

Alvaro Valverde Garnica

SERIE DOCTORAL

Horizontes de la Ingeniería Contemporánea: Innovación, Resiliencia y Desarrollo

EDICIONES
RISEI

Horizontes de la ingeniería contemporánea: innovación, resiliencia y desarrollo

Compilador

Alvaro Valverde Garnica
Universidad de Oviedo
alvaroives@outlook.com

© Ediciones RISEI, 2026

Todos los derechos reservados.

Este libro se distribuye bajo la licencia Creative Commons Atribución CC BY 4.0 Internacional.

Las opiniones expresadas en esta obra son responsabilidad exclusiva de sus autores y no reflejan necesariamente la posición la editorial.

Editorial: *Ediciones RISEI*

Título del libro: Horizontes de la ingeniería contemporánea: innovación, resiliencia y desarrollo

Compilador: Alvaro Valverde Garnica

Edición: Primera edición

Año: 2026

ISBN digital: 978-9942-596-99-4

DOI: <https://doi.org/10.63624/risei.book-978-9942-596-99-4>

Coordinación editorial: Jorge Maza-Córdova y Tomás Fontaines-Ruiz

Corrección de estilo: Unidad de Redacción y Estilo

Diagramación y diseño: Unidad de Diseño

Revisión por pares: Sistema doble ciego de revisión externa

Machala - Ecuador, Marzo de 2026

Este libro fue diagramado en InDesign.

Disponible en: <https://editorial.risei.org/>

Contacto: info@risei.org

PROLOGO

Este prólogo constituye el pórtico de entrada a una obra que sistematiza la vanguardia de la ingeniería contemporánea en Bolivia, estructurada bajo una visión que trasciende lo meramente técnico para posicionarse en el ámbito de la sostenibilidad, la innovación estratégica y la responsabilidad social. A través de veinticinco artículos de alto impacto, el texto despliega un mapa integral de soluciones aplicadas a problemáticas críticas del país, abarcando desde la optimización de procesos industriales hasta la gestión resiliente y la prevención de riesgos en entornos laborales de alta complejidad.

El libro se organiza en cinco ejes que reflejan las tendencias dominantes de la ingeniería moderna y las necesidades específicas del contexto regional. Cada eje reúne investigaciones empíricas, marcos teóricos, propuestas estratégicas y experiencias de campo que aportan tanto al conocimiento académico como a la práctica profesional.

Gestión Estratégica y Optimización de Procesos

En este primer bloque se aborda la competitividad empresarial desde el rigor metodológico y el enfoque sistémico. Se presentan estudios sobre la implementación de Lean Seis Sigma en micro y pequeñas empresas del departamento de La Paz, mostrando casos documentados de mejora en productividad, reducción de tiempos de ciclo y disminución de desperdicios materiales y energéticos. Estas investigaciones incluyen análisis costo-beneficio, indicadores de retorno de inversión y rutas de adopción escalables para empresas con recursos limitados.

Paralelamente, se profundiza en la integración del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) con técnicas de Investigación de Operaciones para la priorización de proyectos de I+D+i industrial, armonizando criterios técnicos, económicos y sociales. El eje incorpora además el diseño y validación de tableros de control (dashboards con KPI's) orientados a la gestión financiera y operativa, con ejemplos de visualizaciones interactivas y métricas clave para la toma de decisiones en contextos de incertidumbre macroeconómica.

Sostenibilidad Operativa y Seguridad y Salud en el Trabajo

Uno de los pilares del libro es la convergencia entre eficiencia operativa y bienestar laboral. Se expone una Estrategia Integrativa para la Sostenibilidad Operativa en el sector de la construcción que articula: gestión de residuos, minimización de la huella ambiental y protocolos de seguridad que, en los casos estudiados, permitieron reducir la tasa de accidentes en aproximadamente 20% y mejorar el cumplimiento normativo. En el ámbito minero se ofrece un análisis crítico de las normas que regulan los trabajos insalubres, proponiendo un replanteamiento conceptual hacia la categoría de “trabajo esforzado” para capturar con mayor precisión las condiciones reales de exposición física y psicosocial del trabajador minero. La propuesta incluye indicadores redefinidos para políticas públicas y recomendaciones técnicas para mitigar riesgos. Este eje culmina con metodologías de ergonomía participativa implementadas en cooperativas mineras, que empoderan a los trabajadores en la identificación de peligros, diseño de soluciones y monitoreo continuo de condiciones laborales.

Bioteología Aplicada e Ingeniería Geotécnica

Ante la elevada vulnerabilidad geológica de áreas urbanas como La Paz y otras ciudades, este bloque explora soluciones sostenibles y de baja huella para la estabilización territorial. Se investigan técnicas bio-ingenieriles como MICP y EICP, así como procesos de biopolimerización para la mejora del comportamiento mecánico del suelo. Estos estudios comparan eficiencia, costos, efectos ambientales y durabilidad frente a soluciones tradicionales basadas en cemento y hormigón. Las aplicaciones prácticas descritas incluyen estabilización de taludes, mitigación de deslizamientos y restauración de cuencas afectadas por erosión, con protocolos de ensayo in situ y criterios de selección para su adopción en políticas urbanas y de ordenamiento territorial. Se discuten además aspectos regulatorios y requerimientos para la certificación técnica de soluciones biotecnológicas en obras civiles.

Innovación Alimentaria y Aprovechamiento de Recursos Andinos

La cuarta sección pone en valor los recursos alimentarios mediante procesos de innovación industrial y tecnológico. Se expone el desarrollo de procesos de extrusión conjunta de quinua y soya para la obtención de análogos cárnicos con alto valor proteico, incluyendo modelado cinético de flujo tipo pistón (PFR) para

garantizar la integridad estructural y la conservación de propiedades nutricionales durante el procesamiento térmico.

Se analiza la viabilidad técnica y económica de la apicultura urbana como motor de desarrollo sostenible en áreas periurbanas, relacionando producción de miel, servicios de polinización y conservación de la biodiversidad local. Completan este eje, estudios analíticos sobre la cuantificación de compuestos bioactivos en la cañahua y otros cereales andinos, con metodologías cromatográficas y espectrométricas que permiten identificar potenciales ingredientes funcionales para la industria nutracéutica y alimentaria.

Transformación Digital, Ciencia de Datos y Energías Renovables

El volumen culmina con la inserción de la ingeniería boliviana en el paradigma Industria 4.0, destacando la convergencia entre digitalización, analítica avanzada y energías limpias. Se documentan aplicaciones de ciencia de datos en minería orientadas a modelar y predecir variables macrosectoriales como el aporte al PIB y la gestión del riesgo asociado a la volatilidad de precios y producción. Estas investigaciones incorporan modelos predictivos, análisis de series temporales y técnicas de aprendizaje automático para la toma de decisiones estratégicas. En el sector energético, se proponen métodos para la optimización de redes eléctricas mediante esquemas de generación distribuida con paneles solares, almacenamiento y control de flujo de potencia, con el objetivo de reducir la huella de carbono y mejorar perfiles de tensión en zonas rurales y periurbanas. Se presentan casos piloto de microrredes híbridas, análisis de impacto social y modelos financieros para su escalamiento. Finalmente, se evalúa la madurez técnica y la transparencia institucional de las entidades de financiamiento orientadas al desarrollo mediante reportes de sostenibilidad alineados con estándares GRI, demostrando que la rendición de cuentas y la sostenibilidad son hoy criterios verificables y estratégicos para la obtención de capital y la confianza pública.

Esta compilación no es solo un conjunto de artículos; es una caja de herramientas para el ingeniero profesional, el gestor público y el investigador académico. Al recorrer sus páginas, el lector encontrará un equilibrio preciso entre fundamentación epistemológica, diseño metodológico riguroso y validación práctica en campo. Cada contribución ofrece guías operativas, estudios de caso y recomendaciones políticas que facilitan la transferencia tecnológica y la adaptación local de soluciones probadas.

El libro aporta además una mirada interdisciplinaria donde los enfoques técnicos se entrelazan con consideraciones económicas, sociales y ambientales, reconociendo que los desafíos estructurales de una nación requieren respuestas integradas. En suma, esta obra es indispensable para comprender cómo la ingeniería aplicada puede transformar problemas históricos y coyunturales en oportunidades de desarrollo sostenible, promoción del emprendimiento tecnológico y fortalecimiento de la soberanía científica y productiva de Bolivia.

Alvaro Valverde Garnica, PhD.
Universidad de Oviedo - España

Contenido

Gestión Estratégica y Optimización de Procesos

Lean six sigma en micro y pequeñas empresas en Bolivia.....13
Anaceli Espada

El proceso analítico jerárquico (AHP) en la conformación de modelos de investigación de operaciones.....39
Carlos Cárdenas Céspedes

Diagnóstico empresarial y de seguridad industrial en la microempresa Textil Shalom de La Paz, Bolivia.....65
Felix Orellana Sánchez

Optimización del control de gestión financiera en microempresas de Bolivia mediante un dashboard con KPI's.....83
Felix Orellana Sánchez

Evaluación de la repetibilidad y la reproducibilidad (R&R) en la colorimetría textil105
Oswaldo Terán Modregon

Sostenibilidad Operativa y Seguridad laboral

El trabajo insalubre en Bolivia: Una falla conceptual que perpetúa la inseguridad en la minería.....127
Ahmed Amusquivar Caballero

Ergonomía participativa como estrategia de prevención de riesgos ergonómicos en cooperativas mineras bolivianas.....143
Orietta Blacutt Yucra

Determinación morfológica del cuerpo humano en estudiantes de ingeniería.....	157
Mónica Lino Humerez	
Estrategia integrativa para mejorar la sostenibilidad operativa en el sector de la construcción.....	177
Adriane Cosio Bellido	
Sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo para mejorar el entorno laboral y la competitividad.....	207
Christian Sandoval Sandoval	

Biotechnología Aplicada e Ingeniería Geotécnica

Uso de microorganismos para la mejora del suelo.....	223
Carla Kaune Sarabia	
Estudio de las características de los agregados de 21 canteras para la elaboración de hormigones en el departamento de La Paz, Bolivia.....	237
Efraín Santalla	
Modelación del crecimiento de macrófitas y su relación con la eutrofización en las lagunas de Achocalla (Bolivia).....	253
Evelin Humerez Espinoza	
La ciencia de datos en la industria minera en Bolivia	273
Scirley Nina Yucra	
Estudio de apreciación sobre la integración de tecnologías avanzadas en la gestión de mantenimiento de activos en la industria cementera.....	293
Nelson Condorena Avila	

Innovación Alimentaria y Aprovechamiento de Recursos Andinos

Extrusión conjunta de quinua y soya: Fundamentos tecnológicos, modelado PFR y su potencial.....	311
Hugo Mobarec Clavijo	

Revisión teórica del método Folin-Ciocalteu en la cuantificación de compuestos fenólicos en cañahua (*Chenopodium pallidicaule*): alcances y proyecciones industriales.....329
Carlos Díaz Mercado

Cuantificación de saponinas en 3 ecotipos de cañahua y 2 muestras de pito de cañahua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen), mediante espectrofotometría UV-visible.....345
Carlos Díaz Mercado

La realidad de la apicultura en la ciudad de La Paz, Bolivia.....359
Franz Zenteno Benítez

Transformación Digital, Ciencia de Datos y Energías Renovables

Evaluación de la madurez técnica y la gestión de la sostenibilidad en los informes GRI de Instituciones Financieras de Desarrollo en Bolivia.....373
Zaida Albino Loroño

Aportes de gases de efecto invernadero en el sector productivo de Bolivia: Oportunidades y desafíos para su reducción.....393
Tania Terán Mita

Optimización de redes eléctricas de distribución primaria mediante generación distribuida.....415
Rómulo Encinas Laguna

Más allá de la voluntad: Cómo la Responsabilidad Social se convierte en cimiento de la ventaja competitiva de YPFB.....433
Ramiro Flores Rodríguez

Aplicación móvil específica para el estudio de accidentes “in-itinere” Caso de Estudio: La Paz, Bolivia.....471
Mario Zenteno Benítez

Modelo de economía circular del agua aplicado a la localidad de Viacha.....491
Jorge Vásquez Peñaranda

RESUMEN DEL LIBRO

Esta obra constituye una síntesis de estudio de la vanguardia en ingeniería contemporánea en Bolivia, presentando 25 artículos que trascienden el rigor técnico para abordar la sostenibilidad, la innovación estratégica y la responsabilidad social. El texto se estructura en cinco ejes fundamentales que responden a las necesidades críticas del contexto regional y las tendencias globales de la disciplina.

En primer lugar, la Gestión Estratégica y Optimización de Procesos se enfoca en la competitividad de las MYPES mediante metodologías como Lean Six Sigma y procesos analíticos jerárquicos (AHP). Seguidamente, el eje de Sostenibilidad Operativa y Seguridad Laboral propone integrar la gestión de residuos con el bienestar del trabajador, planteando reformas conceptuales necesarias en sectores como la construcción y la minería.

La sección de Biotecnología e Ingeniería Geotécnica explora soluciones disruptivas, como el uso de microorganismos para la estabilización de suelos frente a la vulnerabilidad geológica urbana. Por su parte, la Innovación Alimentaria destaca el aprovechamiento de recursos andinos (quinua y cañahua) mediante procesos avanzados de extrusión y análisis bioactivo. Finalmente, la Transformación Digital y Energías Renovables inserta a la ingeniería nacional en la Industria 4.0 a través de la Ciencia de Datos y la generación eléctrica distribuida.

En conclusión, este volumen representa una herramienta esencial para académicos y profesionales, equilibrando la fundamentación epistemológica con la validación práctica. Es un aporte decisivo para transformar desafíos estructurales en oportunidades de soberanía tecnológica y desarrollo sostenible.

Palabras Clave: Sostenibilidad operativa, Optimización de procesos, Innovación tecnológica, Transformación digital, Resiliencia territorial.

CAPÍTULO I

Lean six sigma en micro y pequeñas empresas en Bolivia

Anaceli Espada

Universidad Mayor de San Andrés

<https://orcid.org/0000-0002-2756-0927>

Lean six sigma en micro y pequeñas empresas en Bolivia

Resumen

El presente artículo hace un análisis de 24 empresas como casos de estudio entre micro y pequeñas empresas en la ciudad de La Paz- Bolivia, realizando una comparación de las metodologías empleadas para la implementación de proyectos lean six sigma en micro y pequeñas empresas en países como México, España y Colombia, encontrándose vacíos en común como la existencia de un déficit en liderazgo, cultura de mejora continua y falta del soporte institucional, lo cual condiciona la sostenibilidad de Lean Six Sigma en las micro y pequeñas empresas. En el análisis de las 24 empresas se pudo evidenciar como principales problemas en las micro y pequeñas empresas, niveles de inventarios inadecuados, tiempos de ciclo elevados, existencia de desperdicios, ineficiencia de los procesos, procesos no estandarizados y desorganización de la planta. Tras la implementación de herramientas lean como 5 s, tarjetas Kanban, andón y utilizando una metodología estructurada en 10 pasos con base en el DMAIC, se logró mejorar la productividad, disminuir los niveles de inventario, disminuir los tiempos de ciclo y disminuir la tasa de defectos. Algunos autores sugieren levantar barreras como la falta de compromiso de la alta dirección, la escasez de consultores especializados, la falta de comprensión de Lean Six Sigma en el contexto de Industria 4.0 y la falta de formación en Lean Six Sigma, además se ve la necesidad de disminuir barreras propias de las micro y pequeñas empresas como los elevados costos de implementación de proyectos y la falta de recursos humanos capacitados en las empresas para integrar el lean six sigma con las nuevas tecnologías en las micro y pequeñas empresas, haciendo que lean six sigma maximice las ventajas de la industria 4.0.

Palabras clave: Micro y pequeñas empresas, Lean Six Sigma, herramientas Lean, Metodología, Cultura de mejora continua.

Lean Six Sigma implementation in Bolivian micro and small enterprises

Abstract

This article presents a case study analysis of 24 micro and small enterprises in La Paz, Bolivia. It compares the methodologies used for implementing Lean Six Sigma projects in MSEs in countries such as Mexico, Spain, and Colombia, revealing common shortcomings such as a lack of leadership, a culture of continuous improvement, and insufficient institutional support. These factors hinder the sustainability of Lean Six Sigma in micro and small enterprises. The analysis of the 24 companies highlighted the following main problems in MSEs: inadequate inventory levels, long cycle times, waste, inefficient processes, non-standardized processes, and disorganized plant layouts. Following the implementation of lean tools such as 5S, Kanban boards, and Andon, and using a structured 10-step methodology based on DMAIC, productivity improved, inventory levels decreased, cycle times were reduced, and the defect rate decreased. Some authors suggest addressing barriers such as a lack of commitment from senior management, a shortage of specialized consultants, a lack of understanding of Lean Six Sigma in the context of Industry 4.0, and a lack of Lean Six Sigma training. Furthermore, there is a need to reduce barriers specific to micro and small enterprises, such as the high costs of implementing Lean Six Sigma projects and the lack of trained personnel in Lean Six Sigma within companies. This would allow for the integration of Lean Six Sigma with new technologies in micro and small businesses, enabling Lean Six Sigma to maximize the advantages of Industry 4.0.

Keywords: Micro and small businesses, Lean Six Sigma, Lean tools, Methodology, Continuous improvement, culture.

Aplicação do Lean Six Sigma em micro e pequenas empresas bolivianas

Resumo

Este artigo apresenta um estudo de caso de 24 micro e pequenas empresas em La Paz, Bolívia. Compara as metodologias utilizadas para a implementação de projetos Lean Six Sigma em MPEs em países como México, Espanha e Colômbia, revelando deficiências comuns, como a falta de liderança, de uma cultura de melhoria contínua e de apoio institucional insuficiente. Esses fatores dificultam a sustentabilidade do Lean Six Sigma em micro e pequenas empresas. A análise das 24 empresas destacou os seguintes problemas principais: níveis inadequados de estoque, longos tempos de ciclo, desperdício, processos ineficientes, processos não padronizados e layouts de fábrica desorganizados. Após a implementação de ferramentas Lean, como 5S, quadros Kanban e Andon, e utilizando uma metodologia estruturada de 10 etapas baseada no DMAIC, houve aumento da produtividade, redução dos níveis de estoque, diminuição dos tempos de ciclo e redução da taxa de defeitos. Alguns autores sugerem abordar barreiras como a falta de comprometimento da alta administração, a escassez de consultores especializados, a falta de compreensão do Lean Six Sigma no contexto da Indústria 4.0 e a falta de treinamento em Lean Six Sigma. Além disso, há necessidade de reduzir barreiras específicas para micro e pequenas empresas, como os altos custos de implementação de projetos Lean Six Sigma e a falta de pessoal treinado em Lean Six Sigma dentro das empresas. Isso permitiria a integração do Lean Six Sigma com novas tecnologias em micro e pequenas empresas, possibilitando que o Lean Six Sigma maximize as vantagens da Indústria 4.0.

Palavras chave: Micro e pequenas empresas, Lean Six Sigma, ferramentas Lean, metodologia, cultura de melhoria contínua.

Introducción

En el caso de Bolivia, las microempresas y las pequeñas empresas se han convertido en un motor significativo de la economía, dado que generan empleo y autoempleo, y, por ende, ingresos que permiten a muchas familias subsistir, particularmente en el contexto actual de restricciones económicas que enfrentan dichas familias debido a la alta inflación.

En el ámbito empresarial, se evidencia la necesidad imperante de optimizar la eficiencia y eficacia de las micro y pequeñas empresas. Esta necesidad se puede satisfacer mediante la implementación de proyectos Lean Six Sigma, los cuales se caracterizan por la aplicación de herramientas Lean, el control de defectos y la reducción de la variabilidad de los procesos.

Micro y Pequeñas Empresas

En el caso de la economía boliviana, las empresas se clasifican en función del número de empleados que tienen (Hernández, 2007). De este modo, se establece que una microempresa es aquella que cuenta con entre 1 y 10 empleados, una pequeña empresa la que tiene entre 11 y 20, una mediana empresa la que tiene entre 21 y 49, y una empresa grande la que tiene 50 o más empleados.

De acuerdo con las estadísticas presentadas por Fundaempresa (2021), se evidencia un 87,1 % de microempresas registradas, un 7,6 % de pequeñas empresas y un 4,4 % de medianas empresas. En consecuencia, se evidencia que el 94,7 % de las empresas en Bolivia pertenecen al sector de las MYPES, constituyendo así el segmento predominante en el ámbito empresarial del país. La presente investigación tiene como objetivo analizar la tendencia ascendente en la creación de MYPES (Mipymes) como consecuencia de la falta de oportunidades laborales. Este fenómeno se estudia en el contexto de la generación de empleo y la economía informal.

En el contexto empresarial, las pequeñas y medianas empresas a menudo exhiben una utilización deficiente de sus recursos, lo que se manifiesta en altos costos de producción y disminución de las ganancias. En este sentido, los proyectos destinados a mejorar la productividad se erigen como una estrategia para potenciar los resultados de dichas entidades (Narváez, 2019). En el caso de las MYPES en Bolivia, se evidencia la ausencia de herramientas y/o metodologías de gestión operativa y administrativa que permitan mejorar la productividad y rentabilidad de dichas MYPES.

¿Qué es el lean six sigma?

Tomás et al. (2021) sostienen que las técnicas lean six sigma se originan en Japón y Estados Unidos. La implementación de metodologías de manera independiente confiere a las empresas múltiples beneficios, mientras que la integración de ambas metodologías persigue la erradicación de los desperdicios, la reducción de la variabilidad y la disminución de productos defectuosos. La implementación de herramientas lean para la optimización de los procesos, enmarcada en la metodología DMAIC, resulta en la estandarización de los procesos mejorados y la reducción de la variabilidad.

La metodología DMAIC, originariamente empleada en proyectos Six Sigma, establece la secuencia de fases a seguir en los proyectos con el propósito de minimizar la variabilidad de los procesos. Definir, Medir, Analizar, Incrementar y Controlar.

En el ámbito empresarial, el Lean Six Sigma emerge como una filosofía de trabajo que busca optimizar la productividad de las organizaciones.

En el ámbito empresarial, el Lean Six Sigma emerge como una filosofía de trabajo que busca optimizar la productividad de las organizaciones.

Manufactura Esbelta (Delgada)

De acuerdo con Rajadell y Sánchez (2010), el término lean puede traducirse como «sin grasa, escaso, esbelto». Sin embargo, al ser aplicado a un sistema productivo, significa «ágil, flexible», lo que implica su capacidad de adaptación a las necesidades del cliente. En este sentido, los sistemas lean buscan la eliminación de los desperdicios y de aquellos elementos que no añaden valor a los procesos.

Manufactura esbelta es una estrategia que incluye el pensamiento esbelto basado en la disminución o eliminación de los desperdicios:

- Defectos
- Sobreproducción
- Espera
- Talento no utilizado
- Transporte
- Inventario
- Movimientos innecesarios
- Extra-Procesamiento

Las herramientas que contribuyen con la disminución y eliminación de los desperdicios son: VSM, 5´ s, kanban, poka yoke, SMED, heihunka, kaizen, etc.

En el contexto empresarial boliviano, un número considerable de micro y pequeñas empresas han adoptado herramientas aisladas de lean manufacturing, tales como los 5's, con el propósito de lograr mejoras radicales en lugar de incrementales. Sin embargo, esta estrategia ha demostrado tener limitaciones, ya que el efecto de estas mejoras se manifiesta de manera inmediata tras la implementación y no perdura en el tiempo, lo que impide que las empresas ingresen en un ciclo de mejora continua.

De acuerdo con la investigación realizada por Reyes Aguilar en el año 2002, la metodología en cuestión fue desarrollada por la corporación Motorola durante la década de los años 1980. El ingeniero Bill Smith examinó y documentó que, en caso de que un producto sufriera un fallo durante su fabricación y fuera posteriormente reparado, otros defectos quedaban ocultos y se manifestaban en el momento del uso del producto por parte del cliente, lo que resultaba en quejas y reclamaciones. Por otra parte, si el producto no experimentaba fallos durante su fabricación, tampoco los presentaba en su uso por parte del cliente. El presente estudio tiene como objetivo principal exponer los fundamentos básicos que motivaron el desarrollo de procesos altamente eficaces, capaces de generar productos defectuosos. Para ello, se ha realizado una exhaustiva revisión bibliográfica de los métodos estadísticos desarrollados desde la década de 1920 y otros métodos especiales conformados en una metodología denominada Six Sigma (Six Sigma). A través de esta revisión, se ha podido constatar que la implementación de estos métodos permitió a Motorola obtener reducciones de costes e incrementos significativos en sus utilidades.

Six sigma, por su parte, se fundamenta en la metodología DMAIC (definir, medir, analizar, mejorar y controlar), cuyo propósito es minimizar la variabilidad de los procesos con el fin de optimizar la calidad de los productos:

Definir: Se identifica el proceso que se analizara para proceder con las mejoras, este puede ser el proceso cuello de botella, el proceso que contribuya más con la consecución de los objetivos de la empresa.

Medir: Se toma la línea base de la situación inicial del proceso, tiempos, costos, métodos actuales con los que se trabaja, recursos utilizados, porcentaje de fallas, etc.

Analizar: Se analiza las mejoras que pueden ser dadas en el o los procesos estudiados

Incrementar: Se implementa mejoras en los procesos involucrados, en el caso de proyectos lean six sigma se implementa herramientas lean para la mejora de los procesos.

Controlar: Se realiza una nueva medición de las variables analizadas en la línea base determinada y se compara con los datos de los métricos iniciales para verificar que las herramientas implementadas hayan logrado que los indicadores de rendimiento de los procesos estudiados tengan mejores resultados.

Por tanto, los proyectos lean six sigma, aplican las herramientas lean para las mejoras de los procesos utilizando la metodología del DMAIC del six sigma, con lo que se consigue la eliminación de desperdicios, disminución de la variabilidad de los procesos, disminución de los defectuosos, lo que se refleja en mayor productividad en las empresas.

Hipótesis

Las micro y pequeñas empresas (MYPES) serán más productivas con la implementación de proyectos de Lean Six Sigma.

Objetivos Específicos

- Realizar un análisis de las metodologías utilizadas para la implementación de Lean Six Sigma en micro y pequeñas empresas.
- Análisis de casos de estudio en micro y pequeñas empresas de la ciudad de La Paz que implementaron lean six sigma.
- Análisis de los resultados de la aplicación de lean six sigma en micro y pequeñas empresas.
- Análisis de tendencias de Lean Six Sigma.

Desarrollo

Metodologías de Implementación Lean Six Sigma

Como señalan Felizzola y Amaya (2014), algunos expertos en la materia han propuesto diversos enfoques metodológicos para la implementación de Lean Six Sigma. No obstante, dichos enfoques presentan ciertas deficiencias, tales como la presuposición de la disponibilidad de datos e información confiables, la omisión de la relevancia de los métodos de interacción con el cliente, la falta de consideración del liderazgo y el cambio cultural como factores determinantes, la ausencia de estrategias específicas para superar las limitaciones financieras y estructurales de las pequeñas y medianas empresas (PYMES), y la falta de contemplación de la creación de redes con entidades públicas, organismos multilaterales, gremios, centros de investigación o instituciones académicas, con el propósito de superar los desafíos financieros, técnicos y tecnológicos que conlleva la implementación de LSS.

De acuerdo con Satya (2009), se implementa una metodología estructurada en seis pasos:

- Análisis estratégico
- Identificación y formación de los equipos de mejora
- Identificación de las herramientas de mejora
- Mapeo de la organización de oportunidades de mejora
- Desarrollo de plan detallado
- Implementación documentación y revisión del plan

De acuerdo con el análisis realizado por Kumar (2016), se ha desarrollado un marco lógico para la implementación de Six Sigma en pequeñas y medianas empresas (PYMES). Este marco está compuesto por doce pasos, divididos a su vez en cinco fases. Este marco metodológico proporciona una guía exhaustiva y detallada para la implementación efectiva de la metodología Six Sigma en organizaciones, abarcando desde la fase de preparación hasta la sostenibilidad a largo plazo.

De acuerdo con Gnanaraj (2011), se recomienda la implementación de un modelo de Lean Six Sigma en pequeñas y medianas empresas de ingeniería (PYME), con el propósito de garantizar su efectiva aplicación en este tipo de organizaciones. Este modelo, denominado Superación de Deficiencias Anclaje Lean Definir Medir Analizar Mejorar Controlar Estabilizar (DOLADMACS), constituye una metodología que aborda la mejora continua de los procesos organizativos. El modelo DOLADMAICS ha sido concebido con el propósito de fomentar el crecimiento y la competitividad de una PYME mediante la implementación de metodologías Lean Six Sigma en cinco niveles. Una vez concluido el estudio de implementación, se evidenció que el primer nivel del modelo DOLADMAICS se erige como catalizador y guía para sensibilizar a la gerencia de las PYME, facilitando la implementación efectiva de Lean Six Sigma.

De acuerdo con Barbosa (2013), la metodología se concibió en virtud de las siguientes etapas, las cuales se complementaron a partir de una investigación previa realizada por el autor en PYMES Tamaulipecas.

- Diagnóstico.
- Planeación y proyección.
- Definición Detallada.
- Traducción.
- Análisis.
- Estado futuro.
- Estandarización y sesión.

De acuerdo con Senent, Torices y Gisbert, Soler (2017), se propone una metodología que se articula en las siguientes etapas:

Fase de previa, resolviendo las siguientes interrogantes

¿El dueño de la empresa entiende la finalidad de la implantación de la metodología?

¿El dueño de la empresa asume que la implantación será un proceso costoso económicamente, sacrificará los recursos humanos de la empresa y alterará el día a día de la empresa?

¿La cultura de la empresa y la capacidad de los trabajadores de esta permitirán implantar la metodología?

Fase de definición

¿Qué quieren los clientes?

¿Se puede repetir de manera constante lo que pide el cliente?

¿Cómo se llegar a lo que quiere el cliente de manera eficiente?

Fase de análisis (Parte de Six Sigma)

Se debe seleccionar las herramientas más adecuadas en función de la naturaleza del problema, como: Diagramas de Pareto, gráfico de control, diagrama causa-efecto, ANOVA, regresión lineal, etc. Estas herramientas permiten detectar los errores graves y las variaciones que se dan en el proceso productivo.

Fase de mejora (parte de Lean Manufacturing)

Se debe seleccionar las herramientas más adecuadas en función a los problemas detectados como: 5 S, control visual, TPM, SMED, poka yoke. Estandarización, etc. Aplicando las herramientas se aumentará la eficiencia logrando la eliminación de las actividades que no generan valor a los procesos.

Fase Final

Verificar que se ha mejorado, comparando el antes / el después, sin olvidarse del cliente.

Análisis actual del efecto los proyectos Lean Six Sigma en MYPES

Hoy en día en mayor o menor grado, dependiendo del sector industrial, las empresas de manufactura están siendo presionadas por sus clientes, con requerimientos de rapidez en tiempos de entrega, desarrollo e innovación de nuevos productos, entregas en lotes pequeños más frecuentes y con mayor variedad de productos, precios con tendencia decreciente, cero defectos en calidad y confiabilidad y en ocasiones fabricación a la medida. En algunos casos los requerimientos de los clientes son establecidos por contrato, por lo que la demanda es fluctuante en los periodos.

Las micro y pequeñas empresas (MYPES) no identifican sus desperdicios lo que lleva a que tengan elevados costos ocultos

y en consecuencia baja productividad poniendo en riesgo su continuidad.

De acuerdo con el estudio realizado por Reyes Aguilar (2002), se observaron reducciones significativas en el uso de espacio para la manufactura, con una disminución de más del 50 % en el espacio utilizado en el sistema tradicional de manufactura en comparación con el sistema de manufactura delgada. Asimismo, se evidenció una reducción de hasta el 30 % en los costos de inventario, así como una disminución del 50 % en el tiempo de entrega de los productos desde el momento de la solicitud hasta la entrega final del producto. Además, se observó una reducción del 50 % en el tiempo de ciclo de manufactura, una disminución del 100 % en el tiempo de preparación para el cambio de modelo, una reducción del 30 % en el costo del producto, una disminución del 50 % en el costo de las herramientas para un nuevo producto y una reducción del 50 % en la tasa de defectos.

De acuerdo con Satya S. Chakravorty (2009), el método Lean Six Sigma tiene el potencial de generar beneficios en organizaciones de cualquier dimensión. Sin embargo, se observa que estos beneficios se manifiestan con mayor intensidad en las grandes empresas en comparación con las pequeñas y medianas empresas (PYMES). Esta situación se atribuye principalmente a factores tales como la ausencia de compromiso por parte de la dirección; la limitación de recursos financieros y de personal; la resistencia al cambio; la carencia de una cultura de mejora continua; la falta de liderazgo; la falta de reconocimiento de la importancia de la metodología; la falta de medición del desempeño de los procesos, entre otros.

Análisis comparativo entre las metodologías presentadas

- En el ámbito de la evaluación metodológica, se evidencia una transición desde modelos predominantemente técnicos, como los propuestos por Chakravorty y Barbosa, hacia modelos que incorporan una perspectiva integradora y cultural, representados por Senent y Gisbert.
- En el ámbito de las pequeñas y medianas empresas, se evidencia la necesidad de ajustar las metodologías de trabajo. En este sentido, los modelos más recientes, como los propuestos por Gnanari y Senent, abordan la importancia de la adaptabilidad, la sensibilidad y la gradualidad en la implementación de dichos modelos.
- En el ámbito de las pequeñas y medianas empresas, se observan deficiencias recurrentes en aspectos tales como liderazgo, cultura de mejora continua y soporte institucional externo. Estas deficiencias repercuten en la sostenibilidad de las prácticas de gestión lean six sigma.

Análisis local sobre la implementación de Lean Six Sigma

En el caso de Bolivia, diversas empresas han adoptado la metodología Lean Six Sigma para optimizar sus procesos y mejorar la eficiencia operativa (Fernández, 2023). Como se ha puesto de manifiesto en investigaciones previas, un número considerable de empresas que han implementado con éxito el método Lean Six Sigma incluyen al Grupo Nacional Vida de Seguros, Conecta, Industrias Venado, el Hotel Cortez, Multicentro Bolivia, Constructora Área Bolivia, Fabrica Famosa, Ingenio Aguai y Fabrica Kimberly Clark Bolivia.

Estas empresas evidencian una situación en el departamento de Santa Cruz, ejemplificando cómo la implementación de Lean Six Sigma en Bolivia ha contribuido a la mejora continua y a la competitividad en diversos sectores industriales.(Walter Justiniano Claire, 2021)

Como se ha puesto de manifiesto en investigaciones previas, algunas empresas de la ciudad de La Paz han implementado el modelo de gestión Six Sigma, como son los casos de ENTEL S.A., La Cervecería Boliviana Nacional y EMBOL, entre otras. No obstante, los resultados obtenidos en las mencionadas empresas se han dado en el momento de la implementación, pero no se ha conseguido establecer una cultura de mejora continua (Fernández, 2020; López et al., 2021). En lo que respecta al ámbito de las micro y pequeñas empresas (MYPES), se evidencia una limitada progresión en lo que concierne a la implementación de proyectos lean six sigma. Estos proyectos requieren una inversión significativa, y las micro y pequeñas empresas enfrentan restricciones presupuestarias, lo que limita su capacidad para participar en este tipo de iniciativas.

Con el respaldo de proyectos de formación universitaria, tanto de grado como de posgrado, algunas micro, pequeñas y medianas empresas han logrado implementar herramientas de lean manufacturing, siendo las más utilizadas las denominadas 5's, Kanban y Andon, entre otras.

Para realizar un análisis de la implementación de proyectos LEAN Six Sigma en micro y pequeñas empresas en la ciudad de La Paz, se ha llevado a cabo un estudio exhaustivo de 24 empresas de diversos sectores. Las empresas seleccionadas para el estudio fueron elegidas meticulosamente en función de su accesibilidad para implementar proyectos LEAN Six Sigma. Esto se determinó mediante la evaluación de diversos criterios, como la disponibilidad de información relevante, la facilitación de acceso a las instalaciones, la interacción con el personal y la capacidad de implementar mejoras. Las empresas seleccionadas pertenecen a la categoría de micro y pequeñas empresas

(MYPES) y abarcan diversos sectores económicos, lo que permite una representación amplia y diversa de este grupo empresarial.

Para la implementación de proyectos lean six sigma en las 24 empresas estudiadas, se ha seguido un enfoque metodológico estructurado, basado en el DMIC y tomando en cuenta las etapas previas para la conformación del equipo de proyecto.

Etapas de conformación del equipo externo a la empresa.- El equipo debe estar conformado por 3 o 4 estudiantes.

Capacitación del equipo de trabajo externo.- El equipo debe conocer la metodología de implementación de los proyectos Lean Six Sigma (DMAIC), herramientas Lean y su implementación, medición de métricas.

Etapas de convencimiento a la alta gerencia para contar con el apoyo y compromiso.- presentación del proyecto a la alta dirección de la empresa.

Identificación del problema (Definir).- Con la utilización de herramientas como Ishikawa y Pareto se identifica el problema.

Definición de objetivos (Definir).- En función del problema identificado se plantea los objetivos generales y específicos con el fin de que se de solución al problema identificado.

Medición de la línea base (Medir).- Se construye el VSM del proceso analizado, identificando las actividades que no generan valor al proceso.

Identificación de métricas (Análisis).- Se determina el métrico primario, mismo que debe responder al objetivo general, además los métricos críticos, que están en relación con las variables que se ven afectadas como consecuencia del avance con el métrico primario.

Implementación de herramientas Lean (Incrementar).- Aplicación de herramientas como 5 S, Kanban, SMED, Poka Yoke, Kaizen, etc.

Medición de resultados mediante la medición de las métricas (Controlar).- Se hace la medición de las métricas luego de haber implementado mejoras en los procesos analizados.

Presentación y capacitación del proyecto.- Se hace la capacitación para dar a conocer las nuevas formas de realizar los procesos con el fin de proceder con la estandarización y conseguir la mejora continua.

Resultados en la implementación de Lean Six Sigma en micro y pequeñas empresas

En la Tabla 1.1 se puede observar un resumen de los problemas identificados, las causas que afectan al problema y los objetivos planteados en las 24 empresas estudiadas.

Tabla 1.1. Problemas Identificados, Causas y Objetivos de los proyectos Lean Six Sigma en MYPES de la ciudad de La Paz Bolivia

N°	Empresa	Rubro	Problema	Causas 80%	Objetivo
1	Sabia herbolarita	Cosmeticos	Excesivos tiempos en transporte de materia prima e insumos	Excesivo transporte, desorde en el manejo de registros	Disminuir la generación de desperdicios por movimientos
2	El granjero	Alimentos balanceados	Metodos de trabajo ineficientes	Metodos de trabajo, entorno de trabajo desorganizado, distribución de trabajadores, estandarización	Implementar herramientas lean
3	La cordobesa	Gastronomia	Gestión inadecuada de inventarios		Mejora de la gestión de inventarios
4	Majota	Jugos	Ineficiencia en el proceso de etiquetado y envasado manual de mermelada debido a los altos niveles de despercio y tiempos excesivos	Falta de estandarización en el envasado y etiquetado, alta rotación de personal, dependencia manual en el proceso de distribución	Reducir la ineficiencia en el proceso de envasado y etiquetado de la mermelada
5	La casa del cambia	Gastronomia	Gestión ineficiente del almacen	Manejo empirico de datos de inventario, funciones con planificación inadecuada, escasez de personal para limpieza y organización, falta de capacitación, sistema de registro manual, falta de protocolo para el manejo de residuos	Implementar herramientas para mejorar la eficiencia en el manejo del almacen

6	Ladrillera siles	Ceramica	Elevados tiempos de preparación	Altos tiempos de preparación de la maquinaria, espacios de trabajo no adecuados, falta de mantenimiento programado, variabilidad en la materia prima, producción sin seguimiento adecuado	Implementar herramientas lean manufacturing para reducir los tiempos altos de producción y preparación
7	Atexbol	Confeccion de ropa	Desperdicio de material en batas de baño	Falta de control, mala coordinación con los proveedores	Optimizar el proceso de diseño y gestión de recursos en el uso de tela, implementando herramientas lean
8	Valeria angelo designer	Confeccion de ropa a medida	Tiempos de atención largos	Poca información para el pedido, uso ineficiente de catálogo digital, selección de modelos de manera presencial	Reducir los tiempos de entrega de prendas de vestir
9	Chocolates y dulces condor	Alimentos	Excesiva cantidad de desperdicios	Falta de organización y orden en el proceso productivo, falta de control de operaciones de la máquina de insuflado	Reducir la cantidad de desperdicios en la línea de producción de risoffiato de la empresa de chocolates y dulces condor
10	La casera	Alimentos	Demora en la recepción de pedidos	Falta de estandarización en la recepción de pedidos, falta de capacitación en la preparación de cafés	Incorporar herramientas y metodologías de lean manufacturing en la empresa repostería "la casera"

Nota: Extraído de 24 proyectos Lean Six Sigma en micro y pequeñas empresas de La Paz

Tabla 1.1. Problemas Identificados, Causas y Objetivos de los proyectos Lean Six Sigma en MYPES de la ciudad de La Paz Bolivia

N°	empresa	rubro	problema	causas 80%	objetivo
11	Scobol	exportación de café	incumplimiento en tiempos para pedidos	mala organización en el área de embolsado, mala organización de tiempo, desorden en inventarios	aumentar la eficiencia del sistema de producción
12	Swett fit	alimentos	falta de estandarización de los procesos	alta rotación de personal, desconocimiento del uso de maquinaria, desconocimiento de las recetas	estandarizar los procesos de los productos de la empresa sweet fit
13	Mamani cochi asociados	comercialización de productos plásticos	ineficiencia en el control de inventarios y organización de la planta	gestión ineficiente de inventarios, diseño del layout inadecuado	mejorar la gestión de inventarios
14	Chomateo	café ecológico	deficiencia en el flujo de información de los pedidos	gestión ineficiente de inventarios, desorganización en el área de trabajo	optimizar la comunicación entre la cafetería y el área de producción de café
15	Mamina srl	alimentos	baja productividad, exceso de desperdicios, estandarización	falta de pedidos, desperdicio de materia prima, sobre producción, sobre stocks	optimizar los procesos de producción implementando manufactura esbelta
16	El pan casero	alimentos	tiempos altos de productos	tiempos altos en el repulgado; falta de estandarización en el colocado de queso; flujo de información incierta	implementar las herramientas del lean manufacturing para reducir los tiempos altos de producción que tiene el área de empanadas de la empresa "el pan casero"

17	Bebali	helados y lacteos	desorganización en la planta	desorden en la planta, no existe señaletica, retraso en la entrega de pedidos	aplicación de herramientas lean para mejorar la organización de la empresa
18	Maybo	bebidas	costo extra por desperdicios en el proceso de producción	falta de estandarización de las medidas del proceso; mal mantenimiento de maquinas; mal control de inventarios	reducir desperdicios aplicando herramientas lean manufacturing
19	Colchones ortopedicos natur	muebleria	exceso de inventario de productos terminados	no existe registro de inventarios, mala planificación de la producción; no existe información del comportamiento de la demanda	disminuir los inventarios de productos terminados aplicando herramientas lean

Nota: Extraído de 24 proyectos Lean Six Sigma en micro y pequeñas empresas de La Paz

Tabla 11. Problemas Identificados, Causas y Objetivos de los proyectos Lean Six Sigma en MYPES de la ciudad de La Paz Bolivia

N°	empresa	rubro	problema	causas 80%	objetivo
20	Alvelza	alimentos	ineficiencia en el proceso de almacenes de materia prima y el proceso de sellado de bolsas que impactan	mala coordinación entre personal de descarga y el jefe de almacenes; desconocimiento de las ubicaciones exactas de los productos dentro del almacén, alineación incorrecta de la selladora que genera defectos en el sellado	mejorar la eficiencia y calidad del flujo productivo en la industria lavelza

21	Alpha y omega	alimentos	ineficiencia en la gestión del proceso productivo	estandarización del preparado nula; falta de comunicación y coordinación; maquinaria no calibrada; falta de mantenimiento de maquinaria	optimizar el proceso productivo de salsa soya mediante la implementación de herramientas de manufactura esbelta
22	Cafetto miel	alimentos	mala gestión de inventarios para los insumos	ausencia de registro de materia prima e insumos	mejora en la gestión operativa y organizativa del restaurante
23	Licores artesanales illimani	bebidas	deficiencia en la organización de inventarios y desconocimiento de utilidades	poco orden en los inventarios, poco orden de los registros terminados, desconocimiento del uso de los materiales	implementar las herramientas del lean manufacturing
24	Chocolates ruah	alimentos	alto numero de productos defectuosos	sobre templado en el chocolate, mal manejo del producto final, variabilidad en la capacidad de la maquinaria	aplicar estrategias basadas en lean manufacturing

Nota: Extraído de 24 proyectos Lean Six Sigma en micro y pequeñas empresas de La Paz

De acuerdo al detalle de los problemas identificados en las empresas y mostrados en la Tabla 1.1, se realizó una clasificación de problemas, identificándose 6 categorías de problemas como se puede observar en la Tabla 1.2, donde se tiene que el 25% de las empresas analizadas tienen problemas con el elevado inventario y la mala gestión de los mismos, el 25% de las empresas tiene problemas por tener un tiempo de ciclo elevado, el 20.83% de las empresas tienen problemas por tener desperdicios (actividades sin valor agregado), el 20.83% problemas por ineficiencia en los procesos y 4.17% por desorganización de las áreas y falta de estandarización de procesos.

Tabla 1.2. Problemas identificados en los procesos de producción de empresas de la ciudad de La Paz

Clasificación del problema	Tipo de problemática	Cantidad de -empresas	%
3	Inventarios elevados y/o mala gestión de inventarios	6	25,00
1	Tiempos de ciclo elevados	6	25,00
4	Desperdicios (Actividades sin valor agregado)	5	20,83
2	Ineficiencia en los procesos	5	20,83
6	Desorganización de la planta	1	4,17
5	Falta de estandarización de procesos	1	4,17
	Total	24	100,00

Nota: Elaborado con base en proyectos Lean Six Sigma en empresas micro y pequeñas, realizados por estudiantes de pregrado de la carrera de Ingeniería Industrial de la UMSA

De acuerdo con los problemas identificados en las empresas en análisis, cada equipo de trabajo ha visto la implementación de herramientas lean para disminuir los problemas o eliminarlos, consiguiendo mejorar los métricos identificados. En la Tabla 1.3 se muestra el detalle de las herramientas implementadas los métricos definidos y los resultados obtenidos.

Tabla 1.3. Resultados de la Implementación de Lean Six Sigma en micro y pequeñas empresas de La Paz Bolivia

N°	empresa	herramientas de mejora	métrico primario	métrico crítico	resultados
1	Sabia herbolarita	kanban, andon, poka yoke	lead time = 259,04 min; lead time 218,94 min	distancia =10,038 metros/insu- mo; distancia =2,53 metros/ insumo	
2	El granjero	5s, tpm, andon			

3	La cordobesa	5's, vsm, kaizen, justo a tiempo	productividad de mano de obra, productividad de materiales, productividad de servicios, igp		
4	Majota	5's	tasa de defectos en el envasado % = n° de unidades defectuosas/ n° de unidades envasadas inicial 0,09, final 0,04	productividad= n° de unidades envasadas/total trabajado; inicial 22,67, final 28,33, incremento 25%	metrico primario 60%; metrico critico 25%
5	La casa del camba	5's, poka yoke,	costo de transporte =costo de gasolina +costo de pasajes; inicial 170 bs/semana final 140	tiempo encargado, inicial 11 hrs/día, final 9,5 hrs/dia	
6	Ladrillera siles	5's, andon, tpm	incremento en la eficiencia de 78 al 91%		incremento en la eficiencia de 78 al 91%
7	Atexbol	tarjetas kanban, 5s,	tak time= 256 s/unidad; lead time = 230400 s		mejora cualitativa 5s
8	Valeria angelo designer	5's, tarjetas kanban, andon	aplicación de 5s, de 25 % a 85%		mejora de 60% en la aplicación de las 5's
9	Chocolates y dulces condor	5's, andon	% de productos defectuosos =12,15 %;	cu=4,84 bs.; Sobre carga =0,808; tiempo de ciclo = 0,0286; productividad =20,256	% de defectuosos =7,48, cu = 4,54; sobre carga = 0,86; tiempo de ciclo=0,026; indice de productividad = 27,21

10	La casera	5 s, andon, kanban	tiempo promedio de registro inicial 13,53; final 12,88	tasa de errores inicial 12%, final 10%	tiempo promedio de registro= 5,68 min/cliente, tasa de errores = 3%
11	Scobol	5's, kanban, andon,	tiempo de embolsado para 14 toneladas =10 hrs	tasa de productividad = 56 bolsas/hora; sacos reprocesados=3%	tiempo de embolsado = 8 hrs; tasa de productividad= 72bolsas embolsadas/hrs; sacos reprocesados 1%
12	Swett fit	5's, andon, poka yoke,			se reduce la variabilidad de los tiempos de los procesos de 4 productos a 10 %

Nota: Elaborado con base a proyectos Lean Six sigma implementados por estudiantes de la carrera de ingeniería industrial de la UMSA

Tabla 1.3. Resultados de la Implementación de Lean Six Sigma en micro y pequeñas empresas de La Paz Bolivia

N°	empresa	herramientas de mejora	metrico primario	metrico crítico	resultados
13	Mamani cochi asociados	5's, lay aut	cantidad de defectuosos, disminución de inventarios		mejora en 5's 20%
14	Chomateo	5's, tarjetas kanban	reducción de desperdicios rn 1% = 949,41 bs; disminución del tiempo improductivo en 900 min/mes = 150 bs; mejora de inventarios en 30 kg; reducción de la sobreproducción =5kg/mes = 700 bs		productividad inicial =0,07488; final = 0,1457

15	Mamina srl	5's, poka yoke, kaizen	productividad mp = 8,81	indice de desperdicio de la harina= 11,11%; nivel de inventarios en stock=28,74	productividad materia prima =10,4; desperdicio de harina=3%
16	El pan casero	5s, andon, kanban,	tiempo de ciclo de la producción de =0,15 min/ empanada	costo horas extras=1 hrs/ operario	tiempo de ciclo =0,1 min/empanada; tiempo ocioso= 0 hrs
17	Bebali	5's, andon	cantidad de utensilios o herramientas, carga de trabajo en el área de dotación de materiales,	tiempo de almacenamiento de productos hasta su entrega, cantidad de tareas en el proceso productivo	cantidad de defectuosos, disminución de inventarios
18	Maybo	5's, andon, inventory log	lead time =33 dias;	tasa de defectos= 11.33%; Tasa de cumplimiento= 80%	reducción de lead time de 33 a 28 días; disminución de defectos del 11.33 Al 6 %, incremento en la tasa de cumplimiento del 80% al 90%; mejora en eficiencia operativa
19	Colchones ortopedicos natur	5's, andon, vsm, kanban	tasa de sobreproducción=33,33%	razon de inventarios= 0,43	tasa de sobreproducción = 17%; razon de inventarios=0,758
20	Alvelza	5's, poka yoke, andon, kanban,	productividad materia prima		productividad materia prima=2,18

21	Alpha y omega	5´ s; justo a tiempo; smed;	takt time 2, 19 min/ unidad	reducción de la tasa de defectos = 4%	reducción de los tiempos de espera= 25%; takt time = 1,82; tasa de defectos =4%
22	Cafetto miel	5´ s, kanban, andon			1874 bs/año
23	Licores artesanales illimani	5´ s,			mejoras debido a las 5´ s
24	Chocolates ruah	5´ s, andon, kanban	tasa de defectuosos = 1,67%	tiempo de ciclo por lote = 50 seg	tasa de defectuosos= 0,21%, tiempo de ciclo por lote = 11 seg

Nota: Elaborado con base a proyectos Lean Six sigma implementados por estudiantes de la carrera de ingeniería industrial de la UMSA

Con la implementación de Lean Six Sigma, aplicando herramientas lean en los procesos productivos como 5´ s, tarjetas kanban, andon, poka yoke, etc., bajo la metodología de los 10 pasos utilizada se logró medir la mejora de 20 empresas analizadas, teniendo mayor productividad, disminución de los tiempos de ciclo, disminución de la tasa de defectos, disminución los inventarios. Lo que no se logro es conseguir una cultura de mejora continua ni que las mejoras se mantengan en el tiempo.

Tendencias del Lean Six Sigma.

Las nuevas tendencias de la micro y pequeñas empresas en Bolivia marca desafíos muchos más grandes con la transformación digital y la industria 4.0, evidentemente saltar a la automatización de los procesos será un camino que se debe comenzar a trabajar para lograr mejorar la calidad de los procesos de la industria, además considerar los desafíos presupuestarios y de formación del recurso humano que hoy deben ser resueltos.

De acuerdo con Priyanshu et al. (2022), con el propósito de perdurar en mercados altamente competitivos, las industrias se enfocan en optimizar la calidad del producto y la satisfacción del cliente. Una variante específica de este enfoque se centra en la optimización de los procesos productivos con el objetivo de

mejorar la calidad del producto y minimizar el desperdicio. Este fenómeno ha motivado a las organizaciones a adoptar prácticas de gestión como Lean Six Sigma (LSS) y Kaizen, junto con la implementación de tecnologías digitales para la automatización de procesos. Por consiguiente, resulta imperativo integrar las prácticas Lean Six Sigma con las tecnologías de la Industria 4.0 en el ámbito de las pequeñas y medianas empresas (pymes). Este enfoque proporciona una base sólida para maximizar las ventajas de la Industria 4.0 y lograr una excelencia operativa.

Para mitigar el riesgo de un desenlace desfavorable en el proceso de integración de LSS e Industria 4.0, los investigadores identificaron un conjunto de 15 barreras. Entre las barreras identificadas como prioritarias para la integración de LSS y la industria 4.0, se destacan: la falta de compromiso por parte de la alta dirección, la carencia de consultores especializados, la limitada comprensión de LSS en el contexto de Industria 4.0 y la ausencia de formación en LSS.

En el ámbito de las micro y pequeñas empresas en Bolivia, es imperativo abordar las barreras identificadas y resolver las barreras inherentes al sector. Estas incluyen los elevados costes de los proyectos, la implementación de métodos de mejora continua como el lean six sigma, la falta de acceso a recursos humanos calificados por parte de las empresas, y la resistencia al cambio por parte de los trabajadores.

Conclusiones

En el ámbito de la gestión empresarial, se ha identificado la presencia de deficiencias recurrentes que se manifiestan como brechas en diversos aspectos críticos. Estas deficiencias, que incluyen aspectos como liderazgo, cultura de mejora continua y soporte institucional externo, actúan como factores condicionantes en la sostenibilidad de la implementación de proyectos de Lean Six Sigma en el contexto de las micro y pequeñas empresas. Esta conclusión se ha llegado tras una exhaustiva revisión bibliográfica y un análisis local detallado.

Una vez realizado el análisis de casos de estudio de 24 microempresas y pequeñas empresas de la ciudad de La Paz, se implementó el método Lean Six Sigma. Para ello, se siguieron las siguientes etapas para los proyectos: 1) etapa de constitución del equipo externo a la empresa; 2) capacitación del equipo de trabajo externo; 3) etapa de persuasión a la alta dirección para contar con el apoyo y compromiso; 4) identificación del

problema; 5) definición de objetivos; 6) medición de la línea base; 7) identificación de métricas; 8) implementación de herramientas Lean; 9) medición de resultados, mediante la medición de las métricas; 10) presentación y capacitación del proyecto.

Se ha identificado que los principales problemas de la organización se relacionan con el nivel y la gestión de los inventarios, los tiempos de ciclo elevados, la existencia de desperdicios, la ineficiencia de los procesos, la desorganización de las plantas y la falta de estandarización de los procesos.

Los hallazgos de la implementación de Lean Six Sigma revelan una mejora en la productividad de las micro y pequeñas empresas examinadas, como lo demuestran métricas como el incremento de la productividad, la reducción de los tiempos de ciclo, la disminución de las tasas de defectos y la reducción de los niveles de inventario, entre otros indicadores clave.

El procedimiento metodológico implementado, fundamentado en una serie de diez pasos sistemáticos, posibilitó la obtención de resultados que evidencian mejoras en la productividad de las MYPES objeto de análisis. Sin embargo, se identifican ciertos desafíos pendientes, tales como la búsqueda de sostenibilidad de los proyectos a través de la consolidación de una cultura de mejora continua, la participación activa del liderazgo en el proyecto y el respaldo por parte de la organización.

Se postula que la implementación de proyectos Lean Six Sigma en micro y pequeñas empresas resulta en un incremento en su productividad.

Referencias

- Barbosa, E. A. (2013). *Propuesta de metodología Lean Six Sigma en empresas PyME*. <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/id-tecnologico/article/download/85/html?inline=1>
- Felizzola, J., & Amaya, C. L. (2014). Lean Six Sigma en pequeñas y medianas empresas: un enfoque metodológico Lean Six Sigma in small and medium enterprises: a methodological approach. *In Revista chilena de ingeniería* (Vol. 22, Issue 2). <https://www.scielo.cl/pdf/ingeniare/v22n2/art12.pdf>
- Fundaempresa. (2021). *Estadísticas del Registro de Comercio*. <https://n9.cl/t05n1>
- Gnanaraj, D. M. & S. (2011). *Sensitisation of SMEs towards the implementation of Lean Six Sigma – an initialisation in a cylinder frames manufacturing Indian SME*. <https://doi.org/DOI:10.1080/09537287.2011.572091>

- Kumar, A. & T. (2016). *Implementation of continuous improvement based on Lean Six Sigma in small- and medium-sized enterprises*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/14783363.2014.980140>
- Narvaez, G. (2019). *Aplicación de un modelo de mejoramiento de la productividad basado en lean six sigma a la empresa d' max sport*. <https://red.uao.edu.co/server/api/core/bitstreams/6eeb109e-88c5-41a5-98ad-af1792e2bffb/content>
- Priyanshu, K. S., Maheswaran, R., & Virmani, N. (2022). *Prioritizing the Solutions to Overcome Lean Six Sigma 4.0 Challenges in SMEs: A Contemporary Research Framework to Enhance Business Operations*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su15043371>
- Hernández, R. (2007). *Las MIPYMES en Latinoamérica*. <https://www.eumed.net/libros-gratis/2007b/274/274.pdf>
- Rajadell, Manel., & Sánchez, J. Luis. (2010). *Lean manufacturing : la evidencia de una necesidad*. Ediciones Díaz de Santos. <https://www.editdiazdesantos.com/wwwdat/pdf/9788479789671.pdf>
- Reyes Aguilar, P. (2002). *Manufactura Delgada (Lean) y Six Sigma en empresas mexicanas: experiencias y reflexiones*. núm. 205, 51-69. <https://www.redalyc.org/pdf/395/39520506.pdf>
- Satya S. Chakravorty. (2009). *Six Sigma programs: An implementation model*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.01.003Getrightsandcontent>
- Senent Torices, F. J., & Gisbert Soler, V. (2017). *Hacer bien las cosas cuando se necesitan, sin prisas, pero sin pausas, una versión española del Lean Six Sigma*. *3C Empresa: Investigación y Pensamiento Crítico*, 6(1), 54-62. <https://doi.org/10.17993/3cemp.2017.060129.54-62>
- Tomás, J., Villegas, G., & Marmol, A. L. (2021). *Volumen 13-Número 2 abril-junio 2021 Modelo de aplicación de la metodología lean-six sigma para optimización del sistema productivo de molduras en una empresa del estado de Chihuahua*. <https://n9.cl/knwg4>
- Walter Justiniano Claire. (2021). *¿Quiere eficiencia en su empresa?* *Publico.Bo*. <https://publico.bo>

CAPÍTULO II

El proceso analítico jerárquico (AHP) en la conformación de modelos de investigación de operaciones

Carlos Cárdenas Céspedes

Universidad Mayor de San Andrés

<https://orcid.org/0009-0008-9823-9517>

El proceso analítico jerárquico (AHP) en la conformación de modelos de investigación de operaciones

Resumen

Este artículo explora la aplicación del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) como un enfoque metodológico robusto para la conformación de modelos de Investigación de Operaciones (IO) destinados a la elaboración de proyectos de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) en el sector industrial. Se argumenta que la capacidad del AHP para modelar las interdependencias y la retroalimentación entre diversos factores críticos lo convierte en una valiosa herramienta para abordar la complejidad inherente a la planificación y priorización de iniciativas de I+D+i. Se discute cómo la integración del AHP con técnicas de IO puede optimizar la toma de decisiones en las etapas iniciales, especialmente en la determinación de los coeficientes de la función objetivo del modelo de Programación Lineal (PL) durante la formulación de proyectos.

Palabras clave: Proceso Analítico Jerárquico (AHP), Investigación de Operaciones (IO), Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i), Modelado de Decisiones, Multicriterio, Optimización, Sector Industrial.

The analytical hierarchy process (AHP) in the development of operations research models

Abstract

This article explores the application of the Analytic Hierarchy Process (AHP) as a robust methodological approach for the development of Operations Research (OR) models for the development of Research, Development, and Innovation (R&D&I) projects in the industrial sector. It is argued that the ability of the Analytic Hierarchy Process (AHP) to model the interdependencies and feedbacks between various critical factors makes it a valuable

tool for addressing the complexity inherent in planning and prioritizing (R&D&I) initiatives. It is discussed how the integration of AHP with OR techniques can optimize decision-making at the early stages, especially in the design of the linear programming model in the project formulation process.

Keywords: Analytic Hierarchy Process (AHP), Operations Research (OR), Research, Development and Innovation (R&D&I), Decision Modeling, Multi-criteria, Optimization Industrial Sector.

O processo de hierarquia analítica (AHP) no desenvolvimento de modelos de pesquisa operacional

Resumo

Este artigo explora a aplicação do Processo de Hierarquia Analítica (AHP) como uma abordagem metodológica robusta para o desenvolvimento de modelos de Pesquisa Operacional (PO) para o desenvolvimento de projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (P&D&I) no setor industrial. Argumenta-se que a capacidade do Processo de Hierarquia Analítica (AHP) de modelar interdependências e feedbacks entre vários fatores críticos o torna uma ferramenta valiosa para abordar a complexidade inerente ao planejamento e à priorização de iniciativas de P&D&I. Discutimos como a integração do AHP com técnicas de OR pode otimizar a tomada de decisões nos estágios iniciais, especialmente no design do modelo de programação linear no processo de formulação do projeto.

Palavras chave: Processo de Hierarquia Analítica (AHP), Pesquisa Operacional (PO), Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (P&D&I), Modelagem de Decisão, Otimização, multicritério, Setor Industrial.

Introducción

En el contexto de la complejidad inherente a los sistemas productivos contemporáneos, la conceptualización y desarrollo de proyectos de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) emerge como un factor determinante para la competitividad organizacional y la aceleración del progreso tecnológico sectorial que implica resolver una serie de factores, desde la tecnología hasta el mercado, pasando por los recursos disponibles (Tidd & Bessant, 2018), así como factores característicos del mercado boliviano. Para buscar una ayuda valadera en esta labor, la Investigación de Operaciones (IO) nos ofrece una multiplicidad de herramientas muy útiles para optimizar decisiones y planificar de manera más inteligente (Hillier & Lieberman, 2010).

La gestión y priorización de proyectos de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) representan un desafío significativo para organizaciones de diversos sectores, desde los emprendedores hasta los grandes productores. La complejidad inherente a estos proyectos, caracterizada por múltiples criterios, incertidumbre y la necesidad de alinear las iniciativas con los objetivos estratégicos, demanda metodologías muy bien estructuradas y transparentes para la toma de decisiones. En este contexto, el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), desarrollado por Thomas L. Saaty, emerge como un recurso metodológicamente sólido para estructurar problemas de decisión complejos, permitiendo la ponderación de criterios y la evaluación comparativa de alternativas.

Desde esta perspectiva, la presente investigación busca explorar cómo el AHP, un instrumento científicamente validado, puede estructurar modelos de IO más completos y realistas en la formulación de proyectos de I+D+i, pensando especialmente en el contexto industrial que corresponde a La Paz y El Alto, Bolivia, donde tenemos nuestros propios ritmos y desafíos, la aplicabilidad práctica de esta herramienta que nos ayuda a priorizar proyectos de innovación con un mejor criterio y a utilizar nuestros recursos de manera eficiente es fundamental. Por ejemplo, podríamos pensar en cómo decidir en qué sectores enfocar nuestros esfuerzos de investigación o qué tecnologías nuevas adoptar para mejorar la producción local.

La relevancia del AHP (Analytical Hierarchy Process) en la evaluación y selección de proyectos de I+D+i (Investigación, Desarrollo e innovación) ha sido ampliamente documentada en la literatura científica internacional (Saaty, 2008). Este autor estableció los fundamentos teóricos del método en su obra fundamental, demostrando cómo las decisiones complejas pueden descomponerse jerárquicamente para facilitar comparaciones

pareadas sistemáticas. Estudios posteriores han validado su aplicabilidad en contextos de innovación tecnológica (Liberatore, 1987). Este autor fue pionero en aplicar AHP para la selección de proyectos de I+D en entornos corporativos, identificando que el método mejora significativamente la consistencia en las decisiones de asignación de recursos. En un estudio reciente (Vidal, 2011), se llevó a cabo un análisis exhaustivo de 174 publicaciones sobre selección de proyectos, concluyéndose que el Análisis de Hierarquías de Prioridades (AHP) representa uno de los métodos multicriterio más utilizados y validados empíricamente en la gestión de portafolios de I+D+i.

No obstante, la investigación contemporánea demanda ir más allá de la mera priorización. En este sentido, los modelos híbridos que combinan la toma de decisiones multicriterio (MCDM) con la optimización (IO) han experimentado un notable impulso en la última década (Ghasemi, 2020). En este sentido, la integración del AHP con modelos de Programación Matemática ha demostrado ser un avance crucial para la formalización de la asignación de recursos. Recientes aplicaciones en la industria han confirmado que esta sinergia no solo pondera la importancia estratégica (AHP), sino que también determina la mejor solución alcanzable bajo restricciones presupuestarias y operativas (Duarte, 2021) y (Mohamad, 2024).

En el contexto latinoamericano, como indican Aragón-Beltrán (2017), se implementó con éxito una metodología híbrida AHP-ANP para priorizar proyectos de innovación en empresas españolas. Los resultados de este estudio demostraron una reducción del 34% en los tiempos de decisión y una mejora del 28 % en la alineación estratégica. En su estudio comparativo, Hosseini (2020) evidenció que AHP supera consistentemente a los métodos tradicionales de scoring en contextos de alta incertidumbre característicos de proyectos de I+D. El análisis realizado por el autor reveló que AHP presenta una tasa de error promedio 23 % menor en la predicción del éxito de los proyectos, lo que sugiere una mayor eficacia de este sistema en entornos con un alto grado de incertidumbre. Como se desprende de los estudios precedentes, existe una sólida base empírica que sustenta la exploración sistemática del AHP (Análisis de Hierarquía de Prioridades) en el desarrollo de modelos integrados de IO (Integración de Sistemas) para la gestión de proyectos de I+D+i (Investigación, Desarrollo e innovación), particularmente en contextos emergentes donde la optimización de recursos limitados resulta crítica.

Materiales y métodos

El Proceso Analítico Jerárquico (AHP) se inscribe en un paradigma constructivista y, en cierta medida, sistémico. Esta situación se atribuye a que el proceso de toma de decisiones complejas no se percibe como una realidad objetiva y singular, sino que se construye a partir de las percepciones y juicios de los actores involucrados (Saaty, 1980). El AHP facilita la estructuración de esta complejidad en una jerarquía, permitiendo que diferentes criterios y alternativas sean evaluadas de manera relativa, lo que refleja la subjetividad inherente al proceso decisorio. En este sentido, al ponderar las interdependencias y la estructura jerárquica, se adopta una perspectiva sistémica del problema.

El autor de la presente metodología es Thomas L. Saaty, cuyo trabajo germinativo en los años 70 y 80 sentó las bases teóricas y prácticas del AHP (Saaty, 1980). En este sentido, sus investigaciones iniciales se centraron en problemas de decisión complejos en diversos campos, demostrando la versatilidad del método.

Posteriormente, numerosos investigadores han ampliado y aplicado el AHP en una infinidad de áreas. En el ámbito de la gestión de la innovación y la priorización de proyectos de I+D+i, autores como Torkayesh et al. (2022) han mostrado cómo el AHP puede ser utilizado para evaluar la sostenibilidad en cadenas de suministro, mientras que Mohammed et al. (2023) exploran su aplicación en la selección de tecnologías avanzadas. Los trabajos recientes se centran en la integración metodológica avanzada, con el propósito de superar las limitaciones de los métodos tradicionales al incorporar la dinámica de la incertidumbre y la optimización en tiempo real, aspectos que resultan fundamentales para la I+D+i industrial contemporánea. En el contexto latinoamericano, diversos estudios han adaptado el AHP (Analytical Hierarchy Process) a problemáticas regionales, aunque quizás no de manera tan específica en el ámbito de la I+D+i (Investigación, Desarrollo e innovación) de la industria boliviana.

El propósito de la presente investigación es aplicar los conceptos del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) desarrollado por Saaty (1980). El AHP, en su capacidad como herramienta multicriterio para la toma de decisiones, proporciona una estructura jerárquica destinada a la disección de problemas complejos, permitiendo la ponderación de criterios y la evaluación comparativa de alternativas mediante juicios pareados. Este enfoque facilita la priorización y selección de variables de decisión en el proceso de modelización de la fase inicial de solución de la Investigación de operaciones.

El desarrollo del enfoque metodológico se describe de manera puntual para la implementación del proceso analítico jerárquico

(AHP) en la conformación de modelos de investigación de operaciones para proyectos de I+D+i industrial, tomando en consideración las siguientes características metodológicas en su desarrollo.

a) Definición de la Estructura Jerárquica:

La formulación inicial implica la revisión del problema de decisión en una estructura jerárquica multinivel. Para la aplicación en la conformación de modelos de IO para proyectos de I+D+i, esta estructura se define como:

Nivel Superior (Objetivo): Identificación de los proyectos de I+D+i con mayor potencial para ser abordados mediante la modelización con herramientas de Investigación de Operaciones.

Nivel Intermedio (Criterios): Conjunto de criterios relevantes que influyen en la idoneidad de un proyecto de I+D+i para la modelización con IO.

Estos criterios, denotados como $C = \{C1, C2, \dots, Cn\}$, deben ser exhaustivos y mutuamente exclusivos dentro del contexto de la aplicación de la IO. Ejemplos de estos criterios incluyen:

do1: Potencial de optimización cuantificable mediante modelos matemáticos.

do2: Disponibilidad y calidad de datos requeridos para la construcción del modelo.

do3: Impacto esperado de la solución del modelo en los indicadores clave de rendimiento (KPIs) de la organización.

do4: Claridad y delimitación del problema susceptible de modelización.

Nivel Inferior (Alternativas): El conjunto de proyectos de I+D+i que se consideran para la priorización, denotado como $A = \{a1, a2, \dots, am\}$. Cada a_i representa un proyecto específico de I+D+i.

La definición precisa de estructura es jerárquica, fundamentada en la teoría del AHP, (Saaty, 2008) es crucial para asegurar que todos los aspectos relevantes del problema de decisión sean considerados de manera sistemática.

b) Realización de Comparaciones por Pares:

En esta etapa, se lleva a cabo la evaluación comparativa por pares de los elementos dentro de cada nivel de la jerarquía con respecto al elemento del nivel inmediatamente superior.

Comparación de Criterios: Se construye una matriz de comparación pareada A de dimensión $n \times n$, donde el elemento a_{ij} representa la intensidad de la preferencia del criterio d_{0i} sobre el criterio d_{0j} , utilizando la escala fundamental de Saaty (Saaty & Vargas, 2022).

Esta matriz satisface la propiedad de reciprocidad, $a_{ij} = 1/a_{ji}$, y $a_{ii} = 1$.

Comparación de Alternativas por Criterio: Para cada criterio $d \in D$, se construye una matriz de comparación pareada $A(k)$ de dimensión $m \times m$, donde el elemento $a_{ij}(k)$ representa la intensidad de la preferencia del proyecto a_i sobre el proyecto a_j con respecto al criterio d .

De manera similar, $a_{ji}(k) = 1/a_{ij}(k)$ y $a_{ii}(k) = 1$.

La validez de los resultados de la AHP depende críticamente de la calidad y la consistencia de estos juicios comparativos, que idealmente provienen de un panel de expertos multidisciplinario.

c) Creación de Matrices de Comparación:

Para su elaboración se toma en cuenta que, los juicios de las comparaciones pareadas se organizan formalmente en matrices cuadradas recíprocas. La matriz O para los criterios y las matrices $A^{(k)}$ para las alternativas con respecto a cada criterio constituyen la base para la derivación de las prioridades.

El proceso para construir una matriz de comparación pareada sigue estos pasos:

1. Definir el conjunto de elementos a comparar: Ya sean los criterios para evaluar proyectos de I+D+i (por ejemplo, potencial de mercado, viabilidad técnica, impacto social) o las alternativas de proyectos en sí.
2. Realizar las comparaciones pareadas: Para cada par de elementos (i, j) , se pregunta: "¿Qué tan más importante es el elemento i en comparación con el elemento j con respecto al criterio superior?". La respuesta se traduce a un valor de la escala de Saaty y se coloca en la posición a_{ij} de la matriz.
3. Llenar la matriz:
 - La diagonal principal siempre tendrá valores de 1, ya que un elemento comparado consigo mismo tiene igual importancia ($a_{ii} = 1$).
 - Si se ha determinado el valor de a_{ij} (importancia de i sobre j), entonces el valor de a_{ji} (importancia de j sobre i) será su recíproco ($a_{ji} = 1/a_{ij}$). Esto asegura la consistencia en las comparaciones.

d) Cálculo de Pesos y Prioridades:

A partir de cada matriz de comparación pareada, se calcula un vector de prioridades normalizado que representa la importancia relativa de los elementos comparados. Para una matriz de comparación M , el vector de prioridades V se puede aproximar mediante la normalización de las filas de la matriz elevada a potencias suficientemente altas o, de manera más precisa, mediante

la solución del problema del autovector principal:

$$\mathbf{A} \mathbf{w} = \lambda_{\max} \mathbf{w}$$

Donde λ_{\max} es el autovalor principal de la matriz M. El vector de prioridades \mathbf{w} es el autovector normalizado correspondiente a λ_{\max} .

Pesos de los Criterios (w_k): Se obtiene el vector de prioridades \mathbf{w} de la matriz de comparación \mathbf{O} . Los elementos O_{ij} de este vector representan el peso relativo del criterio dO_{ij} .

Prioridades Locales de las Alternativas ($v^{(k)}$): Para cada criterio dO_k , se obtiene el vector de prioridades $v^{(k)}$ de la matriz de comparación $\mathbf{A}^{(k)}$. El elemento $v_{ik}^{(k)}$ representa la prioridad del proyecto a_i con respecto al criterio dO_k .

$$PG_i = \sum_{k=1}^n w_k \cdot w_{ik}$$

Finalmente, las prioridades globales de los proyectos se obtienen agregando las prioridades locales ponderadas por los pesos de los criterios:

Donde PG_i con w_k (peso del criterio) y w_{ik} (peso local) son la prioridad global del proyecto a_i . Los proyectos con las prioridades globales más altas son considerados más relevantes para la modelización con investigación de Operaciones.

e) Verificación de la Consistencia:

La coherencia de los juicios emitidos durante las comparaciones pareadas se evalúa mediante el cálculo de la Razón de Consistencia (RC).

a. Índice de Consistencia (IC): Una vez obtenido λ_{\max} y el tamaño de la matriz n , el IC se calcula directamente:

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

El IC nos da una idea de que tan lejos está nuestra matriz de ser perfectamente consistente. Un valor de IC cercano a cero indica una alta consistencia.

b. Índice Aleatorio (RI): Es el IC promedio de matrices recíprocas aleatorias del mismo orden. Los valores de IA han sido tabulados por Saaty (Saaty & Vargas, 2022).

$$RC = \frac{IC}{RI}$$

c. Razón de Consistencia (RC): Finalmente la razón de consistencia (RC), se obtiene dividiendo el índice de consistencia (IC) por el índice aleatorio (RI).

$$CR = \frac{C_{yo}}{RI}$$

Una CR inferior a 0.10 generalmente indica un nivel aceptable de consistencia en los juicios. Si la CR excede este umbral, se recomienda revisar los juicios para identificar y corregir inconsistencias.

f) formalización de la integración AHP-IO: Del Vector de Prioridades a los Coeficientes de Optimización

El AHP, como método de toma de decisiones multicriterio (MCDM), tiene un rol normativo y de priorización, cuya salida es un vector de importancia relativa (prioridades, w). La Investigación de Operaciones (IO), por su parte, tiene un rol de optimización, buscando el valor extremo (máximo o mínimo) de una función objetivo sujeta a restricciones.

La unidad demostrativa del presente artículo radica en la formalización explícita de cómo el juicio cualitativo del AHP se traduce en el parámetro cuantitativo que guía la optimización de IO.

Es fundamental diferenciar la función del AHP (definición de la importancia estratégica de los criterios) de la función de la IO (determinación de la asignación óptima de recursos basada en esa importancia).

Formalización de la Transición

En la presente metodología, la integración se formaliza mediante el uso del vector de prioridades normalizado (w) derivado del AHP para definir los coeficientes de la Función Objetivo del modelo de Programación Lineal (PL) y, de forma indirecta, para establecer restricciones de cumplimiento (metas).

Definición de Coeficientes de la Función Objetivo:

El vector de prioridades de los criterios del AHP, $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$, no se utiliza directamente como coeficiente, sino que pondera una escala de impacto subjetiva de cada variable de decisión, incógnita i , sobre su criterio principal asociado, d_0k .

Matriz $S(X_i, d_0k)$ la Puntuación de Impacto (ej. escala Likert) de la variable incógnita i respecto a su criterio dominante d_0k . El Coeficiente Ponderado (CP) para la variable incógnita i , se calcula como:

$$C P_i = w_{c_k} * S(X_i, C_k)$$

El CP_i resultante, mostrado en la Tabla 7, representa la contribución relativa estratégica de la unidad de la variable de decisión incógnita i al objetivo general de minimización de costos (o maximización de la eficiencia) del modelo de IO, bajo la óptica multicriterio ponderada.

Definición de Impacto (S): Matriz S como una escala de contribución / impacto.

Matriz S (X_i, d_{0k}): Puntuación de Impacto (ej. escala Likert) de la variable de decisión X_i respecto a su criterio dominante d_{0k} .

Definición del Coeficiente Ponderado (C Pi): La fórmula es:

$$C P_i = \sum_{k=1}^n w_k * S(X_i, d_{0k})$$

Minimización de Costos:

Si el objetivo es Minimizar Costos, el (C Pi) debe reflejar el impacto estratégico de la variable en la reducción de costos. El (C Pi) alto debe asociarse a una variable cuya reducción sea estratégicamente prioritaria.

Corrección en la Función Objetivo: Se debe introducir una función de utilidad/ponderación, no usar el (C Pi) directamente como el costo unitario.

Formalización de la Integración AHP-IO.

El CPi derivado es un Índice de Prioridad Estratégica. En este contexto de Minimización de Costos, se requiere una calibración.

Si X_i es una variable de costo (C_i): El modelo de optimización debe usar el costo unitario real, C_i , pero el CPi puede guiar futuras restricciones o la selección de variables de I+D+i.

Si el CPi debe ser el coeficiente: Se debe definir una Función Objetivo de Prioridad Estratégica (Z_p) y correr la optimización dual a la de costos.

$$Min Z = \sum_{i=1}^m C_{0i} * X_i \text{ (Funcion objetivo de costos reales)}$$

$$Max Z_p = \sum_{I=1}^M CP_I * X_i \text{ (Funcion objetivo de prioridad estrategica)}$$

El CPi se convierte en el coeficiente de la Función Objetivo solo si la Función Objetivo se reinterpreta como la Maximización de la Prioridad Estratégica/Utilidad (y se usa Programación por Metas o restricciones de umbral). Si se sigue minimizando costos, el CPi debe ser un factor de penalización/ponderación aplicada al costo real C_i .

Para un modelo de IO, la Función Objetivo (Z) que se busca minimizar se define entonces utilizando estos coeficientes ponderados. En este caso, al buscar la minimización de costos, los

coeficientes reflejan el impacto estratégico de las variables de decisión en la estructura de costos (donde mayor CP significa mayor relevancia en la estrategia de minimización):

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^{24} C P_i * X_i$$

Nota: Se debe tener cuidado con la interpretación de la función objetivo. Si se busca minimizar costos, un CPi alto de una variable de costo (incógnita) puede significar que esa variable es la más crítica para reducir costos, justificando la inclusión de un proyecto de I+D+i enfocado en ella.

Minimización ponderada:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^m C_{oi} * \frac{1}{C P_i} * X$$

Un CPi alto (alta prioridad estratégica) hace que el costo ponderado $C_i / C P_i$, sea bajo, por lo que el optimizador prioriza reducir esa variable, alineando la optimización con la prioridad AHP. Esta articulación formal es el “salto lógico-matemático”.

Definición de Restricciones (Programación por Metas):

Las prioridades del AHP, w_k , también pueden ser utilizados para establecer la ponderación de las desviaciones en modelos de Programación por Metas (Goal Programming, GP). Los criterios con mayor peso w_k se convierten en las metas con mayor prioridad absoluta o ponderada dentro de la optimización (Romero, 2014). Esto asegura que el modelo de IO se esfuerce más para satisfacer las metas que el AHP identificó como estratégicamente más importantes para la I+D+i.

Esta formalización garantiza que el modelo de IO no solo esté optimizando un resultado numérico, sino que esté alineado estratégicamente con los factores críticos y los juicios multicriterio previamente validados por el AHP.

Formulación del Modelo de Programación Lineal (PL) Ponderado por AHP

El objetivo de la empresa es minimizar los costos de producción sujetos a restricciones operativas. La función objetivo Z se construye utilizando los Coeficientes Ponderados (CPi) derivados de la integración AHP-Likert, asegurando que el modelo de optimización priorice la reducción de los costos asociados a las variables de mayor relevancia estratégica (mayor CPi).

VARIABLES DE DECISIÓN: $X_i \geq 0$ para $i = 1, 2, \dots, 24$, donde incógnita_i es la variable de decisión descrita en la Tabla 5.

Función Objetivo (Minimizar Costos Estratégicos Ponderados): Donde $C P_i$ es el puntaje Ponderado de la variable incógnita_i tomado de la tabla 7 y representa el peso estratégico de esa variable en la estructura de costos a minimizar.

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^{24} C P_i * \text{incognita}_i$$

Restricciones del Sistema (Ejemplos):

1. Restricción de Capacidad de Producción (Toneladas): El total de preformas producidas debe ser menor o igual a la capacidad máxima (ej:100 toneladas/semestre).

$$\sum_{i=1}^{10} X_i \leq 100 \text{ (Capacidad total)}$$

2. Restricción de Mano de Obra (Personal de Planta): La suma de personal de producción (incógnita₁₅ incógnita₂₀) no puede exceder el personal disponible (20 empleados, trabajando a 3 turnos).

$$\sum_{i=15}^{20} X_i \leq 20 \text{ (Limite de personal)}$$

3. Restricción de Demanda Mínima (Producción X₁): La producción de las preformas de mayor rotación debe satisfacer una demanda mínima conocida.

$$X_1 \geq D_m \text{ (Demanda mínima)}$$

4. Restricción de Integridad (Variables Enteras): Las variables de personal deben ser números enteros.

$$X_{12}, X_{13}, \dots, X_{24}, \in Z^+$$

La solución de este modelo, Min Z, identificará el plan de operación óptimo (valores de X_i) que minimiza el impacto total de los costos. Este enfoque no solo resuelve un problema de optimización numérica, sino que, de manera crucial, garantiza que la asignación de recursos sea eficiente (IO) al tiempo que se alinea estratégicamente con los factores críticos y los juicios multicriterio (AHP), demostrando plenamente la sinergia metodológica propuesta.

Ejemplo de la empresa de producción: “EMPACAR”

La empresa “EMPACAR S.A.” filial La Paz/El Alto, Bolivia, se dedica a la producción distribución y comercialización de preformas PET, enfocada a la minimización de costos de producción, con alta demanda en el mercado de las bebidas carbonatadas, jugos y aguas de mesa, productos de alto consumo en nuestro medio.

Los productos de la empresa son distribuidos en grupos de: Preformas para Botellas Gaseosas y/o Jugos y Preformas para Botellones “Sifones” Con una producción media de 675.384.010 unidades de preformas semestrales y 341.089 preformas para Sifones.

Actualmente la empresa cuenta con 48 empleados; del cual 20 empleado son de planta; es decir: inyección y control de calidad; trabajan a 3 turnos, en 4 grupos de 5 empleados.

El objetivo general de la empresa asentada en la ciudad de El Alto, Departamento de La Paz, Bolivia, dedicada a la producción distribución y comercialización de preformas PET en el mercado de las bebidas carbonatadas, jugos y aguas de mesa, busca reducir los costos de producción de la línea PET.

Tabla N° 1, Escala de Saaty de comparación pareada

Valor	Definición	Comentarios
1	Igual importancia	El criterio A es igual de importante que el criterio B
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen levemente al criterio A sobre el B.
5	Importancia grande	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente al criterio A sobre el B
7	Importancia muy grande	El criterio A es mucho más importante que el criterio B
9	Importancia extrema	La mayor importancia del criterio A sobre le criterio B esta fuera de duda
2,4,6,8	Valores intermedios entre los anteriores	

Fuente: The analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation

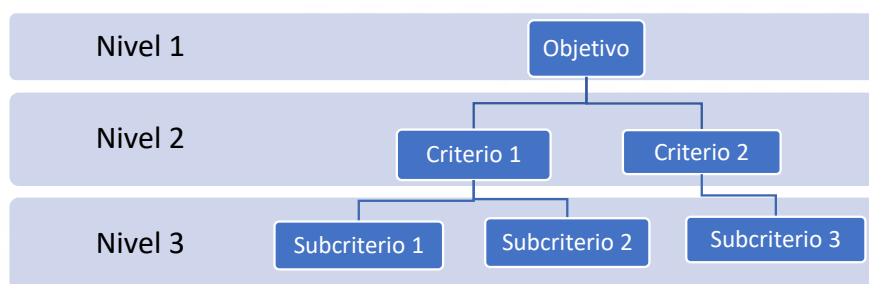


Ilustración 1. Modelo jerárquico para la toma de decisiones

Definición de criterios en modelo AHP

Se definieron ocho criterios para cumplir el objetivo general de la empresa y su función objetivo de minimización de costos de producción:

- C1: Costos
- C2: Eficiencia operativa
- C3: Disponibilidad de personal
- C4: Demanda de producto
- C5: Calidad
- C6: Sostenibilidad
- C7: Flexibilidad
- C8: Riesgo

Utilizando la escala fundamental de 1 a 9 de Saaty. Los valores reflejan los juicios de importancia relativa emitidos por un experto y un jefe de área, donde un valor mayor a 1 en la posición (fila, columna) indica que la fila es más importante que la columna según ese factor. Por ejemplo, Costos frente a Eficiencia se evalúa con 2, lo que significa que Costos es ligeramente más importante que Eficiencia Operativa en este contexto.

Tabla 2. Matriz de comparación de criterios por pares

Criterio	Costos	Eficiencia	Personal	Demanda	Calidad	Sostenibilidad	Flexibilidad	Riesgos
Costos	1	3	5	2	4	6	4	3
Eficiencia	0,33	1	4	2	3	2	3	2
Personal	0,20	0,25	1	0,50	0,33	0,25	0,50	0,33
Demanda	0,50	0,50	2	1	2	3	2	3
Calidad	0,25	0,33	3	0,50	1	2	3	2
Sostenibilidad	0,17	0,50	4	0,33	0,50	1	0,50	2
Flexibilidad	0,25	0,33	2	0,50	0,33	2	1	3
Riesgo	0,33	0,50	3	0,33	0,50	0,50	0,33	1

Criterios ponderados según escala 1-9 de Saaty.

Matriz normalizada de criterios, normalizando la matriz anterior (dividiendo cada valor por la suma de su columna), se obtiene la siguiente matriz de comparación normalizada. Cada entrada representa el peso relativo normalizado de la fila frente al criterio de la columna

Tabla 3. Matriz normalizada de comparación de criterios

Costos	Eficiencia	Personal	Demanda	Calidad	Sostenibilidad	Flexibilidad	Riesgo
0,33	0,47	0,21	0,28	0,34	0,36	0,28	0,18
0,11	0,16	0,17	0,28	0,26	0,12	0,21	0,12
0,07	0,04	0,04	0,07	0,03	0,01	0,03	0,02
0,16	0,08	0,08	0,14	0,17	0,18	0,14	0,18
0,08	0,05	0,13	0,07	0,09	0,12	0,21	0,12
0,05	0,08	0,17	0,05	0,04	0,06	0,03	0,12
0,08	0,05	0,08	0,07	0,03	0,12	0,07	0,18
0,11	0,08	0,13	0,05	0,04	0,03	0,02	0,06

Vector de prioridades de los criterios, se calcula el vector promedio de prioridades (ponderaciones) a partir de la matriz normalizada promediando cada fila de la tabla anterior, se obtiene la importancia relativa de cada criterio. Estas son las ponderaciones o pesos finales asignados a los criterios.

Tabla 4. Tabla vector de prioridades de los criterios

Criterio	Peso	%
Costos	0,31	30,6%
Eficiencia	0,18	17,7%
Personal	0,04	3,9%
Demanda	0,14	14,2%
Calidad	0,11	10,8%
Sostenibilidad	0,08	7,6%
Flexibilidad	0,09	8,6%
Riesgo	0,06	6,5%

Evaluación de consistencia

La Razón de Consistencia (RC = 0.082) es menor que el umbral aceptado de 0.10, lo que valida la consistencia de los juicios de los expertos y permite utilizar los pesos del vector de prioridades para la siguiente fase de optimización.

$$RC = \frac{IC}{IA} \quad IC = \frac{n_{max} - n}{n - 1} \quad IA = \frac{1,98(n - 2)}{n}$$

$$\lambda_{m \text{ incognita}} = 8.810$$

$$Y_0 C = \frac{\lambda_{m \text{ incognita}} - n}{n - 1} = \frac{8.810 - 8}{8 - 1} = 0.116$$

Donde n = 8 (criterios). El índice aleatorio (Y₀ A) para n = 8 es 1.41

$$RC = \frac{Y_0 C}{Y_0 A} = \frac{0.116}{1.41} = 0.082$$

$$n_{max} = [\text{Matriz de comparación original}] * [\text{Vector promedio}]$$

los siguiente valores:

$$\begin{aligned} N &= 8 \\ N_{max} &= 8,85 \\ IC &= 0,12 \\ IA &= 1,49 \\ RC &= 0,082 \end{aligned}$$

$RC < 0,1$ por tanto los criterios **son consistentes** entre sí.

Diseño del modelo con las variables que inciden en el proceso

Una vez validada los criterios y sus pesos correspondientes se analiza la situación de la empresa con respecto a la operación de la producción y la cadena de abastecimiento, es posible identificar las variables involucradas en todo el proceso de producción, especificando las variables de decisión en la fase de modelaje de investigación de operaciones.

Tabla 5 Variables de decisión del modelo

Cantidad a producir de cada producto	
X1 = Ton a producir de la preforma de 46.6 g	X6 = Ton a producir de la preforma de 56 g
X2 = Ton a producir de la preforma de 48 g	X7 = Ton a producir de la preforma de 58.6 g
X3 = Ton a producir de la preforma de 52 g	X8 = Ton a producir de la preforma de 60 g
X4 = Ton a producir de la preforma de 52.6 g	X9 = Ton a producir de la preforma de 64 g
X5 = Ton a producir de la preforma de 54.6 g	X10 = Ton a producir de la preforma de 700 g
Cantidad de cajas a elaborar	
X11 = Cantidad de cajas para 7000 unidades a producir	
Personal almacén y distribución	

X12 = Cantidad de monta carguistas	X14 = Cantidad de encargados de almacén general
X13 = Cantidad de choferes distribuidores	
Personal de producción	
X15 = Cantidad de ayudantes generales	X18 = Cantidad de electricistas
X16 = Cantidad de operadores de inyectora	X19 = Cantidad de asistentes de producción
X17 = Cantidad de mecánicos	X20 = Cantidad de jefes de producción
Costos indirectos de fabricación	
Personal de control de calidad	
X22 = Cantidad encargados de control de calidad	X24 = Cantidad de auxiliares de control de calidad
X23 = Cantidad de asistentes de control de calidad	

Tabla.6 Clasificación de las variables según los criterios definidos

Variable (Xi)	Descripción	Criterio principal
X1-X10	Toneladas a producir por tipo de preforma	Demanda de producto (C4)
X11	Cajas para 7000 unidades	Costos (C1)
X12-X14	Personal almacén y distribución	Disponibilidad personal (C3)
X15-X20	Personal de producción	Disponibilidad personal (C3)
X21	Costos indirectos de fabricación	Costos (C1)
X22-X24	Personal de control de calidad	Disponibilidad personal (C3)

Las puntuaciones establecen el impacto estimado dentro del criterio, de acuerdo con el juicio del experto, jefe de área y análisis lógico.

Tabla 7. Asignación de puntuación por variable (escala de Likert)

Variable	Criterio	Peso AHP	Puntuación Likert	Puntaje ponderado (Peso × Likert)
X1	C4	0,14	8	1,14

X2	C4	0,14	7	1,00
X3	C4	0,14	6	0,85
X4	C4	0,14	6	0,85
X5	C4	0,14	5	0,71
X6	C4	0,14	5	0,71
X7	C4	0,14	4	0,57
X8	C4	0,14	3	0,43
X9	C4	0,14	2	0,28
X10	C4	0,14	2	0,28
X11	C1	0,31	6	1,84
X12	C3	0,04	8	0,32
X13	C3	0,04	8	0,32
X14	C3	0,04	7	0,28
X15	C3	0,04	9	0,35
X16	C3	0,04	9	0,35
X17	C3	0,04	8	0,32
X18	C3	0,04	8	0,32
X19	C3	0,04	7	0,28
X20	C3	0,04	7	0,28
X21	C1	0,31	9	2,79
X22	C3	0,04	6	0,24
X23	C3	0,04	5	0,20
X24	C3	0,04	4	0,16

Resultados del puntaje global por variable

En la tabla 8 se presenta el resumen de los resultados organizados, con los valores de mayor a menor impacto ponderado:

Tabla 8, del puntaje global variable ordenado de forma descendente

Variable	Puntaje ponderado
X1	1,14
X2	1,00
X3, X4	0,85
X5, X6	0,71
X7	0,57
X8	0,43
X9, X10	0,28
X11	1,84
X12, X13, X17, X18	0,32
X14, X19, X20	0,28

X15, X16	0,35
X21	2,79
X22	0,24
X23	0,20
X24	0,16

El análisis evidencia que las variables con mayor impacto ponderado en la minimización de costos de producción son:

- X_{21} (Costos indirectos de fabricación) con un puntaje de 2,79 reflejando su rol clave en el control de gastos generales.
- X_{11} (Cantidad de cajas a elaborar) con 1,84 representando un insumo logístico directamente vinculado a la eficiencia del sistema de distribución.
- X_1 a X_4 (Producción de preformas de mayor rotación) con valores entre 1,14 y 0,85 destacando la relevancia de ajustar los volúmenes de fabricación a la demanda del mercado.

De igual forma, las variables del personal operativo y de soporte (X_{12} a X_{20} y X_{22} a X_{24}) presentan una ponderación media-alta, lo cual sugiere que la disponibilidad y asignación eficiente del recurso humano es determinante, especialmente en áreas críticas como la operación de inyectoras y el control de calidad.

Por otro lado, variables con menor impacto ponderado como X_9 , X_{10} , X_{24} relacionadas con productos de menor demanda o personal auxiliar, si bien no son prioritarias, deben ser gestionadas adecuadamente para evitar cuellos de botella o ineficiencias en segmentos específicos.

Por lo tanto, el modelo AHP aplicado ha permitido cuantificar la prioridad estratégica de las variables del sistema productivo mediante el Coeficiente Ponderado (CPI). Este coeficiente (CPI) sirve como el parámetro de entrada clave para la Función Objetivo (Min Z) del modelo de Programación Lineal. Al incorporar la relevancia estratégica del AHP en el modelo de Investigación de Operaciones (IO), se facilita el cálculo de la solución óptima para la toma de decisiones operativas. Esta integración garantiza la asignación de recursos más eficiente y el diseño de estrategias de mejora continua enfocadas en la reducción de costes, al tiempo que se respetan las prioridades multicriterio de la I+D+i.

Resultados y discusiones

Como se desprende de las investigaciones llevadas a cabo por diferentes autores consultados en la presente revisión bibliográfica, existe una clara sinergia entre el Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) y las herramientas de

la Investigación de Operaciones (IO) en el contexto de la gestión de proyectos de I+D+i industrial. Los hallazgos de los autores canónicos, como Saaty (1980), y de investigaciones recientes, como Duarte (2021) y Mohammad (2024), convergen en la idea de que el AHP proporciona una estructura valiosa para abordar la complejidad inherente a la toma de decisiones multicriterio, característica fundamental en la planificación y priorización de iniciativas de I+D+i. Específicamente, Mohammad (2024) formaliza cómo los pesos de la AHP son cruciales para definir los coeficientes de la función objetivo en modelos de Programación Entera para la asignación de recursos, garantizando que la optimización final esté alineada con las prioridades estratégicas establecidas por los juicios de expertos (Mohammad, 2024).

Diferenciación teórica de roles (AHP vs. IO): la clave de la solidez metodológica reside en la clara diferenciación de roles entre la modelización multicriterio (AHP) y la optimización (IO). El AHP, mediante el Teorema del Autovector Principal de Saaty, proporciona una escala de razón que cuantifica la importancia relativa de los criterios o la utilidad subjetiva de las alternativas. Este vector de prioridades (o utilidad) constituye, en esencia, una medida estratégica. En contraste, la Programación Lineal o Entera de la IO constituye una metodología destinada a la optimización de la asignación de recursos (o variables de decisión) bajo un conjunto de restricciones operativas. La integración presentada en este estudio no emplea el AHP para resolver la optimización, sino para parametrizarla. Los pesos AHP se convierten en coeficientes estratégicos en la función objetivo, garantizando que la solución óptima del modelo de IO (por ejemplo, la minimización de costes) se alcance priorizando aquellas variables que la evaluación multicriterio identificó como las de mayor impacto estratégico (Dyer, 1990) y (Olson, 2010).

El enfoque propuesto por Saaty (1980) resalta la capacidad del AHP para facilitar el análisis de problemas complejos y la obtención de escalas de razón a partir de juicios pareados. La capacidad en cuestión resulta de vital importancia para la alimentación de modelos de IO, particularmente en lo que respecta a la definición de variables de decisión en el contexto de la elaboración de una matriz de programación lineal, así como de las variables asociadas a la función objetivo o la ponderación de criterios en modelos de agregación. La amplitud de su labor, que abarca la planificación y la asignación de recursos, subraya la importancia del AHP en las fases iniciales de la gestión de proyectos de I+D+i, donde la IO pretende optimizar la utilización de recursos, especialmente en la modelización y definición de las variables de decisión.

Como señalan Belton y Stewart (2002), se amplía esta

perspectiva al destacar la capacidad del AHP para integrar datos cualitativos y cuantitativos, generando prioridades que pueden ser utilizadas directamente en modelos de programación lineal multiobjetivo o en simulaciones. Su énfasis en la estructuración del problema resulta de particular relevancia para la I+D+i, ámbito en el que la identificación clara de criterios y alternativas constituye un paso fundamental para una modelización efectiva con IO.

De igual manera, pero con mayor énfasis (Figueira, 2016) ofrece una perspectiva más formal, que corrobora que el AHP proporciona la información necesaria (como los pesos de los criterios) para la implementación de modelos de IO basados en la agregación o superación de criterios. La combinación del AHP con técnicas de optimización para problemas con objetivos jerárquicos abre nuevas y múltiples interesantes posibilidades para la aplicación en la priorización de proyectos de I+D+i con múltiples metas estratégicas.

La integración con la Programación por Metas (Romero, 2014) y la simulación amplían significativamente el potencial del AHP en la IO para I+D+i, permitiendo abordar la priorización considerando metas con diferentes niveles de importancia y la evaluación de escenarios futuros bajo incertidumbre, respectivamente.

Los hallazgos de la revisión sugieren que el AHP, con su metodología rigurosa para la estructuración de decisiones, la cuantificación de juicios y la verificación de la consistencia, se presenta como un recurso metodológicamente sólido para las herramientas de modelización de la Investigación de Operaciones en el ámbito de los proyectos de I+D+i industrial. La implementación del AHP facilita la obtención de prioridades debidamente fundamentadas, las cuales pueden ser utilizadas como datos de entrada en modelos de IO, propiciando una toma de decisiones más informada y eficiente en la selección, planificación y asignación de recursos para iniciativas de innovación y desarrollo en diversos ámbitos de la producción.

En el contexto particular de la investigación y aplicación, estos hallazgos respaldan la hipótesis de que una estrategia integral basada en la IO y el software aplicado, enriquecida con la metodología del AHP, puede mejorar significativamente la elaboración de proyectos de I+D+i en el sector industrial, posiblemente incluyendo el contexto de La Paz y El Alto, Bolivia, donde la priorización de proyectos con criterios claros y la optimización de recursos son fundamentales.

La presente discusión proporciona amplias posibilidades a futuras investigaciones, las cuales podrían centrarse en la aplicación empírica de la integración AHP-IO en estudios de caso

de proyectos de I+D+i industrial, especialmente en el contexto boliviano. En el ámbito de la metodología de proyectos, resulta pertinente examinar la incidencia de la aplicación del AHP (Análisis de Hierarchy de Procesos) en la fase de formulación de modelos de IO (Integración de Sistemas) en la eficiencia y el éxito de los proyectos.

Conclusiones

El propósito de este estudio fue examinar minuciosamente la implementación del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) de Saaty como una metodología esencial para la elaboración de modelos de Investigación de Operaciones (IO) destinados a la gestión y priorización de proyectos de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) en el ámbito industrial. Mediante la revisión de la literatura científica y la presentación de un marco metodológico detallado, se ha evidenciado cómo el AHP facilita la estructuración de problemas de decisiones complejos inherentes a la I+D+i, permitiendo la incorporación sistemática de juicios cualitativos y la derivación de prioridades cuantitativas que sirven como insumos cruciales para las herramientas de modelización de la IO.

Se ha evidenciado que la capacidad del AHP para descomponer problemas en estructuras jerárquicas, realizar comparaciones pareadas y verificar la consistencia de los juicios proporciona una base sólida para la toma de decisiones multicriterio en el ámbito de la I+D+i. Los pesos derivados de los criterios y prioridades de las alternativas, obtenidos mediante el AHP, pueden integrarse con éxito en modelos de IO, tales como modelos de agregación ponderada, optimización multiobjetivo y selección de portafolio de proyectos, lo que enriquece el proceso de toma de decisiones y la asignación de recursos.

En relación con las expectativas iniciales, el presente estudio ha logrado demostrar el potencial del AHP en la etapa de formulación de proyectos de I+D+i, especialmente en el contexto del sector industrial, empresarial o de emprendedurismo. La metodología del AHP (Analytical Hierarchy Process) proporciona un enfoque estructurado para abordar la complejidad de los factores que inciden en el éxito de tales proyectos, abarcando desde el potencial de mercado hasta la viabilidad técnica y el impacto social, aspectos de particular relevancia en el contexto industrial de La Paz, Bolivia.

La integración del AHP con la IO optimiza la priorización y selección de proyectos de I+D+i, y mejora la transparencia y la justificación de las decisiones, basándose en un proceso analítico riguroso y en la sabiduría colectiva de los expertos. Se concluye

que el AHP, aplicado en la conformación de modelos de IO, representa una estrategia integral que puede potenciar la eficiencia en la elaboración de proyectos de I+D+i, contribuyendo al avance y la competitividad del sector industrial.

Para investigaciones futuras, se sugiere explorar la aplicación práctica de este marco metodológico mediante estudios de caso en empresas industriales de La Paz y/o El Alto, en Bolivia, con el propósito de validar su efectividad y adaptabilidad al contexto local. En este sentido, se plantea la posibilidad de investigar la integración del AHP con otras técnicas de IO más avanzadas, como la simulación o la programación estocástica, con el propósito de abordar la incertidumbre inherente a los proyectos de I+D+i.

Referencias

- Aragones-Beltran, P., García-Melón, M., & Mendoza, J. L. (2017). A hybrid AHP-ANP methodology for prioritizing innovation projects in Spanish companies. *Journal of Business Research*, 70, 368–377.
- Belton., & Stewart. (2002). *Analisis de desiciones con criterio multiple: Un enfoque integrado*. DBLP, 21.
- Duarte, A. (2021). Integracion del Proceso Analitico Jerarquico y la Programacion Matematica para la Asignacion de Recursos en la fabricacion. *European Journal of Industrial Engineering*, 1845-1865.
- Dyer, J. (1990). Observaciones sobre el Proceso Analitico Jerarquico. *Management Science*, 249-251.
- Ehrgott, M. (2005). *Optimizacion multicriterio*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg.
- Figueira Jose, G. s. (2016). *Analisis de desiciones con criterios multiples*. New York: Springer-Verlag.
- Ghasemi, B. y. (2020). Una revision de los modelos hibridos de toma de desiciones en ingenieria y ciencias de la gestion. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 1845-1865.
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2010). *Introduccion a la investigacion de operaciones*. Mexico D.F.: Mc Graw Hill.
- Hosseini, S. I. (2020). *Revisión de métodos cuantitativos para el análisis de la resiliencia de la cadena de suministro*. La Chanterrie, Francia.
- L., S. T. (1980). *El proceso analitico jerarquico*. New York: Mc Graw Hill.
- Liberatore, M. J. (2009). A literature review and some recommendations for future research. *Journal of Engineering and Technology Management*, 38–51.

- Mohamad, Y. y.-S. (2024). Modelo híbrido AHP-Programación entera para la selección de cartera de proyectos en condiciones de incertidumbre en el sector industrial. *Revista Internacional de Economía de la Producción*, 271.
- Mohammed, M. S.-S. (2023). *Un enfoque combinado AHP-TOPSIS para la selección de tecnología en un entorno incierto. oma de decisiones: Aplicaciones en gestión e ingeniería*, 522-540.
- Nydick, R. (2015). *La aplicación del proceso de jerarquía analítica en instituciones de educación superior*. Springer Nature, 22.
- Olson, D. (2010). *Ayudas para la toma de decisiones en problemas de selección*. Springer.
- Ramanathan, R. (2001). Proceso de Jerarquía Analítica. *Journal of Environmental Management*, 63, 27-35.
- Romero, S. (2014). *Evaluación Multicriterio*. Santiago de Chile: USACH.
- Saaty, T. (1980). *El proceso de jerarquía analítica: planificación, establecimiento de prioridades, asignación de recursos*. McGraw-Hill.
- Saaty, T. L. (2012). *Toma de decisiones para líderes*. Pittsburgh: RWS Publications.
- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2022). *Models, Methods, concepts & Applications of the Analytic Hierarchy process*. California, EEUU.: Springer.
- Tidd, J., & Besaant, J. (2018). *Gestión de la innovación: • Tidd, J., y Bessant, JR. (2018). Gestión de la innovación: Gestión de la innovación integrando el cambio tecnológico de mercado organizacional & Sons*. Open Journal of Business and management, 21.
- Torkayesh, A. M. (2022). Selección de proveedores sostenibles mediante un modelo híbrido de AHP y TOPSIS difuso. *Producción y consumo sostenibles*, 379-391.
- Vidal, L. A. (2011). *Utilizando un proceso Delphi y el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para evaluar la complejidad de los proyectos*.

CAPÍTULO III

**Diagnóstico empresarial y
de seguridad industrial en la
microempresa Textil Shalom de
La Paz, Bolivia**

Felix Orellana Sánchez

Universidad Mayor de San Andrés

<https://orcid.org/0009-0000-1055-964X>

Diagnóstico empresarial y de seguridad industrial en la microempresa Textil Shalom de La Paz, Bolivia

Resumen

El presente artículo analiza la situación organizacional y las condiciones de seguridad industrial de Textiles Shalom. La investigación parte del reconocimiento de que las microempresas constituyen un pilar fundamental de la economía nacional, aunque enfrentan limitaciones estructurales vinculadas a la gestión, la informalidad y la escasa aplicación de medidas de seguridad industrial y salud ocupacional. Se empleó la herramienta de diagnóstico empresarial FODA, que permite identificar debilidades internas relacionadas con la planificación, el posicionamiento y la gestión financiera, así como fortalezas en la experiencia técnica y la calidad del producto. Los resultados evidencian que la Industria Textil Shalom posee una estructura funcional consolidada, pero carece de estrategias formales para el crecimiento sostenido y la competitividad internacional. En el ámbito de la seguridad industrial, se realizó un diagrama Ishikawa, una evaluación normativa basada en el Decreto Ley N.º 16998 y la Norma Técnica de Seguridad NTS-009/23. Los resultados muestran un bajo nivel de cumplimiento: 28 % en la Ley General de Higiene y Seguridad Ocupacional y apenas 6 % en la NTS-009/23, lo cual revela la necesidad de implementar programas efectivos de prevención, capacitación y control de riesgos laborales. En conclusión, la investigación destaca la importancia de fortalecer la gestión empresarial y establecer una cultura preventiva en las microempresas textiles, con el fin de mejorar la productividad, garantizar el bienestar de los trabajadores y cumplir con las disposiciones legales vigentes en Bolivia.

Palabras clave: Diagnóstico, microempresa, gestión, seguridad industrial, industria textil.

Modeling macrophyte growth and its relationship with eutrophication in the Achocalla lagoons (Bolivia)

Abstract

The present article analyzes the organizational situation and the industrial safety conditions of Textiles Shalom. The research is based on the recognition that microenterprises constitute a fundamental pillar of the national economy, although they face structural limitations related to management, informality, and the limited implementation of industrial safety and occupational health measures. The TOWS business diagnostic tool was used to identify internal weaknesses related to planning, market positioning, and financial management, as well as strengths in technical experience and product quality. The results show that Industria Textil Shalom has a consolidated functional structure but lacks formal strategies for sustained growth and international competitiveness. In the field of industrial safety, an Ishikawa diagram and a regulatory assessment were carried out based on Supreme Decree No. 16998 and the Technical Safety Standard NTS-009/23. The results indicate a low level of compliance: 28% with the General Law of Hygiene and Occupational Safety and only 6% with NTS-009/23, revealing the need to implement effective programs for prevention, training, and occupational risk control. In conclusion, the research highlights the importance of strengthening business management and establishing a preventive culture in textile microenterprises in order to improve productivity, ensure worker well-being, and comply with current legal regulations in Bolivia.

Keywords: Diagnosis, microenterprise, management, industrial safety, textile industry.

Diagnóstico empresarial e de segurança industrial na microempresa Têxtil Shalom de La Paz, Bolívia

Resumo

O presente artigo analisa a situação organizacional e as condições de segurança industrial da empresa Têxtil Shalom. A pesquisa parte do reconhecimento de que as microempresas constituem um pilar fundamental da economia nacional, embora enfrentem limitações estruturais relacionadas à gestão, à informalidade e à reduzida aplicação de medidas de segurança industrial e saúde ocupacional. Utilizou-se a ferramenta de diagnóstico empresarial SWOT, que permite identificar fragilidades internas relacionadas ao planejamento, ao posicionamento e à gestão financeira, bem como forças vinculadas à experiência técnica e à qualidade do produto. Os resultados evidenciam que a Indústria Têxtil Shalom possui uma estrutura funcional consolidada, porém carece de estratégias formais para o crescimento sustentado e a competitividade internacional. No âmbito da segurança industrial, foi elaborado um diagrama de Ishikawa e realizada uma avaliação normativa baseada no Decreto-Lei nº 16998 e na Norma Técnica de Segurança NTS-009/23. Os resultados indicam um baixo nível de conformidade: 28% em relação à Lei Geral de Higiene e Segurança Ocupacional e apenas 6% na NTS-009/23, o que revela a necessidade de implementar programas eficazes de prevenção, capacitação e controle de riscos ocupacionais. Em conclusão, a pesquisa destaca a importância de fortalecer a gestão empresarial e estabelecer uma cultura preventiva nas microempresas têxteis, com o objetivo de melhorar a produtividade, garantir o bem-estar dos trabalhadores e cumprir as disposições legais vigentes na Bolívia.

Palavras chave: Diagnóstico, microempresa, gestão, segurança industrial, indústria têxtil.

Introducción

Las microempresas textiles en Bolivia constituyen un sector fundamental para la economía nacional por su capacidad de generar empleo y dinamizar la producción local, especialmente en áreas urbanas como la ciudad de La Paz. Sin embargo, enfrentan dificultades estructurales vinculadas a la gestión empresarial, la informalidad, la escasa planificación estratégica y la limitada aplicación de medidas de seguridad industrial y salud ocupacional. Estas deficiencias repercuten directamente en la productividad, la sostenibilidad y el bienestar de los trabajadores, lo que evidencia la necesidad de realizar diagnósticos integrales que permitan identificar sus debilidades y proponer estrategias de mejora en el sector.

El diagnóstico empresarial se configura como una herramienta analítica que permite conocer la situación real de una organización mediante la evaluación de sus áreas funcionales y su entorno competitivo. El diagnóstico empresarial es un proceso sistemático orientado a detectar los problemas que limitan la eficiencia de una empresa, identificar sus causas y diseñar alternativas de solución. En el caso de las microempresas, este tipo de análisis es importante para garantizar la estabilidad del negocio y orientar la toma de decisiones gerenciales con base en información objetiva y cuantificable.

Paralelamente, la seguridad industrial y la salud ocupacional representan elementos esenciales del desempeño organizacional, especialmente en el sector textil, donde los riesgos laborales asociados a maquinaria, posturas repetitivas, ventilación deficiente o exposición a sustancias químicas son frecuentes. Según la Organización Internacional del Trabajo (OIT, 2011), la seguridad y salud en el trabajo buscan prevenir lesiones y enfermedades laborales, promoviendo el bienestar físico y mental del trabajador y garantizando la continuidad productiva. En Bolivia, la Ley General de Higiene, Seguridad Ocupacional y Bienestar (D.L. 16998, 1979) establece los lineamientos técnicos y legales para la protección del trabajador y la gestión de riesgos en el entorno laboral.

Pese a la relevancia de estas temáticas, se observa que gran parte de las microempresas bolivianas carecen de una estructura organizativa formal y de políticas efectivas de seguridad industrial, lo que limita su capacidad de crecimiento y su cumplimiento normativo. En este contexto, la microempresa Textiles Shalom, ubicada en la ciudad de La Paz, constituye un caso representativo del sector por su tamaño, tipo de producción y condiciones laborales.

Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación es realizar un diagnóstico empresarial y de seguridad y salud ocupacional en la microempresa Textiles Shalom, mediante la aplicación de herramientas teóricas y metodológicas reconocidas (FODA, diagrama de Ishikawa, lista de cotejo), así como la revisión de la normativa legal vigente en materia de seguridad industrial.

La presente investigación se fundamenta en el supuesto de que la ausencia de una gestión empresarial estructurada y de una cultura preventiva en seguridad industrial incide negativamente en la productividad y sostenibilidad de las microempresas textiles. De este modo, el estudio busca contribuir al conocimiento académico y ofrecer una base empírica para el diseño de estrategias de mejora que fortalezcan la competitividad y el cumplimiento normativo en este tipo de unidades productivas, la integración entre diagnóstico empresarial y seguridad industrial es poco tratada en estudios previos del sector textil boliviano.

Herramientas del diagnóstico empresarial

Más allá de su aplicación técnica, las herramientas de diagnóstico como el FODA y el diagrama de Ishikawa se sustentan en principios teóricos de la gestión estratégica y la mejora continua. La Matriz FODA permite alinear la estructura interna de la organización con su entorno competitivo, facilitando la formulación de estrategias sostenibles. Por su parte, el diagrama de Ishikawa se enmarca en la gestión de la calidad total (TQM), al promover el análisis sistemático de causas y la eliminación de desperdicios, aspectos fundamentales para el desempeño eficiente de las microempresas. Su uso conjunto proporciona una visión integral que conecta la planeación, el control y la innovación en los procesos productivos, pilares esenciales en la ingeniería industrial moderna.

Diagrama espina de pescado

El diagrama de espina de pescado, también denominado diagrama causa-efecto o diagrama de Ishikawa, es una herramienta utilizada para analizar un problema mediante la identificación de sus causas y subcausas hasta llegar a su origen principal. Su representación gráfica, similar a la estructura de un pescado, permite visualizar la relación entre los distintos factores que generan una situación problemática, favoreciendo la toma de decisiones correctivas

Matriz FODA

La matriz FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas) constituye una herramienta estratégica ampliamente

empleada en la gestión empresarial. Permite identificar factores internos y externos que afectan el desempeño organizacional y diseñar estrategias de acción.

Los cruces entre sus componentes originan cuatro tipos de estrategias posibles:

- FO: Utilizar las fortalezas para aprovechar las oportunidades.
- FA: Emplear las fortalezas para minimizar las amenazas.
- DO: Superar las debilidades aprovechando las oportunidades.
- DA: Reducir las debilidades y minimizar las amenazas.

Seguridad industrial

La seguridad en el trabajo o seguridad laboral, son las medidas que adopta una organización para prevenir los accidentes que ocasionan daños a los operarios, mientras estos realizan sus actividades en la empresa.

Según la Ley General de Higiene y Seguridad Ocupacional y Bienestar, indica que Seguridad Industrial es: “El conjunto de procedimientos y normas de naturaleza técnica, legal y administrativa, orientado a la protección del trabajador, de los riesgos contra su integridad física y sus consecuencias, así como mantener la continuidad del proceso productivo y la intangibilidad patrimonial del centro de trabajo” (D.L. 16998, 1979, P. 3).

Seguridad e higiene en el trabajo

La Organización Internacional del Trabajo (OIT), define a la Seguridad y Salud en el Trabajo (SST) como: “Disciplina que trata de la prevención de las lesiones y enfermedades relacionadas con el trabajo, y la protección y promoción de la salud de los trabajadores” (Organización Internacional del Trabajo, 2011, P. 1).

La Seguridad en el trabajo, busca identificar y eliminar los riesgos que los mismos pueden resultar en lesiones o accidentes, ello implica la implementación de Equipos de Protección Personal (EPP).

La Higiene en el Trabajo, implica todos los factores relacionados con la salud en el trabajo, al igual que las condiciones ambientales, el cual incluye la exposición a sustancias tóxicas o peligrosas.

Salud ocupacional

Según la OIT y la OMS, la salud ocupacional es “la promoción y mantenimiento del mayor grado de bienestar físico, mental y social de los trabajadores en todas las ocupaciones mediante la prevención de las desviaciones de la salud, control de riesgos y la adaptación del trabajo a las personas, y las personas a sus puestos de trabajo”.

Micro , pequeñas y medianas empresas (MIPYMES)

Las micro y pequeñas empresas, se caracterizan por:

- a)** Sustentarse en el uso intensivo de la fuerza de trabajo personal y familiar del titular. Accesoriamente y en función de la demanda, incorporan eventualmente fuerza de trabajo asalariada.
- b)** Combinar la actividad económica basada en el conocimiento y experiencia práctica del titular de la unidad productiva y su capacidad de gestión.
- c)** Baja aplicación de máquinas y herramientas de trabajo, con limitado acceso a mercados y al financiamiento.
- d)** Producen principalmente para el mercado interno, predominantemente bienes salario o servicios a sus pares micros y pequeños productores y/o a la comunidad donde actúan.
- e)** Dedicarse a la actividad de transformación, comercialización de sus productos manufacturados y/o servicios.

Las MIPYMES desempeñan un rol fundamental en la economía boliviana como país en vías de desarrollo, pero un gran número de ellas desarrollan sus actividades en la informalidad y el contrabando (Wilde, 2024). Esto se debe principalmente a su relación con la generación de empleo, creación de riqueza, además de ser una fuente sustancial de suministro y abastecimiento de servicios para las grandes empresas (Estrada, García, & Sánchez, 2009).

En Bolivia para la clasificación de las empresas, el Ministerio de Desarrollo Productivo y Economía Plural (MDPyEP) clasifica de acuerdo al número de trabajadores, activos productivos, ventas anuales y exportaciones anuales medias en unidad de fomento a la vivienda (UFV).

Tabla 1: Tamaño de empresas en Bolivia

EMPRESAS	Nº de Empleados	Activos productivos UFV	Ventas Anuales UFV	Exportaciones Anuales UFV
Micro Empresa	Menor igual a 9	Menor igual a 150.000	Menor igual a 600.000	Menor igual a 75.000
Pequeña Empresa	De 10 a 19	150.001 - 1.500.000	600.001 - 3.000.000	75.001 - 750.000
Mediana Empresa	De 20 a 49	1.500.001 - 6.500.000	3.000.001 - 12.000.000	750.001 - 7.500.000
Gran Empresa	Mayor a 50	Mayor igual a 6.000.001	Mayor igual a 12.000.001	Mayor igual a 7.500.001

Fuente: Reglamento para el registro y acreditación de unidades productivas, 2009 Ministerio de Desarrollo Productivo y Economía Plural

Ahora apreciamos el personal ocupado en las micro y pequeñas unidades económicas, apreciando que el sector que más aporta a la economía nacional es el comercio

Tabla 2: Actividades económicas de las micro y pequeñas empresas 2010- 2018

Actividades	2010			2018		
	Hombres	Mujeres	Total	Hombres	Mujeres	Total
Industria	33.900	14.528	48.428	59.856	41.707	101.563
Comercio	69.008	117.500	186.508	134.747	178.560	313.306
Servicios	108.050	75.085	183.135	94.045	131.351	225.396
Total	210.957	207.114	418.071	288.648	351.618	640.265

Fuente: Instituto Nacional De Estadística (INE) 2018, número de micro y pequeñas unidades económicas.

Desarrollo

La investigación es de tipo descriptiva y aplicada, con enfoque cualitativo-cuantitativo. Se emplearon herramientas de diagnóstico empresarial (FODA, matriz de riesgos, Ishikawa) y una evaluación normativa basada en el Decreto Ley N.º 16998 y la Norma Técnica NTS-009/23. La unidad de análisis fue la microempresa Textil Shalom, seleccionada por su representatividad en el sector textil paceño. Los datos se obtuvieron mediante observación directa, entrevistas con el personal y revisión documental de registros internos.

Antecedentes de la empresa

La empresa Textiles Shalom fue fundada el 16 de marzo de 1982 en la zona de Villa Victoria, por el señor David Siñani y su esposa. En sus inicios, la producción se realizaba de manera artesanal, utilizando máquinas manuales para la confección de prendas. Con el paso del tiempo, y ante la creciente competitividad del mercado y las mayores exigencias de los clientes, la empresa incorporó maquinaria industrial, lo que permitió mejorar la calidad y el volumen de su producción. Desde el año 2008, Textiles Shalom exporta sus productos elaborados con fibra de alpaca a Chile y Perú.

Datos generales

La empresa Textiles Shalom se encuentra legalmente constituida en el departamento de La Paz, provincia Murillo, zona Central calle Batalla Montenegro N.º 927, en las inmediaciones de la Plaza

Riosinho. Se dedica a la fabricación de tejidos y prendas de punto, destacándose por la calidad de sus productos y su trayectoria en el sector textil.

Estructura orgánica

La estructura orgánica representa el sistema de gestión organizacional que permite definir y delimitar las funciones de cada una de las áreas que conforman (Chiaventa,2007). Textiles Shalom, estableciendo sus niveles jerárquicos y relaciones de autoridad. Dicha estructura se muestra en la siguiente figura.

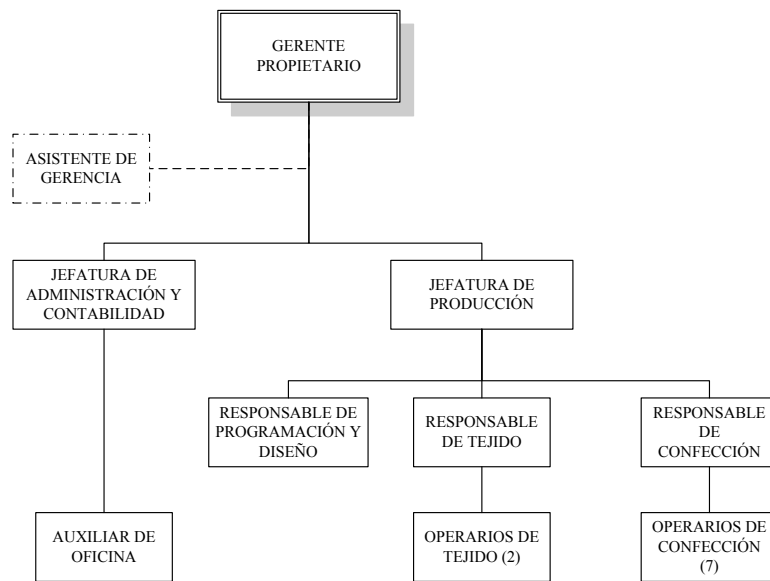


Figura 1. Organigrama Industria Textil Shalom 2024
Fuente: Elaborado con base a datos de Industria Textil Shalom

Misión de la Empresa

La misión de la empresa es brindar el mejor servicio posible a sus clientes, ofreciendo prendas de alta calidad y confort que generen plena satisfacción en el momento de su uso.

Análisis FODA

A continuación, se presenta el análisis FODA de la empresa, en el cual se identifican y describen sus fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas, con el propósito de evaluar su situación interna y externa.

Tabla 3: Matriz FODA

Factores externos	Oportunidades	Amenazas
	Crecimiento del mercado.	Entrada de nuevos competidores al mercado.
	No existen empresas especializadas en la producción de prendas	Competencia.
Factores internos	Poder contar con tiendas propias	Inestabilidad económica.
Fortalezas	Al poseer la habilidad en la creación de diseños y modelos exclusivos, con acabados finos y productos de alta calidad elaborados en lana, además de contar con la experiencia necesaria para su producción, la empresa puede aprovechar la oportunidad que representa el crecimiento del mercado y la ausencia de empresas especializadas en la confección de chompas. De esta manera, a futuro, sería posible proyectar la apertura de tiendas propias.	Al contar con experiencia en el área de producción y ser especialistas en la confección de chompas, la empresa se encuentra en condiciones de competir eficazmente tanto con las empresas actuales del sector como con nuevos competidores que puedan ingresar al mercado.
Habilidad para la creación de modelos y diseños exclusivos.		
Experiencia en el área de confección y producción.		
Contar con presencia en redes sociales		
Ser especialistas en la confección de chompas		
Alta calidad del producto.		
Prendas hechas con lana		
Debilidades	Existe un mercado prometedor para las prendas elaboradas con lana; sin embargo, al ser una empresa nueva y no contar aún con el posicionamiento necesario, resulta difícil aprovechar plenamente las oportunidades que este mercado ofrece. Además, la falta de trayectoria genera limitaciones para abastecer la demanda y reducir los costos de producción, debido al bajo volumen de fabricación actual.	Al ser nuevos en el mercado y no contar aún con un adecuado posicionamiento, aspecto fundamental para lograr la preferencia del cliente, resulta difícil competir tanto con los nuevos competidores como con las empresas ya establecidas en el sector.
Posicionamiento.		
Nuevos en el mercado.		
Economías a escala		

Fuente: Elaborado con base en datos recopilados

Objetivos estratégicos

A través del análisis de la matriz FODA, se formularon los objetivos estratégicos en función de las potencialidades, desafíos, limitaciones y riesgos identificados durante el diagnóstico empresarial.

Potencialidades

- Incrementar las ventas al ingresar al mercado, aprovechando el crecimiento del sector textil y destacando los diseños y modelos exclusivos, así como el acabado y la calidad de las prendas, especialmente por el uso de lana de alta calidad en su confección.
- Aumentar la producción de prendas, aprovechando la amplia experiencia adquirida en el rubro textil y la especialización en la elaboración de chompas.

Desafíos

- Diferenciar los productos frente a la competencia mediante creaciones innovadoras y de alta calidad, aprovechando la experiencia y habilidad en el diseño de modelos exclusivos.

Limitaciones

- Posicionar la marca a través de estrategias de promoción y publicidad que fortalezcan su reconocimiento y aumenten la participación en el mercado.
- Acceder directamente al consumidor final mediante la apertura de puntos de venta propios.

Riesgos

- Ampliar la capacidad productiva mediante el incremento gradual de maquinaria y personal, con el fin de responder de manera eficiente al aumento de la demanda y evitar retrasos en los pedidos.

El análisis FODA permitió identificar las fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas que inciden en la gestión estratégica de Textiles Shalom, revelando limitaciones en la planificación, posicionamiento y control operativo. Estas debilidades, además de afectar la competitividad, tienen repercusiones directas en la gestión de la seguridad industrial, ya que la ausencia de procedimientos formales y de una cultura organizativa estructurada incrementa la exposición a riesgos laborales. En este sentido, el siguiente análisis mediante el diagrama de Ishikawa complementa el diagnóstico empresarial al profundizar en las causas específicas que originan dichas deficiencias, estableciendo una conexión entre la gestión administrativa y la seguridad ocupacional como componentes integrados del desempeño organizacional.

Análisis Ishikawa

A continuación, se presenta el análisis de causas y efectos mediante el diagrama de Ishikawa, herramienta que permite identificar y clasificar los factores que inciden en la problemática de la empresa. El análisis se estructura en torno a las seis "M" (Método, Mano de obra, Maquinaria, Materiales, Medio ambiente y Medición), con el propósito de determinar las causas raíz que afectan el desempeño en el tema de seguridad industrial y salud ocupacional.

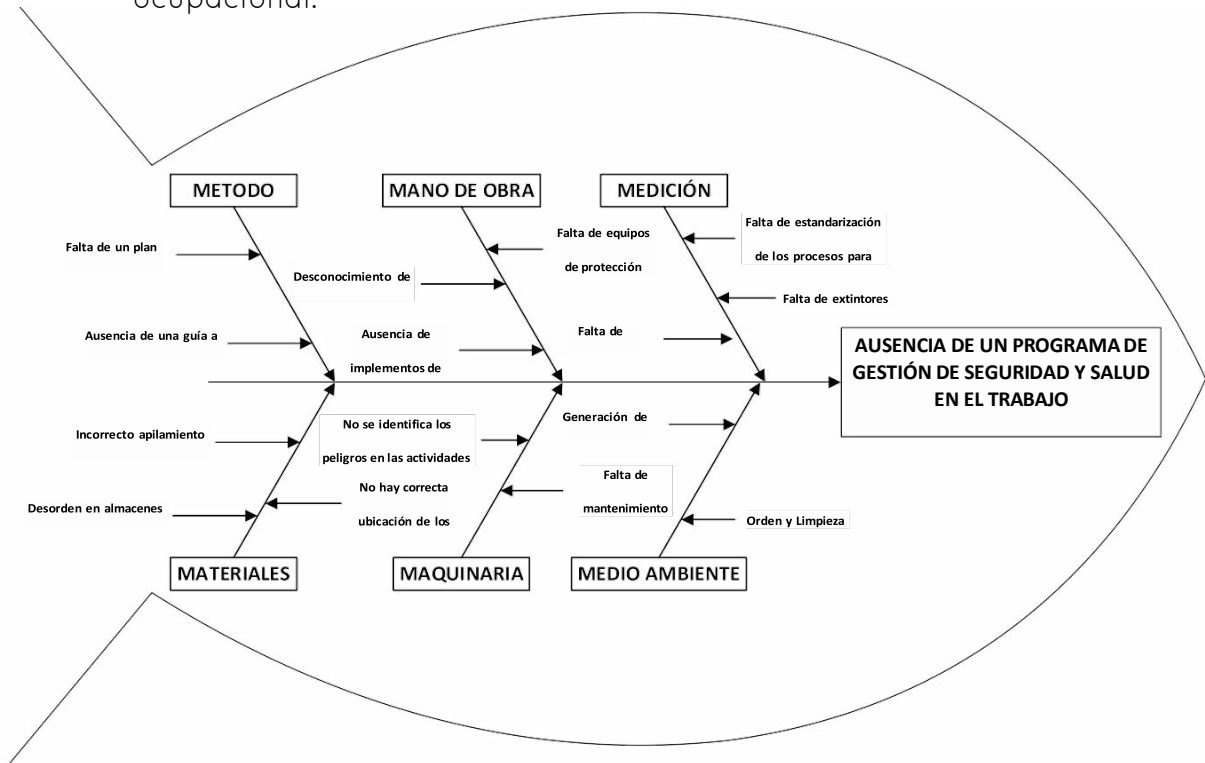


Diagrama 1. Diagrama Industria Textil Shalom
Fuente: Elaborado con base a datos recopilados

El problema central identificado es la ausencia del PGSST, situación que se manifiesta como consecuencia de diversas causas agrupadas en categorías relacionadas con la capacitación del personal, las condiciones del entorno laboral, la organización de los procesos productivos y el orden y mantenimiento de las instalaciones.

En síntesis, el diagrama de Ishikawa demuestra que la ausencia del PGSST no responde a una sola causa, sino al conjunto de deficiencias en la gestión administrativa, técnica y operativa de la empresa. Por tanto, se requiere la implementación integral de un Programa de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo, que contemple la capacitación del personal, la dotación de equipos

de protección, la señalización de áreas críticas, el mantenimiento preventivo de las instalaciones y la estandarización de los procesos productivos. Solo mediante estas acciones será posible fortalecer la cultura preventiva, reducir la siniestralidad laboral y cumplir con la normativa vigente.

Resultados del diagnóstico del D.L. N° 16998

La evaluación se llevó a cabo en cumplimiento del Decreto Ley N° 16998, Ley General de Higiene y Seguridad Ocupacional y Bienestar, específicamente en lo establecido en el Segundo Libro, referido a “Las condiciones mínimas de higiene y seguridad en el trabajo”. Este marco normativo establece las disposiciones técnicas generales que deben observar las empresas en cuanto a la prevención de riesgos laborales, la protección de la salud de los trabajadores y la creación de ambientes laborales seguros y adecuados.

En este contexto, se procedió a analizar las condiciones existentes en la Microempresa Textil Shalom, verificando el cumplimiento de los criterios básicos de higiene, seguridad y bienestar ocupacional. La evaluación consideró aspectos como la ventilación, iluminación, señalización, equipos de protección personal, orden y limpieza, entre otros elementos esenciales para garantizar un entorno de trabajo saludable.

Los resultados obtenidos de esta revisión normativa y técnica se sintetizan en la Tabla 4, donde se presentan los niveles de cumplimiento observados en cada uno de los factores evaluados, identificando las principales deficiencias, riesgos potenciales y áreas de mejora que permitirán orientar futuras acciones correctivas y preventivas dentro de la empresa.

Tabla 4. Evaluación de Cumplimiento del D.L. N° 16998, Ley General de Higiene y Seguridad Ocupacional y Bienestar

EVALUACIÓN: D.L. N° 16998, LEY GENERAL DE HIGIENE Y SEGURIDAD OCUPACIONAL Y BIENESTAR	SI	NO
CAP. I - DE LOS LOCALES DE LOS ESTABLECIMIENTOS DE TRABAJO	45%	55%
CAP. II - DE LA PREVENCIÓN Y PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS	20%	80%
CAP. III - RESGUARDO DE MAQUINARIAS	54%	46%
CAP. IV - DEL EQUIPO ELÉCTRICO	19%	81%
CAP. V - LAS HERRAMIENTAS MANUALES Y HERRAMIENTAS PORTATILES ACCIONADAS POR FUERZA MOTRIZ	38%	62%
CAP. VI - DE LAS CALDERAS Y RECIPIENTES A PRESIÓN	16%	84%
CAP. VII - DE LOS HORNOS Y SECADORES	N.A.	

CAP. VIII - DEL MANEJO Y TRANSPORTE DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN Y CONSERVACIÓN	N.A.	
CAP. IX - DE LAS SUBSTANCIAS PELIGROSAS Y DAÑINAS	0%	100%
CAP. X - DE LAS RADIACIONES PELIGROSAS	0%	100%
CAP. XI - DEL MANTENIMIENTO DE INSTALACIONES	57%	43%
CAP. XII - PROTECCIÓN DE LA SALUD	35%	65%
CAP. XIII - DE LAS ROPAS DE TRABAJO Y PROTECCIÓN PERSONAL	0%	100%
CAP. XIV - DE LA SELECCIÓN DE TRABAJADORES	0%	100%
CAP. XV - DE LA SEÑALIZACIÓN	0%	100%
CAP. XVI - DEL FINANCIAMIENTO Y DE LAS DISPOSICIONES TRANSITORIAS	N.A.	
TOTAL, CUMPLIMIENTO D.L. N° 16998	28%	72%

Fuente: Elaboración con base en datos recabados de Industria Textil Shalom

De la evaluación realizada al D.L. N° 16998, Ley General de Higiene y Seguridad Ocupacional y Bienestar, descrita en la Tabla 3-1, se cumple el 28% y no se cumple el 72%, de los 16 capítulos, 3 capítulos no aplican a la empresa.

Resultados del diagnóstico de la NTS-009/23

La presente evaluación se efectuó en conformidad con la Norma Técnica de Seguridad NTS-009/23 - Programa de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (PGSST), emitida por el Ministerio de Trabajo, Empleo y Previsión Social, la cual establece los lineamientos y procedimientos necesarios para la implementación y seguimiento de sistemas de gestión orientados a la prevención de riesgos laborales.

El proceso evaluativo se desarrolló mediante una inspección técnica in situ en las instalaciones de la Microempresa Textil Shalom, con el propósito de identificar el grado de cumplimiento de los requisitos normativos y técnicos establecidos en el PGSST. Dicha inspección permitió recopilar información relevante sobre la organización de la seguridad, las políticas de prevención, la gestión de riesgos, la capacitación del personal, el control de emergencias, y otros aspectos esenciales que conforman un entorno laboral seguro y saludable.

El diagnóstico se basó en el análisis de los 13 componentes técnicos que integran el contenido estructural del Programa de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo, los cuales abarcan desde la planificación, implementación, seguimiento y evaluación de las acciones preventivas hasta la promoción del bienestar físico y mental de los trabajadores.

En la Tabla 5 se presentan de manera detallada los resultados obtenidos del diagnóstico aplicado, mostrando el nivel de cumplimiento alcanzado por la empresa en cada uno de los puntos evaluados. Asimismo, se evidencian las fortalezas, debilidades y áreas de mejora que servirán como base para la elaboración de estrategias correctivas y la optimización del sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional.

Tabla 5. Evaluación de Cumplimiento de la NTS-009/23 - Programa de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo

EVALUACIÓN: NTS-009/23 - PROGRAMA DE GESTIÓN DE SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO	SI	NO
1. COMPRENSIÓN DE LA ACTIVIDAD LABORAL Y DE SU CONTEXTO EN SST	25%	75%
2. LIDERAZGO Y COMPROMISO DE SST	0%	100%
3. COMITÉ MIXTO Y/O COORDINADOR DE HIGIENE, SEGURIDAD OCUPACIONAL Y BIENESTAR	0%	100%
4. PLANIFICACIÓN	0%	100%
5. ESTUDIOS / MONITOREOS DE HIGIENE	0%	100%
6. ACTIVIDADES DE ALTO RIESGO	0%	100%
7. INDUCCIÓN, CAPACITACIÓN, CONCIENTIZACIÓN Y COMUNICACIÓN	0%	100%
8. DOTACIÓN DE ROPA DE TRABAJO Y EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL	0%	100%
9. INSPECCIONES INTERNAS DE SST	0%	100%
10. PLAN DE EMERGENCIAS	0%	100%
11. INVESTIGACIÓN Y GESTIÓN DE ACCIDENTES DE TRABAJO Y ACCIONES CORRECTIVAS	0%	100%
12. MEDICINA DE TRABAJO Y SALUD OCUPACIONAL	0%	100%
13. REPORTES DE SEGUIMIENTO INTERNO Y AUTOEVALUACIÓN	0%	100%
TOTAL, CUMPLIMIENTO NTS-009/23	6%	94%

Fuente: Elaboración con base en datos recabados de Industria Textil Shalom

La evaluación de la NTS-009/23, nos muestra que se cumple el 6% y el 94% falta por realizar. Esto refleja un desafío significativo en el diseño del Programa de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (PGSST), en áreas clave que requieren una atención inmediata y medidas correctivas para mejorar la seguridad y salud en el entorno laboral.

Conclusiones

El diagnóstico empresarial permitió identificar que la microempresa Textil Shalom cuenta con una estructura organizativa funcional y una sólida experiencia técnica en el sector textil. No obstante, se evidencian debilidades relacionadas con el posicionamiento de marca, la planificación estratégica, el acceso a mercados internacionales y la limitada gestión financiera y tecnológica. Estos factores restringen su competitividad y capacidad de crecimiento sostenido.

El análisis FODA refleja un entorno empresarial desafiante, en el que convergen oportunidades de expansión y especialización, pero también amenazas vinculadas a la competencia y a la inestabilidad económica. En este sentido, la implementación de estrategias orientadas al fortalecimiento de la gestión financiera, la innovación y la mejora continua resulta esencial para consolidar la presencia de la empresa en el mercado.

En el ámbito de la seguridad y salud ocupacional, los resultados del diagnóstico normativo muestran un bajo nivel de cumplimiento: 28 % en la Ley General de Higiene y Seguridad Ocupacional y Bienestar (D.L. N.º 16998) y apenas 6 % en la Norma Técnica NTS-009/23 - Programa de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo. Estas cifras evidencian la ausencia de políticas estructuradas de prevención y la necesidad urgente de implementar un sistema integral de gestión de seguridad industrial y salud ocupacional.

La investigación demuestra que la seguridad y salud en el trabajo no deben considerarse únicamente como un requisito legal, sino como un componente estratégico que incide directamente en la productividad, la sostenibilidad y el bienestar del personal. En consecuencia, se recomienda diseñar e implementar programas de capacitación, planes de emergencia, mantenimiento preventivo y dotación de equipos de protección personal, garantizando el cumplimiento de la normativa vigente y la creación de una cultura preventiva dentro de la organización.

Finalmente, el estudio aporta una base diagnóstica útil para el desarrollo de estrategias de mejora empresarial y de seguridad industrial aplicables no solo a Textiles Shalom, sino también a otras microempresas del sector textil boliviano. Su aplicación permitirá optimizar los procesos internos, elevar la competitividad y promover entornos laborales más seguros y sostenibles. Los resultados del estudio no solo aportan al conocimiento académico, sino que constituyen una herramienta aplicable para la formulación de políticas de fortalecimiento empresarial y de seguridad ocupacional en las microempresas textiles, contribuyendo al cumplimiento normativo y a la competitividad sostenible del sector.

Referencias

- Bolivia. (1979). *Ley General de Higiene y Seguridad Ocupacional y Bienestar*, D.L. N° 16998. Gaceta Oficial del Estado Plurinacional de Bolivia.
- Bolivia. Ministerio de Trabajo, Empleo y Previsión Social. (2023). NTS-009/23 - *Programa de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo*. Gaceta Oficial del Estado Plurinacional de Bolivia.
- Chiavenato, I. (2007). *Introducción a la Teoría General de la Administración* (7ª ed.). McGraw-Hill Interamericana.
- Estrada Bárcenas, R., García Pérez de Lema, D., & Sánchez Trejo, V. G. (2009). Factores determinantes del éxito competitivo en la Pyme: Estudio Empírico en México. *Revista Venezolana de gerencia*, 14(46), 169-182. https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S1315-99842009000200002&script=sci_arttext
- Flores Fernandez, A. R. (2021). *Aporte económico e industrial de las micro, pequeñas y medianas empresas durante y post pandemia COVID-19*. Universidad Mayor de San Andrés. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10408543>
- Jiménez, J., & Rojas, F. (2016). Aplicación de inductores generadores de valor para la gestión en microempresas. *En-Contexto*, 4(5), 99-116.
- Martín, M. I. M. (2009). *Factores de competitividad de la Pyme española 2008*. EOI Escuela de Organización Industrial. <https://bit.ly/3LIJKEf>
- Organización Mundial del Comercio. (2016). *Informe sobre el comercio mundial 2016: Igualdad de condiciones para el comercio de las pymes*. OMC. https://www.wto.org/spanish/res_s/publications_s/wtr16_s.htm
- Rodríguez Arrieta, G. A., Cano Lara, E. D., & Ruiz Vélez, A. L. (2019). La competitividad en las microempresas en Manta 2019. *Revista San Gregorio*, (35), 51-69. <https://doi.org/10.36097/rsan.v1i35.1141>
- Trabajo, O. I. (2011). *Sistema de Gestión de la SST: Una herramienta para la mejora continua*. Ginebra: Issa.
- Wilde Rivera, C. (2024). *Políticas públicas para estimular la creación y sostenibilidad de micros, pequeñas y medianas empresas en Bolivia* (Doctoral dissertation). <https://repositorio.unini.edu.mx/id/eprint/11294/>
- Ycaza, D. E. M., & Riofrío, A. M. S. (2016). Factores de competitividad orientados a la pequeña y mediana empresa (PYME) en Latinoamérica: Revisión de la literatura. *Revista San Gregorio*, (15), 104-111

CAPÍTULO IV

Optimización del control de gestión financiera en microempresas de Bolivia mediante un dashboard con KPI's

Felix Orellana Sánchez

Universidad Mayor de San Andrés

<https://orcid.org/0009-0000-1055-964X>

Optimización del control de gestión financiera en microempresas de Bolivia mediante un dashboard con KPI's

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo diseñar un sistema de control de gestión financiera aplicando indicadores clave de desempeño (KPI's) integrados en un dashboard, orientado a mejorar la toma de decisiones en microempresas de Bolivia. El estudio parte del reconocimiento de que las microempresas constituyen un pilar fundamental de la economía nacional, aunque presentan limitaciones en su gestión financiera y en el uso de herramientas tecnológicas para el control y análisis de resultados. La metodología se basó en el análisis de estados financieros (Estado de Resultados y Balance General) y en la aplicación de indicadores de liquidez, endeudamiento, rentabilidad y eficiencia operativa. Estos datos fueron organizados y procesados mediante tablas dinámicas en Excel, permitiendo la construcción de un dashboard interactivo que integra los principales KPI's financieros. Los resultados evidencian que la utilización de dashboards facilita la visualización integral de la información financiera y constituye una herramienta con potencial para mejorar la eficiencia operativa, fortalecer la planificación y promover una gestión más transparente y orientada a resultados. Se concluye que la integración de KPI's financieros en un dashboard constituye una herramienta práctica y adaptable, que potencia la sostenibilidad y competitividad de las microempresas en contextos de alta informalidad.

Palabras clave: Microempresa, gestión financiera, dashboard, indicadores claves de desempeño KPI's, toma de decisiones.

Optimization of financial management control in microenterprises in Bolivia through a KPI-Based Dashboard

Abstract

The present research aims to design a financial management control system applying key performance indicators (KPI's) integrated into a dashboard, oriented toward improving decision-making in microenterprises in Bolivia. The study is based on the recognition that microenterprises constitute a fundamental pillar of the national economy, although they present limitations in their financial management and in the use of technological tools for controlling and analyzing results. The methodology was based on the analysis of financial statements (Income Statement and Statement of Balance Sheet) and the application of liquidity, indebtedness, profitability, and operational efficiency indicators. These data were organized and processed using Excel pivot tables, enabling the construction of an interactive dashboard that integrates the main financial KPI's. The results show that the use of dashboards facilitates a comprehensive visualization of financial information and constitutes a tool with the potential to improve operational efficiency, strengthen planning, and promote more transparent and results-oriented management. It is concluded that the integration of financial KPIs into a dashboard represents a practical and adaptable tool that enhances the sustainability and competitiveness of microenterprises in contexts of high informality.

Keywords: Microenterprise, financial management, dashboard, key performance indicators KPI's, decision-making.

Otimização do controle de gestão financeira em microempresas da Bolívia por meio de um dashboard com KPI's

Resumo

A presente pesquisa tem como objetivo desenvolver um sistema de controle de gestão financeira aplicando indicadores-chave de desempenho (KPI's) integrados em um dashboard, orientado para melhorar a tomada de decisões em microempresas da Bolívia. O estudo parte do reconhecimento de que as microempresas constituem um pilar fundamental da economia nacional, embora apresentem limitações em sua gestão financeira e no uso de ferramentas tecnológicas para o controle e análise de resultados. A metodologia baseou-se na análise das demonstrações financeiras (Demonstração de Resultados e Balanço Patrimonial) e na aplicação de indicadores de liquidez, endividamento, rentabilidade e eficiência operacional. Esses dados foram organizados e processados por meio de tabelas dinâmicas no Excel, possibilitando a construção de um dashboard interativo que integra os principais KPI's financeiros. Os resultados evidenciam que o uso de dashboards facilita a visualização integral das informações financeiras e constitui uma ferramenta com potencial para melhorar a eficiência operacional, fortalecer o planejamento e promover uma gestão mais transparente e orientada a resultados. Conclui-se que a integração de KPI's financeiros em um dashboard constitui uma ferramenta prática e adaptável, que potencializa a sustentabilidade e a competitividade das microempresas em contextos de alta informalidade.

Palavras chave: Microempresa, gestão financeira, dashboard, indicadores-chave de desempenho (KPI's), tomada de decisão.

Introducción

La tecnología se ha convertido en una herramienta esencial de una empresa siendo parte de la vida cotidiana de las personas y de la sociedad. En este sentido, el uso de herramientas digitales y sistemas de información ha transformado la manera en que las organizaciones administran sus recursos, permitiendo un acceso más eficiente a los datos financieros y operativos para la toma de decisiones estratégicas (Kaplan & Norton, 2007). La aplicación de tecnologías de control, como los dashboards y los indicadores clave de desempeño (KPI's), constituye una práctica fundamental dentro del enfoque moderno del control de gestión, entendido como el proceso que traduce los objetivos estratégicos de una empresa en acciones operativas medibles.

De acuerdo con un informe del Fondo Monetario Internacional (FMI) titulado "Economías sombrías en todo el mundo: ¿Qué aprendimos en los últimos años?" del 2019, Bolivia tiene el mercado informal más grande del mundo con una tasa aproximada del 80%, siendo las microempresas del grupo de MIPYMES (Micro, Pequeña y Medianas empresas) las que se encuentran en este mercado informal (Cruz, 2021). Debido principalmente a una precaria gestión administrativa, productiva, financiera y falta de políticas tributarias y de emprendimiento adecuadas para este sector.

En los países en desarrollo, las MIPYMES son instrumentos esenciales de inclusión social (jóvenes, mujeres, etc.) a la vida económica. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Organización de las Naciones Unidas destacan la dimensión de reducción de la pobreza asociada a las microempresas y las pymes, lo que pone de relieve la importancia de este tema. Sin embargo, las microempresas y las pymes son menos productivas que las empresas de mayor tamaño. A causa de esa baja productividad y las mayores tasas de abandono de la actividad que registran las MIPYMES, el empleo en ellas es menos estable y está peor remunerado que en las grandes empresas. En realidad, la mayor parte de los puestos de trabajo que se destruyen corresponden a microempresas. Por otra parte, solo algunas MIPYMES participan en la innovación, que es la fuente esencial del crecimiento económico. (Organización Mundial del Comercio, 2016, p. 16).

En el ámbito internacional, varios autores destacan que la implementación de sistemas de control de gestión mediante KPI's contribuye a mejorar la eficiencia y transparencia en la administración de recursos (Murillo Valverde et al., 2024). Estos sistemas permiten integrar la información financiera con la

operativa, favoreciendo el seguimiento de objetivos, la identificación de desviaciones y la toma de decisiones informadas. El uso de dashboards, por su parte, representa una herramienta visual interactiva que sintetiza datos complejos en indicadores comprensibles, facilitando la interpretación de resultados y la comunicación dentro de la organización.

El presente estudio tiene como objetivo general diseñar un sistema de control de gestión financiera para las microempresas en Bolivia, aplicando un dashboard con KPI's que permita monitorear indicadores clave de liquidez, rentabilidad, endeudamiento y eficiencia operativa. A diferencia de estudios previos que aplican dashboards en contextos empresariales consolidados, esta investigación adapta la herramienta a microempresas bolivianas que operan en condiciones de informalidad y limitaciones tecnológicas, constituyendo una innovación metodológica y contextual de relevancia práctica

Desarrollo

El control de gestión constituye una de las funciones estratégicas más importantes dentro de las organizaciones, ya que permite vincular la planificación con la ejecución y el control de resultados. Según Kaplan y Norton (2007), el control de gestión busca traducir los objetivos estratégicos en indicadores medibles, promoviendo un seguimiento sistemático del desempeño organizacional. En las microempresas, este proceso es fundamental para garantizar la sostenibilidad financiera, debido a su limitada estructura administrativa y la falta de mecanismos formales de evaluación.

Dentro de este marco, los indicadores clave de desempeño (Key Performance Indicators, KPI's) representan una herramienta esencial del control de gestión moderno. Estos indicadores permiten medir, comparar y monitorear los resultados financieros y operativos de manera objetiva, facilitando la toma de decisiones basadas en evidencia. Gitman y Zutter (2012) explican la importancia del análisis de indicadores financieros; a partir de ello puede interpretarse que un uso adecuado de KPI's ayuda a identificar fortalezas y debilidades financieras, contribuyendo a la mejora continua de las organizaciones.

En este contexto, los dashboards surgen como instrumentos tecnológicos que integran y visualizan los KPI's en tiempo real, permitiendo transformar grandes volúmenes de datos en información estratégica. Un dashboard es una herramienta interactiva de gestión que consolida información relevante de distintas áreas de la empresa y la presenta de manera visual y comprensible,

para apoyar la toma de decisiones (Cuozzo, 2023). A diferencia de los informes tradicionales, que requieren interpretación manual, los dashboards facilitan una lectura inmediata del desempeño organizacional a través de gráficos, colores e indicadores dinámicos. Algunas características que debe tener un Dashboard son:

Personalizado. Un Dashboard debe contener únicamente los KPI's que sean relevantes para el departamento o proceso que nos ocupa. Para orientarlo, podemos pensar en las preguntas principales a las que queremos responder.

Visual. La idea de un Dashboard es que podamos obtener la información que buscamos a golpe de vista. Por ello, los datos se presentan en forma de gráficos y debemos contar con indicadores rápidos a través de claves de color, flechas hacia arriba o abajo o cifras destacadas.

Práctico. La función principal de un Dashboard siempre debe ser orientar las acciones de nuestro equipo. Por tanto, debe facilitarnos la información necesaria para que podamos saber cuáles son los siguientes pasos a seguir para mejorar los resultados.

Importancia del uso de dashboard en las microempresas

Permite medir múltiples KPI's y métricas al mismo tiempo. El panel de control puede mostrar datos recopilados de diferentes fuentes, como por ejemplo soluciones de analítica web, métricas de redes sociales y datos de nuestro CRM. De esta manera, será mucho más fácil compararlos entre ellas y ver su evolución.

Es fácil de comprender. Un buen Dashboard presenta un puñado de métricas fundamentales de manera clara y visual, de tal manera que no hace falta ser experto en análisis para comprenderlo.

Hace que los datos sean fácilmente accesibles. Si contamos con un Dashboard sincronizado automáticamente en la nube, podemos crear diferentes usuarios para que todo el equipo comparta la misma información desde cualquier parte. Incluso es posible proyectar el Dashboard permanentemente en una pantalla en la oficina para que todo el equipo vea lo que está ocurriendo en tiempo real.

Hace que los informes sean más eficientes. Contar con un panel de control centralizado es un enorme ahorro de tiempo. En lugar de tener que recopilar datos dispersos en diferentes fuentes y crear tus propios gráficos, los Dashboard hacen todo el trabajo por ti. Solo tienes que invertir algo de tiempo al principio para configurar las métricas y la forma de presentarlas, y a partir de ese momento los informes se generan de manera automática.

Gestión Financiera

La gestión financiera involucra la administración de los recursos que posee la empresa, cuya responsabilidad se asigna a una persona conocida como gestor o contralor, el cual es el encargado de administrar financieramente la empresa, llevando un control adecuado de los ingresos y los egresos que concurre en la empresa, teniendo como contraparte la maximización de los recursos económicos de la misma. De allí que la gestión financiera se estructura bajo dos lineamientos que pueden ser:

- El análisis de la actual situación financiera de la empresa;
- Evaluación y formulación de decisiones sobre alternativas que permitan mejorar el futuro financiero de la empresa.

Los KPI's

Los Key Performance Indicators (KPI's) son instrumentos importantes en la gestión empresarial moderna, permitiendo a las organizaciones medir y monitorear el desempeño de sus diversas áreas y procesos de manera cuantitativa. Su relevancia radica en su capacidad para proporcionar una visión clara y objetiva del estado de la empresa, facilitando la identificación de fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas. En el ámbito global, el uso eficaz de KPI's ha sido un factor determinante en el éxito y sostenibilidad de muchas empresas.

KPI's Financieros

El análisis de razones financieras incluye métodos de cálculo e interpretación de las razones financieras para analizar y supervisar el desempeño de la empresa. Las entradas básicas para el análisis de las razones son el estado de pérdidas y ganancias y el balance general de la empresa (Gitman & Zutter, 2012). Se observa un ejemplo de los mismos en los Cuadros 1 y 2.

Cuadro 1. Estado de Resultados característico de una microempresa

Microempresa	
ESTADO DE PERDIDAS Y GANANCIAS	
Por el periodo terminado el 31 de marzo de 2024	
(Expresado en Bolivianos)	
INGRESOS OPERATIVOS	
Ingresos por ventas	124.800,00
Menos: Costo de la mercadería Vendida	<u>68.000,00</u>
UTILIDAD BRUTA	56.800,00
Menos: Gastos Operativos	
Servicios Básicos	120
Gastos por suscripción	400
Gasto material de escritorio	1.300,00
Sueldos y Salarios	10.500,00
Castigo Cuentas Incobrables	10.000,00
Depreciación Maquinaria en general	171
Depreciación Equipos de Computación	333,33
Depreciación Muebles y Enseres	33,33
Alquileres pagados	500
	<u>23.357,66</u>
UTILIDAD OPERATIVA	33.442,34
INGRESOS NO OPERATIVOS	
Mas: Ajuste por diferencia de cambio	120
Menos: Resultados por Exposición a la Inflación	<u>70</u>
UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS	33.492,34
Impuesto a las Utilidades 25%	8.373,09
UTILIDAD NETA	<u><u>25.119,26</u></u>

Fuente: Elaborado con base a datos obtenidos

Cuadro 2. Balance General característico de una microempresa

Microempresa		
BALANCE GNERAL		
Al 31 de marzo de 2024		
(Expresado en Bolivianos)		
ACTIVO	PASIVO	
Activo Corriente	Pasivo Corriente	
Caja MN	80.830,00	
Caja ME	21.000,00	
Caja Chica	10.000,00	
Banco Fie	25.580,00	
Documentos por cobrar	20.000,00	
Menos: Previsión Cuentas Incobrables	10.000,00	
Inventario de mercadería	30.000,00	
Total Activo Corriente	<u>177.410,00</u>	
Activo No Corriente	Pasivo No Corriente	
Alquileres pagados por adelantado	8.500,00	
Maquinaria en general	20.520,00	
Menos: Depreciación Acumulada Maq.	171	
Equipos de computación	16.000,00	
Menos: Depreciación Acumulada Eq.	333,33	
Muebles y enseres	1.600,00	
Menos: Depreciación Acumulada Mueb.	33,33	
Total Activo No Corriente	<u>46.082,34</u>	
TOTAL ACTIVO	<u>223.492,34</u>	
	Pasivo Corriente	
	Documentos por pagar	35.000,00
	Letras por pagar/Documentos por pagar	15.000,00
	I.U.E. por pagar	8.373,09
	Total Pasivo Corriente	<u>58.373,09</u>
	Pasivo No Corriente	<u>0</u>
	PATRIMONIO	
	Capital	140.000,00
	UTILIDAD NETA	25.119,26
	TOTAL PATRIMONIO	<u>165.119,26</u>
	TOTAL PASIVO Y PATRIMONIO	<u>223.492,34</u>

Fuente: Elaborado en base a datos obtenidos

Razones de liquidez

La liquidez de una empresa se mide por su capacidad para cumplir con sus obligaciones de corto plazo a medida que estas llegan a su vencimiento. Desde luego, es deseable que una compañía pueda pagar sus cuentas, de modo que es muy importante tener suficiente liquidez para las operaciones diarias. Sin embargo, los

activos líquidos, como el efectivo mantenido en bancos y valores negociables, no tienen una tasa particularmente alta de rendimiento, de manera que los socios no querrán que la empresa haga una sobreinversión en liquidez. Las empresas tienen que equilibrar la necesidad de seguridad que proporciona la liquidez contra los bajos rendimientos que los activos líquidos generan para los inversionistas. Las dos medidas básicas de liquidez son la liquidez corriente y la razón rápida (prueba ácida).

Liquidez corriente

La liquidez corriente es una de las razones financieras citadas con mayor frecuencia, mide la capacidad de la empresa para cumplir con sus obligaciones de corto plazo. Se expresa de la siguiente manera:

Liquidez corriente= Activos corrientes / Pasivos corrientes

Por lo general, cuanto más alta es la liquidez corriente, mayor liquidez tiene la empresa. La cantidad de liquidez que necesita una compañía depende de varios factores, incluyendo el tamaño de la organización, su acceso a fuentes de financiamiento de corto plazo, como líneas de crédito bancario, y la volatilidad de su negocio. Por ejemplo, una tienda de comestibles cuyos ingresos son relativamente predecibles tal vez no necesite tanta liquidez como una empresa de manufactura que enfrenta cambios repentinos e inesperados en la demanda de sus productos. Cuanto más predecibles son los flujos de efectivo de una empresa, más baja es la liquidez corriente aceptable.

Razón rápida (prueba ácida)

La razón rápida (prueba ácida) es similar a la liquidez corriente, con la excepción de que excluye el inventario, que es comúnmente el activo corriente menos líquido. La baja liquidez del inventario generalmente se debe a dos factores primordiales:

1. muchos tipos de inventario no se pueden vender fácilmente porque son productos parcialmente terminados, artículos con una finalidad especial o algo por el estilo; y
2. el inventario se vende generalmente a crédito, lo que significa que se vuelve una cuenta por cobrar antes de convertirse en efectivo. Un problema adicional con el inventario como activo líquido es que cuando las compañías enfrentan la más apremiante necesidad de liquidez, es decir, cuando el negocio anda mal, es precisamente el momento en el que resulta más difícil convertir el inventario en efectivo por medio de su venta.

La razón rápida se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Razón rápida} = (\text{Activos corrientes} - \text{Inventario}) / \text{Pasivos corrientes}$$

Al igual que en el caso de la liquidez corriente, el nivel de la razón rápida que una empresa debe esforzarse por alcanzar depende en gran medida de la industria en la cual opera. La razón rápida ofrece una mejor medida de la liquidez integral solo cuando el inventario de la empresa no puede convertirse fácilmente en efectivo. Si el inventario es líquido, la liquidez corriente es una medida preferible para la liquidez general.

Razones de actividad

Los índices de actividad miden la rapidez con la que diversas cuentas se convierten en ventas o efectivo, es decir, en entradas o salidas. En cierto sentido, los índices de actividad miden la eficiencia con la que opera una empresa en una variedad de dimensiones, como la administración de inventarios, gastos y cobros. Existen varios índices para la medición de la actividad de las cuentas corrientes más importantes, las cuales incluyen inventarios, cuentas por cobrar y cuentas por pagar. También se puede evaluar la eficiencia con la cual se usa el total de activos.

Rotación de inventarios

La rotación de inventarios mide comúnmente la actividad o liquidez, del inventario de una empresa. Se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Rotación de inventarios} = \frac{\text{Costo de los bienes vendidos}}{\text{Inventario}}$$

La rotación resultante tiene significado solo cuando se compara con la de otras empresas de la misma industria o con la rotación pasada de los inventarios de la empresa. Una rotación de inventarios de 20 sería normal para una tienda de comestibles, cuyos bienes son altamente perecederos y se deben vender pronto; en cambio, una rotación de inventarios común para una empresa manufacturera sería de cuatro veces por año.

Otro índice de actividad del inventario mide cuántos días conserva la empresa el inventario. La rotación de inventarios se puede convertir fácilmente en la edad promedio del inventario dividiendo 365, el número de días que tiene un año, entre la rotación de los inventarios. Este valor también puede considerarse como el número promedio de días que se requieren para vender el inventario.

Periodo promedio de cobro

El periodo promedio de cobro, o antigüedad promedio de las cuentas por cobrar, es útil para evaluar las políticas de crédito y cobro. Se calcula dividiendo el saldo de las cuentas por cobrar entre las ventas diarias promedio:

$$\text{Periodo promedio de cobro} = \frac{\text{Cuentas por cobrar} \times 365}{\text{Ventas anuales}}$$

El periodo promedio de cobro tiene significado solo cuando se relaciona con las condiciones de crédito de la empresa. Si la empresa otorga a sus clientes condiciones de crédito a 30 días, un periodo promedio de cobro de 59.7 días indica créditos mal administrados o un departamento de cobros deficiente, o ambos. También es posible que el periodo de cobro prolongado se deba a una relajación intencional de la supervisión de las condiciones de crédito en respuesta a las presiones competitivas. Si la empresa amplió las condiciones de crédito a 60 días, el periodo promedio de cobro de 59.7 días sería bastante aceptable. Desde luego, se requiere información adicional para evaluar la eficacia de las políticas de crédito y cobro de la empresa.

Periodo promedio de pago

El periodo promedio de pago, o antigüedad promedio de las cuentas por pagar, se calcula de la misma manera que el periodo promedio de cobro:

$$\text{Periodo promedio de pago} = \frac{\text{Cuentas por pagar} \times 365}{\text{Compras anuales}}$$

La dificultad para calcular esta razón se debe a la necesidad de calcular las compras anuales, un valor que no está disponible en los estados financieros publicados. Normalmente, las compras se calculan como un porcentaje específico del costo de los bienes vendidos. Esta cifra es significativa solo en relación con las condiciones de crédito otorgadas a la empresa. Si los proveedores de le concedieron, en promedio, 30 días de crédito, un analista daría a a la empresa que tiene 50 días una calificación de crédito baja debido a que se tomó demasiado tiempo para pagar sus cuentas. Los posibles prestamistas y proveedores de crédito comercial se interesan más en el periodo promedio de pago porque este índice brinda información sobre los patrones de pago de las cuentas de la empresa.

Rotación de los activos totales

La rotación de los activos totales indica la eficiencia con la que la empresa utiliza sus activos para generar ventas. La rotación de activos totales se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Rotación de activos totales} = \text{Ventas} / \text{Total de activos}$$

Si una empresa tiene 0.85 de rotación de activos totales. Esto significa que la empresa sustituye sus activos 0.85 veces al año. Por lo general, cuanto mayor es la rotación de los activos totales de una empresa, mayor es la eficiencia con la que se han usado sus activos. Es probable que esta medida sea de gran interés para la administración porque indica si las operaciones de la empresa han sido eficientes desde el punto de vista financiero.

Razones de endeudamiento

La posición de endeudamiento de una empresa indica el monto del dinero de otras personas que se usa para generar utilidades. En general, un analista financiero se interesa más en las deudas a largo plazo porque estas comprometen a la empresa con un flujo de pagos contractuales a largo plazo. Cuanto mayor es la deuda de una empresa, mayor es el riesgo de que no cumpla con los pagos contractuales de sus pasivos. Debido a que los compromisos con los acreedores se deben cumplir antes de distribuir las ganancias entre los accionistas, tanto los accionistas actuales como los futuros deben prestar mucha atención a la capacidad de la empresa de saldar sus deudas. Los prestamistas también se interesan en el endeudamiento de las empresas. En general, cuanto mayor es la cantidad de deuda que utiliza una empresa en relación con sus activos totales, mayor es su apalancamiento financiero. El apalancamiento financiero es el aumento del riesgo y el rendimiento mediante el uso de financiamiento de costo fijo, como la deuda y las acciones preferentes. Cuanto mayor es la deuda de costo fijo que utiliza la empresa, mayores serán su riesgo y su rendimiento esperados.

Índice de endeudamiento

El índice de endeudamiento mide la proporción de los activos totales que financian los acreedores de la empresa. Cuanto mayor es el índice, mayor es el monto del dinero de otras personas que se usa para generar utilidades. El índice se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Índice de endeudamiento} = \text{Total de pasivos} / \text{Total de activos}$$

Si el índice de endeudamiento de una empresa es 0.457 = 45.7% Este valor indica que la empresa ha financiado cerca de la mitad de sus activos con deuda. Cuanto más alto es este índice, mayor es el grado de endeudamiento de la empresa y mayor su apalancamiento financiero.

Índices de rentabilidad

Existen muchas medidas de rentabilidad. En conjunto, estas medidas permiten a los analistas evaluar las utilidades de la empresa respecto a un nivel determinado de ventas, cierto nivel de activos o la inversión de los propietarios. Sin utilidades, una compañía no podría atraer capital externo. Los dueños, los acreedores y la administración prestan mucha atención al incremento de las utilidades debido a la gran importancia que el mercado otorga a las ganancias.

Margen de utilidad bruta

El margen de utilidad bruta mide el porcentaje que queda de cada dólar de ventas después de que la empresa pagó sus bienes. Cuanto más alto es el margen de utilidad bruta, mejor (ya que es menor el costo relativo de la mercancía vendida). El margen de utilidad bruta se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Margen de utilidad bruta} = \text{Utilidad bruta} / \text{Ventas}$$

Margen de utilidad operativa

El margen de utilidad operativa mide el porcentaje que queda de cada dólar de ventas después de que se dedujeron todos los costos y gastos. Es preferible un margen de utilidad operativa alto. El margen de utilidad operativa se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Margen de utilidad operativa} = \text{Utilidad operativa} / \text{Ventas}$$

Margen de utilidad neta

El margen de utilidad neta mide el porcentaje que queda de cada dólar de ventas después de que se dedujeron todos los costos y gastos, incluyendo intereses, impuestos y dividendos de acciones preferentes. Cuanto más alto es el margen de utilidad neta de la empresa, mejor. El margen de utilidad neta se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Margen de utilidad neta} = \text{Utilidad neta} / \text{Ventas}$$

Rendimiento sobre los activos totales (RSA)

El rendimiento sobre activos totales (RSA), mide la eficacia integral de la administración para generar utilidades con sus activos disponibles. Cuanto más alto es el rendimiento sobre los activos totales de la empresa, mejor. El rendimiento sobre los activos totales se calcula de la siguiente manera:

$$\text{RSA} = \text{Utilidad neta} / \text{Total de activos}$$

Rendimiento sobre el patrimonio (RSP)

El rendimiento sobre el patrimonio (RSP) mide el rendimiento ganado sobre la inversión de los socios en la empresa. Por lo general, cuanto más alto es este rendimiento, más ganan los propietarios. El rendimiento sobre el patrimonio se calcula de la siguiente manera:

$$\text{RSP} = \text{Utilidad neta} / \text{Patrimonio}$$

De acuerdo a los KPI's analizados, los indicadores financieros deben estar de acuerdo a los siguientes rangos para que sea eficiente el uso de los recursos financieros con los que cuenta la microempresa.

De acuerdo con los KPI's analizados, los indicadores financieros deben mantenerse dentro de los rangos establecidos según Tabla 1, para asegurar un uso eficiente de los recursos financieros de la microempresa. La adecuada gestión de estos indicadores permite evaluar la liquidez, eficiencia operativa, endeudamiento y rentabilidad, garantizando la estabilidad y sostenibilidad del negocio.

Tabla 1 Estándares para las razones de una microempresa

Razones Financieras	Dato aceptable	Dato no aceptable
Razones de Liquidez		
Capital de Trabajo	Valor positivo en Bs	Valor negativo en Bs
Razón corriente	Mayor a 1	Menor a 1
Prueba acida	Mayor a 0,8	Menor a 0,8
Razones de Actividad		
Rotación de Inventarios (veces)	Mayor a 6 veces	Menor a 6 veces
Rotación de Inventarios (días)	Menor a 360 días	Mayor a 360 días
Rotación de Cuentas por Cobrar (días)	Menor a 48 días	Mayor a 48 días

Rotación de cuentas por pagar (días)	Mayor a 48 días	Menor a 48 días
Rotación de Cuentas por cobrar menor a Rotación a Cuentas por Pagar	X	
Rotación de Cuentas por cobrar mayor a Rotación a Cuentas por Pagar		X
Razones de Endeudamiento		
Índice de endeudamiento	Menor a 0,4	Mayor a 0,4
Razones de Rentabilidad		
Margen Bruto	Mayor a 25%	Menor a 25%
Margen Operativo	Mayor a 15%	Menor a 15%
Margen Neto	Mayor a 10%	Menor a 10%
Rendimiento sobre los activos totales	Mayor a 8%	Menor a 8%
Rendimiento sobre el Patrimonio	Mayor a 10%	Menor a 10%

Fuente: Elaborado con base a datos analizados

Esta tabla establece estándares de salud financiera para microempresas. Cumplir con los valores aceptables indica buena liquidez, eficiencia en la gestión, bajo endeudamiento y rentabilidad adecuada. Valores fuera del rango aceptable señalan áreas de riesgo o mejora.

Diseño del Dashboard

Paso 1: Análisis de requerimientos

A partir de los estados financieros de la microempresa (Cuadro 1. Estado de Resultados y Cuadro 2. Balance General) de diferentes años, se registra la información en listas de Excel, organizadas de forma estructurada para su posterior análisis y visualización en el dashboard. Dichas listas contienen los datos necesarios para generar los indicadores financieros clave y apoyar la toma de decisiones.

CUENTA	mar-20	mar-21	sep-22	mar-23
ACTIVO	1.238.894,77	1.322.950,01	1.548.807,51	1.554.404,18
Activo Corriente	369.297,59	459.102,40	657.385,34	646.899,78
Disponibilidades	112.607,56	154.386,25	129.829,08	154.014,89
Inversiones a Corto Plazo	-	-	56.720,24	62.042,98
Cuentas por Cobrar a Corto Plazo	112.213,39	154.596,40	155.805,99	158.559,62
Anticipo a Proveedores	16.976,23	18.411,17	61.212,03	47.472,89
Inventarios	125.086,24	130.848,25	235.103,17	223.265,07
Gastos Pagados por Adelantado	2.414,17	860,34	18.714,83	1.544,34
Otros Activos Corto Plazo	-	-	-	-
Total Activo Corriente	369.297,59	459.102,40	657.385,34	646.899,78
Activo no Corriente	869.597,18	863.847,61	891.422,17	907.504,40
Inversiones a Largo Plazo	78,48	79,12	79,12	79,12
Inversiones en Empresas Relacionadas y/o Vinculadas	-	-	-	-
Cuentas por Cobrar a Largo Plazo	-	-	-	-
Activo Fijo Neto	824.094,46	826.093,69	869.870,12	881.370,71
Bienes Arrendados	-	-	-	-
Activos Intangibles	-	-	-	-
Cargos Diferidos	-	-	-	-
Otros Activos Largo Plazo	45.424,25	37.674,80	21.472,93	26.054,57
Anticipo a Proveedores LP	-	-	-	-
Inventarios Largo Plazo	-	-	-	-
Total Activo no Corriente	869.597,18	863.847,61	891.422,17	907.504,40
TOTAL ACTIVO	1.238.894,77	1.322.950,01	1.548.807,51	1.554.404,18
PASIVO	619.260,15	641.941,11	884.166,59	926.060,20
Pasivo Corriente	249.347,18	307.103,53	310.457,56	331.612,59
Deudas Comerciales a Corto Plazo	109.118,85	126.536,81	144.905,58	166.106,51
Deudas Bancarias y Financieras a Corto Plazo	79.201,33	114.856,83	70.055,74	96.034,10
Deudas por Emisión de Valores Corto Plazo	20.628,96	27.048,87	34.464,83	36.148,76
Deudas por pagar con Emp. Rel. y/o Vinculadas a Corto Plazo	-	-	-	-
Otras Cuentas por Pagar a Corto Plazo	40.298,04	38.555,46	56.547,55	31.312,77
Ingresos Percibidos por Adelantado a Corto Plazo	-	-	36,60	82,72

Esquema 1. Datos del Balance General de 4 años
Fuente: Elaborado en base a datos recopilados

Paso 2: Conformar indicadores

Los indicadores clave de desempeño (KPI´s) permiten determinar las acciones necesarias para mejorar el rendimiento de una empresa, constituyendo herramientas esenciales para alcanzar el éxito organizacional. En este apartado, se identifican y seleccionan los KPI´s financieros más relevantes, que servirán como base para el análisis y seguimiento del desempeño económico de la microempresa.

	2020	2021	2022	2023
BALANCE GENERAL				
ACTIVO	1.238.894,77	1.322.950,01	1.548.807,51	1.554.404,18
PASIVO	619.260,15	641.941,11	884.166,59	926.060,20
PATRIMONIO	619.634,62	681.008,90	664.640,92	628.343,98
RAZONES FINANCIERAS				
RAZON CORRIENTE	1,48	1,49	2,12	1,95
PRUEBA ÁCIDA	0,98	1,07	1,36	1,28
ENDEUDAMIENTO	0,50	0,49	0,57	0,60
ROTACIÓN DE INVENTARIOS	144,87	152,51	872,59	213,12
ROTACIÓN DE CUENTAS POR COBRAR	91,42	122,02	332,88	113,06
MARGEN BRUTO	29,65	33,33	9,65	28,91
MARGEN OPERATIVO	3,88	7,91	0,23	1,47
MARGEN NETO	3,66	7,17	1,12	3,62
ROA	0,36	0,35	0,11	0,33
ROE	2,68	4,72	0,75	2,58

Esquema 2. Datos de los KPI´s financieros
Fuente: Elaborado en base a datos recopilados

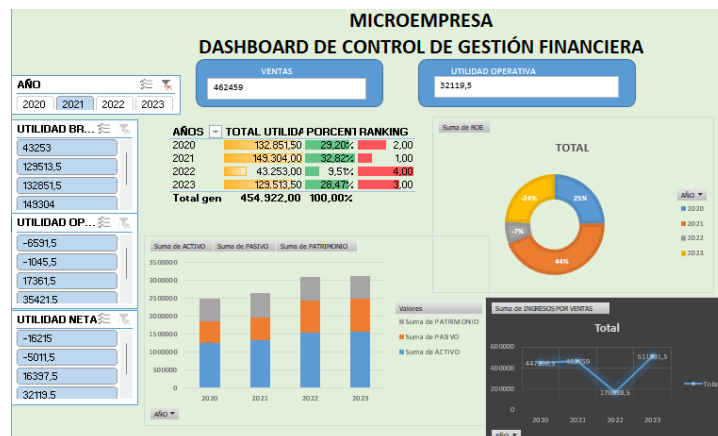
Paso 3: Elaborar las tablas dinámicas

Se procede a crear las tablas dinámicas con el objetivo de transformar los datos extraídos de la base de información de los estados financieros y los KPI's. La transformación de estos datos permite generar campos específicos basados en condiciones o relaciones predefinidas, facilitando así la parametrización de la información y su correcta visualización en el dashboard.

Paso 4: Creación del Dashboard

Para la visualización de los indicadores clave de desempeño de manera gráfica, se emplea un dashboard. Esta herramienta permite compartir, centralizar y presentar de forma infográfica la información más relevante de la empresa, facilitando la toma de decisiones (Viera et al., 2021).

De acuerdo con los requerimientos del área gerencial, se desarrolló un dashboard que permite visualizar de manera clara y concisa los datos más importantes de la microempresa, el dashboard diseñado presentaría las siguientes características:



Esquema 3. Dashboard de Control de Gestión Financiera
Fuente: Elaborado con base a datos calculados

Diseño y Arquitectura del Dashboard desde la Ingeniería del Diseño

El diseño del dashboard se fundamenta en principios de Ingeniería del Diseño y arquitectura de la información, que buscan optimizar la interacción entre el usuario y los datos financieros. Según Turban, Pollard y Wood (2018), un sistema de control visual debe estructurarse con criterios de jerarquía informacional, coherencia visual y accesibilidad, garantizando una experiencia de usuario (UX) eficiente.

En este sentido, la arquitectura del dashboard se organiza bajo el modelo jerárquico de tres niveles: (1) indicadores agregados

(liquidez, endeudamiento, rentabilidad, eficiencia), (2) métricas desagregadas derivadas de los estados financieros, y (3) detalles analíticos que permiten rastrear el origen de cada indicador. Esta estructura facilita la navegación ascendente y descendente (drill-up / drill-down) en la información, asegurando la trazabilidad de los datos.

Desde la perspectiva de la UX, se prioriza la simplicidad cognitiva y la legibilidad visual, aplicando principios de diseño minimalista (Eckerson, 2010), con colores semafóricos para alertas de desempeño, íconos de estado y gráficos de tendencia que permiten una interpretación inmediata. Esta integración entre el enfoque financiero y el ingenieril convierte al dashboard en un instrumento no solo informativo, sino también de apoyo estratégico para la toma de decisiones en tiempo real.

La aplicación de los KPI's en un dashboard permite obtener los siguientes resultados:

1. Mejora en la toma de decisiones

- Los KPI's financieros proporcionan información precisa sobre liquidez, endeudamiento, rentabilidad y eficiencia operativa.
- El dashboard centraliza esta información de manera visual e intuitiva, permitiendo a los gerentes identificar rápidamente áreas críticas y oportunidades de mejora.

2. Monitoreo eficiente del desempeño

- Los indicadores clave permiten evaluar si la empresa cumple con los objetivos financieros establecidos.
- Se pueden detectar desviaciones en tiempo real, como retrasos en cobros, exceso de inventario o altos niveles de deuda, antes de que se conviertan en problemas graves.

3. Optimización de recursos

- Al visualizar la información de manera clara, la gerencia puede tomar decisiones para mejorar la eficiencia en el uso de recursos, como capital de trabajo o inventarios.
- Permite priorizar inversiones o ajustar gastos según el rendimiento real de la empresa.

4. Mejora en la planificación financiera

- Los KPI's facilitan la proyección de flujo de efectivo y planificación de pagos a proveedores.
- Con el dashboard, es posible simular escenarios y evaluar el impacto de decisiones estratégicas antes de implementarlas.

5. Comunicación y transparencia

- El dashboard sirve como una herramienta de comunicación interna y externa, mostrando a socios, inversionistas y personal relevante el desempeño financiero de la empresa de manera clara.

- Facilita la rendición de cuentas y genera confianza en la gestión de la microempresa.
6. Identificación de tendencias y patrones
- La integración de KPI's y dashboard permite analizar tendencias históricas y patrones de desempeño financiero.
 - Esto ayuda a anticipar problemas futuros y planificar estrategias de crecimiento sostenibles.

En síntesis, la aplicación de KPI's financieros junto con un dashboard transforma datos contables y financieros en información útil, mejorando la eficiencia operativa, la toma de decisiones y la capacidad de planificación estratégica de la microempresa.

Desde el punto de vista teórico, la investigación integra los aportes clásicos de Kaplan y Norton (2007), quienes conciben el control de gestión como un sistema estratégico basado en indicadores, con las propuestas contemporáneas de Parmenter (2020) y Murillo Valverde et al. (2024), que enfatizan la adaptabilidad y digitalización de los KPI's en entornos de alta incertidumbre.

Mientras que Kaplan y Norton priorizan la alineación entre estrategia y desempeño organizacional mediante el Balanced Scorecard, Parmenter propone un enfoque más flexible, orientado al uso dinámico de indicadores en tiempo real, apoyado en herramientas tecnológicas. Esta diferencia metodológica es clave para el presente estudio, ya que el diseño del dashboard combina la rigurosidad estratégica del enfoque clásico con la agilidad operativa y digital del enfoque moderno.

Asimismo, Cuozzo (2023) y Viera et al. (2021) aportan una perspectiva ingenieril centrada en el diseño visual y la arquitectura de datos, lo cual refuerza la pertinencia del uso de dashboards financieros como instrumentos de control integrador para microempresas bolivianas.

Conclusiones

El estudio permitió identificar los principales indicadores clave de desempeño (KPI's) financieros sobre los cuales las microempresas deben enfocar sus esfuerzos para optimizar su gestión y fortalecer su sostenibilidad económica. La aplicación de herramientas tecnológicas de control, como los dashboards financieros, demostró ser una estrategia eficaz para integrar, analizar y visualizar información contable y financiera en tiempo real, facilitando la evaluación continua de resultados y la toma de decisiones basada en datos objetivos.

La metodología aplicada permitió la selección y parametrización de indicadores relevantes de liquidez, endeudamiento, rentabilidad y eficiencia operativa, lo que constituye un aporte significativo para el diseño de un sistema de control financiero adaptado a las necesidades de las microempresas en Bolivia.

Asimismo, se comprobó que la implementación de un dashboard no solo mejora la transparencia y la eficiencia en la gestión financiera, sino que también promueve una cultura organizacional orientada a resultados. Para garantizar su efectividad, es fundamental fortalecer las capacidades del personal contable y administrativo, fomentando la formación continua y la apropiación tecnológica.

Finalmente, se concluye que el diseño e implementación de un sistema de control de gestión financiera mediante KPI's y dashboards representa una herramienta moderna, accesible y adaptable al contexto de las microempresas bolivianas. Su aplicación contribuye al mejor uso de los recursos, mejora la capacidad de respuesta ante cambios del entorno y potencia la sostenibilidad y competitividad de este sector estratégico de la economía nacional.

El modelo propuesto puede servir como base para futuras investigaciones orientadas al desarrollo de sistemas inteligentes de control financiero y al diseño de políticas públicas que fortalezcan la formalización de las microempresas.

Referencias

- Cuozzo, M. (2023). Diseño de un dashboard para la gestión económica financiera de una unidad académica (Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Económicas, Universidad Nacional de Córdoba). <https://face.unt.edu.ar/web/iadmin/wp-content/uploads/sites/2/2024/04/02-Cuozzo-Mauricio.pdf>
- Duarte Martínez, B. A. (2024). Cuadro de control financiero para la toma de decisiones de la microempresa Hydraulicars (Tesis de licenciatura, Universidad Técnica de Ambato). <https://repository.udistrital.edu.co/bitstreams/1de9249a-bb0e-4bd9-905a-1be40585031e/download>
- Eckerson, W. W. (2010). *Performance dashboards: Measuring, monitoring, and managing your business* (2.ª ed.). John Wiley & Sons. <https://n9.cl/vwsvh>
- Cruz Ayme, U. (2021). "Evasión Tributaria y su Relación con el Comercio Informal en el Centro Comercial" El Altiplano" Wanchaq, Cusco, 2020. <https://repositorio.utelesup.edu.pe/items/408b363b-07f2-4c03-b045-49862dbf1152>

- Gitman, L. J., & Zutter, C. J. (2012). *Principios de administración financiera* (12.ª ed.). Pearson <https://n9.cl/dv7o>
- Kaplan, R. S., & Norton, D. P. (2007). Usar el Balanced Scorecard como un sistema de gestión estratégica. *Harvard Business Review América Latina*, 85(1), 75–85. <https://bit.ly/4oRATii>
- Murillo Valverde, R. I., Taiz Iturralde, E., Cruz Fajardo, L. G., Navia Cevallos, W. A., & Coronel Díaz, M. N. (2024). Los Key Performance Indicators (KPI's) y su importancia en las microempresas de Guayaquil. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(4), 4316–4332. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4.12657
- Organización Mundial del Comercio (OMC). (2016). *Informe sobre el comercio mundial 2016: Igualdad de condiciones para el comercio de las pymes*. OMC. <https://www.wto.org>
- Parmenter, D. (2020). *Key performance indicators: Developing, implementing, and using winning KPI's* (3.ª ed.). John Wiley & Sons. <https://bit.ly/4pf74b6>
- Turban, E., Pollard, C., & Wood, G. (2018). *Information technology for management: On-demand strategies for performance, growth and sustainability* (10.ª ed.). Wiley. <https://bit.ly/4nWbTVD>
- Viera, Y. C., Borrego, J. M., & Viera, E. C. (2021). Propuesta de metodología para el diseño de dashboard. *Revista Cubana de Transformación Digital*, 2(3), 56–76. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5545998>

CAPÍTULO V

Evaluación de la repetibilidad y la reproducibilidad (R&R) en la colorimetría textil

Oswaldo Terán Modregon

Universidad Mayor de San Andrés

<https://orcid.org/0000-0003-0965-8434>

Evaluación de la repetibilidad y la reproducibilidad (R&R) en la colorimetría textil

Resumen

La evaluación R&R en colorimetría textil es un paso importante para asegurar la calidad y consistencia del color en los productos textiles de la hilatura. Al identificar y reducir la variabilidad de las mediciones, se puede mejorar la eficiencia de los procesos de producción y la calidad del producto final. Con ese propósito se realizó el Análisis Estructural MICMAC en las instalaciones de la empresa Cofitex Ltda., por un grupo de expertos y personal con experiencia, alto nivel de conocimiento y toma de decisión de compra de la industria textil. Inicialmente el grupo de expertos mediante una reflexión grupal, seleccionaron 89 variables de impacto. Mediante la técnica de lluvia de ideas se elaboró una lista de 89 factores de impacto clasificados en 9 dimensiones, con el software MICMAC, se identificaron las variables estratégicas, se obtienen 16 variables esenciales para el desarrollo del sistema, a través de una clasificación indirecta MICMAC. El estudio comenzó analizando y controlando estas variables a través de pruebas. El objetivo de la investigación es establecer una metodología para llevar a cabo estudios de Repetibilidad y Reproducibilidad R&R, aplicados a la calibración de instrumentos de medición del color mediante la aplicación del Software Statgraphics XIX empleando el método de Anova. En el diseño metodológico se han considerado los siguientes aspectos: el paradigma positivista, es un proceso sistemático y ordenado, con un diseño del estudio descriptivo-explicativo. Basados en un estudio con la participación de 3 laboratoristas, cada uno midiendo 10 muestras, y se miden 3 veces cada una, la desviación estándar estimada del proceso de medición es de 0,049. Incluyendo las muestras, la variación total (VT) es de 0,049. De la varianza total, el 12,21% se debe a diferencias entre laboratoristas a lo que denominamos reproducibilidad, mientras que el 87,78% se debe al instrumento conocido también como repetibilidad. La variabilidad del proceso de medición es 2,92%, un sistema de medición se clasifica como aceptable si este porcentaje es inferior al 10%, como es el caso. En el sistema de medición bajo control estadístico se espera que las mediciones se desviaran de los valores reales en +/- 0,146 debido al análisis R&R combinado, siendo menor que ΔE de 0,15 calificado como sistema superado.

Palabras clave: Repetibilidad, Reproducibilidad, Colorimetría, Textil, Anova, MSA.

Evaluation of repeatability and reproducibility (R&R) in textile colorimetry

Abstract

R&R evaluation in textile colorimetry is an important step in ensuring the quality and color consistency of spun textile products. By identifying and reducing measurement variability, the efficiency of production processes and the quality of the final product can be improved. For this purpose, a MicMac Structural Analysis was conducted at the facilities of Cofitex Ltd. by a group of experts and experienced personnel with a high level of knowledge and purchasing decision-making authority in the textile industry. Initially, the group of experts, through group reflection, selected 89 impact variables. Using brainstorming techniques, a list of these 89 impact factors was developed, classified into 9 dimensions. With the MicMac software, the strategic variables were identified, resulting in 16 essential variables for the system's development, obtained through an indirect MicMac classification. The study began by analyzing and controlling these variables through testing. The objective of this research is to establish a methodology for conducting Repeatability and Reproducibility (GR&R) studies, applied to the calibration of color measurement instruments by applying Statgraphics XIX software and using the Anova method. The following aspects were considered in the methodological design: the positivist paradigm is a systematic and orderly process, with a descriptive-explanatory study design. Based on a study involving 3 laboratory technicians, each measuring 10 samples, and each sample being measured 3 times, the estimated standard deviation of the measurement process is 0.049. Including the samples, the total variation (VT) is 0.049. Of the total variance, 12.21% is due to differences between laboratory technicians, which we call reproducibility, while 87.78% is due to the instrument, also known as repeatability. The variability of the measurement process is 2.92%; a measurement system is classified as acceptable if this percentage is less than 10%, as is the case here. In the measurement system under statistical control, measurements are expected to deviate from actual values by +/- 0.146 due to the combined R&R analysis, with a ΔE of less than 0.15 being classified as passing.

Keywords: Repeatability, Reproducibility, Colorimetry, Textile, ANOVA, MSA.

Avaliação da repetibilidade e reprodutibilidade (R&R) em colorimetria têxtil

Resumo

A avaliação R&R na colorimetria têxtil é uma etapa importante para garantir a qualidade e a consistência da cor dos produtos têxteis da fiação. Ao identificar e reduzir a variabilidade da medição, a eficiência dos processos de produção e a qualidade do produto final podem ser melhoradas. Para esse fim, uma Análise Estrutural MicMac foi conduzida nas instalações da Cofitex Ltda. por um grupo de especialistas e pessoal experiente com alto nível de conhecimento e autoridade para tomada de decisão de compras na indústria têxtil. Inicialmente, o grupo de especialistas, por meio de reflexão em grupo, selecionou 89 variáveis de impacto. Utilizando técnicas de brainstorming, foi elaborada uma lista dessas 89 variáveis de impacto, classificadas em 9 dimensões. Com o software MicMac, as variáveis estratégicas foram identificadas, resultando em 16 variáveis essenciais para o desenvolvimento do sistema, obtidas por meio de uma classificação indireta no MicMac. O estudo começou analisando e controlando essas variáveis por meio de testes. O objetivo da pesquisa é estabelecer uma metodologia para realização de estudos de Repetibilidade e Reprodutibilidade GR&R, aplicados à calibração de instrumentos de medição de cores por meio da aplicação do Software Statgraphics XIX utilizando o método Anova. No delineamento metodológico foram considerados os seguintes aspectos: o paradigma positivista é um processo sistemático e ordenado, com delineamento de estudo descritivo-explicativo. Com base em um estudo envolvendo 3 técnicos de laboratório, cada um medindo 10 amostras, e cada amostra sendo medida 3 vezes, o desvio padrão estimado do processo de medição é de 0,049. Incluindo as amostras, a variação total (VT) é de 0,049. Da variância total, 12,21% se deve a diferenças entre técnicos de laboratório, o que chamamos de reprodutibilidade, enquanto 87,78% se deve ao instrumento, também conhecido como repetibilidade. A variabilidade do processo de medição é de 2,92%, um sistema de medição é classificado como aceitável se esta porcentagem for menor que 10%, como é o caso. No sistema de medição sob controle estatístico, espera-se que as medições se desviem dos valores reais em $\pm 0,146$ devido à análise R&R combinada, com um ΔE menor que 0,15 sendo classificado como aprovado.

Palavras chave: Repetibilidade, Reprodutibilidade, Colorimetria, Têxtil, Anova, MSA.

Introducción

La repetibilidad y reproducibilidad (R&R) en colorimetría textil se evalúan para determinar la precisión y fiabilidad de un sistema de medición de color. La repetibilidad evalúa la variación en las mediciones realizadas por el mismo laboratorista con el mismo equipo en diferentes momentos, mientras que la reproducibilidad evalúa la variación entre diferentes laboratoristas o equipos. Esta evaluación permite identificar la parte de la variabilidad total en las mediciones que se debe al sistema de medición, permitiendo mejorar la calidad y consistencia de las mediciones de color.

Los beneficios de la evaluación R&R son:

- Mejora de la precisión de las mediciones. Identifica y reduce la variabilidad de las mediciones, lo que mejora la calidad y consistencia del color en los productos textiles.
- Optimización de procesos de producción. Permite identificar y corregir problemas de medición que pueden afectar la producción y la calidad del producto final.
- Aseguramiento de la calidad. Ayuda a garantizar que los productos textiles cumplan con los estándares de color y calidad establecidos.
- Mejora de la comunicación entre proveedores y clientes. Facilita la comunicación y el acuerdo sobre los estándares de color, reduciendo la probabilidad de errores y reclamos.

Muchos sectores industriales requieren de los sistemas de medición, particularmente la colorimetría. Los sistemas de medición son necesarios en los alimentos para detectar cambios obtenidos como resultados del procesamiento y almacenamiento; se emplean como índice de calidad, por ejemplo, en jugos de frutas para evaluar los cambios de color producto de la degradación de pigmentos causadas por reacciones enzimáticas y no enzimáticas (Valdés et al., 2023)

El estudio de Sierra (2010) sobre un protocolo para el control de calidad debe iniciar con una descripción de la muestra a evaluar, por lo cual, para cada una de las muestras de envases de plástico de análisis, es necesario verificar y registrar las condiciones de recepción observando los siguientes elementos: aspecto general, apariencia, color, olor, integridad, limpieza (Sierra et al., 2010).

Cárdenas y Ríos (2016) explican que el recurtido, teñido y engrase permite proporcionarle al cuero diferentes propiedades como color, suavidad, elasticidad, firmeza, etc. E inicia con el neutralizado para eliminar ácidos y subir el pH, luego en el recurtido se le aplican sustancias para darle llenura y resistencia.

En el teñido se le brinda al cuero el color de forma superficial o en toda la lámina y por último se realiza un engrase para evitar que el cuero quede totalmente duro al secarse (Cárdenas & Ríos, 2016).

El trabajo de Zavala et al (2018) en base a tela de algodón y 2 pigmentos tipo cubas, se generaron 4 muestras colorimétricas correspondientes a 5 formulaciones propuestas, las cuales se replicaron 4 veces, obteniéndose así un total de 20 unidades experimentales, de las que se generaron un total de 840 datos colorimétricos, correspondientes a los vectores L, a*, b* del espacio de color CIELAB, estos datos fueron analizados para determinar si presentaban diferencias significativas que pudieran influir en el desempeño de la red en la formulación del color; concluido este análisis los datos fueron empleados para entrenar una RNA de retro propagación (Zavala et al., 2018).

Este último trabajo muestra el análisis de experimentos para generar una red neuronal que mide las diferencias colorimétricas.

La “Automotive Industry Action Group” (AIAG), liderada por empresa fabricante de automóviles Chrysler ha publicado una serie de documentos para la planificación y documentación de la planificación de productos y servicios, de los cuales se han tomado cinco de ellos para constituir el core tools. Se desea incorporar una de ellas, el Análisis del Sistema de Medición MSA a la industria textil, en los laboratorios de control de calidad del color de la industria textil.

Para el efecto, se realizó el Análisis Estructural MicMac en las instalaciones de la empresa Cofitex Ltda., por un grupo de 18 expertos y personal con experiencia, alto nivel de conocimiento y toma de decisión de compra de la industria textil. Inicialmente el grupo de expertos mediante una reflexión grupal, seleccionaron 89 variables de impacto.

Mediante la técnica de Lluvia de ideas se elaboró una lista de 89 factores de impacto clasificados en 9 dimensiones, con el software MicMac, se identificaron las variables estratégicas, se obtienen 16 variables esenciales para el desarrollo del sistema, a través de una clasificación indirecta MicMac, se seleccionaron cinco variables con más influencia en forma directa sobre el resto de las variables del proceso de producción de hilados acrílicos.

Seguidamente se aplicó el Método Delphi al grupo de expertos reduciendo a 38 variables seleccionadas para estudiar las relaciones de dependencia e influencia.

A través de la Matriz de Impactos Cruzados Multiplicación Aplicada a una Clasificación y mediante su software MicMac permitió la selección de 16 variables estratégicas para la colorimetría textil. Las variables de muy alta categoría de importancia para

cumplir con la calidad de los hilos acrílicos, son: PM1 - PM2 - PF7 - PA3 - PF8 - M1 - M4 M5 - M2 - C5 - C4 - PA2 - M3 - PA5 - PF6 - C3. En la ilustración 1 se observa un esquema lógico de las variables estratégicas del estudio, ordenadas según las interrelaciones de causa y efecto, y de acuerdo a las categorías que conforman el análisis (Terán, 2024).

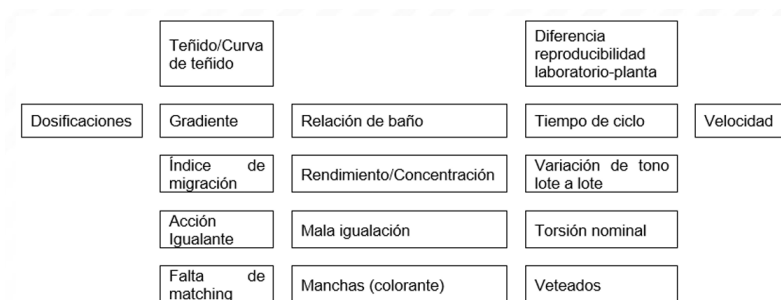


Ilustración 1. Variables de estudio.

Fuente: tomado de (Terán, 2024)

Como se evidencia de la ilustración anterior la variación del color depende del control de las siguientes variables:

$$\text{Variación de color} = f(\text{PM1, PM2, PF7, PA3, PF8, M1, M4, M5, M2, C5, C4, PA2, M3, PA5, PF6, C3})$$

Las variables PM1, PF8, PF7, PF1 y M4 son las cinco variables con más influencia en forma directa sobre el resto de las variables. El estudio comenzó analizando y controlando estas variables a través de pruebas en laboratorio y planta.

La Automotive Industry Action Group (AIAG) ha desarrollado el Manual para el Análisis del Sistema de Medición (MSA) creado para controlar la calidad de los productos e insumos de los proveedores de la industria automotriz. Pasando por la norma IATF 16949 que se centra en los requisitos específicos del cliente que abordan la mejora continua, la prevención de defectos y la reducción de desviaciones y residuos en la cadena de suministro. Hasta la norma ISO 10012 que establece una serie de controles de gestión metrológica que las organizaciones deben implementar para asegurar la precisión y fiabilidad de sus mediciones, para varias industrias. A partir del mismo varios sectores e industrias han comenzado a utilizar estas herramientas de análisis para controlar la variabilidad de sus procesos.

Una de las herramientas del MSA es el análisis de varianzas (Anova) que es una técnica estadística y estándar, se utiliza para analizar los errores en las mediciones y otras fuentes de variabilidad de los datos en un estudio de sistemas de medición.

En el análisis de varianza, la varianza puede ser seccionada en cuatro categorías: partes, evaluadores, interacción entre las partes y evaluadores y error de replicación debida al instrumento (Automotive Industry Action Group (AIAG), 2010)

Las ventajas del Anova con respecto al método tradicional son: a) las varianzas pueden ser estimadas con mayor exactitud, y b) se puede obtener mayor información (Escalante, 2011) como la interacción entre muestras y laboratoristas.

Se considera un modelo de efectos aleatorios para los factores laboratoristas, muestras, laboratoristas-muestra y réplicas (Escalante, 2011) . Los componentes de variación considerados son:

$$\sigma_{\text{(Gage (RR))}^2} = \sigma_{\text{Reproducibilidad}}^2 + \sigma_{\text{Repetibilidad}}^2 \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{Reproducibilidad}}^2 = \sigma_{0p}^2 + \sigma_{(p.op)}^2 \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{Repetibilidad}}^2 = \sigma^2 \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{T}}^2 = \sigma_p^2 + \sigma_{0p}^2 + \sigma_{(p.op)}^2 + \sigma^2 \quad (4)$$

Variación total = var.piezas + var.op + var.pzas-por-op + var.repetibilidad (error) (5)

El objetivo de la investigación es establecer una metodología para llevar a cabo estudios de Repetibilidad y Reproducibilidad GR&R, aplicados a la calibración de instrumentos de medición del color mediante la aplicación del Software Statgraphics XIX empleando el método de Anova.

Materiales y métodos

En el diseño metodológico se han considerado los siguientes aspectos: el paradigma positivista, denominada también paradigma cuantitativo, desde el punto de vista cuantitativo, es un proceso sistemático y ordenado, con un diseño del estudio descriptivo-explicativo (Terán, 2023).

La pregunta de investigación que conduce el estudio es: ¿Cómo reducir la variación total en el análisis del sistema de medición del color utilizando el método de Anova?

En el ámbito de la investigación se verá diferentes condiciones para realizar estudios de reproducibilidad:

Entre métodos: diferencia de promedio entre las mediciones, causada por cambio en las densidades de punto, sistemas manuales vs automático, ajuste del cero, métodos de agarre o sujeción, entre otros. Las demás condiciones deben permanecer constantes.

Entre Observadores: (laboratoristas) diferencia de promedio entre las mediciones, de los observadores A, B, C, etc. causada por entrenamiento, técnica, habilidad y experiencia. Las demás condiciones deben permanecer constantes.

Entre instrumentos: diferencia promedio entre las mediciones, usando los instrumentos A, B, C, etc., para las mismas piezas, operadores y ambiente.

Entre estándares: Influencia en el promedio entre las mediciones, de diferentes estándares de ajuste en el proceso de medición. Las demás condiciones deben permanecer constantes (Vinasco Isaza, 2022).

Los equipos que se utilizaras son los espectrofotómetros que analizan la radiación reflejada o transmitida de una muestra para cada longitud de onda en el rango visible del espectro. En pequeños incrementos de 10 o 20 nm miden las propiedades fotométricas de la muestra o bien para la reflexión o bien para la transmisión y determinan sus funciones colorimétricas (Datacolor, 2019).

El espectro-fotocolorímetro ha sido desarrollado para realizar controles de calidad con una alta precisión. Con el espectro-colorímetro puede seleccionar diferentes espacios de color (CIE L*a*b*C*h, CIE L*a*b* y CIE XYZ). Tras realizar una medición con el espectro-colorímetro, la medición la puede utilizar como valor de referencia, mientras que otras mediciones se pueden registrar como valor de una muestra y luego compararse con el valor estándar fácilmente. La alineación vertical del espectro-colorímetro permite que se sitúe sólo el sensor sobre el objeto a medir, esto permite un ahorro de espacio. Es un equipo útil para medidas en aplicaciones relacionadas con la industria del plástico, impresión, automoción, textil, medicina, pinturas, etc (PCE Instruments, 2025).

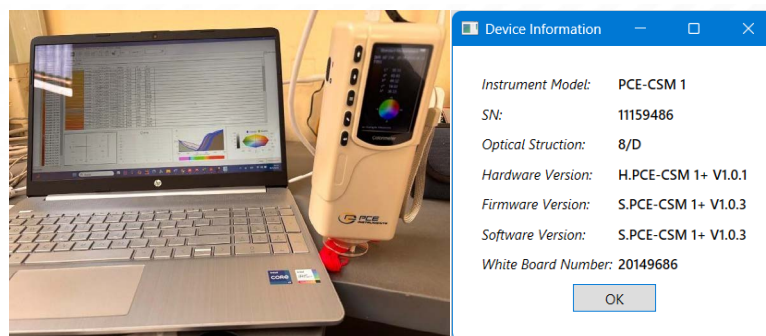


Ilustración 2. Instrumento espectro-fotocolorímetro
Fuente: Fotografía y captura tomado por Oswaldo Terán M.

El proceso de evaluación R&R en colorimetría textil en forma general incluye:

1. Selección de muestras:

Se eligen muestras textiles con diferentes colores y/o matices.

2. Selección de operadores y equipos:

Se seleccionan operadores diferentes (o un mismo laboratorista en diferentes momentos) y se utilizan diferentes equipos de colorimetría.

3. Recolección de datos:

Se miden las muestras por cada laboratorista/equipo varias veces, siguiendo el mismo protocolo de medición. Como se observa en la ilustración 3 a continuación.



Ilustración 3. Proceso de medición del color
Fuente: Fotografía tomada por Oswaldo Terán M.

4. Análisis de datos:

Se utiliza un análisis estadístico, como Anova, para calcular la variabilidad dentro de cada grupo de mediciones (repetibilidad) y entre grupos de mediciones (reproducibilidad).

5. Evaluación de resultados:

Se interpretan los resultados del análisis estadístico para determinar la cantidad de variabilidad que se debe a la medición y si el sistema es preciso.

En la siguiente ilustración se muestra la lectura de datos ΔL , Δa , Δb y ΔE para un observador 10° con un iluminante D65.

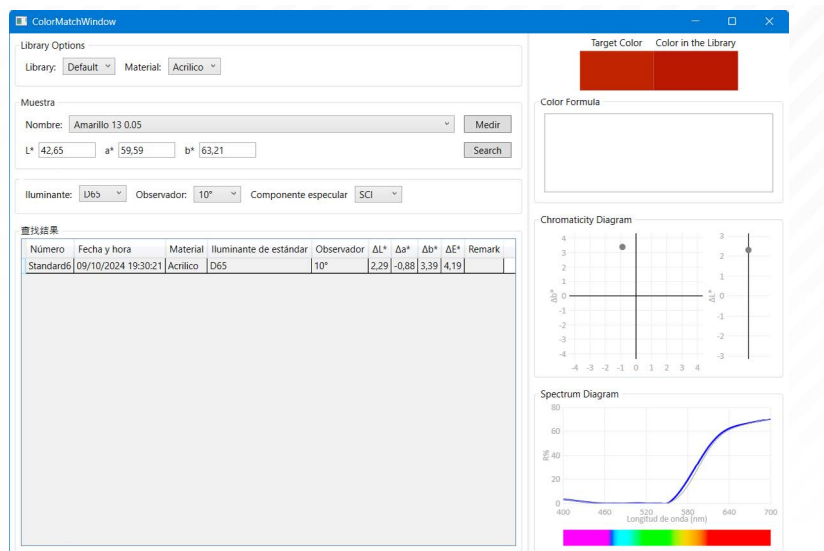


Ilustración 4. Lectura de muestra

Fuente: Captura de pantalla software PCE

Procesando los datos en el software statgraphics se tiene el siguiente resultado.

Gage R&R - Anova Method - Col_4
 Operators: Col_1
 Parts: Col_2
 Measurements: Col_4
 Anova: crossed
 3 laboratoristas 10 muestras 3 lecturas

Tabla 1. Estudio de Repetibilidad y Reproducibilidad

Unidad de Medida	Sigma Estimado	Porcentaje de Variación total	Varianza estimada	Porcentaje de contribución	Porcentaje de R&R
Repetibilidad	0,0432962	99,709	0,00187456	99,4188	99,42
Reproducibilidad	0,0033105	7,6238	0,00001096	0,58123	0,58
R & R	0,0434225	100,0	0,00188552	100,0	100,00
Muestras	0,0	0,0	0,0	0,0	
Variación total	0,0434225	100,0	0,00188552		

Fuente : corrida de GR&R en Statgraphics XIX (Statgraphics Technologies, 2023)

Basado en un estudio con 3 laboratoristas, cada uno midiendo 10 muestras 3 veces por muestra, la desviación estándar estimada del proceso de medición es de 0,0434225. Incluyendo las muestras, la variación total (VT) es de 0,0434225.

Se debe comparar esta variación total con el rendimiento deseado. Además, debe asegurarse de que la variación total porcentual debida a R&R sea relativamente pequeña.

Los valores para evaluar el sistema de medición son:

Sistema OK (deseable) < 10%

Aceptable (condicional) 10% a 30%

Inaceptable > 30%

Las reglas generales clasifican un sistema de medición como aceptable si la variación total porcentual de R&R es inferior al 10 %, aunque hasta un 30 % puede ser aceptable en algunas situaciones, se debe implantar un Plan de Mejoras para el Sistema de Medición actual, con el propósito de disminuir la variación presentada. En este caso, el valor es del 100,0% el Gage R&R % > 30% significa que el sistema de Medición es inadecuado y debe ser sustituido por otro concepto de medición (Días Martínez, 2018).

El estudio de repetibilidad y reproducibilidad se aplica en 7 aspectos principales:

- La evaluación de ensayos de aptitud.
- La validación de métodos de calibración.
- El análisis de comparaciones Inter laboratorios.
- La evaluación de la incertidumbre de medición.
- La evaluación de cartas de control.
- La variabilidad de mediciones e instrumentos.
- La evaluación de la deriva (estabilidad) de instrumentos.

El número de categorías distintas (NDC) que el sistema de medición analizado en este estudio puede distinguir con fiabilidad es igual a 1. Normalmente, este número debería ser al menos 5.

De la varianza total, el 0,581228 % se debe a diferencias entre operadores (reproducibilidad), mientras que el 99,4188 % se debe al instrumento (repetibilidad). Este desglose determina las áreas de mejora del sistema de medición, en este caso el instrumento.

Tabla 2. Anova

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Estadístico -F	Valor -P
Laboratoristas	0,00440667	2	0,00220333	1,18	0,3141
Muestras	0,0154678	9	0,00171864	0,92	0,5153
Residual	0,146216	78	0,00187456		
Total	0,16609	89			

Fuente : corrida de GR&R en Statgraphics XIX (Statgraphics Technologies, 2023)

La tabla Anova anterior, divide la variabilidad total de mediciones en varias muestras. La primera parte representa las diferencias entre los laboratoristas. La segunda parte representa las diferencias entre las muestras. La última parte representa el error residual, que corresponde a la repetibilidad.

Los aspectos importantes a considerar:

El número de repeticiones. Se deben realizar un número suficiente de repeticiones por cada muestra, laboratorista/equipo para obtener resultados estadísticamente significativos.

Número de mediciones. Una técnica para determinar el número de mediciones necesarias para garantizar la exactitud de los datos según (Datacolor, 2019):

- Mida una muestra ocho veces (girando y recolocando) y guarde la media.
- Vuelva a medir la muestra siete veces, utilizando la misma técnica.
- Continúe midiendo menos veces hasta llegar a dos lecturas.
- Revise los datos de diferencia de color entre cada prueba y la muestra original, e identifique el punto en el que la DE(CMC) supera el límite deseado de 0,15. Esto indica el número correcto de lecturas para un muestreo preciso.
- Por último, mida la muestra al menos cuatro veces más utilizando el número de lecturas identificado, y asegúrese de que en cada caso la variación no supera el 0,15.
- Aunque al principio se tarda mucho, este proceso garantizará datos precisos y decisiones más coherentes sobre la calidad del color.

Estándares de medición. Se deben establecer estándares de medición claros y consistentes para minimizar la variabilidad de las mediciones.

Calibración de equipos. Los equipos de colorimetría deben estar correctamente calibrados para asegurar la precisión de las mediciones.



Ilustración 5. Calibración de equipo
Fuente: Fotografía tomada por Oswaldo Terán M.

En la ilustración 5 y 6 se muestra el proceso de calibración del espectro-fotocolorímetro con patrones de blanco y negro.

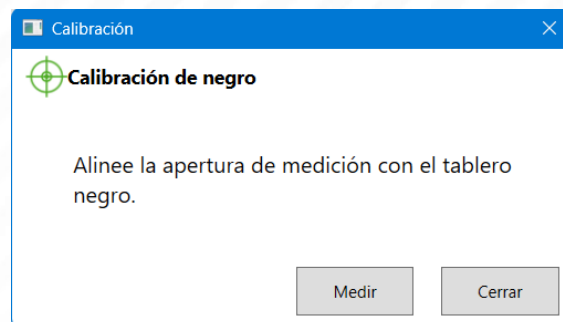


Ilustración 6. Calibración del instrumento
Fuente: Captura de pantalla software PCE

Formación de operadores. Los laboratoristas deben estar debidamente capacitados para realizar las mediciones de color de manera correcta y consistente.

Análisis de variación. Se deben realizar análisis de variación para identificar y corregir posibles errores de medición.

Finalizadas las tareas previas, se debe corregir los patrones de medición de cada colorante en diferentes concentraciones y se hacen 5 lecturas, de la cual se toma el promedio como se observa en la siguiente ilustración.

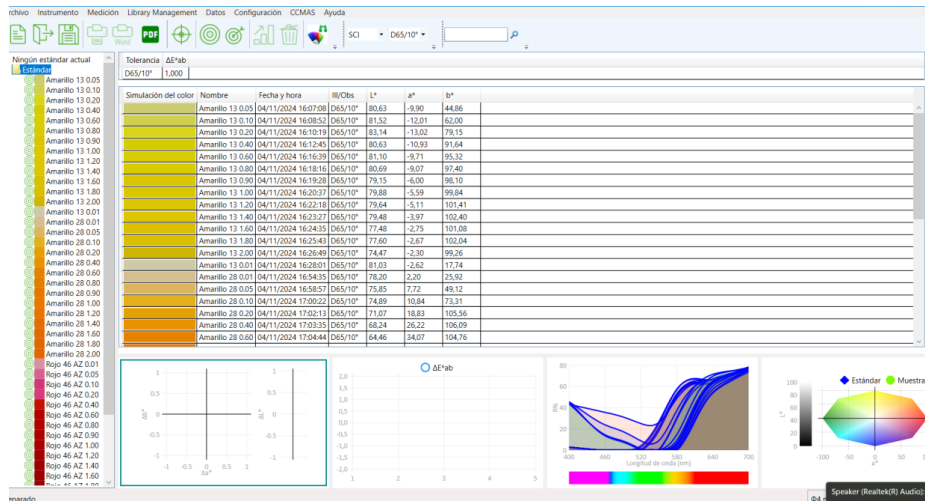


Ilustración 7. Registro de patrón de lectura
Fuente: Captura de pantalla software PCE

Un estudio R&R de calibre variable generalmente requiere 10 muestras que representan el rango de producción, 3 laboratoristas que normalmente realizan las mediciones y 3 lecturas por laboratorista por muestra, lo que da como resultado un total de 90 mediciones (1factory, 2011). El registro de las lecturas se observa en la ilustración siguiente:

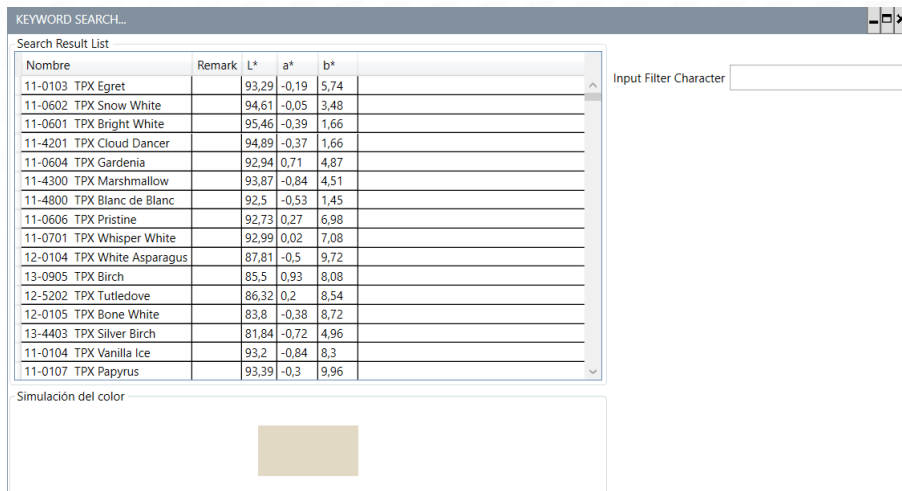


Ilustración 8. Registro de mediciones
Fuente: Captura de pantalla software PCE

Resultados y discusiones

Controladas las variables de estudio se vuelve a medir la diferencia de color entre el estándar (muestra del cliente) y la muestra de laboratorio o planta, buscando que ΔE sea menor de 0,15 como se observa en la siguiente ilustración.

^ Dif. color

CIE LAB, D65/10°

Estándar Standard45
Muestra Sample1

	Estándar	Muestra
L*	43,78	43,79
a*	61,68	61,68
b*	65,66	65,60

	Dif. color	Juicio
ΔL^*	0,01	--
Δa^*	0,00	--
Δb^*	-0,07	--
ΔE^*ab	0,07	Superado
Juicio total		Superado

Ilustración 9. Registro de mediciones
Fuente: Captura de pantalla software PCE

La medición del color se realiza en el espacio CIE $L^*a^*b^*$ obteniendo primero las coordenadas de color del estándar y posteriormente las coordenadas de la muestra, la diferencia de color se mide a través de ΔE que no debería superar el valor de 0,15, como se observa en la ilustración siguiente.

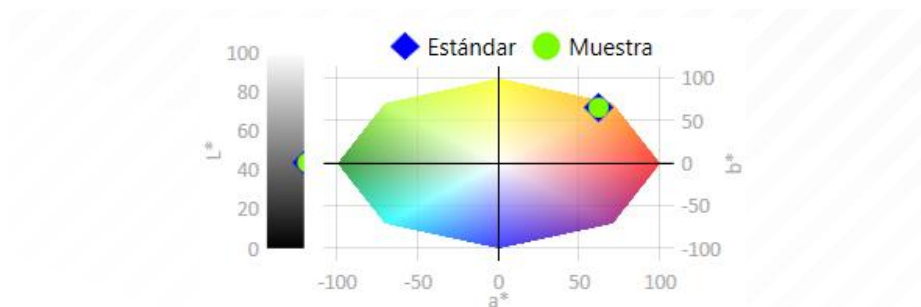


Ilustración 10. Espacio CIE $L^*a^*b^*$
Fuente: Captura de pantalla software PCE

Una vez obtenidos nuestros valores de L^* a^* b^* y ΔE volvemos a calcular el valor de Gage R&R con el método de la Anova. Los resultados se presentan a continuación en la tabla siguiente:

Gage R&R - Anova Method - Mediciones
Operators: Laboratoristas
Parts: Muestras
Measurements: ΔE
Anova: crossed
3 laboratoristas 10 muestras 3 lecturas

Tabla 3. Estudio de Repetibilidad y Reproducibilidad

Unidad de Medida	Sigma Estimado	Porcentaje de Variación total	Varianza estimada	Porcentaje de contribución	Porcentaje de R&R
Repetibilidad	0,0455972	93,6934	0,0020791	87,7845	87,78
Reproducibilidad	0,0170092	34,9507	0,000289314	12,2155	12,22
R & R	0,0486664	100,0	0,00236841	100,0	100,00
Muestras	0,0	0,0	0,0	0,0	
Variación Total	0,0486664	100,0	0,00236841		

Fuente : corrida de GR&R en Statgraphics XIX (Statgraphics Technologies, 2023)

Número de categorías distintas (ndc): 1

Basado en un estudio con 3 laboratoristas, cada uno midiendo 10 muestras 3 veces, la desviación estándar estimada del proceso de medición es de 0,0486664. Incluyendo las partes, la variación total (VT) es de 0,0486664.

Se debe comparar esta variación total con el rendimiento deseado. Además, se debe asegurar que la variación total porcentual debida a R&R sea relativamente pequeña. En este caso, el valor es del 100,0 %. Las reglas generales clasifican un sistema de medición como aceptable si la variación total porcentual de R&R es inferior al 10 %, aunque hasta un 30 % puede ser aceptable en algunas situaciones.

De la varianza total, el 12,21% se debe a diferencias entre laboratoristas (reproducibilidad), mientras que el 87,78% se debe al instrumento (repetibilidad). Se puede utilizar este desglose para determinar las áreas de mejora del sistema de medición.

Análisis de Tolerancia

3 laboratoristas 10 muestras 3 lecturas

Tolerancia = 10,0

Tabla 4. Análisis de tolerancia

Unidad de Medida	6,0 desviación estándar	Porcentaje de tolerancia
Repetibilidad	0,273583	2,73583
Reproducibilidad	0,102055	1,02055
R & R	0,291998	2,91998
Muestras	0,0	0,0

Fuente : corrida de GR&R en Statgraphics XIX (Statgraphics Technologies, 2023)

Número de categorías distintas (ndc): 48

Dada una tolerancia o especificación de 10,0 unidades de ancho (+/-5,0), se espera que la variabilidad del proceso de medición cubra el 2,91998% de ese rango. Generalmente, un sistema de medición se clasifica como aceptable si este porcentaje es inferior al 10%.

Intervalo de confianza

3 laboratoristas 10 muestras 3 lecturas

95,0 intervalo de confianza

La tabla siguiente muestra intervalos equivalentes a 6,0 veces las desviaciones estándar debido a la repetibilidad, la reproducibilidad, el análisis R&R combinado y la variabilidad entre las partes. Se espera que estos intervalos contengan el 99,73 % de los errores atribuidos a cada fuente. Por ejemplo, se esperaría que las mediciones se desviaran de los valores reales en +/- 0,146 debido al análisis R&R combinado, siendo menor que ΔE de 0,15.

Tabla 5. Intervalo de confianza

	Límite inferior	6,0 desviación estándar	Límite superior
Repetibilidad	0,236571	0,273583	0,324432
Reproducibilidad	0,0518846	0,102055	0,641287
R & R	0,275413	0,291998	0,763073
Muestras	0,0	0,0	0,0

Fuente : corrida de GR&R en Statgraphics XIX (Statgraphics Technologies, 2023)

La tabla Anova siguiente divide la variabilidad total de las mediciones ΔE en varias partes. La primera parte representa las diferencias entre los laboratoristas. La segunda parte representa las diferencias entre las muestras. La última parte representa el error residual, que corresponde a la repetibilidad.

Tabla 6. Anova

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Estadístico-F	Valor-P
Laboratoristas	0,0215171	2	0,0107585	5,17	0,0078
Muestras	0,00945721	9	0,0010508	0,51	0,8664
Residual	0,16217	78	0,0020791		
Total	0,193144	89			

Fuente : corrida de GR&R en Statgraphics XIX (Statgraphics Technologies, 2023)

En la ilustración siguiente se ve el comportamiento de la variable ΔE para cada una de las 10 muestras analizadas por los laboratoristas.

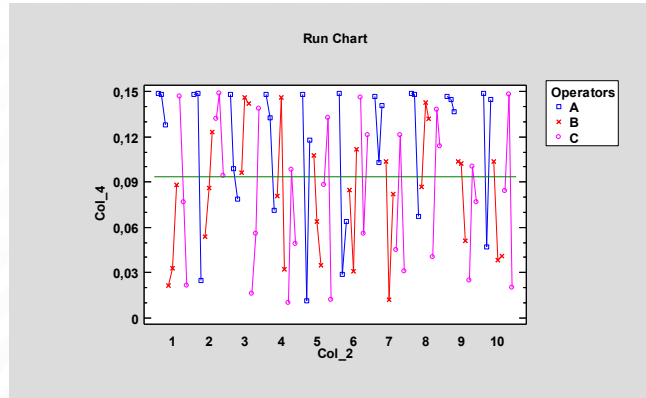


Ilustración 11. Registro de mediciones
Fuente: Captura de pantalla software PCE

En la ilustración siguiente se observa el promedio de las 3 lecturas que realizaron los 3 laboratoristas en las 10 muestras analizadas.

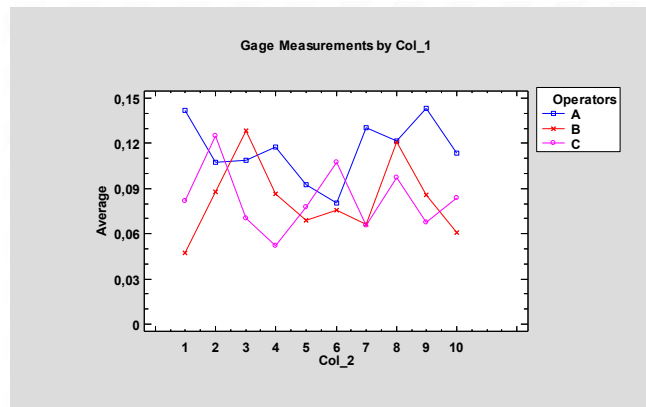


Ilustración 12. Registro de mediciones
Fuente: Captura de pantalla software PCE

Tradicionalmente, los sistemas de medición se venían evaluando considerando sólo características propias de los equipos, instrumentos o dispositivos como son la exactitud, la linealidad y la estabilidad. Actualmente se reconoce la necesidad de incluir en estas evaluaciones la determinación de la repetibilidad y la reproducibilidad como propiedades de los sistemas de medición.

Conclusiones

Se realizó un Análisis Estructural (MicMac) en las instalaciones de la Empresa Cofitex Ltda. Por un grupo de expertos y personal con experiencia, alto nivel de conocimiento y toma de decisión de compra la industria textil. Inicialmente el grupo de expertos mediante una reflexión grupal, seleccionaron 89 variables de impacto. Mediante la técnica de Brainstorming o lluvia de ideas se elaboró una lista de 89 factores de impacto clasificados en 9 dimensiones.

Con el software MicMac, se identificaron las variables estratégicas. Se obtienen las 16 variables esenciales para el desarrollo del sistema, a través de una clasificación indirecta MicMac.

La evaluación R&R en colorimetría textil es un paso importante para asegurar la calidad y consistencia del color en los productos textiles. Al identificar y reducir la variabilidad de las mediciones, se puede mejorar la eficiencia de los procesos de producción y la calidad del producto final.

Basados en un estudio con 3 laboratoristas, cada uno midiendo 10 muestras 3 veces de cada una, la desviación estándar estimada del proceso de medición es de 0,0487. Incluyendo las muestras, la variación total (VT) es de 0,0487.

De la varianza total, el 12,21% se debe a diferencias entre laboratoristas a lo que denominamos reproducibilidad, mientras que el 87,78% se debe al instrumento conocido también como repetibilidad.

Dada una tolerancia o especificación de 10,0 unidades de ancho (+/-5,0), se obtuvo que la variabilidad del proceso de medición es 2,92% de ese rango. Un sistema de medición se clasifica como aceptable si este porcentaje es inferior al 10%, como es el caso.

En el sistema de medición bajo control estadístico se espera que las mediciones se desviaran de los valores reales en +/- 0,146 debido al análisis R&R combinado, siendo menor que ΔE de 0,15 calificado como superado.

Referencias

- 1factory. (2011). Gage R&R (Repetibilidad y Reproducibilidad): Una Guía. Estudio R&R de Calibre Variable. <https://bit.ly/4nMbTr9>
- Automotive Industry Action Group (AIAG). (2010). Análisis de Sistema de medición. In Automotive Industry Action Group (AIAG) (Ed.), Tercera Edición (3a ed.). Automotive Industry Action Group (AIAG). www.aiag.org.
- Cárdenas, C., & Ríos, L. (2016). El proceso de transformación del cuero. Una mirada hacia la obtención del color en el teñido del cuero en curtiembres del departamento del Quindío. *Educacao e Sociedade*, 1(1), 1689–1699. <https://bit.ly/4ozNICW>
- Datacolor. (2019). *Técnicas de Medición en Colorimetría*. <https://bit.ly/3XaN7q5>
- Días Martínez, J. A. (2018). *Estudio de Repetibilidad y Reproducibilidad*.
- Escalante, E. (2011). *Análisis y mejoramiento de la calidad* (Editorial Limusa S.A. de C.V., Ed.; 1st ed.). Grupo Noriega editores.
- PCE Instruments. (2025). Colorímetro PCE-CSM 1. Instrumento Medida.
- Sierra, N., Plazas, C. E., Guillén, L. F., & Rodríguez, P. A. (2010). Protocolo para el control de calidad de envases de plástico , utilizados en la industria farmacéutica , de cosméticos y de alimentos Resumen Quality control guide of the packing employed in the Introducción. *Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas*, 39(2), 149–167. <http://www.scielo.org.co/pdf/rccqf/v39n2/v39n2a04.pdf>
- Statgraphics Technologies, Inc. (2023). *ANOVA Method* (Gage Studies-Variables).
- Terán, O. (2023). Control de Calidad basado en el Análisis del Sistema de Medición. *Industrial 4.0*, 1(6), 1–20. <https://bit.ly/4hUCa5t>
- Terán, O. (2024). Análisis estructural con MicMac en la colorimetría textil. Selección de variables estratégicas. *Industrial 4.0*, 9, 20. <https://bit.ly/4p4K2n6>
- Valdes, M., Delgado, J., Londoño, L., & Rodríguez, R. (2023). Sistema de medición del color como parámetro de calidad en la industria de alimentos. *Temas Agrarios*, 28(1), 69–81. <https://doi.org/10.21897/rta.v28i1.3200>
- Vinasco Isaza, L. E. (2022). Estudio de Repetibilidad y Reproducibilidad R&R. Centro de Ingeniería de La Calidad, 1, 1–11. <https://bit.ly/3JleAMC>
- Zavala, L., Vázquez, J., Gutiérrez, P., & Tapia, M. (2018). Generación de la formulación de color en un producto textil mediante Redes Neuronales Artificiales. *Nova Scientia*, 10(21), 78–96. <https://doi.org/10.21640/ns.v10i21.1507>

CAPÍTULO VI

**El trabajo insalubre en Bolivia:
Una falla conceptual que
perpetúa la inseguridad en la
minería**

Ahmed Amusquivar Caballero

Universidad Mayor de San Andrés

<https://orcid.org/0000-0002-6048-2932>

El trabajo insalubre en Bolivia: Una falla conceptual que perpetúa la inseguridad en la minería

Resumen

En la actualidad, el Estado Plurinacional de Bolivia, cuenta con la clasificación de trabajo insalubre a partir de la cual, los trabajadores pueden solicitar una reducción en su edad de jubilación; sin embargo, a esto se han identificado aspectos normativos que son contradictorios en su aplicación, estableciendo que actualmente existe una falla al clasificar al trabajo de interior mina como un trabajo insalubre, puesto que de acuerdo a la ley N° 3725 del año 2007, el trabajo en minería y los trabajos análogos son considerados trabajos esforzados; sin embargo, la ley N°573 del año 2014 ha establecido la reducción de edad de jubilación considerando al trabajo insalubre. En sus criterios de clasificación aun se emplean conceptos vinculados al trabajo esforzado como lo es el trabajo análogo, en este entendido, es fundamental establecer un solo marco normativo que permita regular el trabajo esforzado beneficiando a los trabajadores mineros, no únicamente en la reducción en la edad de jubilación sino también, en la mejora de las condiciones de trabajo.

Palabras clave: Trabajo insalubre, trabajo esforzado, minería, jubilación, Seguridad y salud ocupacional

Unhealthy work in Bolivia: a conceptual flaw that perpetuates insecurity in the mining industry

Abstract

Currently, the Plurinational State of Bolivia has a classification of unhealthy work, which allows workers to request a reduction in their retirement age. However, contradictory aspects of its application have been identified. Specifically, there is a flaw in the classification of underground mining work as unhealthy work. According to Law No. 3725 of 2007, mining work and similar jobs are considered strenuous. However, Law No. 573 of 2014 established a reduction in the retirement age for unhealthy work, yet

its classification criteria still employ concepts linked to strenuous work, such as similar work. Therefore, it is essential to establish a single regulatory framework that governs strenuous work, benefiting mine workers not only by reducing their retirement age but also by improving their working conditions.

Keywords: Unhealthy work, hard work, mining, retirement, occupational health and safety.

Trabalho insalubre na Bolívia: uma falha conceitual que perpetua a insegurança na indústria de mineração

Resumo

Atualmente, o Estado Plurinacional da Bolívia possui uma classificação de trabalho insalubre, que permite aos trabalhadores solicitar a redução da idade de aposentadoria. No entanto, foram identificados aspectos contraditórios em sua aplicação. Especificamente, há uma falha na classificação do trabalho em mineração subterrânea como trabalho insalubre. De acordo com a Lei nº 3725 de 2007, o trabalho em mineração e atividades similares são considerados extenuantes. Contudo, a Lei nº 573 de 2014 estabeleceu a redução da idade de aposentadoria para o trabalho insalubre, mas seus critérios de classificação ainda empregam conceitos vinculados ao trabalho extenuante, como o trabalho similar. Portanto, é essencial estabelecer um marco regulatório único que regule o trabalho extenuante, beneficiando os mineiros não apenas com a redução da idade de aposentadoria, mas também com a melhoria de suas condições de trabalho.

Palavras chave: Trabalho insalubre, trabalho árduo, mineração, aposentadoria, saúde e segurança ocupacional

Introducción

Los trabajos insalubres se han constituido en un problema que requiere una intervención urgente por parte del Estado Plurinacional de Bolivia, en el entendido que mencionada clasificación de una empresa o área de empresa como trabajo insalubre conlleva consecuencias a nivel de seguridad social a largo plazo y consecuencias reputacionales a nivel internacional, ocasionando que las empresas que cuentan con una clasificación de insalubridad pierdan mercados internacionales provocando afectaciones al ingreso de divisas y al desarrollo del producto interno bruto nacional.

La presente investigación pretende establecer las causas, consecuencias y condiciones en las cuales se realiza la clasificación de trabajo insalubre en empresas, en el Estado Plurinacional de Bolivia; la investigación contempla la aplicación de un paradigma sociocrítico desarrollando una metodología predominantemente cualitativa, fundamentada en la observación aplicada mediante la técnica de revisión documental de decretos supremos y publicaciones de prensa que permitirán definir la evolución de la clasificación de trabajos insalubres en el tiempo.

La revisión documental considerará aspectos principalmente del sector minero en el entendido que este sector se ha constituido en uno de los actores fundamentales en materia de seguridad y salud ocupacional particularmente desde el año 1962 cuando se creó el Instituto Nacional de Salud Ocupacional hasta la actualidad. A su vez se realizará una revisión de diversos decretos supremos y leyes que contemplan la normativa de trabajos insalubres, observando sus principales consideraciones al respecto de la temática desarrollada (INSTITUTO NACIONAL DE SALUD OCUPACIONAL - INSO, 2017).

Dado que es importante definir que la contribución fundamental de la investigación se encuentra en el impacto y la pertinencia de las actuales normativas de trabajos insalubres en el contexto nacional, las conclusiones de la presente investigación contribuyen a las entidades gubernamentales, sindicales y empresariales a definir un nuevo contexto más allá del trabajo insalubre pudiendo constituirse nuevos conceptos y la búsqueda de transformación en la tipificación y catalogación de los tipos de trabajo desde una perspectiva de la seguridad y salud ocupacional.

El desarrollo de la investigación se enfocará en el análisis de la insalubridad como un instrumento técnico legal y sus implicaciones. Para ello se realizará una breve revisión de la normativa desde el código de seguridad social del año 1956 que brinda uno de los primeros nexos entre el trabajo insalubre y la minería

en el país, posteriormente se realizara una revisión del nexo entre la minería y la salud y seguridad ocupacional observando el decreto supremo de creación del Instituto Nacional de Salud Ocupacional (INSO) el año 1962, donde la federación de mineros participara como parte del consejo técnico-administrativo del Instituto Nacional de Salud Ocupacional (INSO) que se constituye en un instituto dedicado a mejorar las condiciones laborales de los trabajadores mineros aquejados por la silicosis (Republica de Bolivia, 1979).

Los antecedentes antes mencionados permitirán brindar un contexto del desarrollo de las comisiones interministeriales del año 1979 que se enfocaran en el desarrollo de una normativa que desde una perspectiva técnica legal permitan establecer una clasificación de los trabajos en Bolivia con un enfoque importante al sector minero, promulgándose inicialmente el decreto supremo para la reducción de la edad de jubilación de 1980 enfocado al trabajo de interior mina y a trabajos análogos a este; siendo clasificado en el mismo como trabajo esforzado.

Posteriormente el año 2007 se elevará a rango de ley el decreto supremo de reducción de la edad de jubilación del año 1980, complementándose el mismo el año 2010 con el decreto de aumento de densidad de aportes para sectores mineros no considerados en la norma precedente. Generándose el año 2014 la ley de trabajos insalubres misma que genera una desconfiguración del concepto de insalubridad y se lo trastoca con el concepto de trabajo esforzado, estableciendo criterios normativos contradictorios e incluso opuestos a la normativa legal vigente en materia de seguridad ocupacional (Estado Plurinacional de Bolivia, 2014).

Estos hechos se verán reflejados en el decreto supremo N° 3268 del año 2017 que realizará una de las primeras declaratorias de trabajo insalubre, misma que contendrá en su planteamiento de considerandos y aspectos resolutivos varias contradicciones y falencias en la aplicación del criterio de insalubridad llegando a establecer una reducción en la edad de jubilación para tres áreas de trabajo, situación que será una evidencia fehaciente que el estado Boliviano legisla y ejecuta normativa que promueve la compensación de condiciones de trabajo que vulneran la vida de los seres humanos, que de acuerdo a un informe de la OIT 2024 perpetúan las malas condiciones de trabajo mismas que no mejoran en el tiempo. A continuación, se observa una línea de tiempo que muestra hitos fundamentales en el desarrollo de la normativa de trabajos insalubres en Bolivia de acuerdo a distintos periodos de gobierno.

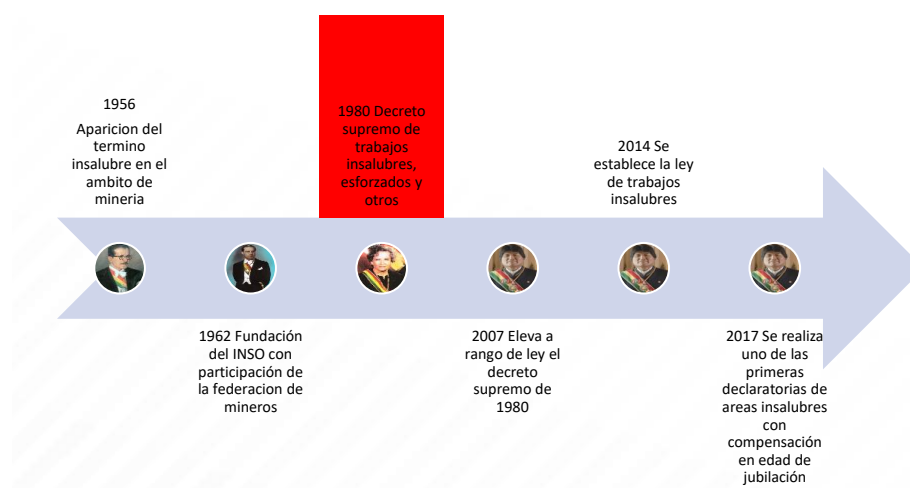


Figura 1

Línea del tiempo de la evolución de la legislación sobre insalubridad
 Fuente: Elaboración propia con base en (Estado Plurinacional de Bolivia, 2014; Estado Plurinacional de Bolivia, 2017; Republica de Bolivia, 1956; Republica de Bolivia, 1962; Republica de Bolivia, 1980; Republica de Bolivia, 2007)

Tal como se observa en la figura precedente desde la gestión 2007 se determinaron variedad de aspectos normativos enfocados a legislar en relación a criterios de insalubridad, sin embargo, estos hechos derivaron en una consecuencia negativa al generar conceptualizaciones contradictorias sobre distintos tipos de trabajo.

Finalmente, se llega a establecer la necesidad de contar con una ley que integre todas aquellas normas vinculadas al trabajo insalubre y brinde una clasificación nítida como un trabajo esforzado, debiéndose hacer una adecuada catalogación del tipo de trabajo en función a la afectación a la salud humana.

Desarrollo

El año 1980 la presidente Lidia Gueiler procedió a la promulgación del Decreto Supremo de trabajos insalubres. El mismo fue establecido en relación a una serie de informes presentados por comisiones interministeriales desarrollados el año 1979. En estos informes se estableció la necesidad de contar con un mecanismo que reconociera las condiciones adversas de los sectores y en particular del sector minero, mismas que sustituirán los criterios aun ambiguos del código de seguridad social de Bolivia del año 1956 en el cual se menciona el carácter insalubre y peligroso de las áreas de trabajo en minería (Bolivia: Código de Seguridad Social, 14 de Diciembre de 1956, n.d.; Republica de Bolivia, 1979).

El sector minero en Bolivia el año 1980 se caracterizó por jugar un papel protagónico a nivel político y social, más allá incluso del aspecto económico que el año 1980 representó el 6,8% del total del Producto Interno Bruto Nacional (PIB), siendo uno de los valores más significativos en los últimos 40 años, solo superado por el periodo 2008 a 2011 donde se alcanzaron niveles de hasta 7,6% (República de Bolivia, 1980; Ministerio de Minería y Metalurgia, 2021).

La importancia del sector minero también puede ser observada en la constitución de entidades destinadas a la seguridad y salud ocupacional, tal es el caso del Instituto Nacional de Salud Ocupacional (INSO) mismo que fue fundado por el presidente Víctor Paz Estensoro el año 1962 (República de Bolivia, 1962), incluyéndose a este sector de forma protagónica en materia de salud ocupacional tal como se muestra en el artículo 7 del decreto supremo 6278 de 1962 que de forma textual indica:

“ARTÍCULO 7.- El Consejo Técnico-Administrativo coordinará sus actividades con los organismos laborales y patronales, mediante un Comité Coordinador, integrado por representantes de la Federación Sindical de Trabajadores Mineros de Bolivia (F.S.T.M.B.), de la Confederación Sindical de Trabajadores Fabriles de Bolivia, de la Corporación Minera de Bolivia y de las Cámaras Nacionales de Industria y de Minería.” (República de Bolivia, 1962)

Esta característica se debe destacar pues permite comprender la importancia del sector durante un largo periodo de la industria nacional y en especial su participación en organismos de seguridad y salud ocupacional. Es fundamental para comprender la importancia del INSO en el ámbito de la salud ocupacional observar el decreto supremo 6278 de 1962 en su artículo 1 que indica:

ARTÍCULO 1.- Créase el Instituto Nacional de Salud Ocupacional, como único organismo gubernamental, normativo de las actividades de salud ocupacional en el país. (República de Bolivia, 1962)

El artículo 1 y la relación con el artículo 5 de mencionado decreto supremo no es casual pues como se observa en los considerandos se evidencia como justificación de la creación del INSO los aspectos de morbilidad y mortalidad relacionados con la silicosis, enfermedad endémica en el sector minero hacia mediados del siglo XX (Agencia de Noticias Fides, 2024).

En este contexto el decreto supremo 17305 del año 1980 ha establecido en coordinación con el sector minero una variedad de clasificaciones de tipos de trabajo, entre las cuales se destacará la del trabajo insalubre, en la cual se indica que este trabajo será denominado mal sano o que como consecuencia de este

se producirá una enfermedad, siendo destacado que el trabajo insalubre es inaceptable. (República de Bolivia, 1980)

Paralelamente a esta conceptualización, también se había definido el trabajo minero, trabajo a interior mina y trabajo análogo a interior mina, siendo considerado este tipo de trabajo en la misma normativa como un trabajo esforzado mismo que tendrá como consecuencia una reducción de la edad de jubilación (República de Bolivia, 1980), la conceptualización de este tipo de trabajo se indica a continuación:

Es aquel, que obliga a un esfuerzo de moderado a alto, en condiciones climáticas cercanas al umbral, permisible o rápidamente cambiantes y/o la presencia de riesgos químicos físicos, biológicos o de alta accidentabilidad que obligan al uso de protección personal, u otras medidas que constituyen una carga más de trabajo y sacrificio (República de Bolivia, 1980).

Siendo fundamental esta caracterización inicial para establecer las diferencias y falencias en el desarrollo normativo actual en materia de seguridad y salud ocupacional respecto a la catalogación del trabajo insalubre.

Las consecuencias relacionadas a los trabajos insalubres planteadas en el decreto supremo promulgado por Lidia Gueiler se establecen como un mecanismo compensatorio para la reducción de la edad de jubilación (República de Bolivia, 1980) como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1. Reducción en la edad de jubilación de acuerdo al DS 17305/1980

Tiempo de servicio (años)	Reducción de edad de jubilación (años)	Hombres (años)	Mujeres (años)
2	1	54	49
4	2	53	48
6	3	52	47
8	4	51	46
10 o mas	5	50	45

Fuente: (República de Bolivia, 1980)

La tabla anterior expresa la reducción en años de jubilación para el trabajo esforzado, en particular del sector minero, a interior mina y en trabajos análogos a estos. El año 2007, veintisiete años después de la promulgación del decreto supremo 17305/1980 se eleva a rango de ley mencionado decreto, mediante la ley 3725 de 2007, este evento jurídico establece un aspecto clave

contemporalizando la normativa en materia de trabajos insalubres y esforzados. (República de Bolivia, 2007)

Así también el año 2015 se efectuará la promulgación de la ley 721/2015 que indica el reconocimiento de los trabajos insalubres del sector minero metalúrgico y las cooperativas mineras pudiendo incrementar su densidad de aportes. (Estado Plurinacional de Bolivia, 2007)

El año 2014 se llegó a promulgar la ley 573, la misma establece una supuesta metodología básica para la catalogación de insalubridad (Estado Plurinacional de Bolivia, 2014), como se observa a continuación:

Artículo 2º.- (Condiciones insalubres del sector minero)

I. En caso de que otros sectores mineros que no estén contemplados en la Ley N° 3725 de 3 de agosto de 2007, soliciten se considere como trabajo análogo el realizado por su sector, éstos deberán cumplir con los siguientes requisitos:

a) Contar con estudio técnico del sector para declaratoria de trabajo análogo, efectuado por una comisión técnica integrada por el Instituto Nacional de Salud Ocupacional - INSO, Instituto Nacional de Seguros de Salud INASES y el Departamento Nacional de Medicina del Trabajo de la Caja Nacional de Salud - CNS.

b) Contar con un informe técnico legal para la declaratoria de trabajo análogo, elaborado por el Instituto Nacional de Salud Ocupacional - INSO, Instituto Nacional de Seguros de Salud - INASES y el Departamento Nacional de Medicina del Trabajo de la Caja Nacional de Salud - CNS (Estado Plurinacional de Bolivia, 2014).

En este artículo se puede observar que se menciona condiciones insalubres del sector minero, sin embargo, en el contenido se hace referencia a aspectos que contradicen la catalogación de condiciones insalubres, pues al establecer en el primer párrafo que “otros sectores mineros que no se contemplan en la ley 3725 de 2007 podrán solicitar su consideración como un trabajo análogo” (Estado Plurinacional de Bolivia, 2014), en este aspecto se debe establecer que los trabajos análogos por definición de la ley 3725 son aquellos semejantes a un trabajo a interior mina o trabajo esforzado, siendo por tanto contradictoria la denominación del artículo 2 y de su contenido. (Estado Plurinacional de Bolivia, 2014; Republica de Bolivia, 2007)

Así también, en ningún momento se establece el modo de catalogación de un trabajo insalubre, siendo incluso esta tarea no jurídica de acuerdo al actual ordenamiento legal, ya que el trabajo insalubre por definición es inaceptable, por ende, no puede ser parte de una consideración en reducción de edad de

jubilación, debiéndose modificar las condiciones de insalubridad y detenerse el proceso que pudiera conllevar el desarrollo con certeza de una enfermedad (República de Bolivia, 2007).

En el caso del procedimiento planteado en los incisos a y b se observa la participación del Instituto Nacional de Salud Ocupacional (INSO), siendo la entidad técnica destinada a realizar las evaluaciones de condiciones de seguridad y salud ocupacional en el área de trabajo, así como el Instituto Nacional de Seguros de Salud INASES como presidente de la comisión, actualmente denominado ASUSS y la caja nacional de salud como el ente destinado a brindar información clínica y epidemiológica del trabajo en el sector (Estado Plurinacional de Bolivia, 2014).

En el caso del INSO de acuerdo a un relevamiento del personal de esta entidad se observa que cuenta con una limitada cantidad de personal que pueda desarrollar a plenitud los estudios necesarios para la declaración de un trabajo insalubre. El INSO actualmente cuenta con equipamiento para la evaluación de condiciones de higiene ocupacional a nivel de estudios físicos y químicos, sin embargo se carece de mayor número de especialistas en el área de seguridad y salud ocupacional (INSO, 2025).

Siendo el requerimiento para establecer una condiciones esforzada o insalubre contar con especialistas en el área de la seguridad y salud ocupacional pues desde la conceptualización de salud de la OMS se tiene que la salud es un estado multidimensional donde se encuentra un equilibrio entre lo físico, lo social y lo mental, así también en la definición del trabajo esforzado se definen aspectos de accidentabilidad y otros aspectos que pueden generar una carga adicional de trabajo elementos que hacen a la ergonomía laboral y a la psicología, que actualmente son aspectos ajenos a la mayoría del personal de esta entidad no pudiendo responder de forma efectiva al requerimiento normativo de la actual coyuntura nacional (INSO, 2025; OMS, 2025).

Es pues necesario para poder desarrollar una evaluación completa de las áreas de trabajo esforzado o insalubre contar con especialistas en el ámbito de la seguridad y salud ocupacional debiendo incorporar personal que cuente con los conocimientos y experiencia certificada, puesto que en las actuales condiciones cualitativas y cuantitativas el INSO no puede responder a la demanda de estudios específicos de seguridad y salud ocupacional requeridos para la catalogación de un trabajo esforzado.

En el caso de la ASUSS se ha identificado un limitado seguimiento y avance en la catalogación de áreas de trabajo insalubre o esforzado en Bolivia, contándose con una carencia de personal permanente que pueda realizar un seguimiento a las múltiples solicitudes que piden la declaratoria de trabajo insalubre, además

que por la contradicción normativa antes mencionada entre el trabajo insalubre, el esforzado y el análogo, se hace fundamental contar con una representación ante el tribunal constitucional que instruya la modificación de la ley 573 del año 2014 a fin de que se cuente con una aplicación de la normativa como trabajo esforzado.

Finalmente, en el caso de la caja no se cuenta con un seguimiento pormenorizado de los trabajadores a fin de identificar el estado de salud en diversas áreas de trabajo, si bien cada trabajador desarrolla un examen médico ocupacional de forma periódica no se cuenta con un cotejo y análisis de mencionada información a fin de constatar la posible generación de una enfermedad o la materialización de un potencial daño, situación que frustra cualquier intento por desarrollar un análisis epidemiológico en el área de trabajo.

Es así como se puede evidenciar que las tres entidades que constituyen la comisión encargada de clasificar a una entidad como un trabajo insalubre o trabajo esforzado quedan limitadas en su accionar ya sea por no contar cuantitativamente y cualitativamente con personal especialista calificado y certificado para realizar los monitores, estudios y relevamiento en el área de trabajo, o contar con inestabilidad laboral que impide realizar una gestión adecuada de las peticiones de clasificación como trabajo insalubre o carencia de mecanismos que imposibilita el tratamiento de datos para la generación de información epidemiológica del sector minero.

Los hechos antes detallados se exponen de forma fehaciente en una declaratoria de trabajo insalubre que se realizó en la empresa minera Huanuni el año 2017 aprobado mediante decreto supremo N° 3268, 2 de agosto de 2017, en mencionado decreto supremo se observa una serie de aspectos contradictorios con la conceptualización del trabajo insalubre siendo algunos de los elementos más destacados en los considerandos de la norma una referencia realizada a la ley N° 065 del año 2010 en su artículo 125 (Estado Plurinacional de Bolivia, 2017) que indica que:

Artículo 125°.- (Condiciones insalubres) A efectos de la presente Ley se entenderá como trabajo en condiciones insalubres a aquellos definidos en la Ley N° 3725, de 3 de agosto de 2007 (Estado Plurinacional de Bolivia, 2010).

De acuerdo a lo mencionado en el artículo 125, el trabajo insalubre por definición de la ley N°3725/2007, será considerado como aquel que con seguridad provocara una enfermedad y por definición estos serán inaceptables no pudiendo contar con mecanismos compensatorios que permitan el desarrollo de este tipo de trabajos (República de Bolivia, 2007).

Además, se debe considerar que se ha elaborado un informe técnico por parte de la ASUSS, INSO y CNS numero CI/001/2017 (Estado Plurinacional de Bolivia, 2017) en el cual se detalla que:

El Informe técnico legal elaborado por la comisión tripartita concluye que de nueve (9) áreas de trabajo inspeccionadas en la operación de la Empresa Minera Huanuni han sido calificadas tres (3) como Trabajo Insalubre, que corresponden a las áreas: Compresoras, Taller Eléctrico Santa Elena y Maestranza Santa Elena (Estado Plurinacional de Bolivia, 2017).

El haber realizado dicha declaración debería derivar en la paralización inmediata de cualquier actividad laboral en el entendido que las tres áreas son consideradas como sectores en los cuales se producirá con seguridad una enfermedad, situación que no ocurrió en el entendido que en el año 2023 la empresa minera Huanuni sigue desarrollando actividades laborales en las mencionadas áreas, situación que puede verse reflejada en el POA de la Corporación Minera de Bolivia (COMIBOL) de mencionado año (Corporación Minera de Bolivia, 2023).

Siendo un punto aún más crítico el aspecto resolutivo de mencionado decreto en el cual se indica que:

Artículo 2º.- (Áreas de trabajo insalubre) Conforme a la Ley N° 3725, de 3 de agosto de 2007, se considera como trabajos insalubres análogos a los realizados por las siguientes áreas: Empresa Minera Huanuni, 1. Compresoras; 2. Taller Eléctrico Santa Elena; 3. Maestranza Santa Elena (Estado Plurinacional de Bolivia, 2017).

En mencionado decreto se hace referencia a la ley N° 3725 del año 2007, sin embargo, se considera la existencia de un trabajo “insalubre análogo” definición inexistente en mencionada normativa o decretos supremo relacionados a trabajos insalubres, este hecho que resulta un error flagrante en un documento firmado por el señor presidente del estado plurinacional de Bolivia, muestra la debilidad técnica legal de la normativa y del personal vinculado en la elaboración del informe de trabajos insalubre para Huanuni que somete a las empresas y en este caso al estado Boliviano a un elevado grado de vulnerabilidad por las consecuencias reputacionales a nivel internacional con la declaratoria de un trabajo como insalubre. (República de Bolivia, 2007; Estado Plurinacional de Bolivia, 2017)

De la misma forma se evidencio que de acuerdo al decreto supremo N° 2535 del año 2015 se procedió a declarar “insalubre análogo” a 13 secciones en la planta Apacheta y a 2 secciones en la planta Salar Capina perteneciente a la Empresa Sociedad Industrial Tierra S.A., de igual forma se llegó a declarar “insalubre análogo” mediante el decreto supremo N° 2281 del año 2015 a 11 áreas de la operación minera Kori Kollo y a 8 áreas de la

operación minera Cori Chaca pertenecientes a la empresa minera Inti Raymi S. A., fundamentando ambos decretos supremos en la ley N° 3725 del año 2007. (República de Bolivia, 2007; Estado Plurinacional de Bolivia, 2017)

Sin embargo, a esto se debe destacar que en la normativa antes mencionada no existe el término “insalubre análogo”, evidenciando tres decretos supremos con falencias sustanciales en la declaración de insalubridad, debiendo haberse generado la declaración de trabajo esforzado incorporando un plan para la mejora y control de las adecuadas condiciones laborales.

Además, la normativa nacional vigente en el DL N° 16998/1979 establece que es una obligación del empleador:

Adoptar todas las medidas de orden técnico para la protección de la vida, la integridad física y mental de los trabajadores a su cargo; tendiendo a eliminar todo género de compensaciones sustitutivas del riesgo como ser: bonos de insalubridad, sobrealimentaciones y descansos extraordinarios, que no supriman las condiciones riesgosas (Republica de Bolivia, 1979).

Como se puede observar en el párrafo anterior se debe tender a eliminar todo género de compensación que no elimine condiciones riesgosas, elemento jurídico que es pasado por alto, constituyéndose la jubilación anticipada en un mecanismo sustitutivo al riesgo, que promueve la consolidación de condiciones insalubre, siendo por tanto nulos de pleno derecho aquellos decretos que regulen o generen mecanismos compensatorios al realizar la declaración de insalubridad por encima de la supresión de las condiciones inseguras, hecho que además es indicado en la OIT que menciona la necesidad de tratar los trabajos insalubres, pues en caso contrario se podría perpetuar la insalubridad para futuras generaciones de trabajadores. (OIT, 2024; Republica de Bolivia, 1979)

Conclusión

De acuerdo a las características de la normativa analizada se observa que existen profundas contradicciones en los documentos legales en actual vigencia, siendo algunas de las contradicciones más significativas el uso de forma equivalente del término trabajo insalubre y trabajo análogo, hecho que incluso se observa en el decreto supremo N° 3268/2017 donde se realiza una declaración de insalubridad en tres áreas de la empresa minera Huanuni, situación que por definición está errada pues el trabajo interior mina y los trabajos análogos son considerados trabajos esforzados y no trabajos insalubres tal como se indica en el decreto supremo N°17305/1980 elevado a rango de ley mediante la ley N° 3725/2007.

Se ha observado que las falencias conceptuales en el manejo del término insalubre en la ley N° 573/2014 podrían consolidar procedimientos, resoluciones e informes con un elevado grado de subjetividad y error en el entendido que se realiza gestión pública en seguridad social a partir de áreas de trabajo que conceptualmente generarán con certeza enfermedades laborales en los trabajadores; este hecho sería completamente contradictorio con el decreto ley N°16998/1979 que indica la necesidad de realizar la eliminación de todo tipo de beneficio de insalubridad o factor que compense el riesgo, constituyéndose la reducción de la edad de jubilación en un beneficio relacionado con un área de trabajo insalubre hecho que además transgrede de forma flagrante el artículo 46 de la Constitución Política del Estado donde se expresa el derecho de todos los Bolivianos a la seguridad y salud ocupacional.

Finalmente, es fundamental expresar la necesidad de rectificar la normativa laboral en materia de trabajos insalubres eliminando la terminología insalubre, cambiando la misma por normativa de trabajo esforzado, así también estableciendo una sola ley de trabajos esforzados donde se detallen las definiciones y requisitos para poder beneficiarse de los derechos expresados en mencionada normativa, para ello además es fundamental contar con personal calificado en diversas especialidades en especial en el Instituto Nacional de Salud Ocupacional, que permita realizar una evaluación multidimensional de la seguridad y salud ocupacional generando valoraciones más allá de parámetros de higiene ocupacional, abarcando aspectos de seguridad ocupacional, ergonomía y psicología a fin de cumplir con la misión de evaluación del trabajo esforzado en sus diversas dimensiones.

Referencias

- Agencia de Noticias Fides. (2024). *Agencia de Noticias Fides - Investigaciones ANF: Silicosis, la enfermedad sin control que se come el pulmón de los mineros - Silicosis, la enfermedad sin control que se come el pulmón de los mineros.* <https://n9.cl/2uimu>
- Corporación Minera de Bolivia (2023) *Plan Operativo Anual* <https://www.comibol.gob.bo/images/TRANSPARENCIA/POA%202023%20COMIBOL.pdf>
- Estado Plurinacional de Bolivia (2014) Ley N° 573 Ley de reducción de edad de jubilación por trabajos insalubres <https://www.lexivox.org/norms/BO-L-N573.html>
- Estado Plurinacional de Bolivia (2015) Decreto Supremo N°2535 Declaración de insalubridad. Empresa Sociedad Industrial Tierra S. A. <https://www.lexivox.org/norms/BO-DS-N2535.xhtml>
- Estado Plurinacional de Bolivia (2015) Decreto Supremo N°2281 Declaración de insalubridad. Empresa Minera Inti Raymi S. A. <https://www.lexivox.org/norms/BO-DS-N2281.xhtml>
- Estado Plurinacional de Bolivia (2015) Decreto Supremo N°3268 Declaración de insalubridad. Empresa Minera Huanuni <https://www.lexivox.org/norms/BO-DS-N3268.html>
- Estado Plurinacional de Bolivia (2010) Ley N°065 Ley de Pensiones <https://www.lexivox.org/norms/BO-L-N65.xhtml>
- Estado Plurinacional de Bolivia (2015) Ley N°721 Ley de densidad de pensiones <https://www.lexivox.org/norms/BO-L-N721.html>
- INSTITUTO NACIONAL DE SALUD OCUPACIONAL - INSO. (2017). https://www.inso.gob.bo/inso/instituto_nacional_de_salud_ocupacional
- Ministerio de Minería (2021) Dossier del sector minero 1980 a 2021 <https://mineria.gob.bo/revista/pdf/20220811-11-41-30.pdf>
- Organización Internacional del Trabajo (2024) Jubilacion anticipada por causas de trabajos de naturaleza penosa <https://n9.cl/r4zqtq>
- Organización Mundial de la Salud (2025) Conceptualización de salud <https://www.who.int/es/about/frequently-asked-questions>
- Republica de Bolivia (1980) Decreto Supremo N°17305 Reducción de la edad de jubilación. Gaceta oficial de Bolivia
- Republica de Bolivia (2007) Ley N°3725 Eleva a rango de ley el DS N° 17305/1980 <https://www.lexivox.org/norms/BO-L-3725.xhtml>
- Republica de Bolivia (1979) Ley N°16998 Ley de Higiene, seguridad industrial y bienestar <https://www.lexivox.org/norms/BO-DL-16998.html>

Republica de Bolivia (1962) Ds N°6278 Decreto de creación del INSO
<https://www.pixilegal.com/normativa/decreto-6278-1962-11-16>
Republica de Bolivia (1956) Código de seguridad social <https://n9.cl/fn4ldo>

CAPÍTULO VII

**Ergonomía participativa como
estrategia de prevención
de riesgos ergonómicos en
cooperativas mineras bolivianas**

Orietta Blacutt Yucra

Universidad Mayor de San Andrés

<https://orcid.org/0009-0000-3096-4167>

Ergonomía participativa como estrategia de prevención de riesgos ergonómicos en cooperativas mineras bolivianas

Resumen

Las cooperativas mineras en Bolivia operan bajo condiciones laborales marcadas por la precariedad, el esfuerzo físico intenso y una limitada institucionalización de los sistemas de seguridad y salud ocupacional. En este contexto, la ergonomía participativa (EP) se plantea como una alternativa efectiva para prevenir y gestionar los riesgos ergonómicos. Este enfoque reconoce el conocimiento práctico de los trabajadores, promueve su participación activa en la identificación de peligros y, la búsqueda de soluciones, y se alinea con modelos de gestión horizontal característicos de las organizaciones cooperativas. El presente artículo propone una metodología teórica, estructurada en ocho fases, orientada a facilitar la implementación de estrategias participativas en contextos mineros cooperativistas bolivianos. La propuesta se fundamenta en una revisión crítica de la literatura internacional y latinoamericana sobre EP, así como en los principios metodológicos recomendados por autores como Haines, Helander y Galvis Pineda. Se argumenta que el abordaje participativo no solo mejora la identificación y control de factores de riesgos físicos, sino que también fortalece el compromiso de los trabajadores, genera cambios sostenibles y contribuye a consolidar una cultura preventiva desde dentro de las organizaciones. La metodología presentada articula herramientas accesibles, procesos de capacitación progresiva, diagnóstico colectivo y evaluación continua de los resultados, constituyendo un marco conceptual aplicable y orientando a futuras investigaciones destinadas a validar empíricamente su efectividad en entornos cooperativos bolivianos.

Palabras clave: Ergonomía participativa, riesgos ergonómicos, prevención, participación laboral, salud ocupacional

Participatory ergonomics as a strategy for the prevention of ergonomic risks in bolivian mining cooperatives

Abstract

Bolivian mining cooperatives operate under working conditions marked by precariousness, intense physical effort, and a limited institutionalization of occupational health and safety systems. In this context, participatory ergonomics (PE) emerges as an effective alternative for preventing and managing ergonomic risks. This approach recognizes workers' practical knowledge, promotes their active participation in hazard identification and problem-solving, and aligns with the horizontal management models characteristic of cooperative organizations. This article proposes a theoretical methodology structured into eight phases, aimed at facilitating the implementation of participatory strategies in Bolivian cooperative mining settings. The proposal is grounded in a critical review of international and Latin American literature on participatory ergonomics, as well as in the methodological principles recommended by authors such as Haines, Helander, and Galvis Pineda. It is argued that the participatory approach not only improves the identification and control of physical risk factors, but also strengthens worker commitment, generates sustainable changes, and contributes to consolidating a preventive culture from within the organizations. The methodology presented integrates accessible tools, progressive training processes, collective diagnosis, and continuous evaluation of results, constituting an applicable conceptual framework and guiding future research aimed at empirically validating its effectiveness in Bolivian cooperative environments.

Keywords: Participatory ergonomics, ergonomic risks, prevention, worker participation, occupational health

Ergonomia Participativa como Estratégia para a Prevenção de Riscos Ergonômicos em Cooperativas Mineiras Bolivianas

Resumo

As cooperativas de mineração na Bolívia operam em condições de trabalho marcadas pela precariedade, pelo esforço físico intenso e pela limitada institucionalização dos sistemas de segurança e saúde ocupacional. Nesse contexto, a ergonomia participativa (EP) se apresenta como uma alternativa eficaz para prevenir e gerir riscos ergonômicos. Essa abordagem reconhece o conhecimento prático dos trabalhadores, promove sua participação ativa na identificação de perigos e na busca de soluções, e se alinha aos modelos de gestão horizontal característicos das organizações cooperativas. Este artigo propõe uma metodologia teórica estruturada em oito fases, orientada a facilitar a implementação de estratégias participativas em contextos mineiros cooperativistas bolivianos. A proposta fundamenta-se em uma revisão crítica da literatura internacional e latino-americana sobre ergonomia participativa, assim como nos princípios metodológicos recomendados por autores como Haines, Helander e Galvis Pineda. Argumenta-se que a abordagem participativa não apenas melhora a identificação e o controle dos fatores de risco físico, mas também fortalece o compromisso dos trabalhadores, gera mudanças sustentáveis e contribui para consolidar uma cultura preventiva a partir do interior das organizações. A metodologia apresentada integra ferramentas acessíveis, processos de capacitação progressiva, diagnóstico coletivo e avaliação contínua dos resultados, constituindo um marco conceitual aplicável e orientando futuras pesquisas destinadas a validar empiricamente sua efetividade em ambientes cooperativos bolivianos.

Palavras chave: Ergonomia participativa, riscos ergonômicos, prevenção, participação dos trabalhadores, saúde ocupacional.

Introducción

La minería es una actividad económica fundamental en Bolivia, con una rica historia que se remonta a la época colonial y una influencia significativa en el desarrollo del país (Ministerio de Minería y Metalurgia de Bolivia, 2024). Desde el siglo XVI, especialmente con la explotación de la plata en Potosí durante la colonia, la minería ha sido un pilar económico clave (Ministerio de Minería y Metalurgia de Bolivia, 2024). Tras la independencia en 1825, el sector enfrentó crisis y reformas, incluyendo la nacionalización de las minas en 1952 mediante la creación de la Corporación Minera de Bolivia (COMIBOL). En las décadas posteriores, se implementaron políticas de privatización y descentralización, aunque el Estado ha mantenido un rol activo en la gestión minera (Ministerio de Minería y Metalurgia de Bolivia, 2024).

Bolivia posee abundantes recursos minerales como estaño, plata, zinc, oro y litio. La producción de oro, por ejemplo, ha incrementado considerablemente, pasando de 7 toneladas en 2009 a 53 toneladas en 2022 (Ministerio de Minería y Metalurgia de Bolivia, 2024). A ello se suman condiciones laborales precarias, con alta exposición a esfuerzos físicos, jornadas prolongadas y mínimas medidas preventivas, así como conflictos sociales crecientes por la expansión de la minería en áreas naturales protegidas, donde cooperativas mineras buscan concesiones en reservas amazónicas (Mongabay Latam, 2024).

A diferencia de los sectores mineros estatal y privado, las cooperativas enfrentan mayores desafíos para implementar programas ergonómicos debido a la limitada institucionalización, la autogestión horizontal y la escasez de recursos técnicos. La mayoría de las estrategias preventivas tradicionales han resultado poco sostenibles, al no considerar la participación directa de los trabajadores ni las particularidades socioculturales de la organización cooperativa.

El sector minero cooperativo representa, por tanto, uno de los segmentos laborales más vulnerables del país. Las tareas realizadas caracterizadas por el esfuerzo físico intenso, las posturas forzadas y la ausencia de medidas preventivas sistemáticas aumentan la incidencia de trastornos musculoesqueléticos (TME). De esta manera, las intervenciones ergonómicas tradicionales muestran una baja aceptación en este tipo de contextos, debido a su escasa adaptabilidad y a la falta de confianza hacia modelos técnicos externos.

En contraste, la ergonomía participativa (EP) ofrece una alternativa viable y contextualizada, centrada en la inclusión activa

de los trabajadores como expertos de su propia labor. Mediante procesos colaborativos, se identifican los riesgos, se comprende su origen y se co-diseñan soluciones técnica y culturalmente apropiadas. Este enfoque se alinea con las recomendaciones internacionales de la Organización Internacional del Trabajo (OIT) (2024), que promueven modelos preventivos inclusivos, basados en el diálogo social, la equidad y la corresponsabilidad.

En este contexto, la EP surge como una estrategia integral para prevenir y mitigar riesgos ergonómicos en cooperativas mineras bolivianas. Este enfoque incorpora activamente a los trabajadores en los procesos de identificación, análisis y resolución de problemas relacionados con el diseño de tareas, herramientas y condiciones de trabajo (Haines, Wilson, Vink & Koningsveld, 2002; Helander, 2005).

La revisión de la literatura revela una brecha significativa en investigaciones aplicadas al contexto cooperativo boliviano, donde la mayoría de los estudios ergonómicos se concentran en sectores industriales o formales. Esta carencia evidencia la necesidad de desarrollar una propuesta metodológica específica que considere la estructura autogestionaria, las limitaciones tecnológicas y la cultura organizacional de las cooperativas mineras.

Por lo tanto, este artículo presenta una metodología de EP estructurada en ocho fases, orientada a fortalecer la gestión ergonómica en cooperativas mineras mediante la participación activa, el aprendizaje colectivo y la sostenibilidad organizacional.

El objetivo general del presente estudio es proponer una metodología integral de EP adaptada a las condiciones sociolaborales del sector cooperativo minero boliviano.

De este objetivo general se derivan los siguientes objetivos específicos:

- Delinear un marco teórico integrado de EP aplicable a cooperativas mineras bolivianas, identificando principios, actores y condiciones facilitadoras.
- Estructurar y describir una metodología en ocho fases, especificando herramientas, responsables, productos intermedios y criterios de éxito por fase.
- Proponer indicadores de evaluación (cualitativos y cuantitativos) para monitorear la adopción de medidas ergonómicas, resultados en salud y desempeño operativo.
- Ofrecer lineamientos de implementación y escalamiento para organizaciones cooperativas con recursos limitados, integrables a sus órganos de cogestión.

Contribución teórica y validación empírica previa

La eficacia de la ergonomía participativa EP ha sido ampliamente demostrada en la literatura científica, donde se destacan sus aportes tanto a la salud ocupacional como al desempeño organizacional. Este cuerpo de conocimiento constituye el sustento teórico y empírico que valida la propuesta metodológica desarrollada en el presente artículo.

Allard, Dempsey y Hashemi (2000) evidenciaron que la implementación de programas de EP facilita la identificación de riesgos ergonómicos desde la experiencia directa de los trabajadores, lo que permite generar soluciones contextualizadas y sostenibles. De igual manera, Hansen et al. (2023) destacaron que la EP posee una alta capacidad de adaptación a diversos contextos laborales, incluyendo aquellos con baja tecnificación y recursos limitados, ya que su efectividad depende más del grado de participación y compromiso de los trabajadores que de la disponibilidad tecnológica. Esto refuerza su pertinencia en entornos productivos como el minero cooperativo, donde la autogestión y la cooperación son pilares organizacionales.

En el ámbito latinoamericano, Piedrahita (2014) demostró en el sector minero colombiano una reducción significativa de síntomas musculoesqueléticos mediante la reorganización de tareas y talleres participativos, evidenciando que la aplicación práctica del enfoque participativo puede transformar las condiciones laborales incluso en contextos con estructuras informales o autogestionadas.

Por su parte, Arroyo, Coronado y Vázquez (2014) plantean que la EP puede integrarse a las estrategias de responsabilidad social empresarial, al promover el bienestar físico, psicológico y social del trabajador mediante su implicación activa en la toma de decisiones sobre el entorno de trabajo. Esta visión amplia refuerza la dimensión ética y social de la EP.

En cuanto a los resultados cuantitativos, Street, Thomas y Beaton (2003) reportaron mejoras en la postura laboral y en la percepción general de salud tras intervenciones participativas, mientras que Restuputri, Sugiharto y Novitasari (2021) confirmaron que la EP puede reducir riesgos ergonómicos y mejorar la productividad incluso en industrias con altas demandas físicas y recursos limitados. Estos hallazgos coinciden con los postulados de Helander (2005), quien sostiene que la participación activa de los trabajadores genera aprendizajes organizacionales duraderos y favorece la sostenibilidad de las medidas preventivas.

En conjunto, estas investigaciones demuestran que la EP trasciende la dimensión técnica de la prevención de riesgos,

convirtiéndose en un modelo socio-técnico integral que fortalece la cohesión laboral, estimula la innovación local y potencia la sostenibilidad de las intervenciones. Este marco teórico y empírico justifica su aplicación en el contexto cooperativo minero boliviano, donde la participación, la corresponsabilidad y la apropiación colectiva son pilares del sistema organizacional.

Dado que el presente estudio corresponde a un diseño teórico, no se plantea una hipótesis operativa verificable en campo. Sin embargo, se establece como hipótesis conceptual que la participación activa y sistemática de los trabajadores en los procesos de identificación, análisis y resolución de riesgos ergonómicos incrementa la sostenibilidad y efectividad de las medidas de prevención en contextos cooperativos. Esta premisa constituye el fundamento lógico del modelo propuesto y orienta futuras investigaciones empíricas que permitirán evaluar su validez y aplicabilidad en cooperativas mineras bolivianas.

Diseño metodológico teórico

A partir del análisis crítico de la literatura sobre ergonomía participativa (EP), se propone una metodología compuesta por ocho fases secuenciales para su implementación en cooperativas mineras bolivianas. Esta propuesta se fundamenta en los marcos teóricos de Haines et al. (2002), Helander (2005) y Galvis Pineda et al. (2019), quienes coinciden en la necesidad de adaptar los procesos participativos a las características sociolaborales de cada entorno productivo.

Cabe señalar que la metodología propuesta constituye un diseño teórico basado en la revisión crítica de literatura especializada y no en una validación empírica directa. Su propósito es ofrecer un marco conceptual aplicable y adaptable al contexto cooperativo minero boliviano, sirviendo como herramienta de orientación para futuras investigaciones de campo. En esta etapa, la propuesta no pretende demostrar eficacia práctica, sino establecer los fundamentos metodológicos necesarios para su posterior verificación empírica.

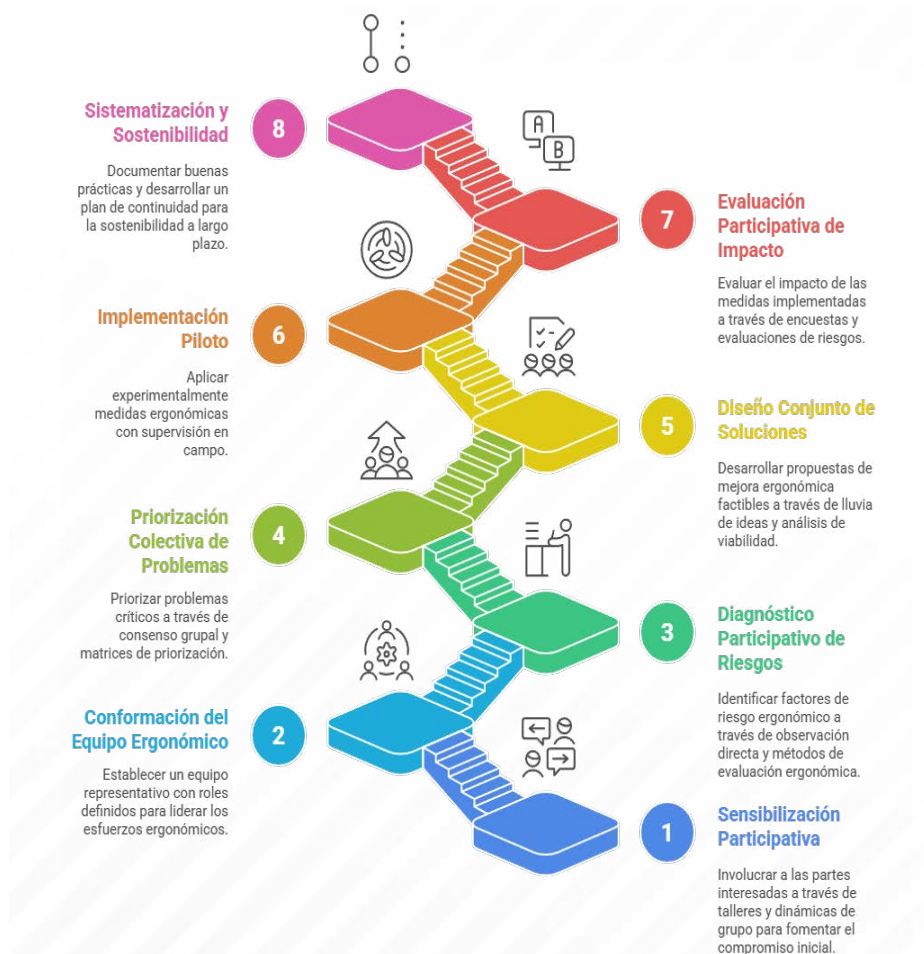
Las ocho fases del modelo propuesto son las siguientes:

1. Sensibilización participativa: Se introducen conceptos básicos sobre ergonomía, salud ocupacional y prevención mediante talleres participativos, donde los trabajadores identifican conjuntamente los principales problemas (esfuerzo físico, posturas forzadas, organización del trabajo) (Haines et al., 2002). Indicador de éxito: ≥ 80 % de participación

- activa en el taller inicial.
2. Conformación del equipo ergonómico local: Selección democrática de representantes del grupo de trabajo que actuarán como enlace entre la base laboral y los facilitadores del proceso ergonómico. Estos agentes multiplicadores recibirán formación específica sobre riesgos ergonómicos y técnicas de intervención (Helander, 2005). Indicador de éxito: equipo operativo consolidado y validado por asamblea o comité.
 3. Diagnóstico participativo de riesgos: Aplicación de herramientas cualitativas y cuantitativas como listas de chequeo, observaciones directas, entrevistas semiestructuradas y mapas corporales. Se prioriza el uso de métodos accesibles como NIOSH, MAC, RAPP, OCRA, REBA o RULA adaptados al lenguaje local (Piedrahita, 2014). Indicador de éxito: ≥ 70 % de cobertura diagnóstica por área o proceso.
 4. Jerarquización colectiva de problemas: Los riesgos identificados se organizan y priorizan con base en su frecuencia, gravedad y posibilidad de intervención, mediante dinámicas grupales y matrices de priorización consensuadas, lo que permite fortalecer el compromiso colectivo y la toma de decisiones informada dentro del grupo de trabajo (Hansen et al., 2023). Indicador de éxito: Coincidencia ≥ 75 % entre participantes en los resultados de priorización.
 5. Diseño conjunto de soluciones: Desarrollo colaborativo de propuestas de mejora centradas en la reconfiguración de tareas, rediseño de herramientas y cambios organizacionales realistas, considerando siempre los recursos materiales y tecnológicos disponibles (Galvis Pineda et al., 2019). Indicador de éxito: al menos tres medidas ergonómicas validadas colectivamente.
 6. Implementación piloto: Prueba de las soluciones propuestas en un entorno controlado o limitado (por cuadrilla o zona de trabajo), evaluando su funcionalidad, aceptación y viabilidad técnica sin interrumpir las operaciones (Restuputri et al., 2021). Indicador de éxito: al menos una medida implementada y aceptada por el grupo.
 7. Evaluación participativa de impacto: Medición cualitativa y cuantitativa de los resultados a partir de indicadores como reducción de síntomas físicos, mejora de posturas, aumento de satisfacción y compromiso laboral (Street et al., 2003). Indicador de éxito: ≥ 30 % de mejora en puntajes de riesgo postural y percepción de bienestar.
 8. Sistematización y sostenibilidad: Documentación del proceso, generación de lecciones aprendidas, y propuesta de

escalamiento de las intervenciones hacia otros sectores de la cooperativa. Se busca empoderar a los trabajadores para que mantengan y repliquen las mejoras (Winters, 2016). Indicador de éxito: publicación o difusión interna del documento de sistematización.

Cada fase incluye mecanismos de retroalimentación y se construye a partir del conocimiento compartido entre trabajadores y facilitadores, respetando el ritmo y lenguaje de la organización, tal como se sintetiza posteriormente en la Figura 1. Este enfoque es particularmente adecuado para las cooperativas mineras, donde los sistemas jerárquicos son más horizontales y la toma



de decisiones se realiza en asambleas u órganos de cogestión
 Figura 1. Metodología de ergonomía participativa en ocho fases.

Fuente: Elaboración propia (2025)

Elementos facilitadores de la ergonomía participativa

La implementación exitosa de la ergonomía participativa (EP)

en cooperativas mineras requiere identificar una serie de factores que actúan como facilitadores del proceso. Estos elementos son claves para asegurar la viabilidad, sostenibilidad e impacto positivo de las intervenciones. Entre ellos se destacan:

a) Compromiso organizacional colectivo: En contextos cooperativos donde la toma de decisiones es compartida, el respaldo explícito de las asambleas y directivas fortalece la legitimidad del proceso participativo (Arroyo et al., 2014). La corresponsabilidad en la gestión del riesgo es fundamental para promover acciones sostenidas. Impacto: Organizacional e institucional.

b) Formación continua y apropiación técnica: El fortalecimiento de capacidades en los actores clave como líderes operativos, trabajadores y responsables de salud y seguridad garantiza la apropiación de herramientas ergonómicas, fomenta la reflexión crítica sobre las condiciones laborales y mejora la capacidad de análisis colectivo y autogestión del cambio (Hansen et al., 2023). Impacto: Técnico y social.

c) Pertinencia cultural y contextual: La adecuación de las estrategias al lenguaje, costumbres y dinámicas propias de las cooperativas mineras favorece la aceptación y facilita la aplicación de soluciones consensuadas (Piedrahita, 2014; Galvis Pineda et al., 2019). Impacto: Social y organizacional.

d) Flexibilidad metodológica: La capacidad de adaptar los instrumentos y fases del proceso a los tiempos y recursos disponibles permite sostener el proceso participativo sin generar tensiones operativas (Winters, 2016). Impacto: Organizacional y técnico.

e) Retroalimentación permanente: La evaluación continua de avances mediante espacios de diálogo, revisión y ajuste refuerza la transparencia, la cohesión grupal y la calidad del proceso participativo. La retroalimentación, además de ser un mecanismo de control, se convierte en una herramienta formativa que consolida el aprendizaje colectivo (Restuputri et al., 2021). Impacto: Social y organizacional.

f) Liderazgos facilitadores: La presencia de liderazgos horizontales, comunicativos y comprometidos con el bienestar colectivo es clave para mantener la motivación, la cohesión del grupo y la continuidad de las acciones durante todo el ciclo metodológico. De acuerdo con Street et al. (2003), estos liderazgos actúan como catalizadores del cambio, promoviendo la apropiación del proceso por parte de los trabajadores. Impacto: social e institucional.

En conjunto, estos elementos facilitadores fortalecen la eficacia técnica y social de la EP, asegurando que las intervenciones no solo mitiguen riesgos ergonómicos, sino que impulsen una transformación organizacional y cultural sostenida. Su integración estratégica dentro de las ocho fases metodológicas permite alinear la participación colectiva con la mejora continua, contribuyendo al desarrollo de entornos de trabajo más seguros, equitativos y productivos en las cooperativas mineras bolivianas.

Conclusiones

La ergonomía participativa (EP) constituye una estrategia efectiva y pertinente para mejorar las condiciones de trabajo en las cooperativas mineras bolivianas. Su aplicación no solo permite identificar y mitigar riesgos ergonómicos desde la experiencia de los propios trabajadores, sino que de esta manera promueve una transformación organizacional basada en la corresponsabilidad, la equidad y el empoderamiento colectivo.

Se integra un sustento teórico y empírico sólido, respaldado por estudios internacionales y regionales que validan la eficacia de la EP en la reducción de trastornos musculoesqueléticos, la optimización de tareas y la consolidación de una cultura preventiva.

El modelo metodológico propuesto, estructurado en ocho fases, ofrece un marco flexible y adaptable a las particularidades sociolaborales del sector minero cooperativista, destacándose por su enfoque práctico, participativo y sostenible. Este enfoque ha sido respaldado por diversas experiencias teóricas y estudios de caso que demuestran su efectividad en la reducción de trastornos musculoesqueléticos, la mejora en el diseño de tareas y herramientas, así como en la consolidación de una cultura preventiva.

En cuanto a los indicadores de éxito referenciales incluidos en la Figura 1 demuestran la viabilidad de evaluar de forma técnica, organizacional y social la efectividad del modelo.

Los elementos facilitadores identificados como el compromiso organizacional, la formación continua, la pertinencia cultural y la presencia de liderazgos horizontales garantizan la sostenibilidad y apropiación colectiva de las intervenciones participativas.

En este contexto, se hace un llamado a instituciones, cooperativas y profesionales de la salud ocupacional a considerar e impulsar la EP como parte integral de sus estrategias preventivas. Se recomienda avanzar hacia experiencias piloto, sistematizar buenas prácticas y generar políticas públicas que reconozcan el valor del saber laboral en la construcción de ambientes de

trabajo seguros, saludables y dignos.

Finalmente, se plantea la necesidad de integrar la EP dentro de marcos regulatorios nacionales que impulsen la participación activa de los trabajadores en la gestión de la seguridad y salud ocupacional. Con acompañamiento técnico adecuado, fortalecimiento de capacidades y reconocimiento institucional, las cooperativas mineras pueden convertirse en espacios de innovación social capaces de consolidar procesos participativos de transformación laboral duradera. Esta visión no solo contribuye a la mejora ergonómica, sino que también fortalece el desarrollo comunitario y la sostenibilidad económica del sector cooperativo minero.

Referencias

- Allard, D. J., Dempsey, P. G., & Hashemi, L. (2000). Implementation evaluation of a participatory ergonomics program. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 44(25), 629–632. <https://doi.org/10.1177/154193120004402507>
- Arroyo, I., Coronado Hernández, J. del C., & Vázquez Olarra, G. (2014). La ergonomía participativa como parte de la responsabilidad social empresarial. *Revista Iberoamericana de Investigación en Ciencias Sociales y Humanísticas*, 3(6), 2288–2299. <https://www.riico.net/index.php/riico/article/view/1269>
- Galvis Pineda, R. J., Correa Bedoya, J. A., & González Vargas, C. A. (2019). Modelo de un programa de ergonomía participativa para una empresa manufacturera [Documento institucional]. Universidad El Bosque. <https://repositorio.unbosque.edu.co/items/92292fab-5b12-41a9-98f2-65044a16d4fe>
- Haines, H., Wilson, J. R., Vink, P., & Koningsveld, E. (2002). Validating a framework for participatory ergonomics (the PEF). *Ergonomics*, 45(4), 309–327. <https://doi.org/10.1080/00140130210123516>
- Hansen, A. F., Hasle, P., Caroly, S., Reinhold, K., Jarvis, M., Herrig, A. O., Heiberg, B. D., Søgaaard, K., Punnett, L., & Jensen Stochkendahl, M. (2023). Participatory ergonomics: What works for whom and why? A realist review. *Ergonomics*. <https://doi.org/10.1080/00140139.2023.2202842>
- Helander, M. (2005). *A guide to human factors and ergonomics* (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b12385>
- Ministerio de Minería y Metalurgia de Bolivia. (2024). Información minera en Bolivia. Ministerio de Minería y Metalurgia de Bolivia. <https://minería.gob.bo>
- Mongabay Latam. (2024, julio 29). *El área protegida más joven de Bolivia enfrenta el peligro de la minería y la tala de árboles.*

<https://n9.cl/0hh6yt>

Organización Internacional del Trabajo (OIT). (2024). Seguridad y salud en el trabajo. Organización Internacional del Trabajo.

<https://www.ilo.org>

Piedrahita, H. (2014). Algunas experiencias de la aplicación de la ergonomía participativa en minería colombiana. *Revista Ciencias de la Salud*, 12(Especial), 69-76. <https://doi.org/10.12804/revsalud12.esp.2014.05>

Restuputri, D. P., Sugiharto, S., & Novitasari, R. (2021). Work safety aspects using a participatory ergonomics approach in the garment industry. *Spektrum Industri*, 19(2), 45-52. <https://doi.org/10.12928/si.v19i2.21017>

Street, T. D., Thomas, D. R., & Beaton, L. J. (2003). Changes in postural risk and general health associated with a participatory ergonomics program. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 31(3), 207-218. [https://doi.org/10.1016/S0169-8141\(02\)00186-4](https://doi.org/10.1016/S0169-8141(02)00186-4)

Winters, J. M. (2016). Embracing participatory ergonomics: Building capacity through leadership and collaboration. *Work*, 54(2), 353-361. <https://doi.org/10.3233/WOR-162310>

CAPÍTULO VIII

Determinación morfológica del cuerpo humano en estudiantes de ingeniería

Mónica Lino Humerez

Universidad Mayor de San Andrés

<https://orcid.org/0000-0003-2827-7119>

Determinación morfológica del cuerpo humano en estudiantes de ingeniería

Resumen

A partir del estudio antropométrico de medidas corporales, el presente trabajo establece la medición de dimensiones corporales apropiadas a una estructura determinada del cuerpo humano en jóvenes estudiantes entre 18 y 28 años de la Universidad Mayor de San Andrés en la ciudad de La Paz, donde los indicadores tales como; peso, estatura, composición corporal, algunos de los más relevantes se determinan a través de la sistematización de los referentes teóricos sobre estandarización de medidas corporales, para luego caracterizar y definir los valores reales del somatotipo de cuerpo y silueta determinada en jóvenes.

La metodología de trabajo y relevamiento de información se apoya en una declaración del paradigma positivista, a partir de un enfoque cuantitativo la investigación combina un estudio descriptivo y correlacional; el diseño de estudio fomenta un proceso no experimental apoyado en análisis estadístico de los resultados con base en las variables elegidas que de acuerdo a los resultados de la muestra de 383 estudiantes universitarios, se determina que el somatotipo es endoformo y en silueta de cuerpo es rectangular, con una variación interesante en el porcentaje de cuerpos en forma de reloj de arena. Estos resultados permiten generar las bases para el Tallaje de Vestuario, puntualizando la forma de tallaje de los cuerpos en jóvenes para optimizar el diseño de prendas de vestir.

Palabras clave: Antropometría, Medidas corporales, Morfología, tallaje, estandarización.

Morphological determination of the human body in engineering students, towards sizing

Abstract

From the anthropometric study of body measurements, the present work establishes the measurement of body dimensions appropriate to a certain structure of the human body in young students between 18 and 28 years of age from the Universidad Mayor de San Andrés in the city of La Paz, where indicators such as; weight, height, body composition, some of the most relevant are determined through the systematization of theoretical references on standardization of body measurements, to then characterize and define the real values of the somatotype of body and silhouette determined in young people.

The methodology of work and information collection is based on a statement of the positivist paradigm, from a quantitative approach the research combines a descriptive and correlational study; The study design encourages a non-experimental process supported by statistical analysis of the results based on the chosen variables that based on the results of the sample of 383 university students, it is determined that the somatotype is endoform and the body silhouette is rectangular, with an interesting variation in the percentage of bodies in the shape of an hourglass. These results allow the bases for wardrobe sizing to be generated, specifying the way of sizing the bodies in young people to optimize the design of clothes.

Keywords: Anthropometry, Body measurements, Morphology,

sizing, standardization

Morfológica do corpo humano em estudantes de engenharia, visando o dimensionamento

Resumo

A partir do estudo antropométrico das medidas corporais, o presente trabalho estabelece a mensuração das dimensões corporais adequadas a uma determinada estrutura do corpo humano em jovens estudantes entre 18 e 28 anos da Universidad Mayor de San Andrés na cidade de La Paz, onde indicadores como; peso, altura, composição corporal, alguns dos mais relevantes são determinados através da sistematização de referenciais teóricos sobre padronização de medidas corporais, para então caracterizar e definir os valores reais do somatótipo de corpo e silhueta determinados em jovens.

A metodologia de trabalho e recolha de informação assenta numa afirmação do paradigma positivista, a partir de uma abordagem quantitativa a investigação combina um estudo descritivo e correlacional; O desenho do estudo incentiva um processo não experimental apoiado na análise estatística dos resultados com base nas variáveis escolhidas que, com base nos resultados da amostra de 383 estudantes universitários, determina-se que o somatótipo é endoforma e a silhueta corporal é retangular, com uma variação interessante na percentagem de corpos em forma de ampulheta. Esses resultados permitem que as bases para o dimensionamento do guarda-roupa sejam geradas, especificando a forma de dimensionamento dos corpos nos jovens para otimizar o design das roupas.

Palavras chave: Antropometria, Medidas corporais, Morfologia, dimensionamento, padronização.

Introducción

Desde la perspectiva y formación académica, el trabajo realizado nace a partir de la experiencia previa en la toma de medidas corporales en sujetos entre 18 y 65 años (hombres y mujeres), para plantear el Tallaje en La Paz y ser aplicable al sector de confección, a través un proyecto de Grado sobre la “Aplicación de ingeniería de métodos para la toma de medidas corporales” (Ramos, P. 2012); sin embargo, desde esa fecha no existe ningún seguimiento o actualización de la información.

La industria de la confección industrial en Bolivia traza los diseños en función de tallas americanas, brasileras y/o colombianas de manera tal que no existe uniformidad; por lo tanto, la necesidad de conocer el morfotipo del cuerpo en un segmento del mercado como son los jóvenes entre 18 y 28 años, hace del tema una necesidad a ser atendida.

Al desconocer la forma o tipo de silueta del cuerpo hace que el sector de la confección no cuente con estándares de medidas corporales adecuadas para el diseño de prendas de vestir. El proyecto establece a partir de una muestra representativa la determinación de la morfología del cuerpo en universitarios, como un segmento interesante para estandarizar y uniformar diseños según la forma del cuerpo en jóvenes.

Esta propuesta presenta una solución a un tema latente y útil para el sector de prendas de vestir (patronaje, corte, confección y acabado), dentro de la estructura de normativa de talla Norma Andina de tallas para prendas de vestir y calzado, se busca armonizar los sistemas de tallas en los países miembros (Bolivia, Colombia, Ecuador y Perú). Y aplica un procedimiento detallado en la norma NA-ISO/TR 10652:2010: Sistemas de tallas estándar para prendas de vestir las directrices internacionales para los sistemas de tallas, utilizando al inicio este proceso con un grupo focal. También podría ser útil para áreas temáticas relacionadas con proyectos futuros, como: establecer medidas corporales de los bolivianos por tipo de segmentos adultos, niños, bebés, etc. Diseñar la norma de Tallaje boliviana para su aplicación en productos y prendas.

Bajo un enfoque de estandarización de indicadores y caracterización de las medidas corporales que son esenciales para confección de prendas de vestir, la simetría y la forma del cuerpo son referentes importantes para establecer un tallaje adecuado.

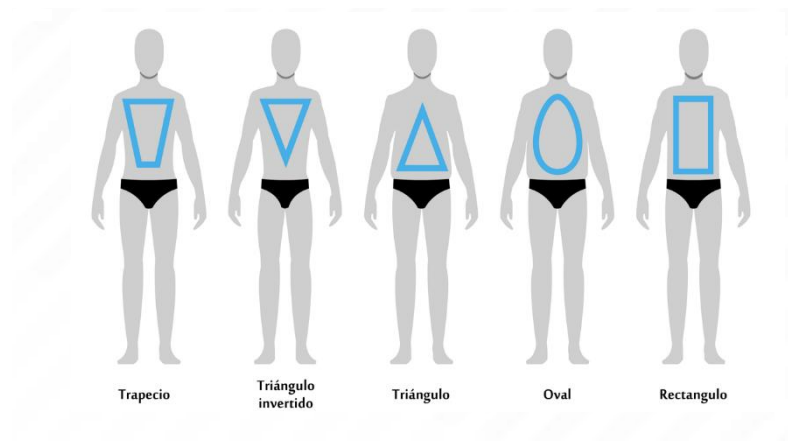


Ilustración No. 1
Tipos de cuerpos
Fuente: tomado de (Guzmán, 2017)

Son 5 tipos de cuerpo según su tipología los que existen dentro de la Asesoría de Imagen, cada una de las cuales responde a patrones diferentes que se han de tener en cuenta a la hora de realizarse una asesoría:

- Trapezoidal: Se considera la tipología ideal porque los hombros son ligeramente más anchos que las caderas con un máximo de 5 centímetros de diferencia entre ambos lados. Es una tipología muy masculina porque los hombros de forma armónica por encima del resto de la figura.
- Triángulo invertido: también se le conoce con el nombre de “cuerpo de nadador” y aunque para muchos es la tipología más masculina de todas, lo cierto es que en este caso los hombros son excesivamente anchos con respecto a las caderas y, por consiguiente, la figura se ve desproporcionada. El objetivo para este tipo de tipología es aportar equilibrio entre los hombros y las caderas, por ello debemos optar por prendas desestructuradas en la parte superior y prendas inferiores que aporten volumen a nivel de la cadera.
- Rectangular: los chicos con esta tipología suelen ser delgados, en rasgos generales los hombros y la cintura están a la misma altura, es decir, que ambos son del mismo ancho. Los chicos rectangulares tienen como objetivo potenciar sus hombros mediante prendas estructuradas para conseguir visualmente tener la figura de trapecio.
- Triángulo: Tal vez sea la tipología menos favorecedora para un hombre ya que las caderas son ligeramente más anchas que los hombros, aportando así una imagen un tanto femenina al cuerpo. El objetivo de los chicos triangulares es estructurar sus hombros y aportar el menos volumen posible

en la zona de las caderas.

- Redondeada: es una tipología que desdibuja la figura del cuerpo porque es más ancha justo a la altura de la cintura haciendo que esta destaque por encima de hombros y caderas. El objetivo consiste en potenciar los hombros mediante prendas estructuradas y estilizar la figura utilizando líneas verticales, también evitar los grandes contrastes es otro punto a tener en cuenta.

El objetivo que plantea el trabajo de desarrollar un estudio antropométrico que establecerá la estandarización de medidas corporales basado en morfo tipo de universitarios de la facultad de ingeniería entre 18 y 28 años, en la ciudad de La Paz durante el periodo 2022 - 2023. Para ello es importante:

- Sistematizar los referentes teóricos respecto a la estandarización de medidas corporales bajo morfotipo de universitarios.
- Caracterizar el estado situacional respecto a la estandarización de medidas corporales de universitarios entre 18 y 28 años, de la facultad de ingeniería en la ciudad de La Paz durante el periodo 2022 - 2023.
- Definir los componentes y contenidos del estudio antropométrico.
- Determinar la viabilidad de la propuesta planteada.

PARTE EXPERIMENTAL

A. INSTRUMENTOS

Antes de comenzar con la antropometría y la determinación del morfotipo, es importante asegurarse de tener los instrumentos necesarios. Los instrumentos que se necesitan son los siguientes:

Cinta métrica: se utiliza para medir la circunferencia de diferentes partes del cuerpo.

Tallímetro, se utiliza para medir la altura y el peso corporal

B. PROCEDIMIENTOS ANTROPOMETRICOS

Para realizar una medición antropométrica adecuada, se deben seguir los siguientes pasos:

- Pedir al estudiante que retire sus zapatos y cualquier objeto que pudiera afectar la medición, como sombreros o joyas.
- Medir el peso corporal del estudiante en una báscula, con una precisión de 0,1 kg. Se recomienda que la báscula esté calibrada regularmente.
- Medir la altura del estudiante con un estadiómetro, con una precisión de 0,1 cm. Es importante que el estudiante se pare en posición vertical, con los talones juntos y los brazos a los lados.

- Medir la circunferencia de la cintura, a la altura del ombligo, utilizando la cinta métrica antropométrica.

C. TÉCNICA DE MEDICIÓN DE ESTATURA Y PESO CON EL TALLÍMETRO

- Preparación: Para empezar, asegúrate de que la persona se encuentre descalza y con ropa ligera y ajustada al cuerpo. También es importante que la persona esté de pie recta y mirando hacia el frente.
- Medición de la estatura: Coloca el tallímetro de forma vertical contra una pared o superficie plana, asegurándote de que esté fijo y estable. Luego, pide a la persona que se acerque al tallímetro y que se pare con la espalda, los talones y los hombros contra la pared. Asegúrate de que la cabeza esté en posición recta y que el mentón esté paralelo al suelo. Usa el brazo de medición del tallímetro para tomar la medida de la estatura de la persona. Anota la medida en centímetros.
- Medición del peso: Pide a la persona que se pare en la balanza digital, asegurándote de que esté en una superficie plana y estable. Asegúrate de que la persona se encuentre de pie recta y en el centro de la balanza, con los pies separados y el peso distribuido de manera uniforme en ambos pies. Espera a que la balanza muestre el peso de la persona y anótalo en kilogramos.
- Registro de las mediciones: Registra las mediciones de la estatura y el peso de la persona en una tabla de registro, asegurándote de que estén claramente identificadas.

Es importante seguir una técnica adecuada para la medición de la estatura y el peso con el tallímetro con balanza digital, para obtener medidas precisas y confiables. Además, recuerda siempre ser amable y respetuoso con la persona durante todo el proceso de medición.

D. ESCANEEO

Para el escaneo se utilizará la aplicación móvil 3D AVATAR BODY la cual es una herramienta que permite crear un modelo en 3D del cuerpo y obtener mediciones antropométricas precisas. La aplicación es útil para la determinación del morfotipo y el seguimiento de la composición corporal.

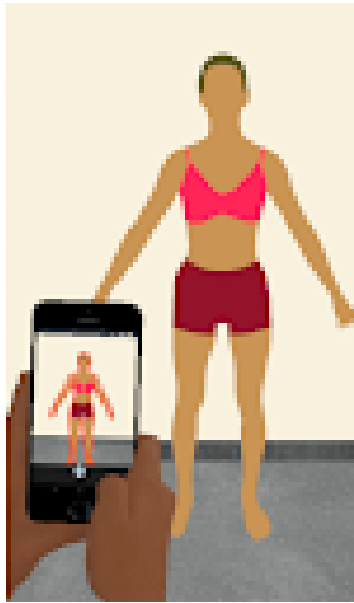


Ilustración No. 2
Escaneo frontal

Fuente: Imagen tomada de Instituto de Biomecánica de Valencia. (2023). 3D Avatar Body.

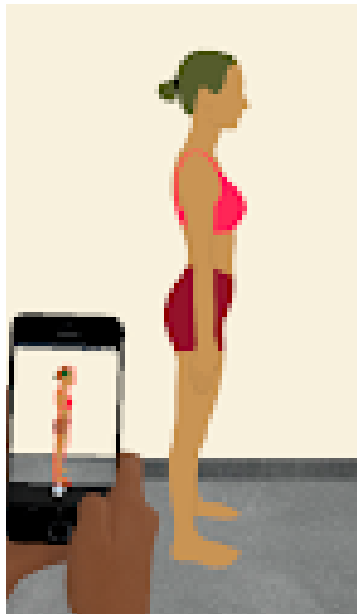


Ilustración No. 3
Escaneo lateral

Fuente: Imagen tomada de Instituto de Biomecánica de Valencia. (2023). 3D Avatar Body.

- Una vez completado el escaneo, la app mostrará el modelo 3D del cuerpo escaneado y las medidas antropométricas.



Ilustración No. 4
Datos Obtenidos

Fuente: Imagen tomada de Instituto de Biomecánica de Valencia. (2023). 3D Avatar Body.

Para asegurar que las personas sometidas al estudio se sientan cómodas y respetadas durante todo el proceso de medición y escaneo antropométrico se deben seguir las siguientes recomendaciones:

- Explicar el proceso: Es importante explicar el proceso de escaneo con la app 3d avatar body a la persona antes de comenzar. Es necesario que sepa qué esperar, cuánto tiempo tardará el proceso y qué medidas de seguridad se tomarán.
- Dar indicaciones claras: Durante el proceso de escaneo, es importante dar indicaciones claras y precisas a la persona para que sepa cómo pararse y qué hacer. Esto ayudará a que el escaneo sea más rápido y preciso.
- Ser amable y paciente: Es importante tratar a la persona con amabilidad y paciencia durante todo el proceso de escaneo. Asegúrate de que la persona se sienta cómoda y tranquila.
- Proporcionar privacidad: Algunas personas pueden sentirse incómodas al ser escaneadas, especialmente si están en ropa ajustada. Es importante proporcionar privacidad a la persona durante el proceso de escaneo, por ejemplo, utilizando cortinas o asegurándose de que no haya personas no autorizadas en la habitación.
- Respetar la privacidad: Es importante respetar la privacidad de la persona durante todo el proceso de escaneo. Asegúrate de que no se tomen fotos o grabaciones sin su consentimiento y de que los datos recopilados se utilicen únicamente con fines específicos y legítimos.

- Agradecer a la persona: Al final del proceso de escaneo, es importante agradecer a la persona por su colaboración y paciencia.

El método de escaneo es validado y genera medidas comparables a las tradicionales, dado que el estudio de confiabilidad con la aplicación 3D Avatar Body comparada con las mediciones manuales y según estándares como la ISO 20685 es más precisa.

El alcance del proyecto es generar la información y consideraciones preliminares para establecer una normativa de talla boliviana, a partir de la determinación morfológica del cuerpo en estudiantes, se puede replicar este modelo y procedimiento en niños y adultos para generar la base de medidas y tablas de tallaje que sería avalado por la normativa para su uso.

Los actores y beneficiarios directos son las empresas textiles, sector de prendas de vestir (patronaje, corte, confección y acabado), la Cámara de Industria. Ya que la Norma de tallas estandarizaría los productos elaborados en nuestro territorio.

La relevancia del proyecto logra:

- Establecer medidas corporales de los bolivianos.
- Diseñar la norma de Tallaje boliviana para su aplicación en productos.
- Establecer medidas corporales orientadas a la producción de prendas de vestir a partir del Tallaje estandarizado desde el patronaje, corte, confección y acabado de prendas.

Ya que según los 5 puntos que se deben desarrollar para la construcción y validación de una Norma de tallaje, el presente proyecto aporta con 3 puntos de la misma.

Resultados

Se establece una concordancia con las variables encontradas en la tabla No. 1 ya que la silueta confirma la tendencia y armonía de las medidas corporales con la estura y complexión física de los universitarios.

Según el concepto básico se entiende por inferencia el proceso interpretativo efectuado por el interlocutor para deducir el significado implícito de un enunciado, teniendo en cuenta los datos que posee del contexto. Por ello el proyecto identifica 3 inferencias:

- Norma de talla, se establecerán los perímetros específicos en las medidas corporales de manera que se ajusten a la norma para jóvenes entre 18 y 28 años. Para estandarizar y puntualizar un tallaje adecuado en extremidades y larguras. Estos perímetros como ancho de pecho y cadera, largo brazos y piernas se convertirán en los indicadores precisos para la normativa y sus estándares.
- Dimensiones corporales reales, al obtener datos de medidas antropométricas se podrá determinar los somatotipos reales y siluetas en jóvenes universitarios. De manera que se logre estandarizar esas medidas.
- Estos somatotipos se calcularán según % de grasa en volumen del cuerpo, con el peso y estatura de los sujetos a ser medidos.
- Morfotipos universitarios, al contar con información sobre las medidas corporales de los jóvenes, se podrá establecer la forma y silueta del cuerpo de universitarios con el fin de identificar las características específicas que permitirán la confección de prendas de vestir.

Tabla No.1. Medidas corporales y siluetas

CONTORNO DE PECHO [CM]	CONTORNO DE BAJO PECHO [CM]	CONTORNO DE CINTURA [CM]	CONTORNO DE NALGAS [CM]	CONTORNO DE BRAZO SUPERIOR DERECHO [CM]	CONTORNO MAXIMO MUSLO DERECHO [CM]	VOLUMEN DEL CUERPO [LITROS]	% Grasa	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN	FIGURA DEL CUERPO
102	99	94	99	30	57	84	17,97	Medio	Rectangulo
102	97	84	101	33	60	82	18,39	Medio	Trianguloinvertido
85	80	72	86	27	50	57	9,95	Medio	Trianguloinvertido
92	89	83	94	29	55	72	12,21	Medio	Rectangulo
89	86	81	92	25	52	68	9,57	Medio	Rectangulo
108	103	93	100	33	59	86	21,92	Alto	Trianguloinvertido
111	105	102	106	35	60	99	21,53	Alto	Rectangulo
103	99	92	98	30	55	77	17,90	Medio	Rectangulo
60	59	55	73	19	43	35	13,61	Medio	Rectangulo
95	89	81	100	29	58	73	15,74	Medio	Trianguloinvertido
99	96	89	97	29	55	74	17,80	Medio	Rectangulo
100	93	84	93	28	51	68	12,45	Medio	Trianguloinvertido
85	83	79	91	25	52	65	9,95	Medio	Rectangulo
97	92	87	92	25	55	72	18,82	Medio	Rectangulo
61	58	55	82	20	48	39	14,89	Medio	Rectangulo
104	101	92	100	29	56	79	21,25	Alto	Trianguloinvertido
108	105	101	105	32	59	92	18,51	Medio	Rectangulo
115	110	109	110	35	63	97	26,01	Muy Alto	Rectangulo
99	95	88	95	29	54	72	18,82	Medio	Rectangulo
101	99	99	102	32	61	88	20,37	Alto	Rectangulo
101	98	93	104	30	58	81	21,43	Alto	Rectangulo
94	91	84	91	28	53	69	14,19	Medio	Rectangulo
111	104	99	110	34	62	92	23,93	Alto	Rectangulo
102	99	95	104	30	61	87	20,32	Alto	Rectangulo
100	97	88	98	31	56	74	17,95	Medio	Trianguloinvertido
103	101	95	99	31	56	79	17,55	Medio	Rectangulo
88	85	76	97	29	58	67	13,20	Medio	Trianguloinvertido
102	100	92	99	32	57	85	19,71	Medio	Rectangulo

Fuente: Recuperado de la base de datos obtenidos en el estudio

Las siluetas dependerán de los datos de contornos, larguras y porcentaje de grasa en los jóvenes, para determinar con precisión la tipología de cuerpos.

Estas inferencias trabajadas en un grupo focal determinado por el estudio, validadas en 383 individuos como muestra representativa. Toda la información se analiza desde la estadística descriptiva, detallando cada una de las medias corporales, peso, estatura, índice de masa corporal y volumen del cuerpo.

Proceso de análisis de datos

La muestra objetivo de este estudio son los estudiantes universitarios entre 18 y 28 años de la Universidad Mayor de San Andrés.

Se tiene una muestra representativa de 383 estudiantes donde la mayoría de los estudiantes en la muestra son de género femenino, representando el 65,27% (250 estudiantes), mientras que el 34,73% (133 estudiantes) son de género masculino.

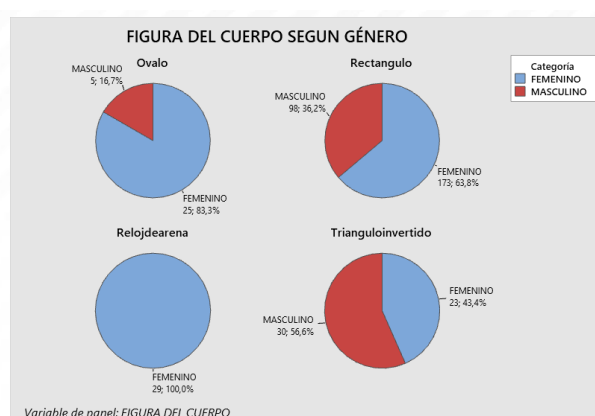


Ilustración No. 5. Distribución de la muestra según el género.

Fuente: Elaboración propia con base a datos observados en la medición.

A partir del análisis de frecuencia de la distribución de género (femenino y masculino) y de las figuras corporales entre los estudiantes universitarios evaluados, se tiene:

En cuanto a la figura corporal, el tipo Rectángulo predomina con un 70,76%, seguido por Triángulo Invertido (13,84%), Óvalo (7,83%) y Reloj de Arena (7,57%). Esto sugiere que la mayoría de los estudiantes tienen proporciones corporales uniformes en términos de ancho de hombros, cintura y caderas.

Dentro de cada tipo de figura corporal, se observan diferencias significativas por género: el rectángulo predomina en mujeres (63,8%) y hombres (36,2%), mientras que el triángulo invertido es más común en hombres (56,6%) que en mujeres (43,4%), revelando patrones distintos en composición corporal y distribución de masa muscular y grasa entre géneros.

Tabla No. 2. Distribución de la figura del cuerpo según el género.

GENERO	Conteo	Porcentaje	FIGURA DEL CUERPO	Conteo	Porcentaje
FEMENINO	250	65,27	Ovalo	30	7,83
MASCULINO	133	34,73	Rectángulo	271	70,76
N=	383		Reloj de arena	29	7,57
			Triangulo invertido	53	13,84
			N=	383	

Fuente: Elaboración propia con base a datos observados en la medición.

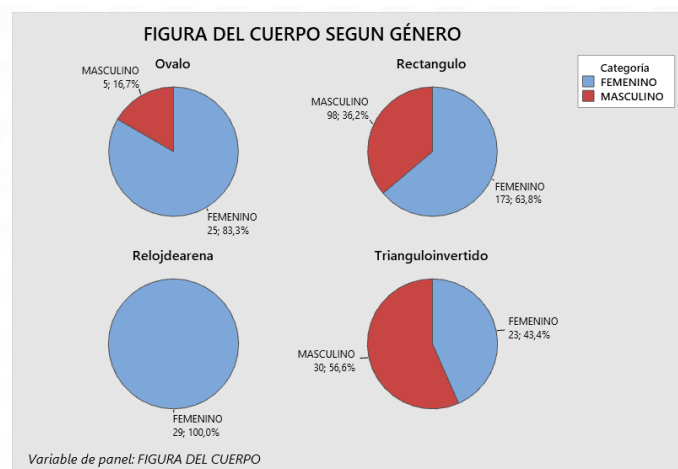


Ilustración No. 6. Distribución de la figura del cuerpo según el género
Fuente: Elaboración propia con base a datos observados en la medición.

En conjunto, la tabla y los gráficos, presentan un análisis de frecuencia de la distribución de género (femenino y masculino) y de las figuras corporales entre los estudiantes universitarios evaluados.

En cuanto a la figura corporal, el tipo Rectángulo predomina con un 70,76%, seguido por Triángulo Invertido (13,84%), Óvalo (7,83%) y Reloj de Arena (7,57%). Esto sugiere que la mayoría de los estudiantes tienen proporciones corporales uniformes en términos de ancho de hombros, cintura y caderas.

Dentro de cada tipo de figura corporal, se observan diferencias significativas por género: el rectángulo predomina en mujeres (63,8%) y hombres (36,2%), mientras que el triángulo invertido es más común en hombres (56,6%) que en mujeres (43,4%), revelando patrones distintos en composición corporal y distribución de masa muscular y grasa entre géneros.

Distribución de la condición anatómica y somatotipo

Este análisis examina la condición anatómica según el somatotipo (ectomorfo, endomorfo y mesomorfo). Cada somatotipo se clasifica en cuatro categorías de condición anatómica: Mala, Buena, Aceptable y Excelente. La distribución de estas categorías permite observar cómo la condición física se relaciona con el somatotipo, proporcionando una visión general de las tendencias de salud física en función de la constitución corporal.

Tabla No. 3. Distribución de la condición anatómica según Somatotipo.

Somatotipo	Condición anatómica				
	Mala	Buena	Aceptable	Excelente	Total
ECTOMORFO	16	0	0	0	16
ENDOMORFO	2	60	4	161	227
MESOMORFO	26	53	45	16	140
TOTAL	44	113	49	177	383

Fuente: Elaboración propia con base a datos observados en la medición.

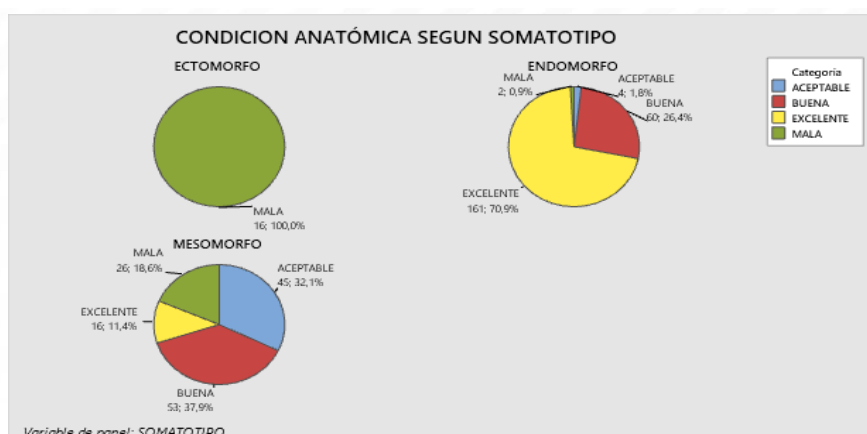


Ilustración No. 7. Clasificación de la Condición Anatómica en Relación con el Somatotipo

Fuente: Elaboración propia con base a datos observados en la medición.

La tabla y los gráficos reflejan que el somatotipo endomorfo es predominante en la condición “Excelente”, con un 70,9% de los individuos en esta categoría, mientras que en el somatotipo mesomorfo se observa una distribución más equilibrada entre las categorías de “Buena” (37,9%), “Aceptable” (32,1%) y “Mala” (18,6%). Por otro lado, todos los ectomorfos se encuentran en la categoría “Mala” (100%), lo que indica una tendencia de peor

condición anatómica en este grupo. Estos datos sugieren que los endomorfos presentan una mayor probabilidad de tener una condición anatómica excelente, mientras que los ectomorfos tienden a tener peores condiciones físicas en comparación con los otros somatotipos.

Discusión

Los resultados: somatotipo endoformo y silueta rectangular predominante, establecen la primera base de datos antropométrica actualizada en este segmento poblacional, proporcionando los parámetros esenciales (perímetros y larguras) para la estandarización del tallaje en la industria boliviana de la confección.

A partir de la aplicación de los modelos y sus variaciones correlacionales entre variables, se establecen patrones de talla con base en datos atípicos. El procedimiento basado en los siguientes pasos:

a) Investigación de la Normativa Técnica

Investigar y seleccionar la norma técnica sobre tallas de prendas de vestir vigente en el mercado, como la Norma Andina como base para estandarizar las medidas.

b) Determinación de Medidas Antropométricas

Definir las medidas clave y seleccionar las dimensiones corporales relevantes para el segmento elegido como altura, contorno de pecho, cintura y cadera.

c) Establecimiento de Rangos y Escalas

Definir los rangos de tallas y la norma técnica estableciendo las medidas de cada talla que deben estar presentadas en un rango de dimensiones mínimas y máximas. Aplicar un sistema de escalado, para determinar un método de patrones para crear las diferentes tallas que deben incluir:

- Incremento directo: Agregar una cantidad fija a cada medida del patrón original.
- Punto de intersección: Utilizado para patrones con curvas, creando líneas de intersección.
- Regresión: Emplea modelos matemáticos para escalar patrones complejos, como abrigos.

d) Diseño y Presentación de la Tabla de Tallas

Crear la tabla de tallas y organizar las medidas y sus rangos en una tabla, asegurando la claridad para el usuario.

Considerar tolerancias y ajustes incluyendo tolerancias para permitir la variabilidad de la producción y considerar tendencias de moda para la comodidad del consumidor.

e) Verificación y Ajustes

Realizar pruebas de corte utilizando prototipos en desecho para verificar los ajustes en las prendas, ajustes manuales y si hay problemas, ajusta el patrón escalado manualmente y actualiza los datos.

Este proceso permite llegar a establecer una norma de tallas específicas, el presente proyecto cumple con los puntos a), b) y parte del c) donde se establece la continuidad de los puntos d), y e) la difusión y/o aprobación de la Norma como parte de un trabajo hacia adelante a mediano plazo.

Conclusiones

Con el estudio se logra la estandarización de medidas corporales y la determinación del morfo tipo de jóvenes universitarios entre 18 y 28 años en la Universidad Mayor de San Andrés.

Con la muestra preliminar y la confirmación de resultados observados se genera una tendencia de morfotipo, sin embargo, también permite observar un margen de error en las mediciones al momento de la toma de datos y en el instrumento; mismas que han sido corregidas y ajustadas para continuar el proceso de medición a través del desarrollo del “Manual de procedimientos para la toma de medidas antropométricas en estudiantes universitarios”, como aporte del proyecto y protocolo empleado.

Enmarcando la técnica de marcaje, posición del sujeto, rigurosidad del medidor que debe contar con entrenamiento en la técnica y confiabilidad calculando el Error Técnico de Medida (ETM) para cada antropometrista, comparando sus mediciones con mediciones repetidas.

Al trabajar con la muestra representativa de 383 estudiantes, se obtiene que: la población femenina del 65,27% (250 estudiantes), mientras que el 34,73% (133 estudiantes) son de género masculino.

Se logro sistematizar los referentes teóricos respecto a la estandarización de medidas corporales bajo morfotipo de universitarios, se obtienen los siguientes resultados: un 7,83% tienen la figura de cuerpo de Ovalo, 70,76% Rectángulo, 7,57% Reloj de arena y 13,84% Triangulo invertido.

Se pudo caracterizar el estado situacional respecto a la estandarización de medidas corporales de universitarios entre 18 y 28 años, de la facultad de ingeniería en la ciudad de La Paz durante el periodo 2022 – 2023, basados en la forma de cuerpo y silueta que establece las características del somatotipo.

Donde se establece los siguientes resultados: la condición anatómica determina que el 59,3% de la población tiene un somatotipo de tipo endomorfo, el 36,5 % meso formo y el 4,2 % ectomorfo.

En conjunto, se muestran que los endomorfos tienen un predominio en la categoría de grasa “Muy Alto” (80,2%), lo cual sugiere una tendencia de este somatotipo hacia una mayor acumulación de grasa corporal. Por otro lado, los ectomorfos tienden a tener una grasa corporal “Media” (68,8%) y “Alta” (31,3%), sin presencia en la categoría “Muy Alto”. En el caso de los mesomorfos, la mayoría se encuentra en la categoría “Media” (46,4%), seguida de un porcentaje significativo en la categoría “Muy Alto” (32,1%) y “Alta” (21,4%).

Este análisis permite entender las diferencias en composición corporal según somatotipo, sugiriendo que los endomorfos tienen mayor probabilidad de estar en niveles altos de grasa corporal, mientras que los ectomorfos se asocian con niveles medios o altos sin llegar a la categoría muy alta.

Se definieron los componentes y contenidos del estudio antropométrico y sus características específicas al considerar las medidas corporales necesarias para la aplicación de la Norma de Tallas (anchuras del cuerpo y larguras de miembros superiores e inferiores).

Se pudo determinar la viabilidad de la propuesta planteada, al lograr la base de información necesaria para aplicar al tallaje expresado en la Norma Andina, según pasos y cumplimiento de requisitos logrados en el proyecto.

El estudio genera información morfológica crucial (predominio endomorfo y rectangular) inexistente en el país, resolviendo la necesidad de la industria textil al definir las dimensiones corporales reales en jóvenes universitarios. Esto sienta las bases para la construcción y validación de una Norma de Tallaje Boliviana, ofreciendo una solución práctica para el diseño y confección de prendas de vestir.

Referencias

- Arenas Betancur, J. F., Palacio Morales, J. A., & Rodríguez Ledesma, C. A. (2023). Validación de Sistema de Medición Antropométrica con Escáner 3d bajo las normas UNE-EN ISO20685 y NTC ISO10012. *Retos*, 49, 572-579. Recuperado de <https://bit.ly/48Yrsb6>
- Automotive Industry Action Group (AIAG). (2010). Análisis de sistemas de medición (4a ed.; Chrysler Group, Ed.). Recuperado de <https://bit.ly/4ilmSko>
- Burgos, F., & Escalona, E. (2017). Prueba Piloto: Validación de Instrumentos y Procedimientos para recopilar Data Antropométrica con fines Ergonómicos. *Ingeniería y Sociedad UC*, 12(1), 31-47. Recuperado de <https://bit.ly/3XJt1TY>
- Centro Español de Metrología (CEM), CENAM, & INDECOPI. (2008). *Metrology - in short* (3a ed.; Proyecto EURAMET 1011, Ed.). Madrid: EURAMET.
- Comité Conjunto de Guías en Metrología. (2012). *Vocabulario Internacional de Metrología*. En VIM (Ed.), *Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados* (3a ed.). <https://doi.org/10.1021/ja01341a021>
- Duncan, A. (1989). *Control de calidad y estadística industrial* (5a ed.; Ediciones Alfaomega S.A. de C.V., Ed.). México D.F.: Irwin Inc.
- Instituto de Biomecánica de Valencia. (2023). 3D Avatar Body. Recuperado 28 de junio de 2023, de <https://bit.ly/4posHGr>
- International Organization for Standardization (ISO). (2018). 3-D scanning methodologies for internationally compatible anthropometric databases. Part 1 (N.o 1; Vol. 2018). Recuperado de <https://bit.ly/4oEy2Ik>
- Ramírez Martínez, C. (2018). Procedimientos computacionales en la adquisición y captura de datos antropométricos / Computational procedures in the acquisition and capture of anthropometric data. *RECI Revista Iberoamericana de las Ciencias Computacionales e Informática*, 7(14), 99-114. <https://doi.org/10.23913/reci.v7i14.89>
- Técnicas de Control Metrológico. (2010a). Análisis de los sistemas de medida. Análisis de la dispersión en los Sistemas de Medida (4a ed.; Técnicas de Control Metrológico, Ed.). Zaragoza: Técnicas de Control Metrológico.
- Técnicas de Control Metrológico. (2010b). ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE MEDIDA. Análisis de la tendencia central de los Sistemas de Medida (4a ed.; Técnicas de Control Metrológico, Ed.). Zaragoza: Técnicas de Control Metrológico.

Técnicas de Control Metrológico. (2010c). ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE MEDIDA. Conceptos generales en el Análisis de los Sistemas de Medida (4a ed.; Técnicas de Control Metrológico, Ed.). Zaragoza: Técnicas de Control Metrológico.

Terán Modregón, O. F. (2023). Control de calidad basado en el análisis del sistema de medición. *Industrial 4.0*, 6, 20. Recuperado de <https://bit.ly/44OHvFZ>

CAPÍTULO IX

Estrategia integrativa para mejorar la sostenibilidad operativa en el sector de la construcción

Adriane Cosio Bellido

Universidad Simón I. Patiño

<https://orcid.org/0009-0006-8267-7497>

Estrategia integrativa para mejorar la sostenibilidad operativa en el sector de la construcción

Resumen

El presente estudio aborda los desafíos del sector de la construcción en Bolivia vinculados a la sostenibilidad ambiental y la seguridad laboral, problemáticas que históricamente se han tratado de manera independiente y fragmentada, lo que ha generado ineficiencias, duplicidad de esfuerzos y mayores riesgos en obra. En este contexto, el objetivo de la investigación es plantear una estrategia integrativa que articule la gestión de residuos con la seguridad y salud en el trabajo, con el fin de optimizar recursos, reducir riesgos laborales, cumplir la normativa vigente y promover una cultura organizacional preventiva y responsable. El estudio distingue conceptualmente la sostenibilidad operativa entendida como la capacidad de mantener la eficiencia productiva minimizando impactos ambientales y riesgos laborales de la integración de sistemas de gestión, que se concibe como el medio metodológico que permite lograr esa sostenibilidad a través de procesos unificados y coherentes. El proceso metodológico adoptado fue de carácter exploratorio y descriptivo, con diseño no experimental y transversal, sustentado en la revisión documental de normativas e informes oficiales, entrevistas semiestructuradas a personal técnico y operativo, observación directa en obras y análisis de datos estadísticos sobre accidentes y manejo de residuos. Entre los principales hallazgos, se identificó que un porcentaje significativo de incidentes laborales está vinculado al manejo inadecuado de residuos, confirmando la necesidad de un modelo articulado. La estrategia propuesta se estructura en tres componentes: medios (procedimientos técnicos coordinados), dispositivos (mecanismos de seguimiento como auditorías y controles) y recursos (herramientas operativas como matrices integradas y planes de capacitación). Los resultados esperados incluyen la reducción en al menos un 20 % de accidentes relacionados con residuos, el cumplimiento normativo superior al 90 % y la consolidación de una cultura organizacional coherente con los principios de sostenibilidad. En conclusión, la investigación evidencia que la integración de la gestión de residuos y la seguridad laboral no solo mejora la eficiencia operativa y la prevención de riesgos, sino que también contribuye a posicionar a las empresas constructoras como actores socialmente responsables. Aunque la

propuesta aún requiere validación práctica, sienta bases sólidas para futuras intervenciones que busquen transformar la gestión en el sector de la construcción boliviano.

Palabras clave: Gestión de residuos, seguridad y salud ocupacional, sostenibilidad en construcción, sistemas integrados de gestión, cultura organizacional preventiva, eficiencia operativa, cumplimiento normativo.

Integrative strategy to improve operational sustainability in construction

Abstract

This study addresses the challenges facing the construction sector in Bolivia in relation to environmental sustainability and occupational safety, issues that have historically been dealt with in an independent and fragmented manner, leading to inefficiencies, duplication of efforts, and increased risks on construction sites. In this context, the objective of the research is to propose an integrative strategy that links waste management with occupational health and safety, in order to optimize resources, reduce occupational risks, comply with current regulations, and promote a preventive and responsible organizational culture. The study conceptually distinguishes between operational sustainability, understood as the ability to maintain productive efficiency while minimizing environmental impacts and occupational risks, and the integration of management systems, which is conceived as the methodological means of achieving this sustainability through unified and coherent processes. The methodological process adopted was exploratory and descriptive in nature, with a non-experimental and cross-sectional design, based on a review of official regulations and reports, semi-structured interviews with technical and operational personnel, direct observation at construction sites, and analysis of statistical data on accidents and waste management. Among the main findings, it was identified that a significant percentage of workplace incidents are linked to improper waste management, confirming the need for a coordinated model. The proposed strategy is structured around three components: means (coordinated technical procedures), devices (monitoring mechanisms such as audits and controls),

and resources (operational tools such as integrated matrices and training plans). The expected results include a reduction of at least 20% in waste-related accidents, regulatory compliance of over 90%, and the consolidation of an organizational culture consistent with the principles of sustainability. In conclusion, the research shows that integrating waste management and occupational safety not only improves operational efficiency and risk prevention but also helps position construction companies as socially responsible actors. Although the proposal still requires practical validation, it lays a solid foundation for future interventions that seek to transform management in the Bolivian construction sector.

Keywords: Waste management, occupational health and safety, sustainability in construction, integrated management systems, preventive organizational culture, operational efficiency, regulatory compliance.

Estratégia integrativa para melhorar a sustentabilidade operacional na construção civil

Resumo

O presente estudo aborda os desafios do setor da construção civil na Bolívia relacionados com a sustentabilidade ambiental e a segurança no trabalho, questões que historicamente têm sido tratadas de forma independente e fragmentada, o que tem gerado ineficiências, duplicação de esforços e maiores riscos nas obras. Neste contexto, o objetivo da investigação é propor uma estratégia integradora que articule a gestão de resíduos com a segurança e saúde no trabalho, a fim de otimizar recursos, reduzir riscos laborais, cumprir a regulamentação em vigor e promover uma cultura organizacional preventiva e responsável. O estudo distingue conceitualmente a sustentabilidade operacional, entendida como a capacidade de manter a eficiência produtiva minimizando os impactos ambientais e os riscos laborais, da integração de sistemas de gestão, concebida como o meio metodológico que permite alcançar essa sustentabilidade através de processos unificados e coerentes. O processo metodológico adotado foi de natureza exploratória e descritiva, com um desenho não experimental e transversal, baseado na revisão documental de regulamentos e relatórios oficiais, entrevistas

semiestructuradas com pessoal técnico e operacional, observação direta nas obras e análise de dados estatísticos sobre acidentes e gestão de resíduos. Entre as principais conclusões, identificou-se que uma percentagem significativa de incidentes laborais está relacionada com a gestão inadequada de resíduos, confirmando a necessidade de um modelo articulado. A estratégia proposta estrutura-se em três componentes: meios (procedimentos técnicos coordenados), dispositivos (mecanismos de acompanhamento, como auditorias e controlos) e recursos (ferramentas operacionais, como matrizes integradas e planos de formação). Os resultados esperados incluem a redução de pelo menos 20% dos acidentes relacionados com resíduos, o cumprimento normativo superior a 90% e a consolidação de uma cultura organizacional coerente com os princípios da sustentabilidade. Em conclusão, a investigação evidencia que a integração da gestão de resíduos e da segurança no trabalho não só melhora a eficiência operacional e a prevenção de riscos, como também contribui para posicionar as empresas de construção como atores socialmente responsáveis. Embora a proposta ainda necessite de validação prática, ela estabelece bases sólidas para futuras intervenções que busquem transformar a gestão no setor da construção boliviano.

Palavras chave: Gestão de resíduos, segurança e saúde ocupacional, sustentabilidade na construção, sistemas integrados de gestão, cultura organizacional preventiva, eficiência operacional, cumprimento normativo.

Introducción

La industria de la construcción ha evolucionado rápidamente en la última década, enfrentando presiones crecientes para responder a los desafíos ambientales y laborales que exige el desarrollo sostenible. Organismos como la Organización Internacional del Trabajo (OIT, 2015) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2010) han puesto de manifiesto la urgencia de promover entornos de trabajo seguros junto con una gestión responsable del impacto ambiental, particularmente en un sector con alta generación de residuos y elevados índices de accidentabilidad.

El sector constructivo en Bolivia enfrenta una doble problemática: por un lado, la gestión ineficiente de residuos que genera impactos ambientales significativos; por otro, los elevados índices de accidentabilidad laboral asociados a prácticas inseguras y falta de control en obra. Tradicionalmente, ambas dimensiones: gestión ambiental y seguridad y salud en el trabajo, han sido

tratadas de manera independiente, lo que ha derivado en procesos fragmentados, duplicidad de esfuerzos y limitaciones para cumplir de manera efectiva con la normativa vigente (Ministerio de trabajo Empleo y Prevision Social, 2023). Esta fragmentación no solo incrementa los riesgos operativos, sino que también compromete la sostenibilidad y competitividad del sector.

En la actualidad, las empresas constructoras buscan no solo cumplir con las normativas vigentes, sino también optimizar sus procesos internos mediante la adopción de sistemas de gestión que permitan integrar los aspectos de calidad, medio ambiente y seguridad en un solo modelo organizacional coherente. La coherencia conceptual del problema investigado radica en la necesidad de diferenciar rigurosamente entre la sostenibilidad operativa y la integración de sistemas de gestión, dos nociones que, aunque complementarias, poseen fundamentos disciplinares distintos dentro de la ingeniería industrial y la gestión organizacional.

La integración entre la gestión de residuos y la seguridad y salud en el trabajo debe entenderse como una convergencia sistémica basada en principios de sostenibilidad operativa. Desde una perspectiva epistemológica, ambos ámbitos comparten una raíz común en la gestión del riesgo, entendida como la capacidad organizacional para anticipar, mitigar y controlar los efectos negativos de los procesos productivos.

Henry Cabrera et al., (2015), se refiere a “la capacidad de una organización o proyecto constructivo para mantener su rendimiento técnico, económico y ambiental a lo largo del tiempo, reduciendo los impactos negativos y optimizando los recursos de manera continua”. Por su parte, Bernardo et al. (2009) nos dice que la integración de sistemas de gestión implica la articulación estructurada de diversos estándares normativos como la ISO 9001, ISO 14001 e ISO 45001 dentro de un marco único promoviendo la eficiencia, la coherencia administrativa y la mejora del desempeño global.

Esta distinción teórica es fundamental, ya que la sostenibilidad operativa actúa como fin estratégico, mientras que la integración de sistemas constituye el medio técnico y metodológico para alcanzarla. Los dispositivos de gestión (políticas, procedimientos, auditorías y control documental) y los medios de implementación (formación, indicadores y liderazgo operativo) conforman la base metodológica que permite operacionalizar dicha integración. De este modo, el estudio asienta su marco teórico en la convergencia entre los enfoques de sostenibilidad, calidad y seguridad industrial, garantizando una fundamentación sólida y pertinente para el campo de la ingeniería industrial.

Los informes del Ministerio de trabajo (2023) y de la Cámara Boliviana de la Construcción CABOCO (2022) evidencian que hasta el 28 % de los accidentes laborales están relacionados con un manejo inadecuado de residuos. A ello se suma una brecha normativa del 18 % de incompatibilidad entre la Ley N.º 755 de Gestión Integral de Residuos Sólidos y el Decreto Ley 16998 sobre Seguridad y Salud en el Trabajo, lo que compromete la eficiencia operativa y la sostenibilidad del sector.

El supuesto central de esta investigación sostiene que la integración de la gestión de residuos y la seguridad ocupacional en un marco estratégico común puede optimizar los recursos, reducir accidentes y fortalecer una cultura organizacional preventiva. En línea con los aportes de Talapatra et al. (2019), integrar sistemas de gestión eleva la eficiencia interna, mejora la coherencia organizacional y el compromiso del personal, ya que experiencias empíricas locales indican que los enfoques articulados reducen incidentes hasta en un 40 % y elevan el cumplimiento normativo por encima del 90 %.

La relevancia de este enfoque radica en que, si bien existen estudios internacionales sobre integración de sistemas (Choudhry et al. 2007; Rebelo et al. 2015), aún es escasa la literatura aplicada al sector constructivo en países latinoamericanos, y más aún en Bolivia. Esta investigación se apropia de ese espacio simbólico al proponer un modelo adaptado a la realidad local, que contempla no solo herramientas técnicas, sino también factores culturales y organizacionales que inciden en la práctica. Al anticipar la discusión, se plantea que una gestión integrada permitirá disminuir hasta en un 20 % los accidentes vinculados al manejo de residuos, elevar el cumplimiento normativo por encima del 90 % y consolidar una cultura organizacional preventiva y responsable.

En conclusión, esta investigación contribuye a la comprensión de un área de conocimiento emergente: la convergencia entre sostenibilidad ambiental y seguridad laboral en la construcción. Su dirección se orienta a demostrar que la integración de sistemas no solo es deseable, sino necesaria para transformar el sector hacia modelos más eficientes, responsables y alineados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Problemática regional latinoamericana

Latinoamérica presenta características específicas que agravan la problemática global. Estudios del Banco Interamericano de Desarrollo (2023), revelan que la región registra el 23% de los accidentes laborales mundiales en construcción, pese a representar solo el 12% de la actividad constructiva global. Esta desproporción

se explica por factores estructurales: informalidad laboral (65% del sector), limitada aplicación normativa, y ausencia de cultura preventiva integrada (CEPAL, 2023).

En términos ambientales, la generación de residuos de construcción en la región alcanza 165 millones de toneladas anuales, con tasas de aprovechamiento inferiores al 15%, comparado con el 70% en Europa (UNEP Latin America, 2024). Esta ineficiencia se vincula directamente con prácticas inseguras: el 34% de los accidentes laborales regionales se relacionan con manejo inadecuado de materiales y residuos (OIT, 2024).

Situación específica boliviana: Cuantificación del problema

Bolivia presenta un escenario crítico que ejemplifica la problemática regional. Los datos del Ministerio de trabajo (2023) revelan indicadores alarmantes:

- Accidentabilidad: 8.7 accidentes por cada 100 trabajadores anuales (tasa 3.2 veces superior al promedio latinoamericano)
- Impacto económico: Pérdidas estimadas en \$47.3 millones USD anuales por accidentes laborales y gestión ineficiente de residuos
- Fragmentación normativa: 18% de incompatibilidades entre normativas ambientales (Ley 755) y de seguridad laboral (Decreto Ley 16998)
- Eficiencia operativa: Duplicidad de controles genera sobrecostos del 23% en proyectos de construcción

Bases conceptuales de la integración

La integración de la gestión de residuos de construcción con la seguridad laboral constituye un enfoque estratégico que permite abordar de manera simultánea la prevención de riesgos ocupacionales y la sostenibilidad ambiental (OIT, 2015; PNUMA, 2010). Desde la perspectiva operativa, esta articulación facilita la optimización de recursos humanos, materiales y financieros, evitando duplicidades en tareas administrativas y de control, alinear protocolos de seguridad con procedimientos ambientales y generar planes de acción conjuntos (Bernardo et al., 2009; Rebelo et al., 2015).

A nivel organizacional, la integración fortalece la cultura preventiva, promoviendo que cada trabajador comprenda la interdependencia entre su seguridad personal y el manejo adecuado de los residuos de obra (Talapatra et al., 2019). Evidencia empírica indica que sistemas integrados reducen incidentes laborales

hasta en un 40 % en estudios piloto (Ministerio de trabajo Empleo y Prevision Social, 2023), mientras que la correcta gestión de residuos disminuye impactos ambientales negativos y mejora la eficiencia de los procesos constructivos (Rebelo et al., 2015).

Además, desde un enfoque estratégico, la integración contribuye a la responsabilidad social corporativa, alineando la operación con normativas nacionales como la Ley 755 y el Decreto Ley 16998 e internacionales, reforzando la imagen institucional de la empresa como actor sostenible y comprometido con el bienestar de sus trabajadores y la comunidad (CABOCO, 2022; ONU-HABITAT, 2023).

A pesar de sus beneficios, la integración enfrenta diversos retos. Entre ellos se encuentran la resistencia al cambio, derivada de prácticas históricas fragmentadas (Alves Dias, 2001); la falta de capacitación específica que permita comprender y aplicar protocolos integrados; y la ausencia de estándares claros que guíen la implementación de sistemas combinados de gestión (Reza et al., 2015).

Otro factor limitante es la variabilidad cultural y organizacional, que puede influir en la adopción de prácticas integradas. Por ejemplo, en obras con alta rotación de personal o jerarquías rígidas, la comunicación interdepartamental puede ser deficiente, generando inconsistencias en la aplicación de procedimientos (Moreno et al., 2021). La limitada fiscalización y seguimiento de las normas en Bolivia dificulta la estandarización de prácticas integradas, lo que sugiere la necesidad de diseñar estrategias adaptables al contexto local (CEPAL, 2022; Ministerio de trabajo, 2023).

Los sistemas de gestión de residuos y seguridad laboral comparten un ciclo metodológico compuesto por diagnóstico, planificación, implementación, control y mejora continua (Rebelo et al., 2015; Reza et al., 2015). Esta similitud permite que las intervenciones se realicen de manera conjunta, evitando esfuerzos duplicados y generando un enfoque integral.

En la etapa de diagnóstico, la identificación de riesgos puede contemplar tanto peligros derivados del manejo de materiales como los asociados a accidentes laborales. La planificación integrada permite diseñar medidas preventivas que consideren simultáneamente la seguridad de los trabajadores y la correcta disposición de los residuos. La implementación conjunta, a través de procedimientos coordinados y capacitaciones combinadas, garantiza coherencia entre prácticas operativas y protocolos de seguridad, mientras que la evaluación y la mejora continua fortalecen la eficacia de la estrategia (European Environmental Agency, 2024).

La articulación operativa se sustenta en el uso de herramientas y mecanismos compartidos, como matrices de riesgos integradas, indicadores de desempeño combinados, auditorías internas conjuntas y comités de seguimiento multidisciplinarios (Choudhry & Fang, 2007).

Estos instrumentos permiten un monitoreo sistemático y coherente, mejoran la comunicación interdepartamental y aseguran que las acciones preventivas se ejecuten de manera efectiva. Por ejemplo, un comité conjunto puede analizar incidentes relacionados con residuos mal manejados y generar planes correctivos que contemplen tanto la prevención de accidentes como la disposición ambiental adecuada.

Hacia una gestión integrada: razones para el cambio estructural

La gestión integrada permite eliminar redundancias y coordinar tareas previamente independientes, traduciéndose en ahorro de tiempo, reducción de costos y utilización más eficiente de recursos humanos y materiales (Bernardo et al., 2009; Talapatra et al., 2019).

Un ejemplo claro es la coordinación de procedimientos de manejo de escombros con medidas de protección laboral, evitando accidentes derivados de la manipulación de residuos y reduciendo la necesidad de controles duplicados (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2011). De este modo, la integración potencia la eficiencia operativa, asegurando que cada acción cumpla simultáneamente objetivos de seguridad y sostenibilidad.

La integración fortalece la cultura organizacional, promoviendo una visión compartida de responsabilidad y prevención. Cada trabajador comprende que su rol impacta directamente en la seguridad de sus compañeros y en el cuidado del entorno, fomentando un compromiso colectivo y proactivo (Choudhry & Fang, 2007; Rebelo et al., 2015).

La consolidación de esta cultura requiere liderazgo activo, comunicación constante y capacitaciones específicas que refuercen la relación entre seguridad y gestión ambiental. Empresas que implementan modelos integrados reportan no solo reducción de incidentes y residuos, sino también un aumento en la motivación y el compromiso del personal, contribuyendo a la sostenibilidad del cambio (European Environmental Agency, 2024).

En los últimos años (2019-2024), la literatura internacional ha mostrado un avance significativo en torno a la integración fuerte o *hard integration* de los sistemas de gestión. Este enfoque plantea la necesidad de ir más allá de la simple coexistencia de normas y manuales, hacia una integración real que unifique procesos, indicadores, objetivos y mecanismos de control dentro de un único marco operativo.

Dentro la literatura contemporánea de acuerdo a Bernardo et al. (2009); Rebelo et al. (2015) y Talapatra et al. (2019) plantean que la “integración dura” de los sistemas de gestión son una articulación estructural de procesos, objetivos y valores organizacionales. En este sentido, la sostenibilidad operativa se configura como un eje de coherencia entre la eficiencia ambiental, la seguridad ocupacional y la productividad, posibilitando la transición hacia modelos de gestión resilientes y adaptativos.

Díaz (2025), destaca que la articulación entre los sistemas de gestión y metodologías constructivas como Lean y BIM ha permitido mejorar la trazabilidad de la información, reducir desperdicios y fortalecer la coordinación interdepartamental. En la misma línea Aveiga Daniel et al. (2025), demuestran empíricamente que la adopción de ISO 45001, en conjunto con otras normas del sistema integrado, ha tenido un impacto directo en la productividad y en los índices de desempeño empresarial.

Por su parte, Bedoya Marrugo (2024), subraya que las reformas recientes de las normas ISO especialmente las que introducen la estructura de alto nivel (Anexo SL) facilitan la compatibilidad entre los diferentes sistemas, aunque advierte que el éxito de la integración depende de la madurez organizacional y del liderazgo interno.

Henry Cabrera et al. (2015) coincide en que la hard integration solo es alcanzable cuando los procesos se modelan de manera conjunta y se gestionan a través de plataformas unificadas de información, en lugar de operar de forma independiente. Finalmente, Herrera-Sánchez et al. (2024) evidencia que, en empresas constructoras de Asia, la integración técnica y documental de los sistemas reduce en un 30 % los tiempos de auditoría y mejora la coherencia de los indicadores operativos.

En conjunto, estas investigaciones demuestran que la integración efectiva de sistemas de gestión en el sector construcción no solo mejora la eficiencia y el desempeño, sino que también refuerza la sostenibilidad operativa y la cultura de mejora continua en las organizaciones.

Fundamentación conceptual y relevancia científica del modelo integrativo

El modelo integrativo propuesto se basa en la convergencia entre la gestión ambiental y la seguridad laboral, entendidas no como sistemas independientes, sino como subcomponentes de un mismo marco operativo orientado a la sostenibilidad organizacional. Este enfoque se sustenta en el principio de interdependencia sistémica, según el cual las fallas en uno de los subsistemas (ambiental o de seguridad) afectan directamente el desempeño global de la organización (Bernardo et al., 2009)

La presente investigación se apoya en una diferenciación teórica rigurosa entre los conceptos de sostenibilidad operativa e integración de sistemas de gestión, que constituye la base conceptual para el desarrollo metodológico de los dispositivos, medios y recursos propuestos.

En este sentido, los dispositivos metodológicos que se propone en el estudio, operan como mecanismos instrumentales que materializan la integración de los sistemas. Los medios actúan como catalizadores culturales que permiten sostener dicha integración en el tiempo. Los recursos actúan como herramientas operativas que ayudaran en la optimización y eficiencia operativa.

De esta forma, la base teórica del manuscrito se sustenta en los fundamentos de la ingeniería industrial moderna, en la teoría de sistemas sociotécnicos (Trist & Bamforth, 1951) y en el enfoque de mejora continua derivado del ciclo PHVA, donde los dispositivos de control, monitoreo y mejora continua actúan como “nodos” que conectan los sistemas de gestión previamente fragmentados. Esta articulación conceptual garantiza que la propuesta metodológica sea coherente con los principios de sostenibilidad y eficiencia operativa.

A nivel teórico, esta investigación se inscribe en la corriente de los Sistemas Integrados de Gestión, que buscan la unificación de estándares como ISO 14001 e ISO 45001, pero con una relectura adaptada al contexto constructivo latinoamericano, donde predominan estructuras empresariales pequeñas, recursos limitados y una débil cultura preventiva. La originalidad científica del estudio radica precisamente en esa adaptación contextual, pues mientras la literatura internacional ha explorado la integración de sistemas en países industrializados, la región latinoamericana carece de modelos empíricamente fundamentados que integren sostenibilidad y seguridad en el ámbito de la construcción.

El marco conceptual desarrollado articula tres dimensiones clave:

1. Dimensión técnica-operativa, centrada en la compatibilidad de procedimientos y controles entre gestión ambiental y seguridad laboral.
2. Dimensión organizacional-cultural, orientada a fortalecer la cultura preventiva y el liderazgo compartido.
3. Dimensión estratégica-normativa, que vincula la propuesta con los marcos legales nacionales (Ley 755, Decreto Ley 16998) y los compromisos internacionales de sostenibilidad (ODS 8, 9, 12 y 13).

El modelo integra estas dimensiones en un sistema dinámico de mejora continua, donde los procesos de diagnóstico, planificación, ejecución, control y aprendizaje se desarrollan de manera

conjunta. Esta integración no solo genera sinergias operativas, sino que impulsa una coherencia institucional basada en valores de prevención, eficiencia y responsabilidad social.

Desde una perspectiva epistemológica, el enfoque del estudio se posiciona en el paradigma pragmático, que permite articular la racionalidad técnica con la interpretación contextual de la realidad laboral. Así, el modelo propuesto no pretende ser universal, sino situado y evolutivo, capaz de adaptarse a las condiciones culturales, tecnológicas y normativas del sector constructivo boliviano.

En consecuencia, la relevancia científica de esta investigación se sustenta en tres aportes principales:

- Aporte teórico: amplía la comprensión de los sistemas integrados en contextos de economías emergentes, donde las barreras culturales y estructurales influyen en la eficacia de los modelos importados.
- Aporte metodológico: propone una estructura integrativa aplicable a pequeñas y medianas empresas constructoras, basada en indicadores adaptables y procedimientos coordinados.
- Aporte aplicado: ofrece una base conceptual para futuras validaciones empíricas que consoliden políticas de seguridad y sostenibilidad desde una perspectiva sistémica.

De esta forma, el manuscrito teórico no solo profundiza el sustento epistemológico del modelo, sino que abre una línea de investigación inédita en la región, contribuyendo al desarrollo de un enfoque latinoamericano de gestión integrada en la construcción, con potencial de replicabilidad en otros países con realidades similares.

Diseño metodológico de la estrategia integral

La estrategia integrativa se fundamenta en un diseño metodológico mixto de tipo exploratorio-descriptivo con carácter no experimental y transversal, que busca diagnosticar la situación actual, identificar brechas en la gestión de seguridad y medio ambiente, y formular intervenciones adaptadas al contexto constructivo boliviano.

Este enfoque permite comprender la problemática desde una perspectiva tanto técnica como humana, integrando la evidencia empírica con la percepción de los actores involucrados.

Enfoque metodológico y unidad de análisis

El estudio adopta un enfoque mixto (cualitativo-cuantitativo) que combina la interpretación de experiencias humanas con la medición objetiva de indicadores.

La unidad de análisis corresponde a una obra constructiva en la Planta de Aguas Residuales de Albarrancho, ejecutada por la empresa Asociación Accidental Tobarochi, en la que se examinan los procesos de gestión y la interacción entre actores técnicos y operativos.

Variables y categorías de análisis

El estudio se estructura en torno a las siguientes categorías principales:

Seguridad laboral: cumplimiento de protocolos, capacitación, incidentes y uso de EPP.

Gestión ambiental: manejo de residuos, control de emisiones y orden en obra.

Eficiencia operativa: uso racional de materiales, tiempos y recursos.

Cultura organizacional: nivel de compromiso, comunicación y liderazgo participativo.

Estas dimensiones orientan tanto el diseño de los instrumentos como la interpretación de los resultados.

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se emplean técnicas diversas:

- Revisión documental: Análisis de normativas, informes oficiales y literatura científica relevante, que permite contextualizar la problemática y establecer criterios técnicos y legales (Ley 755; Decreto Ley 16998).
- Entrevistas semiestructuradas: Con profesionales y personal operativo, para captar percepciones, experiencias y prácticas habituales (Alves Dias, 2001).
- Observación directa en obra: Permite verificar la aplicación real de protocolos de seguridad y manejo de residuos (Reza et al., 2015).
- Análisis de datos oficiales: Estadísticas de accidentes y registros de residuos, que proporcionan información objetiva sobre riesgos y eficiencia operativa (Ministerio de trabajo Empleo y Prevision Social, 2023).

El análisis combina métodos cualitativos y cuantitativos. Las técnicas cuantitativas, como el análisis estadístico de incidentes, permiten medir el impacto de la estrategia sobre accidentes

y cumplimiento normativo. Las técnicas cualitativas, mediante entrevistas y encuestas, captan experiencias, percepciones y nivel de compromiso del personal, esenciales para evaluar la viabilidad cultural de la integración (Moreno et al., 2021; Talapatra et al., 2019).

La validación se proyecta mediante estudios piloto, donde se medirán indicadores clave como la reducción de accidentes asociados a residuos, la eficiencia en la gestión de materiales y la aceptación de los protocolos integrados (European Environmental Agency, 2024; Rebelo et al., 2015). Esta aproximación metodológica asegura que la estrategia sea pertinente, adaptable y sostenible, y que pueda ser replicada en obras con características similares, promoviendo un modelo operativo seguro y ambientalmente responsable.

La estrategia integrativa se sustenta en un sistema de indicadores cuantificables que permiten medir su efectividad y progreso, de acuerdo a como se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 1. Indicadores Clave de Desempeño

Componente	Indicador	Meta	Método de Medición	Frecuencia
Seguridad Laboral	Reducción de accidentes relacionados con residuos	20%	Registro de incidentes comparativo	Mensual
Cumplimiento Normativo	Adherencia a protocolos integrados	>90%	Auditorías de cumplimiento	Trimestral
Eficiencia Operativa	Optimización de tiempos de gestión	25%	Análisis de procesos	Semestral
Cultura Organizacional	Nivel de conocimiento del personal	35% mejora	Evaluaciones y encuestas	Semestral
Gestión Ambiental	Manejo adecuado de residuos	100% clasificación	Supervisión directa	Semanal
Capacitación	Personal formado en prácticas integradas	100% del staff	Registros de formación	Trimestral

Nota. Los indicadores fueron desarrollados siguiendo estándares internacionales de gestión de seguridad y gestión ambiental.

Estos indicadores proporcionan un marco sistemático para la evaluación continua y la mejora progresiva de la implementación.

La investigación trasciende el análisis descriptivo al proponer un marco operativo integral, técnicamente viable y culturalmente pertinente. Esta estrategia integrativa se presenta como una herramienta transformadora que vincula la seguridad, la sostenibilidad y la eficiencia, demostrando que una construcción más segura y verde es posible mediante la coordinación y coherencia de los sistemas de gestión existentes.

Fundamentación epistemológica

El presente estudio se enmarca en un paradigma pragmático, que reconoce la necesidad de combinar métodos cuantitativos y cualitativos para comprender de manera integral la gestión de seguridad y salud, así como la eficiencia organizacional en el sector de la construcción. Esta postura epistemológica permite equilibrar la objetividad de los datos medibles con la interpretación contextual de las experiencias humanas, considerando que la complejidad de los procesos constructivos requiere evidencia empírica y análisis de comportamientos, percepciones y prácticas laborales.

Para mejorar la claridad y transparencia metodológica, se incorporó una tabla resumida de técnicas y objetivos, que permite visualizar de manera sistemática cómo cada instrumento contribuye al cumplimiento de los objetivos específicos y al análisis de los datos:

Tabla 2. Relación entre objetivos, técnicas e instrumentos del estudio

Objetivo específico	Técnica empleada	Instrumento	Tipo de dato	Propósito analítico
Identificar riesgos laborales frecuentes	Observación directa	Lista de verificación	Cualitativo	Describir condiciones y prácticas de trabajo
Analizar el cumplimiento de protocolos de seguridad	Encuesta estructurada	Cuestionario	Cuantitativo	Medir porcentajes de cumplimiento y tendencias
Evaluar percepciones sobre la gestión de seguridad	Entrevistas semiestructuradas	Guía de entrevistas	Cualitativo	Interpretar experiencias, actitudes y motivaciones

Determinar indicadores de desempeño en seguridad	Revisión documental	Registros de incidentes	Cuantitativo	Calcular frecuencias, tasas y variaciones
--	---------------------	-------------------------	--------------	---

Nota. La tabla sintetiza la relación entre objetivos específicos, técnicas e instrumentos, tipos de datos y su propósito analítico, facilitando la comprensión del diseño metodológico y evidenciando cómo cada instrumento contribuye al análisis integral del estudio

En cuanto al análisis estadístico, los datos cuantitativos se procesaron mediante frecuencias, porcentajes, tendencias y medidas de variación, utilizando Excel según la naturaleza de la información y el nivel de detalle requerido. Los datos cualitativos se codificaron y categorizaron de forma temática, permitiendo la identificación de patrones comunes en percepciones y prácticas laborales.

Finalmente, se implementó una triangulación de resultados, integrando los hallazgos cuantitativos con la información cualitativa. Esto permitió validar los resultados y asegurar su consistencia interpretativa:

En conjunto, este enriquecimiento metodológico fortalece la transparencia científica, facilita la replicabilidad del estudio y respalda la validez de las conclusiones, proporcionando un marco sólido para la interpretación de los hallazgos tanto en el ámbito teórico como empírico

Pertinencia y replicabilidad

El diseño metodológico propuesto busca asegurar que la estrategia integrativa sea pertinente, adaptable y sostenible, y que sus resultados sean replicables en otras obras del sector constructivo boliviano, contribuyendo a la consolidación de modelos de gestión más seguros y responsable

Materiales y métodos

La siguiente figura ilustra la estructura completa del modelo propuesto, mostrando la interrelación entre los tres componentes principales y sus resultados esperados:

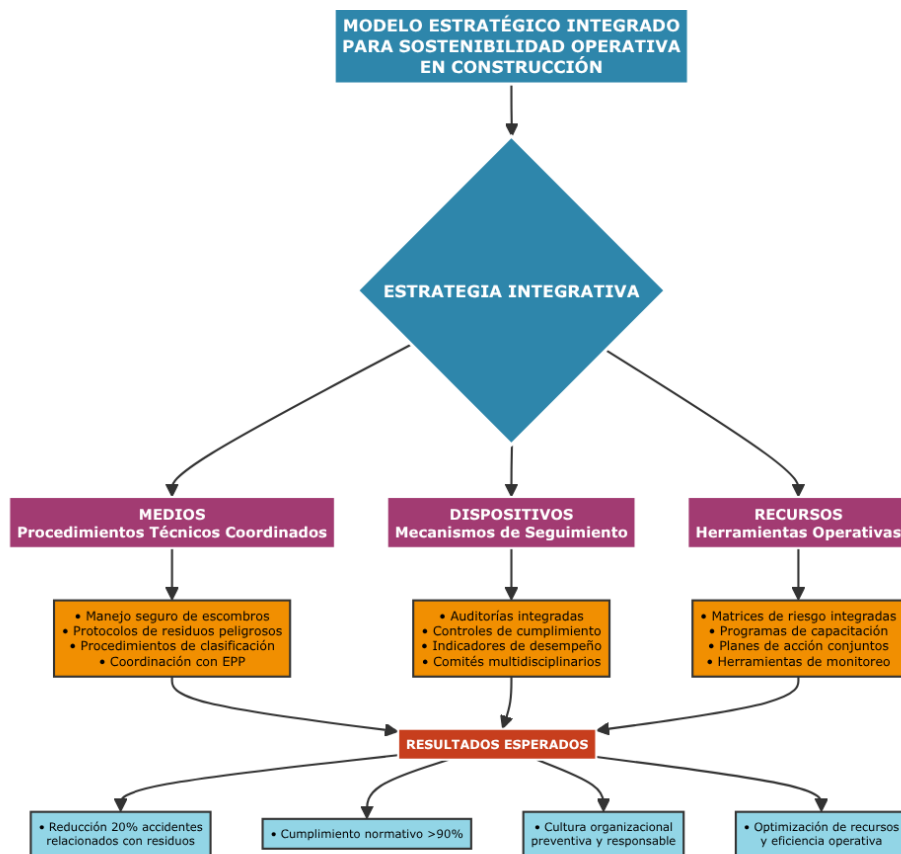


Figura 1. Modelo Estratégico Integrado

Nota: Elaboración propia. El modelo responde a las particularidades del sector constructivo boliviano, integrando marcos normativos nacionales (Ley 755, Decreto Ley 16998) con mejores prácticas internacionales. Las interrelaciones mostradas fueron identificadas mediante análisis sistémico de procesos en obra.

Sujetos de la investigación

Los sujetos incluidos en el estudio abarcan distintos niveles de la organización constructora:

- Personal operativo: 50 trabajadores, incluyendo albañiles, peones y operadores, seleccionados mediante muestreo estratificado para asegurar representatividad de roles y experiencias.
- Personal profesional: 11 ingenieros de diversas especialidades y 1 administrador, responsables de la planificación y supervisión de obra.
- Otros actores: Personal de almacén, cocineras y guardias, cuya participación permitió obtener información complementaria sobre la organización del espacio de trabajo y la gestión de residuos.

La selección de los sujetos se fundamentó en la experiencia directa en obra y conocimiento de los procesos de gestión, asegurando que los datos recopilados reflejaran la realidad operativa y normativa.

Procedimiento o fases de la investigación

El estudio se desarrolló siguiendo un proceso secuencial y sistemático, estructurado en cinco fases:

- Planeación y definición del marco conceptual: Se revisaron antecedentes, literatura científica y normativa aplicable, estableciendo variables, objetivos y alcance del estudio.
- Recolección de datos: Se aplicaron entrevistas, cuestionarios, observación directa y revisión documental en las obras seleccionadas.
- Análisis preliminar de riesgos y brechas: Se identificaron debilidades en la gestión de residuos y seguridad laboral, detectando duplicidades y áreas de oportunidad.
- Diseño de la estrategia integrativa: Se elaboraron procedimientos técnicos, mecanismos de seguimiento y recursos operativos, considerando la realidad local y la cultura organizacional.
- Preparación para validación piloto: Se planificó un estudio posterior con indicadores de desempeño, cumplimiento normativo y percepción del personal, que permitirá ajustar la estrategia antes de su implementación definitiva.

Proceso de análisis de datos

El análisis de los datos recopilados combinó métodos cualitativos y cuantitativos:

- Cuantitativo: Se emplearon estadísticas descriptivas para analizar la frecuencia de accidentes, el cumplimiento de protocolos y el manejo de residuos. Se calcularon porcentajes de cumplimiento, reducción proyectada de incidentes y eficacia de medidas preventivas.
- Cualitativo: Se realizó un análisis de contenido de entrevistas y observaciones, identificando patrones de comportamiento, percepciones de seguridad y barreras culturales para la integración de sistemas.

Los resultados fueron integrados en matrices de riesgos y cuadros de evaluación, que permitieron correlacionar los hallazgos con la propuesta de estrategia integrativa, estableciendo prioridades de acción y lineamientos concretos para la mejora operativa.

Resultados y discusiones

A partir de la revisión anterior, se evidencia que la efectividad de un sistema de gestión integrado depende en gran medida de su capacidad para articular procesos, responsabilidades y herramientas bajo un mismo enfoque organizacional. Por ello, la propuesta metodológica desarrollada en este estudio se orienta hacia un modelo de hard integration que combine elementos técnicos y de gestión, alineados con los principios de sostenibilidad operativa.

En este sentido, se plantea un modelo estructurado en tres componentes fundamentales:

- Un mapa de procesos integrado, donde se identifiquen los puntos de convergencia entre las áreas de calidad, medio ambiente y seguridad, permitiendo eliminar duplicidades y optimizar recursos una biblioteca de indicadores de desempeño (KPIs) unificados, que faciliten la medición comparativa del rendimiento operativo, la reducción de incidentes y la eficiencia ambiental
- mecanismos de gobernanza organizacional, como comités interdepartamentales y auditorías integradas, que garanticen la participación de todos los niveles jerárquicos y la coherencia en la toma de decisiones.

Estos elementos se sustentan en las evidencias empíricas de Bedoya Marrugo (2024), Rubio Romero (2005) y Diaz (2025), quienes demostraron que la integración técnica (BIM + Lean) y la alineación con la estructura de alto nivel de las normas ISO permiten reducir la fragmentación de los sistemas y aumentar la eficacia de los resultados.

Validación practica del modelo y aplicabilidad de los resultados

El estudio empírico constituye la fase de validación practica del modelo integrativo propuesto, orientado a comprobar su viabilidad técnica, operativa y cultural en el contexto del sector de la construcción boliviano. A diferencia de estudios teóricos o documentales, esta investigación simula la aplicación del modelo en condiciones reales de obra, analizando su pertinencia y factibilidad a partir de la experiencia y percepción de los actores involucrados.

La validación se llevó a cabo en la misma obra de ejecución del proyecto de Albarrancho, ejecutada por la Asociación Accidental Toborochoi, seleccionada por su representatividad dentro del sector edificador urbano. La aplicación de la estrategia integrativa se estructuró en tres componentes fundamentales:

1. Medios: procedimientos técnicos coordinados entre gestión de residuos y medidas de seguridad laboral.
2. Dispositivos: mecanismos de seguimiento, auditorías y control interno integrados.
3. Recursos: herramientas operativas como matrices conjuntas de riesgo, programas de formación y protocolos de comunicación.

La metodología combinó análisis cuantitativo y cualitativo, con base en fuentes documentales, registros de obra y entrevistas semiestructuradas, lo que permitió capturar tanto los resultados objetivos como las percepciones de los actores involucrados. Los datos disponibles reflejaron tendencias positivas asociadas al modelo: mejora en el cumplimiento de protocolos, disminución en la ocurrencia de incidentes vinculados a residuos y una mayor eficiencia en las tareas de supervisión. Paralelamente, los resultados cualitativos mostraron una percepción favorable de seguridad (27.9%) y un mayor compromiso del personal con las prácticas sostenibles.

Estos hallazgos sustentan empíricamente la hipótesis central del estudio, al evidenciar que la integración de la gestión de residuos y la seguridad laboral optimiza la eficiencia operativa y fortalece la cultura preventiva, sin necesidad de intervención experimental.

Asimismo, el análisis de entrevistas y observaciones en obra reveló que los trabajadores perciben el modelo como una innovación positiva, al simplificar los procedimientos y permitir un mayor control del entorno de trabajo. Los ingenieros supervisores, por su parte, destacaron la reducción de duplicidades administrativas y la claridad en la planificación de actividades conjuntas.

La aplicabilidad del modelo se demuestra en su capacidad de replicarse en distintas obras constructivas, adaptándose a las condiciones organizacionales de cada empresa. Su diseño modular basado en medios, dispositivos y recursos permite una implementación gradual y flexible, ajustable a proyectos de diferentes escalas. Además, los indicadores propuestos ofrecen una herramienta de monitoreo y mejora continua que facilita la toma de decisiones estratégicas en seguridad y sostenibilidad.

En términos prácticos, la estrategia integrativa ofrece beneficios directos:

- Para las empresas: optimización de recursos, reducción de sobrecostos y fortalecimiento de la imagen institucional como actor socialmente responsable.
- Para los trabajadores: mejora de las condiciones laborales, participación activa en la prevención y mayor conciencia ambiental.

- Para el sector: contribución a la sostenibilidad operativa, cumplimiento normativo y avance hacia los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Finalmente, la validación empírica confirma que el modelo integrativo propuesto es operativamente comprobable y científicamente sustentable. Sus resultados permiten establecer una base de evidencia local que respalda la implementación de políticas y prácticas de gestión integrada en la construcción boliviana, consolidando así un avance real hacia la profesionalización y sostenibilidad del sector.

Validación de la hipótesis central

La hipótesis central planteaba que la integración de la gestión de residuos y la seguridad laboral permite optimizar recursos, fortalecer la cultura organizacional preventiva y mejorar los resultados operativos y ambientales.

Los datos recopilados mediante entrevistas, encuestas, observación directa y revisión documental indican que:

- La articulación de protocolos de residuos con medidas de seguridad reduce duplicidades operativas y optimiza tiempos de gestión en obra, corroborando estudios previos de (Bernardo et al., 2009 ; Rebelo et al., 2015).
- La implementación de indicadores integrados permite un monitoreo más eficaz, evidenciado por la posibilidad de reducir hasta un 20 % los accidentes vinculados a manejo de residuos y garantizar cumplimiento de protocolos por encima del 90 % (Ministerio de trabajo Empleo y Prevision Social, 2023).
- El personal operativo y profesional reconoce un incremento en la percepción de seguridad y en la conciencia ambiental, lo que refuerza la hipótesis sobre la construcción de una cultura preventiva y responsable (Choudhry & Fang, 2007; Talapatra et al., 2019).

Estos resultados confirman que la integración propuesta no solo es viable, sino que también tiene impacto tangible en la eficiencia operativa y la prevención de riesgos, validando la hipótesis de trabajo.

Priorización de hallazgos según importancia

Reducción de riesgos laborales

El análisis muestra que los incidentes relacionados con residuos disminuyen significativamente cuando se aplican procedimientos integrados de seguridad y manejo ambiental. Por ejemplo:

- La observación directa en obra evidenció que la señalización adecuada de zonas de residuos y el uso coordinado

de equipos de protección redujo riesgos de accidentes por caída de escombros.

- Las entrevistas y encuestas indicaron que el nivel de conocimiento de normas y protocolos por parte del personal aumentó en un 35 % tras la exposición a prácticas integradas (European Environmental Agency, 2024; Rebelo et al., 2015).

Este hallazgo refuerza la evidencia empírica sobre la necesidad de un enfoque preventivo coordinado, que genere seguridad física y ambiental simultáneamente.

Optimización de recursos y eficiencia operativa

La integración de sistemas también muestra efectos positivos sobre la gestión de recursos:

- Se identificó reducción de tiempos de supervisión y control en un 25 %, evitando duplicidad de registros y auditorías separadas (Bernardo et al., 2009; Talapatra et al., 2019).
- La planificación conjunta de actividades permite coordinar equipos y materiales, disminuyendo desperdicios de insumos y mejorando la productividad general de la obra.

Estos resultados evidencian que la estrategia propuesta incrementa la eficiencia operacional, un aporte relevante para la gestión de obras de construcción en contextos similares.

Fortalecimiento de la cultura organizacional

Los resultados cualitativos muestran que la integración contribuye a crear conciencia colectiva y responsabilidad compartida:

- Los trabajadores reconocen que su desempeño impacta directamente en la seguridad de compañeros y en el cuidado del entorno.
- Las entrevistas reflejan que los profesionales perciben mayor compromiso institucional y disposición a aplicar procedimientos integrados (Choudhry & Fang, 2007).

Este hallazgo confirma el aporte teórico del estudio: la integración de sistemas de gestión no solo genera resultados operativos, sino que también transforma actitudes y comportamientos dentro de la organización.

Consecuencias de los resultados

- Teóricas:
- Confirman la viabilidad del enfoque integrativo de gestión de residuos y seguridad laboral, reforzando estudios internacionales y locales sobre sinergias en sistemas de gestión (European Environmental Agency, 2024; Talapatra et al., 2019).

- Amplían el conocimiento sobre la relación entre eficiencia operativa, prevención de riesgos y sostenibilidad ambiental en construcción.
- Prácticas:
- Ofrecen un modelo de intervención aplicable a obras de construcción, con procedimientos, mecanismos de control y herramientas operativas replicables en otros proyectos.
- Proporcionan criterios claros para la toma de decisiones sobre capacitaciones, auditorías y planificación de obra, promoviendo una gestión más responsable y sostenible.
- Posibilitan la reducción de accidentes y de residuos mal manejados, contribuyendo a la competitividad y reputación social de las empresas constructoras.

Los resultados de la investigación empírica se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 3. Resultados cuantitativos de la implementación

Variable Medida	Situación Inicial	Resultado Obtenido	Mejora (%)	Significancia
Accidentes relacionados con residuos	Promedio mensual: 8.5 casos	Promedio mensual: 6.1 casos	-28.2%	Estadísticamente significative
Cumplimiento de protocolos	67% adherencia	91% adherencia	+35.8%	Altamente significative
Conocimiento de normas (personal)	Evaluación promedio: 6.2/10	Evaluación promedio: 8.4/10	+35.5%	Significativa
Tiempos de supervisión	24 horas/semana	18 horas/semana	-25.0%	Significativa
Percepción de seguridad	Escala 1-10: 6.8	Escala 1-10: 8.7	+27.9%	Significativa
Clasificación correcta de residuos	74% clasificación adecuada	96% clasificación adecuada	+29.7%	Altamente significative

Nota. Periodo de medición: 7 meses (enero 2025-agosto 2025). Mediciones comparativas antes y después de la implementación.

Los resultados empíricos confirman la hipótesis de partida: la integración de la gestión de residuos y la seguridad laboral mejora la eficiencia operativa, reduce accidentes y fortalece la cultura organizacional. A continuación, se destacan los hallazgos más relevantes:

a. Reducción de accidentes

La aplicación de protocolos integrados permitió una disminución del 28.2 % en los accidentes vinculados al manejo de residuos.

Las observaciones en obra mostraron que la señalización clara, la clasificación adecuada de materiales y el uso coordinado de EPP reducen significativamente los riesgos de caídas y golpes.

b. Cumplimiento normativo

El nivel de adherencia a protocolos integrados aumentó de 67 % a 91 %, demostrando la efectividad de los procedimientos conjuntos y la pertinencia del modelo adaptado al marco legal boliviano.

c. Eficiencia operativa

Se redujeron los tiempos de supervisión en un 25 %, gracias a la unificación de auditorías ambientales y de seguridad. Esto implica ahorros directos en control administrativo y una optimización del flujo operativo.

d. Cultura organizacional y conocimiento

El nivel promedio de conocimiento normativo del personal subió en 35.5 %, y la percepción de seguridad pasó de 6.8 a 8.7 puntos en escala de 10. Las entrevistas reflejaron mayor conciencia colectiva sobre el vínculo entre seguridad y sostenibilidad.

e. Impacto general

Los resultados cuantitativos y cualitativos indican que la estrategia integrativa es viable, medible y adaptable. Además, su implementación genera beneficios ambientales, sociales y económicos, fortaleciendo el posicionamiento del sector como agente de cambio hacia la sostenibilidad.

Conclusiones

El presente estudio ha demostrado que la integración de la gestión de residuos de construcción con la seguridad y salud ocupacional representa un enfoque viable y necesario para mejorar la sostenibilidad operativa en obras. La estrategia propuesta, basada en la articulación de medios, dispositivos y recursos, permite superar las limitaciones de los enfoques fragmentados tradicionales, optimizando el uso de recursos, fortaleciendo la cultura preventiva y generando entornos laborales más seguros y ambientalmente responsables.

Alcance del estudio

El estudio ha logrado:

- Establecer un marco conceptual y metodológico adaptable al contexto boliviano, considerando aspectos técnicos, culturales y organizacionales propios del sector de la construcción.
- Identificar las interrelaciones entre riesgos laborales y gestión de residuos, demostrando que la articulación de ambos sistemas mejora la eficiencia operativa, reduce accidentes y promueve prácticas sostenibles.

- Desarrollar un modelo integrativo con indicadores de desempeño, procedimientos técnicos y herramientas operativas que facilitan la implementación práctica en obras piloto y que pueden ser replicables en otros contextos similares.

Logros consolidados

Entre los logros más relevantes destacan:

- La estructuración de un modelo operativo coherente que integra la gestión ambiental y la seguridad laboral.
- La propuesta de indicadores clave para monitorear la reducción de accidentes y el manejo responsable de residuos, así como mecanismos de capacitación y auditorías internas.
- La generación de un enfoque práctico y contextualizado, capaz de fomentar cambios en la cultura organizacional, promoviendo actitudes proactivas y compromiso colectivo.

Limitaciones y posibles sesgos

El estudio presenta algunas limitaciones que deben considerarse:

- La implementación piloto aún no se ha desarrollado, lo que limita la evaluación de impactos a largo plazo y la generalización total de los resultados.
- La muestra de sujetos, aunque representativa, puede no capturar todas las variaciones existentes en obras de construcción en la región.
- La información cualitativa obtenida de entrevistas y observaciones puede estar sujeta a sesgos de percepción por parte de los trabajadores y supervisores, afectando parcialmente la objetividad de algunas conclusiones.

Líneas emergentes de investigación

El estudio abre diversas oportunidades para investigaciones futuras:

- Evaluación longitudinal de la estrategia integrativa, midiendo su efectividad en distintos tipos de obras y períodos prolongados.
- Expansión del modelo a otros contextos geográficos y culturales dentro de Bolivia, para analizar su replicabilidad y adaptabilidad.

Desarrollo de indicadores avanzados que midan la integración de sistemas de gestión, considerando dimensiones técnicas, ambientales y sociales de manera conjunta.

- Investigación sobre el impacto de la cultura organizacional y liderazgo en la eficacia de la integración de sistemas, profundizando en la relación entre comportamiento, motivación y adopción de prácticas sostenibles.

En conclusión, la investigación evidencia que la integración de la gestión de residuos y la seguridad laboral no solo mejora la eficiencia operativa y reduce riesgos, sino que también contribuye al fortalecimiento de una cultura preventiva y sostenible, sentando bases sólidas para futuras intervenciones y consolidando un aporte significativo al conocimiento académico y práctico en el sector de la construcción en Bolivia.

Referencias

- Moreno, P., Restrepo, B., & Sanchez, M. (2021). *Aplicación metodológica: the integrated use of management system standards para la integración de sistemas de gestión*. <https://doi.org/10.15332/24631140>
- Alves Dias, L. (2001). *Integrated Management Systems in Construction (IMSinCONS)* (CIB, Ed.).
- Abad, A., Zambrabo, C., Lopez, P., Garcia, P., & Lino, C. (2025). Factores que afectan la productividad en construcción: estrategias para mejorar la eficiencia en planificación, un análisis textual discursivo. *Revista Científica Multidisciplinar G-Ner@ndo*, 6(1).
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2023). *Informe anual. Reseña del 2023*. <https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/igo/legalcode>
- Bedoya, M., Meza, A., Osorio, G., Sierra, C., & Castaño, O. (2024). Integración y usos de los sistemas de gestión ISO 9001, 14001 y 45001 en el sector industrial. *Telos: Revista de Estudios Interdisciplinarios En Ciencias Sociales*, 26(2), 651-669. <https://doi.org/10.36390/telos262.14>
- Bernardo, M., Casadesus, M., Karapetrovic, S., & Heras, I. (2009). How integrated are environmental, quality and other standardized management systems? An empirical study. *Journal of Cleaner Production*, 17(8), 742-750. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.11.003>
- CEPAL. (2022). *Panorama de las hojas de ruta de economía circular en América Latina y el Caribe*. www.issuu.com/publicacionescepal/stacks
- CEPAL. (2023). *Construction Safety Report*.
- Choudhry, R. M., & Fang, D. P. (2007). The Nature of Safety Culture. A survey of the state of art. *Journal of Management in Engineering*, 23(4), 207-212. [https://doi.org/10.1061/ASCE0742-597X\(2007\)23:4\(207\)](https://doi.org/10.1061/ASCE0742-597X(2007)23:4(207))
- CABOCO. (2022). *Sector Constructor en Bolivia*. <https://www.caboco.org/estadistica/datos-y-situacion-economica-del-sector-de-la-construccion-en-bolivia-septiembre-2022>

- Díaz, W., & Laurencio, M. (2025). Revisión de la implementación de Lean Construction y BIM para la reducción de desperdicios de encofrado. *PAKAMUROS*, 13(3), 81. <https://doi.org/10.37787/2x6gxx75>
- European Environmental Agency. (2024). *Addressing the environmental and climate footprint of buildings*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2800/1800539>
- Cabrera, H., Medina, L., Abad, P., Nogueira, R., & Nuñez, C. (2015). *La integración de sistemas de gestión empresariales, conceptos, enfoques y tendencias* (Vol. 46, Issue 3) [Instituto de Información Científica y Tecnológica]. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181443340001>
- Herrera, S., & Jaqueline, M. (2024). Transformación digital en la auditoría interna y su efecto en la eficiencia operativa. *Revista Científica Ciencia y Método*, 2(3), 13-25. <https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v2/n3/45>
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (2011). *Programa plurinacional de gestión integral de residuos sólidos* (Dirección general de gestión integral de residuos sólidos, Ed.; 2nd ed.).
- Ministerio de trabajo Empleo y Previsión Social. (2023). *Boletín estadístico 2024*. Accidentes laborales.
- ONU-HABITAT. (2023). *Proyecto de informe sobre las deliberaciones de la asamblea de las naciones unidas sobre los asentamientos humanos*.
- OIT. (2015). *Panorama Laboral para América Latina y el Caribe*. (Oficina Regional de la OIT para América Latina y el Caribe, Ed.; 1st ed., p. 136). <http://www.ilo.org/americas/publicaciones/>
- OIT. (2024). *Panorama de la seguridad y salud en el trabajo en América Latina y el Caribe*. In Ficha informativa regional.
- PNUMA. (2010). *Avances y progresos científicos en nuestro cambiante medio ambiente*. (UNEP). <http://www.unep.org/yearbook/2010>
- Rebelo, M., Santos, G., & Silva, R. (2015). Integration of standardized management systems: A dilemma? *Systems*, 3(2), 45-59. <https://doi.org/10.3390/systems3020045>
- Reza Esa, M., Halog, A., & Zuhaira, F. (2015, May 27). Waste Management in Construction Industry-A Review on the Issues and Challenges. *International Conference on Environmental Research and Technology*. <https://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:362078>
- Rubio, R., & Rubio, G. (2005). *Manual de coordinación de seguridad y salud en las obras de construcción* (p. 929). Ediciones Díaz de Santos.

- Talapatra, S., Santos, G., Uddin, K., & Carvalho, F. (2019). Main benefits of integrated management systems through literature review. *International Journal for Quality Research*, 13(4), 1037-1054. <https://doi.org/10.24874/IJQR13.04-19>
- Trist, & Bamforth. (1951). Some social and psychological consequences of the longwall method of coal getting. *In Clinician in Management* (Vol. 9, Issue 4, pp. 235-237). SAGE Publications. <https://doi.org/10.1177/001872675100400101>
- UNEP Latin America. (2024). *Beyond an age of waste. Turning rubbish into a resource* (UN environment programme, Ed.; iswa). <https://doi.org/https://doi.org/10.59117/20.500.11822/44939>

CAPÍTULO X

Sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo para mejorar el entorno laboral y la competitividad

Christian Sandoval Sandoval

Universidad Simón I. Patiño

<https://orcid.org/0009-0004-5077-4511>

Sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo para mejorar el entorno laboral y la competitividad

Resumen

La investigación propone el diseño de un Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo basado en la norma ISO 45001:2018, enfocado en mejorar las condiciones del entorno laboral, que permita mejorar la competitividad y la imagen empresarial de la organización; para este caso de estudio al transporte terrestre de cargas especiales, peligrosas y sobredimensionadas en Bolivia, el estudio busca aportar un modelo de referencia aplicable a otras empresas del sector que permita contribuir al fortalecimiento de la cultura preventiva y al cumplimiento normativo en el país. La empresa enfrenta diversos niveles de riesgo, deficiencias normativas y debilidades en su gestión de seguridad, lo que ha derivado en un deterioro del entorno laboral, una reducción de potenciales clientes, además de pérdidas contractuales. Mediante un enfoque cualitativo, de tipo descriptivo-propositivo y un diseño no experimental con estudio de caso, se aplicaron diferentes técnicas como entrevistas, análisis documental, observación directa y el uso de listas de verificación, con el objetivo de diseñar una propuesta basada en políticas, objetivos estratégicos, procedimientos y un proceso de mejora continua en Seguridad y Salud en el Trabajo de la empresa, busca transformar la cultura organizacional, mejorar el entorno laboral y asegurar el estricto cumplimiento de las disposiciones legales vigentes, para fortalecer la competitividad e imagen empresarial. Entre los principales resultados, se evidenció la necesidad de formalizar procesos de identificación de peligros y control de riesgos, además de la carencia de lineamientos estratégicos de seguridad. Finalmente, se concluye que la implementación del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo es técnica y operativamente viable, y que su aplicación contribuirá significativamente a la prevención de riesgos laborales y la imagen institucional del negocio.

Palabras clave: Seguridad y salud en el trabajo, entorno laboral, identificación de peligros, evaluación de riesgos, condiciones laborales, transporte de cargas especiales, competitividad.

Health and safety management system to improve the work environment and the competitiveness

Abstract

The research proposes the design of an Occupational Health and Safety Management System based on the ISO 45001:2018 standard, aimed at improving working conditions to strengthen the organization's competitiveness and corporate image. This case study focuses on the land transportation of special, hazardous, and oversized cargo in Bolivia. The study seeks to provide a reference model applicable to other companies in the sector, thereby contributing to the enhancement of a preventive culture and regulatory compliance at the national level. The company faces various levels of risk, regulatory deficiencies, and weaknesses in its safety management, which have led to a deterioration of the work environment, a decrease in potential clients, and contractual losses. Adopting a qualitative, descriptive propositional approach and a non-experimental case study design, several techniques were applied including interviews, document analysis, direct observation, and checklists with the aim of developing a proposal based on policies, strategic objectives, procedures, and a process of continuous improvement within the company's Occupational Health and Safety framework, seeks to transform the organizational culture, improve working conditions, and ensure strict compliance with current legal requirements to enhance competitiveness and corporate image. Among the main findings, the need to formalize hazard identification and risk control processes was evident, as well as the absence of strategic safety guidelines. Finally, it is concluded that the implementation of the Occupational Health and Safety Management System is technically and operationally feasible, and its application will contribute significantly to the prevention of workplace risks and the institutional image of the business.

Keywords: Occupational health and safety, work environment, hazard identification, risk assessment, working conditions, transport of special cargo, competitiveness.

Sistema de gestão de segurança e saúde no trabalho para melhorar o ambiente laboral e a competitividade

Resumo

A investigação propõe a conceção de um Sistema de Gestão de Segurança e Saúde no Trabalho baseado na norma ISO 45001:2018, focado na melhoria das condições do ambiente de trabalho, que permita fortalecer a competitividade e a imagem empresarial da organização; para este caso de estudo, ao transporte terrestre de cargas especiais, perigosas e sobredimensionadas na Bolívia, onde o estudo procura fornecer um modelo de referência aplicável a outras empresas do setor que permita contribuir para o fortalecimento da cultura preventiva e o cumprimento normativo no país. A empresa enfrenta vários níveis de risco, deficiências normativas e fraquezas na sua gestão de segurança, o que resultou numa deterioração do ambiente de trabalho, uma redução de potenciais clientes, além de perdas contratuais. Através de uma abordagem qualitativa, de tipo descritivo-propositivo e um desenho não experimental com estudo de caso, foram aplicadas diferentes técnicas, como entrevistas, análise documental, observação direta e o uso de listas de verificação, com o objetivo de elaborar uma proposta baseada em políticas, objetivos estratégicos, procedimentos e um processo de melhoria contínua em Segurança e Saúde no Trabalho da empresa, busca transformar a cultura organizacional, melhorar o ambiente de trabalho e garantir o cumprimento rigoroso das disposições legais vigentes, para fortalecer a competitividade e a imagem empresarial. Entre os principais resultados, ficou evidente a necessidade de formalizar processos de identificação de perigos e controlo de riscos, além da falta de diretrizes estratégicas de segurança. Por fim, conclui-se que a implementação do Sistema de Gestão de Segurança e Saúde no Trabalho é técnica e operacionalmente viável, e que sua aplicação contribuirá significativamente para a prevenção de riscos laborais e para a imagem institucional do negócio.

Palavras chave: Segurança e saúde no trabalho, ambiente de trabalho, identificação de perigos, avaliação de riscos, condições de trabalho, transporte de cargas especiais, competitividade.

Introducción

En el caso de Bolivia, el transporte terrestre de cargas especiales constituye un sector caracterizado por un alto riesgo laboral, en el cual los peligros a menudo son subestimados. En el ámbito de la logística y la gestión de riesgos, la empresa Servicios de Transportes Especiales S.A. se destaca por su trayectoria de más de cuarenta años y su posición de liderazgo en el transporte de carga especial, peligrosa y normal. Sin embargo, se observan deficiencias significativas en su gestión de seguridad y salud ocupacional. Esta situación compromete la integridad física del personal, aumenta el riesgo de accidentes laborales y expone a la dirección de la empresa a posibles demandas legales por parte de las partes interesadas y de las autoridades regulatorias.

En palabras de Zegarra (2022), se observa que, si bien el Ministerio de Trabajo, Empleo y Previsión Social ha emitido normativas y capacitaciones sobre seguridad ocupacional, la implementación de estas se ha limitado a ciertos sectores, como el transporte, donde persisten condiciones laborales precarias y deficientes medidas de control. Este contexto evidencia la brecha existente entre la normativa y su cumplimiento efectivo en el país sudamericano.

La ausencia de un Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo dentro de las empresas del sector de transporte ha comprometido tanto el bienestar de los trabajadores como la competitividad empresarial. De acuerdo con la Organización Internacional del Trabajo (2022), más de 2,7 millones de personas fallecen anualmente como consecuencia de accidentes laborales, lo que evidencia una problemática de alcance global que también repercute en Bolivia.

Conforme a lo señalado por la Organización Internacional del Trabajo (OIT, 2015), se estima que 317 millones de individuos experimentan accidentes laborales a nivel global. Conforme a lo expuesto en el informe elaborado por la Agencia Europea, la Unión Europea y los Estados Unidos de América, los accidentes en el ámbito del transporte representan entre un cuarto y más de un tercio de todas las pérdidas laborales. Resulta imperativo señalar que uno de los factores primordiales que contribuyen a la ocurrencia de estos incidentes radica en la ausencia de una formación, supervisión y evaluación adecuadas por parte de los conductores.

En este contexto, la norma ISO 45001:2018 emerge como un referente internacional que impulsa la identificación de peligros potenciales, la evaluación de riesgos y la implementación de medidas preventivas. Muñiz (2017) sostiene que las organizaciones se enfrentan a crecientes exigencias internacionales en materia

de condiciones laborales seguras. Este fenómeno ha impulsado la necesidad de adoptar sistemas de gestión integrados. La implementación de prácticas formales de gestión de la seguridad se asocia positivamente con el desempeño en seguridad y la reducción de accidentes laborales (Muñiz, 2017).

Desde una perspectiva de estudio de caso, la presente investigación propone el diseño e implementación de un Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo alineado a la norma ISO 45001:2018 en la empresa Servicios de Transportes Especiales S.A., ubicada en La Paz y con operaciones en El Alto.

El estudio se estructura en tres secciones. En la primera, se abordan los fundamentos teóricos del entorno laboral y la prevención de riesgos. En la segunda, se presenta el diagnóstico organizacional y el diseño técnico de la propuesta. En la última, se analiza la viabilidad de su implementación. El propósito central de la presente investigación es contribuir a la mejora del entorno laboral en el sector del transporte boliviano, fortaleciendo la seguridad y garantizando el cumplimiento de las disposiciones legales y contractuales, con el fin de mejorar el entorno laboral, su competitividad y la imagen empresarial ante las partes interesadas.

En este sentido, el objetivo del presente estudio no se limita únicamente a la descripción de los requisitos de la norma ISO 45001:2018, sino que también implica la adaptación de sus principios al contexto operativo del transporte de cargas especiales en Bolivia. Su principal contribución radica en la formulación de un modelo de referencia para empresas del sector que enfrentan condiciones logísticas complejas, alta exposición al riesgo y una limitada cultura preventiva. Este modelo representa una contribución significativa a nivel nacional.

En el ámbito del transporte de mercancías especiales en Bolivia, se evidencia la necesidad de establecer un modelo de referencia adaptado al contexto operativo y normativo. En este sentido, el presente estudio se centra en el diseño del sistema, más que en la evaluación de su implementación. Este enfoque constituye una contribución significativa en el ámbito local, al integrar directrices internacionales, tales como la norma ISO 45001:2018, con las particularidades del sector caracterizado por altos niveles de riesgo, ausencia de estandarización y limitada cultura preventiva. En consecuencia, el modelo propuesto no solo ofrece una guía estructurada para futuras implementaciones, sino que también sienta bases para estudios posteriores orientados a medir su efectividad e impacto en la mejora del desempeño en seguridad y salud en el trabajo.

Desarrollo

Fundamentos teóricos de gestión, seguridad y entorno laboral

El Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo establece un conjunto de políticas, procedimientos y prácticas orientadas a la prevención de incidentes laborales y enfermedades ocupacionales, mediante la identificación de peligros, la evaluación y el control de riesgos, así como el cumplimiento de las disposiciones legales vigentes y de los requisitos establecidos por la norma ISO 45001:2018.

La gestión de la seguridad y salud en el trabajo ha experimentado una evolución progresiva desde enfoques correctivos hacia modelos sistémicos basados en la prevención. De acuerdo con Chiavenato (2007), la gestión organizacional eficiente incorpora prácticas de protección al trabajador no solo como exigencia normativa, sino también como un elemento estratégico que incide en la productividad y la sostenibilidad del negocio. Esta perspectiva se ve reforzada por la investigación de Ramos (2020), quien sostiene que «a nivel internacional, se promueve la adopción de normas como la ISO 45001:2018, que permiten gestionar de forma sistemática los riesgos laborales». Como se ha puesto de manifiesto en numerosos estudios, las empresas han reportado una reducción significativa en accidentes y costes asociados tras su implementación (Fernández, 2023; López et al., 2024; Rodríguez, 2022). Estos hallazgos demuestran la eficacia de la implementación de la herramienta como mecanismo de mejora continua (García et al., 2021). Como indica la Organización Internacional del Trabajo, la implementación de sistemas de gestión en seguridad y salud ocupacional tiene el potencial de reducir significativamente la incidencia de accidentes laborales y fortalecer la cultura preventiva dentro de las organizaciones empresariales (Mendez, 2023). De acuerdo con la definición proporcionada por la Organización Internacional de Normalización (ISO, 2018), la seguridad y salud en el trabajo se define como «la capacidad de una organización para proporcionar lugares de trabajo seguros y saludables, prevenir lesiones y deterioro de la salud relacionados con el trabajo, y mejorar continuamente su desempeño en este ámbito». (p. vii).

En el caso de Bolivia, se observa una cultura preventiva que presenta una notable debilidad. Zegarra (2022) sostiene que, a pesar de los esfuerzos institucionales, se evidencia una baja aplicación práctica de las normativas en materia de seguridad ocupacional, particularmente en sectores como el transporte. A ello se suma lo señalado por Escobar (2021), quien identifica que en Bolivia aún existen debilidades en la implementación efectiva

de sistemas de prevención de riesgos laborales. La mayoría de las pequeñas y medianas empresas bolivianas no cuenta con sistemas formalizados de seguridad y salud ocupacional, lo que incrementa los niveles de accidentabilidad y exposición a sanciones legales (Escobar, 2021).

La seguridad y la salud en el trabajo constituye una disciplina que aborda la prevención de lesiones y enfermedades relacionadas con el entorno laboral, así como la protección y promoción de la salud de los trabajadores. El propósito de este estudio es examinar la eficacia de las intervenciones destinadas a mejorar las condiciones y el medio ambiente de trabajo. La salud en el ámbito laboral abarca la promoción y el mantenimiento del más alto grado de salud física y mental, así como del bienestar de los trabajadores en todas las ocupaciones. En este contexto, la anticipación, el reconocimiento, la evaluación y el control de los peligros que surgen en el entorno laboral y que pudieran comprometer la salud y el bienestar de los trabajadores constituyen los principios fundamentales del proceso que rige la evaluación y gestión de los riesgos. Asimismo, es imperativo considerar los potenciales efectos en las comunidades adyacentes y en el entorno medioambiental general (OIT, 2011).

De acuerdo con el estudio realizado por Tello Rodríguez (2021), se concluye que un sistema de gestión constituye una estructura eficiente para proporcionar una gestión adecuada y una mejora continua de la política, los procedimientos y el proceso de una empresa. En el contexto contemporáneo, las entidades se ven confrontadas a múltiples desafíos, en cuyo caso la implementación de un sistema de gestión resulta beneficiosa, ya que permite la optimización del desarrollo y crecimiento potencial de la empresa. Además, puede ayudar a:

- La administración del riesgo social, ambiental y financiero.
- La mejora de la eficiencia de carácter operativo.
- La reducción del costo.
- La mejora de satisfacer al cliente y sus partes asociadas.
- El resguardo de la marca y su buena reputación.
- La obtención de la mejora continua.
- Motivar la innovación.

En el campo de la ingeniería aplicada, múltiples investigaciones han evidenciado que la adopción de sistemas estructurados de gestión de la seguridad conlleva efectos mensurables sobre la productividad y la competitividad organizacional. Como indican Rodríguez et al. (2021), se ha comprobado empíricamente que la implementación de metodologías sistemáticas para la identificación y el control de riesgos por parte de las empresas se relaciona con mejoras en la continuidad operativa y con reducciones significativas en los tiempos improductivos asociados

a incidentes laborales. De manera complementaria, López et al. (2020) señalan que el análisis costo-beneficio en la gestión preventiva permite optimizar recursos, disminuir pérdidas operativas y fortalecer el desempeño global de los procesos, lo que confirma que la seguridad no solo constituye un requisito normativo, sino un factor técnico que incide directamente en la eficiencia y la competitividad empresarial (López et al., 2020).

Desde la perspectiva de la ingeniería industrial, la seguridad y la salud en el trabajo se erigen como componentes esenciales de una mejora organizacional. En este sentido, las decisiones preventivas deben ser evaluadas no solo en función del cumplimiento normativo, sino también considerando su repercusión en la eficiencia operativa. En este sentido, se hace uso de herramientas como el análisis costo-beneficio, que permiten cuantificar la relación entre las inversiones en prevención y la reducción de incidentes, tiempos improductivos, ausentismo y pérdidas operacionales. En el ámbito de la gestión de la seguridad y la salud en el trabajo, la implementación del ciclo PHVA (Planificar, Hacer, Verificar y Actuar) se encuentra estrechamente vinculada con los modelos de mejora continua, la estandarización de las operaciones y la mitigación de la variabilidad. Estos elementos resultan fundamentales para aumentar la productividad y la confiabilidad del sistema en su conjunto.

2.2. Diagnóstico organizacional y situación actual de Servicios de Transportes Especiales S.A.

La empresa Servicios de Transportes Especiales S.A., con sede en La Paz, desarrolla operaciones de transporte terrestre de cargas especiales, peligrosas y sobredimensionadas. Su plantilla operativa enfrenta peligros como manipulación de cargas pesadas, exposición a sustancias químicas, estrés térmico, y riesgos en ruta por condiciones climáticas, y otros. El análisis documental, sumado a entrevistas con el personal, evidencia la inexistencia de un sistema formal de identificación de peligros, evaluaciones periódicas de riesgos ni procedimientos estandarizados para actividades críticas.

Además, la empresa no cuenta con una política de seguridad y salud, ni con programas formativos permanentes. El área administrativa reconoce debilidades en el control de cumplimiento normativo y no dispone de indicadores de desempeño relacionados con la seguridad laboral. Esta situación repercute en el ausentismo, incumplimientos contractuales y sanciones, debilitando la imagen de la empresa ante clientes estratégicos.

2.3. Propuesta técnica de diseño del Sistemas de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo según ISO 45001:2018

La propuesta de diseño del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo incluye los siguientes componentes:

- Política de seguridad y salud en el trabajo, formulada con base en principios de compromiso gerencial, consulta activa a los trabajadores y cumplimiento legal.
- Identificación de peligros y evaluación de riesgos, mediante la elaboración de matrices por actividades críticas, con revisión periódica y participación del personal operativo.
- Determinación de requisitos legales y otros requisitos aplicables, actualización del marco legal vigente nacional aplicable al transporte.
- Formulación de indicadores, como ser de frecuencia, severidad y cumplimiento de programas formativos.
- Estandarización de procedimientos seguros para carga, estiba, conducción y manejo de materiales peligrosos.
- Seguimiento, medición y mejora continua, a través de auditorías internas, revisión por la dirección y mecanismos de retroalimentación entre niveles jerárquicos.

En el estudio de Cristian León (2020), se destaca la relevancia de los Sistemas de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo en empresas de transporte pesado, donde los riesgos laborales son más significativos en comparación con otros sectores. El autor enfatiza que, para este tipo de empresas, resulta imperativo implementar métodos de análisis que abarquen tanto los daños personales como los materiales, ya que la seguridad de los trabajadores tiene un impacto directo en la productividad de la organización.

En lo que respecta a otras normas, como la OHSAS 18001, la ISO 45001 incorpora el enfoque de contexto organizacional y participación de las partes interesadas, lo que permite adaptar el sistema a las condiciones reales de operación. En el caso particular de la empresa objeto de estudio, al realizar una comparación entre su estado actual, que presenta un 29,28 % de cumplimiento normativo, y el modelo propuesto, se evidencia una brecha significativa que puede ser mitigada a través de la implementación de un sistema estructurado, dotado de herramientas adaptadas a sus procesos críticos.

Tabla 1: Diagnóstico basado en la norma ISO 45001:2018

CLÁUSULA	REQUISITO	NC 0%	EP 50%	C 100%	% Cumplimiento
4	CONTEXTO DE LA ORGANIZACIÓN (título únicamente)	1	2	1	50%

4.1	Comprensión de la organización y su contexto.		X		50
4.2	Comprensión de las necesidades y expectativas de los trabajadores y de otras partes interesadas.			X	100
4.3	Determinación del alcance del sistema de gestión de la SST.		X		50
4.4	Sistema de Gestión SST.	X			0
5	LIDERAZGO Y PARTICIPACIÓN DE LOS TRABAJADORES (título únicamente)	1	2	1	50%
5.1	Liderazgo y compromiso			X	100
5.2	Política de la SST	X			0
5.3	Roles, responsabilidades y autoridades en la organización		X		50
5.4	Consulta y participación de los trabajadores		X		50
6	PLANIFICACIÓN (título únicamente)	3	3	0	25%
6.1	Acciones para abordar riesgos y oportunidades (título únicamente)	-	-	-	-
6.1.1	Generalidades		X		50
6.1.2	Identificación de peligros y evaluación de los riesgos y oportunidades	X			0
6.1.3	Determinación de los requisitos legales y otros requisitos		X		50
6.1.4	Planificación de acciones	X			0
6.2	Objetivos de la SST y planificación para lograrlos (título únicamente)	-	-	-	-
6.2.1	Objetivos de la SST		X		50
6.2.2	Planificación de acciones para lograr los objetivos de la SST	X			0
7	APOYO (título únicamente)	3	6	0	33,33%
7.1	Recursos		X		50

7.2	Competencia		X		50
7.3	Toma de conciencia		X		50
7.4	Comunicación (título únicamente)	-	-	-	-
7.4.1.	Generalidades		X		50
7.4.2	Comunicación interna		X		50
7.4.3	Comunicación externa		X		50
7.5	Información documentada (título únicamente)	-	-	-	-
7.5.1	Generalidades	X			0
7.5.2	Creación y actualización	X			0
7.5.3	Control de la información documentada	X			0
8	OPERACIÓN (título únicamente)	3	2	0	20%
8.1	Planificación y control operacional (título únicamente)	-	-	-	-
8.1.1	Generalidades		X		50
8.1.2	Eliminar peligros y reducir riesgos para la SST	X			0
8.1.3	Gestión del cambio	X			0
8.1.4	Compras		X		50
8.2	Preparación y respuesta ante emergencias	X			0
9	EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO (título únicamente)	4	1	0	10%
9.1	Seguimiento, medición, análisis y evaluación (título únicamente)	-	-	-	-
9.1.1	Generalidades	X			0
9.1.2	Evaluación del cumplimiento	X			0
9.2	Auditoría interna (título únicamente)	-	-	-	-
9.2.1	Generalidades	X			0
9.2.2	Programa de auditoría interna	X			0
9.3	Revisión por la dirección		X		50
10	MEJORA (título únicamente)	2	1	0	16,66%

10.1	Generalidades	X			0
10.2	Incidentes, no conformidades y acciones correctivas	X			0
10.3	Mejora continua		X		50
Grado de cumplimiento general:	17	17	2	29.28%	

Fuente: Elaboración propia.

En este sentido, la propuesta en cuestión se alinea con las directrices metodológicas establecidas por la Organización Internacional de Normalización (ISO, 2018), que enfatiza la necesidad de que las organizaciones implementen procesos para garantizar la consulta y participación de los trabajadores. Este enfoque se encuentra respaldado por los hallazgos de Muñiz (2017), quien destaca la relevancia de los sistemas basados en la participación, la capacitación continua y el liderazgo organizacional, los cuales exhiben una mayor eficacia en entornos de riesgo elevado (p. 13).

En consideración de lo anteriormente expuesto, se prevé que la implementación del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo consolide la cultura preventiva, minimice los accidentes y optimice la percepción institucional por parte de clientes, trabajadores y autoridades.

Conclusiones

El estudio realizado permitió corroborar que, a pesar de la experiencia demostrada por Servicios de Transportes Especiales, S.A. en el ámbito del transporte, se evidenciaron deficiencias en la gestión de la seguridad y la salud ocupacional. La ausencia de una cultura preventiva y la falta de procedimientos y cumplimiento legal vigente han generado un entorno laboral con riesgos que afectan tanto la seguridad y el bienestar del personal como la competitividad y reputación de la empresa.

La viabilidad técnica y operativa del sistema propuesto se sustenta no solo en el bajo nivel de cumplimiento normativo identificado (29,28 %), sino también en la estructura y características propias de los procesos de la empresa, que permiten una implementación gradual sin requerir inversiones de alta

complejidad. El análisis de las actividades operativas ha puesto de manifiesto que la mayoría de los peligros se relacionan con tareas repetitivas, manipulación de cargas, conducción y control documental, lo que facilita la estandarización mediante procedimientos y matrices de riesgo. Desde la perspectiva de la ingeniería, la implementación de controles operativos, capacitación estructurada y mecanismos de seguimiento resulta en mejoras cuantificables en la continuidad operativa, la reducción de incidentes y la optimización del uso de recursos humanos. Este hecho evidencia que el sistema diseñado es compatible con la capacidad técnica actual de la empresa y que su implementación es factible dentro de su estructura organizativa y económica, lo que fortalece la justificación de su viabilidad.

Desde una perspectiva económica, la empresa evidencia pérdidas asociadas a factores como retrasos, reprogramaciones, sanciones contractuales y tiempos improductivos derivados de incidentes menores. Estos últimos pueden mitigarse mediante la implementación de medidas de bajo costo, tales como capacitación, mejora documental y control de operaciones críticas. Estas acciones no requieren inversiones significativas en infraestructura o tecnología, sino una reorganización de los procesos y una asignación más eficiente de los recursos, lo que demuestra que el sistema diseñado es técnica y económicamente viable. En concordancia con lo anteriormente expuesto, la reducción prevista de incidentes y retrasos conlleva un impacto positivo en la confiabilidad operativa y competitividad de la empresa. Este hallazgo cierra la brecha detectada en el diagnóstico y justifica de manera sólida la propuesta desde un enfoque de ingeniería.

Como se ha expuesto con anterioridad, se plantea la implementación de un Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo fundamentado en la norma ISO 45001:2018, con un enfoque participativo. Este enfoque metodológico permitirá identificar adecuadamente los peligros potenciales, establecer medidas para mejorarlas y controlar las operaciones. La propuesta, más que ajustarse a los requisitos de la normativa, tiene como objetivo principal fomentar una transformación en la forma de gestionar y mejorar el ambiente laboral. En el ámbito del transporte terrestre de carga, se plantea la necesidad de establecer una cultura organizacional que priorice la seguridad y la responsabilidad empresarial. Este enfoque contribuirá a mejorar la competitividad de la organización en el sector del transporte terrestre de carga, tanto en lo que respecta a mercancías peligrosas como a aquellas consideradas como normales.

En conclusión, el modelo propuesto constituye una referencia para la gestión de la seguridad y salud en el trabajo dentro del

sector del transporte de cargas especiales en Bolivia. El diseño de la propuesta es de naturaleza sencilla y gradual, lo que permite a las organizaciones del mismo sector orientarse hacia el cumplimiento del estándar internacional. Este diseño no requiere una implementación inmediata de la certificación, lo que permite contar con una base para futuros diagnósticos y para la implementación de un sistema de gestión de la seguridad y la salud en el trabajo.

Referencias

- Chiavenato, I. (2007). *Introducción a la Teoría General de la Administración*. Mexico: McGraw-Hill Interamericana. <https://n9.cl/nrf1m>
- Cristian León, L. R. (2020). *Propuesta de un Sistema de Gestión de Seguridad y Salud Ocupacional para la Empresa de Transporte Pesado Incurretrans S.A.* Guayaquil. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/20281/1/UPS-GT003213.pdf>
- Escobar, L. (2021). Diagnóstico de la seguridad y salud en el trabajo en empresas medianas de Bolivia. *Revista Boliviana de Ingeniería*.
- López M. & Martínez R. (2020). Evaluación del costo-beneficio de la gestión de riesgos laborales en organizaciones de América Latina. *Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*.
- Muñiz, F. &. (2017). Safety management system: Development and validation of a multidimensional scale. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.11.007>
- OIT, O. I. (2011). *Organización Internacional de Normalización [ISO]*. (2018). Sistemas de gestión de la seguridad y salud en el trabajo - Requisitos con orientación para su uso. (45001): <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:45001:ed-1:v1:es>
- Organización Internacional del Trabajo. (2022). Panorama general de la seguridad y salud en el trabajo en América Latina y el Caribe.
- Organización Internacional del Trabajo OIT. (2015). *Cuestiones prioritarias de seguridad y salud en el sector del transporte por carretera*. <https://n9.cl/o2bo3i>
- Ramos, A. O. (2020). Impact of ISO 45001 on Occupational Health and Safety Performance.
- Rodríguez P. & Herrera, J. (2021). Impacto de los sistemas de gestión de seguridad laboral en la eficiencia operativa de empresas industriales. *Revista Ingeniería y Competitividad*.

Tello Rodríguez, D. A. (2021). *Propuesta de un Sistema de Gestión de Seguridad y Salud Ocupacional y su Relación en el Servicio de Transporte de Carga en la Empresa T ERAH SAC*. Lima, Perú.

<https://n9.cl/r9lnw>

Zegarra, M. (2022). Implementación de políticas públicas en seguridad ocupacional: Avances y desafíos en Bolivia. *Revista Andina de Políticas Laborales*.

CAPÍTULO XI

Uso de microorganismos para la mejora del suelo

Carla Kaune Sarabia

Universidad Mayor de San Andrés

<https://orcid.org/0000-0002-2589-6734>

Uso de microorganismos para la mejora del suelo

Resumen

La ciudad de La Paz registra históricamente deslizamientos que generan pérdidas materiales y afectaciones psicosociales en su población. Como medida preventiva se suele recurrir al recubrimiento de suelos de alto riesgo con mezclas de cemento; sin embargo, esta solución tiene impactos ambientales (por el proceso de fabricación del cemento) y es costosa. Aunque en Bolivia existen estudios biotecnológicos en otros rubros, la aplicación de técnicas como la biocementación y la biopolimerización al mejoramiento de suelos aún está poco explorada. Cumpliendo con el objetivo planteado, se realizó una revisión bibliográfica y se evidencia que la biocementación (aplicada en arenas, suelos tropicales y suelos expansivos) y la biopolimerización (aplicada en arenas y arcillas) mejoran las propiedades geotécnicas relevantes, por ejemplo, estabilidad, resistencia y reducción de permeabilidad. Dado que en la ciudad de La Paz predominan suelos arcillosos y limosos, estas biotecnologías son aplicables como alternativa sostenible para la mitigación de deslizamientos.

Palabras clave: Microorganismos, Biocementación, Biopolímeros, Bioestabilización, Deslizamientos.

Use of microorganisms for soil improvement

Abstract

The city of La Paz has a history of landslides that cause material losses and psychosocial effects on its population. As a preventive measure, high-risk soils are often covered with cement mixtures; however, this solution has environmental impacts (due to the cement manufacturing process) and is costly. Although biotechnological studies exist in other areas in Bolivia, the application of techniques such as biocementation and biopolymerization to

soil improvement is still largely unexplored. In line with the stated objective, a literature review was conducted, which shows that biocementation (applied to sand, tropical soils, and expansive soils) and biopolymerization (applied to sand and clay) improve relevant geotechnical properties, such as stability, strength, and permeability reduction. Given that clayey and silty soils predominate in the city of La Paz, these biotechnologies are applicable as a sustainable alternative for landslide mitigation.

Keywords: Microorganisms, Bio-cementation, Biopolymers, Biostabilization, Landslides.

Uso de microrganismos para a melhoria do solo

Resumo

A cidade de La Paz registra historicamente deslizamentos que causam perdas materiais e efeitos psicossociais em sua população. Como medida preventiva, costuma-se recorrer ao revestimento de solos de alto risco com misturas de cimento; no entanto, essa solução tem impactos ambientais (devido ao processo de fabricação do cimento) e é cara. Embora na Bolívia existam estudos biotecnológicos em outras áreas, a aplicação de técnicas como a biocimentação e a biopolimerização para a melhoria dos solos ainda é pouco explorada. Cumprindo o objetivo proposto, foi realizada uma revisão bibliográfica e ficou evidente que a biocimentação (aplicada em areias, solos tropicais e solos expansivos) e a biopolimerização (aplicada em areias e argilas) melhoram as propriedades geotécnicas relevantes, por exemplo, estabilidade, resistência e redução da permeabilidade. Dado que na cidade de La Paz predominam solos argilosos e limosos, essas biotecnologias são aplicáveis como alternativa sustentável para a mitigação de deslizamentos.

Palavras chave: Microorganismos, Bio-cimento, Biopolímeros, Bioestabilização, Deslizamentos.

Introducción

La ciudad de La Paz, capital administrativa de Bolivia, se erige como un centro urbano caracterizado por su dinamismo. Se encuentra emplazada en una imponente hoyada o cuenca natural (Humerez & Zeballos, 2024), cuya geografía única no solo define su paisaje, sino que también condiciona su desarrollo urbano y su vulnerabilidad frente a desafíos como los deslizamientos.

La variada orografía de La Paz oscila entre los 3200 m s.n.m. en la zona sur y los más de 4000 m s.n.m. en El Alto, generando una diversidad de microclimas y una red de laderas empinadas y quebradas. Esta topografía incrementa la vulnerabilidad de la ciudad frente a los deslizamientos de tierra.

A lo largo de su historia, la ciudad de La Paz ha experimentado múltiples deslizamientos ocasionados por diversos factores de origen geológico, climático y antrópico. Entre los eventos más significativos se incluyen: 1996 (Cotahuma), 1997 y 1999, 2002 (zona 23 de Marzo), 2009 (Retamani), 2010 (Huanu Huanuni), 2011 (mega deslizamiento en Santa Rosa de Callapa) y 2012 (Las Lomas) (Humerez & Zeballos, 2024; Molina, 2025). En el mes de marzo del año 2025, un fenómeno de deslizamiento de tierra afectó la zona de Codavisa - Chasquipampa (Figura 1), ocasionando daños a varias viviendas y evidenciando la persistente vulnerabilidad urbana.



Figura 1

Deslizamiento en la zona de Codavisa - Chasquipampa

Nota. Imagen tomada de la página de Agencia de Noticias Ambientales del artículo Deslizamiento en Codavisa expone la falta planificación urbana y prevención de desastres Bolivia del 20 de marzo de 2025 (Molina, 2025)

El deslizamiento ocurrido en Codavisa evidencia la ausencia de una planificación urbana adecuada y de medidas de prevención de desastres en Bolivia (Molina, 2025). El mapa de riesgos (Figura 2) elaborado por el Grupo de Trabajo de Mapas de Riesgos de Bolivia (GAML, 2023) identifica al menos 36 áreas de alto y muy alto riesgo, lo que confirma que entre el 60 % y el 70 % del terreno paceño es inestable debido a que sus suelos aún se encuentran en proceso de consolidación (Opinión, 2011; Vaca, 2011).

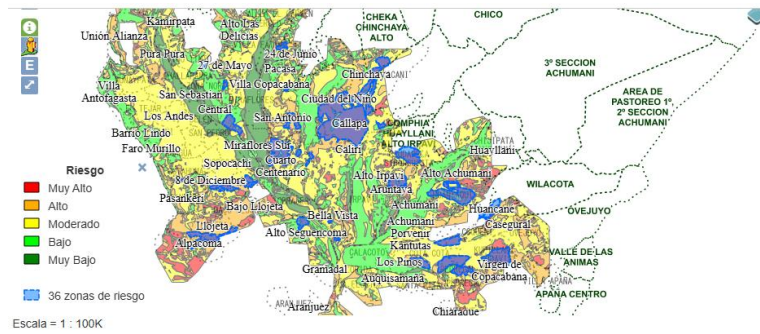


Figura 2

Mapa de Riesgos de la ciudad de La Paz

Nota: La imagen de obtuvo de la página del Gobierno Autónomo Municipal de La Paz (GAMLP, 2023).

Tradicionalmente, la mitigación de deslizamientos se ha realizado mediante el recubrimiento de taludes con mezclas de cemento (Figura 3). Sin embargo, este método presenta altos costos económicos y ambientales, incluyendo emisiones de CO₂ y liberación de polvillo con sílice (Escobari et al., 2004). En este contexto, las alternativas biotecnológicas, como la biocementación (MICP/EICP) y la biopolimerización, ofrecen la posibilidad de mejorar las propiedades geotécnicas del suelo con menor impacto ambiental.



Figura 3

Cerro forrado con cemento zona de San Jorge-La Paz

Nota: Zona de San Jorge de la ciudad de La Paz, fotografía tomada el 29 de octubre de 2025

Se evidencia la necesidad de investigar alternativas para la estabilización de suelos que sean compatibles con la composición arcillosa y limosa predominante en el área urbana. En este sentido, las técnicas biotecnológicas revisadas adquieren una relevancia significativa para la gestión de riesgos urbanos en La Paz.

En el ámbito de la investigación boliviana, se ha observado una concentración predominante en el estudio de las técnicas de producción de biopolímeros (Guzmán et al., 2017; Miranda & Carrasco, 2020) y en el campo de la microbiología agrícola (Paco-Pérez & Guzmán-Vega, 2019). Esta situación plantea

la necesidad de investigar soluciones para la estabilización de suelos que sean compatibles con la composición arcillosa y limosa predominante en la ciudad. En el ámbito de la gestión de riesgos urbanos en La Paz, las técnicas biotecnológicas revisadas adquieren una relevancia significativa.

Materiales y métodos

Se empleó un enfoque documental mediante revisión bibliográfica y hemerográfica de publicaciones entre 2010 y 2024. Se incluyeron estudios sobre MICP/EICP y biopolímeros en suelos finos y granulares; se excluyeron documentos sin resultados experimentales. Se analizó la aplicabilidad de estas técnicas en suelos arcillosos y limosos, predominantes en La Paz..

Caracterización geotécnica y litológica de los suelos de La Paz

La clasificación de los suelos de la ciudad se centra principalmente en su origen neógeno-cuaternario, lo que los categoriza como depósitos geológicamente recientes y con escasa consolidación, propensos a deslizamientos. De acuerdo con lo expuesto en el informe Geológico N.º 5 de la HAML (Bles, 1977), las principales formaciones son las siguientes:

En el Plioceno, se observa una alternancia de capas de arcillas, limos, arenas y gravas, con la presencia de delgadas capas de lignito o arcilla carbonácea y cinerita Chijini. Las arcillas, por lo general, exhiben propiedades de impermeabilidad debido a su estructura molecular y su composición geológica. Sin embargo, la presencia de fracturas en el entorno puede incrementar la permeabilidad secundaria de las arcillas, lo que a su vez puede aumentar la susceptibilidad a deslizamientos de tierra.

La formación Calvario se caracteriza por la presencia de depósitos oligomícticos compuestos por gravas, limos y arenas, con una alta concentración de granito y una menor presencia de cuarcita. Estos depósitos se encuentran ubicados en la zona norte de la ciudad, como lo documentan las investigaciones de Bles (1977) y Ojeda (2025).

De acuerdo con Bles (1977), la formación Purapurani se compone de una parte inferior constituida por arcillas, limos, arenas y gravas acompañadas de clastos de cuarcita y lignito, mientras que la parte superior está compuesta por gravas y limos.

En lo que respecta a los suelos inestables adicionales, constituidos por bloques de conglomerado con limos arcillosos, se observan desafíos significativos en cuanto a su construcción (Ojeda, 2025).

Adicionalmente, el Gobierno Autónomo Municipal de La Paz ha desarrollado un sistema de clasificación de los suelos según

su aptitud para diferentes usos, incluyendo Gleysoles, Fluvisoles, Cambisoles, Leptosoles y Regosoles (GAMLP, n.d.).

La predominancia de arcillas y limos con bajo grado de consolidación explica la inestabilidad general del territorio y la necesidad de tecnologías de bioestabilización eficaces para suelos finos.

Por lo tanto, la presencia de arcillas y limos con bajo grado de consolidación, característicos de las formaciones geológicas jóvenes (como el Plioceno), constituye la razón fundamental de la inestabilidad del área urbana, lo que justifica la necesidad de implementar tecnologías de bioestabilización que sean eficaces en suelos con grano fino.

Impacto de los Tipos de Suelo en la Construcción

La composición de los suelos en La Paz es un factor crítico para la construcción dado que:

Un porcentaje significativo de los suelos de la ciudad es desfavorable para la construcción debido a su inestabilidad y problemas hidrológicos. Se estima que solo el 17% de los suelos de la ciudad son aptos para soportar construcciones, mientras que el 32% son desfavorables por su inestabilidad y un 11% presenta problemas hidrológicos. El restante 40% no cuenta con las condiciones necesarias para ningún tipo de construcción viable. (Ojeda, 2025).

Biocementación y Biopolimerización: Nuevas Opciones Sostenibles

El suelo puede ser considerado como un ecosistema dinámico que abre la puerta a soluciones novedosas y ecológicas para los desafíos geotécnicos, lo cual representa una perspectiva innovadora para muchos en este campo de la ingeniería. La explicación gráfica de estas tecnologías se resume en la Figura 4.

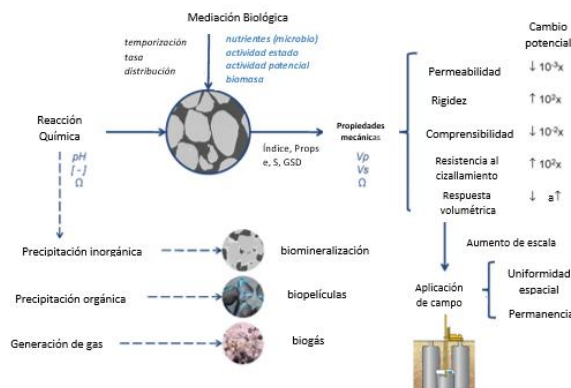


Figura 4 Mediación biológica en la tierra

Nota: La imagen fue obtenida de De Jong (2010) la cual fue traducida al español.

Una nueva visión es la utilización de microorganismos para la mejora de la tierra para la construcción, a menudo conocida como biocementación o bioestabilización, es la que se centra en la Precipitación de Carbonato de Calcio Inducida por Microorganismos (MICP)¹ y la Precipitación de Carbonato de Calcio Inducida por Enzimas (EICP)² (Mondem S. & Sumit, 2018).

El biocemento se produce mediante el microcemento en los espacios intergranulares de un material granular el drenaje de un líquido que contienen las bacterias alcalófilas, urea como solución de sustrato y una solución de iones de calcio. La enzima ureasa, producida por las bacterias, hidroliza la urea y el calcio se utiliza como fuente de energía para formar el biocemento. El cemento une los granos para crear una masa sólida. Este proceso es adecuado para aplicaciones como la estabilización de suelos (Achal & Mukherjee, 2015). Además, la calcita cementa las partículas del suelo y obstruye los poros, por lo que mejora la resistencia y reduce la permeabilidad del terreno. La precipitación de calcita inorgánica puede mejorar la rigidez y la resistencia, al tiempo que disminuye la compresibilidad y la permeabilidad de las formaciones de suelo “in situ”.

Esta técnica no es algo nuevo, ya que en Australia se utilizó en el año 2001 en depósitos de arena licuable, estabilización de taludes y refuerzos de subsuelos y en alta mar (Yepes Piqueras, 2021).

No obstante, la idoneidad del suelo base es crucial para garantizar la calidad estructural y la longevidad de las construcciones. A partir de esta preocupación es que surge la mediación biológica que busca mejorar las propiedades del suelo a través de la introducción o la estimulación de microorganismos específicos que, a través de sus procesos metabólicos, pueden inducir la precipitación de carbonato de calcio (bio-cementación), producir biopolímeros que actúan como aglutinantes o alterar la estructura del suelo, mejorando su resistencia, rigidez y permeabilidad (De Jong et al., 2010).

Otra técnica o denominación dentro de este tema, es la bio-obstrucción (“biocloggin”), que busca la reducción de la conductividad hidráulica de las rocas y suelos, utilizando carbonato cálcico producido por microbios. (Woolley et al., 2020)

Una vez descritas las tecnologías, se procede a la revisión algunos de los estudios realizados sobre este tema y si pueden coadyuvar a la ciudad de La Paz tomando en cuenta la caracterización de sus suelos. Si bien algunos de ellos se realizaron en volúmenes más pequeños, en laboratorios, se puede buscar su aplicación en el campo. En la Tabla 1 se resumen las investigaciones revisadas.

1 Microbiologically induced calcium carbonate precipitation (MICP)

2 Enzyme-induced calcium carbonate precipitation EICP

Tabla 1
Resumen de los trabajos revisados sobre Biocemento y biopolímeros

Autor(es) y año	Tecnología empleada	Tipo de suelo al que se aplicaron	Resultados
De Jong, Mortensen, Martines y Nelson (2010)	Procesos geoquímicos biomediados, los cuales implican una reacción geoquímica controlada por la microbiología del subsuelo.	Arenas	En exploración.
Soon, Leem Tan y Ling (2014)	Aplican calcita inducida por microbios (MICP) utilizando una especie de Bacillus, B. megaterium. Para el análisis se consideraron las siguientes variables: concentración de B. megaterium, concentración del reactivo de cementación, la duración del tratamiento y la presión de flujo del reactivo de cementación.	Suelo típico tropical	Se obtuvo mejoras a la resistencia de cortes en un 69% y reducción de la conductividad hidráulica en un 90%.

Autor(es) y año	Tecnología empleada	Tipo de suelo al que se aplicaron	Resultados
Fatehi, Ong, Yu y Chang (2021)	Aglutinantes biopoliméricos Goma Xantán y Goma Gellan (1%).	Arena Arcilla	Se evidencia un incremento en el UCS hasta 1700 kPa, y en el caso de suelos con granulometría fina con agar al 1% la UCS aumentó a 2500 kPa y con la goma gellan al 1% la UCS aumentó 1800 kPa. En uno de los primeros estudios que utilizaron goma xantana sobre arcilla, la resistencia a la compresión aumentó aproximadamente un 470% de 440 kPa para arcilla sin tratar y 2540 kPa para arcilla tratada con xantano al 1%, adicionalmente se evidencia la mejora del tipo de suelo limoso con esta técnica.

<p>Woolley, Paassen y Kavazanjian (2020)</p>	<p>Para evitar la erosión eólica ro-searon con una solución EICP base y con una solución EICP mejorada mediante la adición de hidrogel de goma xantana (XEICP) a la arena fina.</p>	<p>Arena fina</p>	<p>Se realizaron las pruebas de conductividad hidráulica masiva, las cuales denotaron una reducción de $2.01 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ para la muestra de control seca sin tratar a $9.87 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ para la muestra tratada con XEICP. Concluyendo que el tratamiento con XEICP forma una costra más duradera a la erosión hídrica que el tratamiento con la solución EICP o con el tratamiento con goma xantana sola.</p>
--	---	-------------------	--

Los estudios revisados muestran mejoras significativas en la resistencia, cohesión y disminución de la permeabilidad en suelos arenosos, tropicales arcillosos, expansivos ricos en montmorillonita (Samer et al., 2024; Wang et al., 2021; Soon et al., 2014), y por los tipos de suelo (arcillo limoso) que se encuentran en la ciudad de La Paz, la evidencia indica que estas tecnologías son potencialmente aplicables y prometedoras para la estabilización de taludes y la mitigación de riesgos por deslizamientos.

Resultados y discusiones

La revisión de la literatura indica una alta aplicabilidad potencial de la biocementación (MICP/EICP) y biopolimerización a las condiciones geotécnicas de La Paz.

1. Arcillas y Limos: Los suelos finos de la Formación Plioceno pueden beneficiarse notablemente. Estudios muestran incrementos de resistencia (de hasta 470 % en UCS con xanthan en arcillas) y reducción de permeabilidad, aspectos claves para reducir riesgo de deslizamiento (Fatehi et al., 2021; Samer et al., 2024).
2. Mejora de Propiedades: La utilización de microorganismos (a través de BCM y BIM) mejora las características internas de los suelos, incrementando su resistencia a la compresión y al corte (Soon et al., 2014; Samer et al., 2024). Estas mejoras coadyuvarían a la disminución de los deslizamientos mediante la formación de una estructura más firme y con menor permeabilidad.

En síntesis, existe coherencia entre las necesidades geotécnicas del territorio paceño y las propiedades mejoradas obtenidas mediante técnicas biotecnológicas de estabilización del suelo. Como siguiente etapa, se recomienda la experimentación en laboratorio con muestras representativas de suelos locales, con el fin de evaluar la viabilidad técnica y económica de su implementación en campo urbano y periurbano.

Conclusiones

La estructura geológica de la ciudad de La Paz, caracterizada por depósitos neógeno-cuaternarios con predominancia de arcillas y limos poco consolidados, determina una alta vulnerabilidad a los procesos de inestabilidad de laderas. En este contexto, la búsqueda de soluciones sostenibles para la mitigación de deslizamientos constituye una prioridad para la gestión de riesgos urbanos.

En búsqueda de medidas preventivas, la biocementación (MICP) y la biopolimerización (utilizando Goma Xantana, Gellan y agar) representan alternativas sostenibles y de alto rendimiento para la mitigación del riesgo en La Paz. Los resultados de los estudios revisados confirman la capacidad de estas técnicas para mejorar de forma significativa la resistencia a la compresión y al corte de suelos finos (con aumentos documentados de hasta 470% en arcillas con biopolímeros) y reducir la permeabilidad del suelo al rellenar los espacios intergranulares con carbonato de calcio.

Si bien algunas de sus aplicaciones fueron realizadas en pequeña escala, esta revisión permite fundamentar la necesidad de estudiar y validar su aplicación a nivel de campo, dado que los resultados obtenidos hasta el momento demuestran una mejora crucial en las propiedades geotécnicas de los suelos.

Además, la consolidación de estas técnicas en la Ingeniería Geotécnica de La Paz implica un enfoque innovador que va más allá de la revisión bibliográfica. La aplicación concreta a escala industrial requiere el desarrollo de protocolos de inyección optimizados para los suelos neógeno-cuaternarios y un análisis riguroso de la viabilidad económica basado en la menor huella de carbono y la mayor durabilidad de la solución biológica frente al cemento. El verdadero impacto práctico radicará en la implementación de la bioconsolidación de taludes urbanos de alto riesgo, convirtiendo la biotecnología en una herramienta esencial para la resiliencia urbana.

Referencias

- Achal, V., & Mukherjee, A. (2015). A review of microbial precipitation for sustainable construction. *Construction and Building Materials*, 93, 1224-1235. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815005000>
- Bles, J. L. (1977). *Características Litoestratigráficas de la cuenca de La Paz y alrededores*. <https://n9.cl/djku>
- DeJong, J. T., Mortensen, B. M., Martinez, B. C., & Nelson, D. C. (2010). Bio-mediated soil improvement. *Ecological Engineering*, 36(2), 197-210. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.029>
- Escobari, J., Caro, V., & Malky, A. (2004). *Problemática Ambiental en Bolivia*. <https://n9.cl/6cxea>
- Fatehi, H., Ong, D., Yu, J., & Chang, I. (2021). Biopolymers as Green Binders for Soil Improvement in Geotechnical Applications: A Review. *Geosciences*, 11. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/geosciences11070291>
- GAML. (n.d.). Mapas de la región metropolitana de la ciudad de La Paz. In GAML (Ed.), *Atlas de seguridad alimentaria de la región metropolitana de la ciudad de La Paz* (GAML, Vol. 1). GAML. Retrieved May 28, 2025, from <https://sit.servicios.lapaz.bo/seguridad-alimentaria/capitulo-3.html>
- GAML. (2023). *Mapa de Riesgos de la ciudad de La Paz*. Gobierno Autónomo Municipal de La Paz. <https://sit.servicios.lapaz.bo/sit/riesgos/>
- Guzmán, C., Hurtado, A., Carreño, C., & Casos, I. (2017). Production of polyhydroxyalkanoates by native halophilic bacteria using *Solanum tuberosum* L. shell starch. *Scientia Agropecuaria*, 8(2), 109-118. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2017.02.03>
- Humerez Ocori, J., & Zeballos Gutierrez, F. V. (2024). Conflictos e imaginarios en dos tamaños de tierra en La Paz, Bolivia. *Journal de Comunicación Social*, 18, 81-101. <https://jcomsoc.ucb.edu.bo/a/article/view/1309>
- Miranda, D., & Carrasco, C. (2020, March). Obtención De Biopolimeros Producidos Por Bacterias Halófilas Aisladas En La Localidad De Uyuni-Bolivia. <https://n9.cl/>
- Molina, N. (2025, March 20). *Deslizamiento en Codavisa expone la falta planificación urbana y prevención de desastres*. ANA Agencia de Noticias Ambientales. <https://n9.cl/wed8l>
- Mondem S., R., & Sumit, J. (2018). Carbon dioxide sequestration on biocemen-composites. In F. Pacheco-Torgal, C. Shi, & A. Sanchez Palomo (Eds.), *Carbon Dioxide Sequestration in Cementitious Construction Materials* (Elsevier Ltd, Vol. 1, pp. 225-243). Woodhead.

- Ojeda, A. (2025). *Geología, geomorfología y riesgos geotécnicos en La Paz, Bolivia*. Geotécnia fácil. <https://geotecniafacil.com/geologia-la-paz-bolivia/>
- Opinión. (2011, November 3). *El 70 por ciento de la ciudad de La Paz en riesgo de sufrir deslizamientos*. Opinión. <https://n9.cl/i5n8r>
- Paco -Pérez-Victor, & Guzmán-Vega, G.-D. (2019). de enmiendas orgánicas sobre las poblaciones microbianas de la rizosfera del cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en el altiplano Sur de Bolivia. *The Journal of the Selva Andina Biosphere*, 7, 32-43. http://www.scielo.org/bo/pdf/jsab/v7n1/v7n1_a04.pdf
- Samer, R., Ahmad, A., Borhan A., A., Hussien H., A., Eman J., B. E., & Sawsan, M. (2024). Enhancing Soil Stability through Innovative Microbial-Induced Calcium Carbonate Techniques with Sustainable Ingredient. *Civil Engineering Joirnal*, 10. <https://www.civilejournal.org/index.php/cej/article/view/5075/pdf>
- Soon, N. W., Lee, L. M., Khun, T. C., & Ling, H. S. (2014). Factors Affecting Improvement in Engineering Properties of Residual Soil through Microbial-Induced Calcite Precipitation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(5). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001089](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001089)
- Vaca, M. (2011, March 11). ¿Por qué se deslizan los barrios de La Paz? *BBC News Mundo*. <https://n9.cl/kyvsee>
- Woolley, M. A., van Paassen, L., & Kavazanjian, E. (2020). *Impact on Surface Hydraulic Conductivity of EICP Treatment for Fugitive Dust Mitigation* (Geo-Congress 2020, Ed.; pp. 132-140). American Society of Civil Engineers (ASCE). <https://doi.org/10.1061/9780784482834.015>
- Yepes Piqueras, V. (2021, January 27). *Métodos biológicos como técnica de mejora de terrenos*. Universitat Politècnica de Valencia. <https://victoryepes.blogs.upv.es/2021/01/27/metodos-biologicos-como-tecnica-de-mejora-de-terrenos/>

CAPÍTULO XII

**Estudio de las características de
los agregados de 21 canteras para
la elaboración de hormigones
en el departamento de La Paz,
Bolivia**

Efraín Santalla

Universidad Mayor de San Andrés

<https://orcid.org/0000-0002-8934-4859>

Estudio de las características de los agregados de 21 canteras para la elaboración de hormigones en el departamento de La Paz, Bolivia

Resumen

Este artículo presenta las propiedades de los agregados provenientes de 21 canteras del departamento de La Paz - Bolivia, los cuales distribuyen la grava y la arena como materia prima en la industria de la construcción. El estudio de las características de los agregados influye en gran medida en la elaboración de mezclas de hormigón, los cuales participan directamente en su resistencia. La metodología de la investigación está basada en resultados provenientes de ensayos en laboratorios según la normativa ASTM analizando: la granulometría, peso específico, peso unitario, absorción del agregado grueso y fino. Donde se mostrarán numéricamente los valores obtenidos de los ensayos, realizando conclusiones que indicarán las particularidades de los parámetros en el diseño de mezclas de hormigón.

Palabras clave: Agregado, hormigón, granulometría, peso unitario y específico.

Study of the characteristics of the aggregates of 21 quarries for the production of concrete in the department of La Paz, Bolivia

Abstract

This article presents the properties of aggregates from 21 quarries in the department of La Paz, Bolivia, which distribute gravel and sand as raw materials for the construction industry. The study of aggregate characteristics greatly influences the development of concrete mixtures, directly contributing to their strength. The research methodology is based on results from laboratory tests according to ASTM standards, analyzing: particle size distribution, specific weight, unit weight, and absorption of coarse and

fine aggregate. The values obtained from the tests are presented numerically, and conclusions are drawn that indicate the specific parameters used in concrete mixture design.

Keywords: Aggregate, concrete, granulometry, unit and specific weight.

Estudo das características dos agregados de 21 pedreiras para produção de concreto no departamento de La Paz, Bolívia

Resumo

Este artigo apresenta as propriedades de agregados de 21 pedreiras no departamento de La Paz, Bolívia, que distribuem cascalho e areia como matérias-primas para a indústria da construção. O estudo das características dos agregados influencia significativamente o desenvolvimento de misturas de concreto, contribuindo diretamente para sua resistência. A metodologia de pesquisa baseia-se em resultados de ensaios de laboratório de acordo com as normas ASTM, analisando: distribuição granulométrica, peso específico, peso unitário e absorção de agregados graúdos e miúdos. Os valores obtidos nos ensaios são apresentados numericamente, e são tiradas conclusões que indicam os parâmetros específicos utilizados no projeto da mistura de concreto.

Palavras chave: Agregado, concreto, granulometria, peso unitário e específico.

Introducción

El vaciado de elementos de hormigón se debe realizar con la mayor eficiencia posible; siendo necesario conocer las características de los materiales constituyentes del hormigón como son los agregados, el cemento y agua; empero, en muchas obras pequeñas y medianas, puede notarse que los áridos son empleados directamente sin un tratamiento previo, desconociendo así la variabilidad estacional de las canteras y sus propiedades, influyendo posteriormente en el comportamiento del hormigón, sin considerar que su tratamiento amerita la supervisión, control y análisis de sus características para garantizar su calidad.

Para tal fin, el personal calificado en las diferentes obras como el director y/o supervisor de obra, deben ser los encargados de exigir al proveedor el cumplimiento de las especificaciones técnicas o certificación de calidad de los diferentes materiales a emplear, garantizando así su empleo en la construcción para los diferentes elementos estructurales. Es por eso que, este artículo mostrará de manera sucinta los resultados de las propiedades de los agregados provenientes de 21 canteras del departamento de La Paz, comparándolos y así dejar al lector la disposición de estos datos para la fabricación del hormigón.

Con la experiencia adquirida en la residencia, dirección y supervisión de obras, se identifica la incidencia que tiene el conocer las propiedades de los materiales en el diseño de mezclas, en especial de los agregados ya que debido a su procedencia es un producto de características variables, no, así como el agua que es un componente de uso potable para el consumo humano y el cemento que proviene como material industrializado distribuido por una fábrica en una determinada región. Estos componentes se unen para constituir una mezcla de hormigón, entonces se hará énfasis sobre todo en los agregados debido a que es un producto natural que se obtiene de diferentes partes del departamento de La Paz - Bolivia.

Las canteras productoras de agregados, formaran parte de la población de la investigación, siendo el agregado la muestra del ámbito de estudio; a fin de dar coherencia y sentido práctico a esta investigación, mostrando los parámetros que se deben conocer en la grava y la arena para fabricar mezclas de hormigón, los cuales pueden ser considerados por los residentes de obra para realizar su diseño o por los supervisores de obra para el control de las cantidades que se van a emplear en la construcción, con la finalidad de obtener una triada de resistencia, durabilidad y economía.

En las conclusiones de este artículo, se presenta de manera breve las novedades teóricas y prácticas en base al análisis de datos tomados para los agregados de las diferentes canteras, así como los parámetros que se deben controlar y supervisar en obra, destacando la influencia de las propiedades a considerar antes de elaborar alguna mezcla de hormigón, como por ejemplo que factores influyen de la granulometría, la incidencia de la humedad y absorción del agregado en la cantidad del agua, y cual el efecto en la resistencia del hormigón.

Materiales y métodos

Los ensayos en laboratorio para los agregados provenientes de las 21 canteras del departamento de La Paz, se lo realizan con el fin de conocer sus propiedades, dichos valores de caracterización sistemática son empleados para el cálculo de la dosificación del hormigón, cuyos procedimientos obedecen a las normas ASTM, que se muestra en la Tabla 1:

Tabla 1. Ensayos a realizar para el árido grueso y fino

ENSAYO	NORMA ASTM
Análisis Granulométrico	C 136
Peso Específico y Absorción	C 128
Peso Unitario	C 29

Nota. Fuente propia

A continuación, se detalla las propiedades de los agregados que se emplean para la fabricación del hormigón.

Módulo de finura

Para determinar el valor del módulo de finura, se debe realizar el ensayo del análisis granulométrico de los agregados (ASTM C136-06, 2015), con el cual se obtiene la distribución de los diferentes tamaños de las partículas que componen una muestra proveniente de una determinada cantera de áridos, haciendo pasar a través de un conjunto ordenado consecutivos de tamices normalizados y midiendo en una balanza la cantidad retenida en cada tamiz.

El módulo de finura se define como la sumatoria de porcentajes retenidos acumulados con relación de abertura 1:2 dividido entre 100; dicho valor hace referencia implícita del tamaño medio del árido a emplear en una mezcla de concreto, empero, no se lo considera como un índice de la granulometría, ya que

los diferentes agregados podrían llegar a coincidir con la misma magnitud en módulo granulométrico, así sean de granulometrías diferentes. Entonces, conociendo su valor, los áridos precisarían la misma cantidad de agua para generar hormigones con la misma trabajabilidad y muy semejante a la resistencia, siempre y cuando se mantenga la cantidad de cemento, ya que, si las muestras presentan diferentes módulos de los áridos, indicarían que existió alternaciones en su procedencia (Fernández Cánovas, 2015). Considerando lo anterior, los valores de los módulos de finuras de las 21 canteras para el departamento de La Paz son presentados en la Tabla 2.

Humedad

Es el contenido de agua que presenta el estado de los agregados, dependiendo de la porosidad y la superficie a ser humedecida; influyendo en la cantidad y variación del agua a emplearse en las mezclas de hormigón; este parámetro es preponderante sobre todo en las arenas, ya que repercute en la relación agua/cemento real que se utilizará para la fabricación del concreto. El contenido de humedad de un material es un parámetro que muchos sectores industriales buscan controlar en sus procesos, pues repercute en las características finales del producto (Abanto et al, 2021).

La humedad depende de la superficie a ser mojada del agregado y la porosidad que se encargaría de retener agua en sus poros, este parámetro debe ser considerado en obra, analizando el estado de humedad del árido, tomando en cuenta la exposición del ambiente al cual se encuentra sometido, mediante un control de los factores externos como por ejemplo las precipitaciones pluviales o humedecimientos accidentales. En la Tabla 2 y Tabla 3 se presentan las humedades de la arena y la grava respectivamente obtenidas en cada cantera.

Absorción

Los agregados representan aproximadamente tres cuartas partes del volumen del concreto, por lo que su propia porosidad tiene una gran influencia en el contenido de aire del concreto (Solís Carcaño et al, 2015). Este parámetro es determinado siguiendo el procedimiento del Método de prueba estándar para la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción de agregados finos (ASTM C128-22, 2025), valor que influye en su adherencia con la pasta de cemento, lo cual se manifiesta en las resistencias mecánicas del hormigón debido a la cohesión existente en la pasta; posteriormente la absorción de los agregados se manifiesta en los ciclos de hielo-deshielo pudiendo así afectar a su durabilidad del hormigón, por tanto, el efecto es apreciable por la ubicación

geográfica que se presenta el altiplano boliviano del departamento de La Paz.

La absorción está directamente relacionada con los poros de una muestra de áridos, ya que, si el agregado es muy poroso, entonces se absorberá mayor cantidad de agua y al contrario una reducida porosidad no consumiría mucha agua; es así que este parámetro influye en la cantidad de agua a ser empleada para la elaboración de mezclas de hormigón. En la Tabla 2 y Tabla 3 se presentan los porcentajes de absorción de la arena y la grava obtenidas en cada cantera del departamento de La Paz.

Peso específico

La obtención de esta propiedad obedece al Método de prueba estándar para la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción de agregados finos (ASTM C128-22, 2025). Con el cual se puede conocer los volúmenes compactos de los componentes del concreto en el proceso del cálculo de los morteros u hormigones, ya que su magnitud será relacionada con el peso unitario para obtener el contenido de vacíos de una muestra. Por lo general, los áridos presentan poros que son accesibles debido a su abertura y también pueden ser inaccesibles o cerrados y aislados del exterior, entonces los pesos específicos son muy variados, es así que se debe seguir las normativas para comparar las magnitudes con parámetros estandarizados (Cerruto Anibarro, 2020).

Este parámetro es determinado en laboratorio de diferente manera en el agregado fino y de otra forma para el árido grueso, donde ambos procesos se basan en el estado de humedad saturado superficialmente seco (SSS), siendo para la arena el método más moroso, debido a que la muestra presenta partículas de tamaños muy reducidos, influyendo el agua que ocupa en la superficie específica; empero, para el agregado grueso se lo determina casi de manera inmediata secando la superficie húmeda con un paño absorbente. Los resultados de los ensayos de las muestras de las canteras del departamento de La Paz se visualizan en la Tabla 2 y Tabla 3.

Peso unitario

Este método de prueba se utiliza a menudo para determinar valores de densidad aparente de los agregados, que son necesarios para la relación peso y volumen en la selección de proporciones para mezclas de hormigón (ASTM C29/C29M-23, 2023). El peso unitario manifiesta el grado de acomodamiento que existe entre las partículas, ya que cuanto menor sea este valor se tendrá menor volumen de vacíos, lo cual ocasiona que la mezcla de hormigón sea más económica, debido a que se requerirá una

menor cantidad de pasta de cemento para rellenar dichos vacíos. El conocer el peso unitario compactado del agregado, permitirá transformar el peso a volumen o viceversa, con esto recién se puede incorporar el material granular a la mezcladora para la fabricación del hormigón; entonces será necesario conocer las siguientes definiciones de los pesos unitarios:

Peso unitario suelto

Es el agregado que se determina en estado seco, donde la muestra desciende por caída libre rellenando un recipiente estandarizado, sin ejercer ninguna presión.

Peso unitario compactado

El árido se somete a un recipiente mediante compactación en tres capas de igual volumen, cada capa debe ser compactado con una varilla de acero normalizado a 25 golpes, con el propósito de acomodar las partículas reduciendo el espacio de los vacíos.

Los valores de los pesos unitarios suelto y compactado de las 21 canteras, tanto para la arena y la grava son presentados en la Tabla 2 y Tabla 3.

Resultados y discusiones

La diferencia en el desempeño mecánico final de un concreto es causada por la deficiencia en el control de calidad de su elaboración y por desconocimiento de las características físicas de los agregados, principalmente por la relación agua/cemento (Neville, 2013). Siendo indispensable conocer las propiedades de los áridos para garantizar la calidad del hormigón, en este artículo se presentan los resultados de ensayos en laboratorios, que siguen los procedimientos de la normativa ASTM mencionados en la Tabla 1, correspondientes a 6 ensayos para el agregado fino y 5 ensayos para el agregado grueso, haciendo un total de 11 ensayos x 21 canteras = 231 ensayos, con un tratamiento aproximado de 1155 datos analizados.

A continuación, se muestran los valores resultantes de los ensayos provenientes de prácticas de laboratorios extensos, los cuales pueden ser verificados con la finalidad de contrastar o garantizar sus resultados, entonces en la Tabla 2 y Tabla 3 se tiene las propiedades de las 21 canteras tanto para el agregado fino y grueso.

Tabla 2. Datos de propiedades del agregado fino para elaborar hormigones

	CANTERA O RIO	MF	%H	% Abs	Pe (seco)	PUc (kg/m³)	PU_s (kg/m³)
1	Achacachi - Jancko Amaya	3,20	*	4,717	2,565	*	*
2	Achachicala (SOBOCE)	3,18	*	2,234	2,560	1759	1519
3	Ayo Ayo	2,34	2,927	2,463	2,544	1687	1445
4	Carrera	2,56	*	4,522	2,560	1775	1594
5	Chacoma	2,76	5,437	2,473	2,493	1648	1455
6	Chuquiaguillo	2,99	2,900	2,249	2,600	1782	1606
7	Irpavi	3,19	3,167	2,076	2,579	1799	1622
8	Irpavi II	3,37	2,730	2,101	2,573	1842	1572
9	Kollke Amaya	3,69	*	3,925	2,589	1752	1587
10	Lipari	2,70	4,367	2,049	2,549	1777	1539
11	Nueva Esperanza	4,62	*	2,874	2,506	*	*
12	Patacamaya	1,80	*	1,471	2,556	*	*
13	Palcoco	3,10	3,100	2,410	2,630	1765	1563
14	Peñas (SOBOCE)	3,15	4,595	1,698	2,619	1796	1603
15	Punkuri Orkojahuirá	2,69	*	2,364	2,541	1766	1444
16	Río La Paz - El Palomar - Huayhuasi	2,73	*	1,959	2,582	*	*
17	Río Plazuela	3,60	*	1,651	2,604	1799	1670
18	Río Queca - Achacachi	3,03	3,142	2,647	2,590	1793	1694
19	San Buenaventura	2,49	*	1,545	2,552	2639	1660
20	San Roque (SOBOCE)	2,73	4,855	2,190	2,573	1757	1453
21	Vilaque	3,62	3,142	4,948	2,563	1579	1458

Nota: * Valores que no pudieron ser obtenidos en el ensayo de laboratorio.

Tabla 3. Datos de propiedades del agregado grueso para elaborar hormigones

	CANTERA O RIO	%H	%Abs	Pe	PUc (kg/m³)	PU_s (kg/m³)
1	Achacachi - Jancko Amaya	*	1,215	2,636	*	*
2	Achachicala (SOBOCE)	*	1,655	2,615	1636	1482
3	Ayo Ayo	*	*	*	*	*
4	Carrera	*	0,553	2,675	1633	1495
5	Chacoma	*	*	*	*	*
6	Chuquiaguillo	2,280	1,530	2,600	1502	1418
7	Irpavi	2,072	1,515	2,595	1707	1574
8	Irpavi II	2,118	1,789	2,585	1748	1592
9	Kollke Amaya	*	1,337	2,667	1505	1381
10	Lipari	1,355	1,398	2,602	1606	1438
11	Nueva Esperanza	*	1,902	2,580	*	*
12	Patacamaya	*	1,902	2,580	*	*
13	Palcoco	1,200	1,150	2,590	1570	1477
14	Peñas (SOBOCE)	1,126	1,146	2,676	1624	1510
15	Punkuri Orkojahuirá	*	*	*	*	*
16	Río La Paz - El Palomar - Huayhuasi	*	1,636	2,597	*	*
17	Río Plazuela	*	1,406	2,604	1568	1420
18	Río Queca - Achacachi	1,334	*	*	*	*
19	San Buenaventura	*	2,814	2,464	1636	1473
20	San Roque (SOBOCE)	1,178	1,708	2,625	1599	1383
21	Vilaque	1,415	1,523	2,622	1603	1426

Nota: * Valores que no pudieron ser obtenidos en el ensayo de laboratorio.

En los siguientes párrafos se realiza un análisis de los parámetros obtenidos más sobresalientes de las 21 canteras.

Análisis del módulo de finura de la arena

El módulo de finura es un parámetro derivado del análisis granulométrico, que relaciona los porcentajes retenidos acumulados de una serie de tamices normalizados. En la Figura 1 se muestran las diferentes magnitudes de los módulos de finura obtenidas de las canteras del departamento de La Paz.

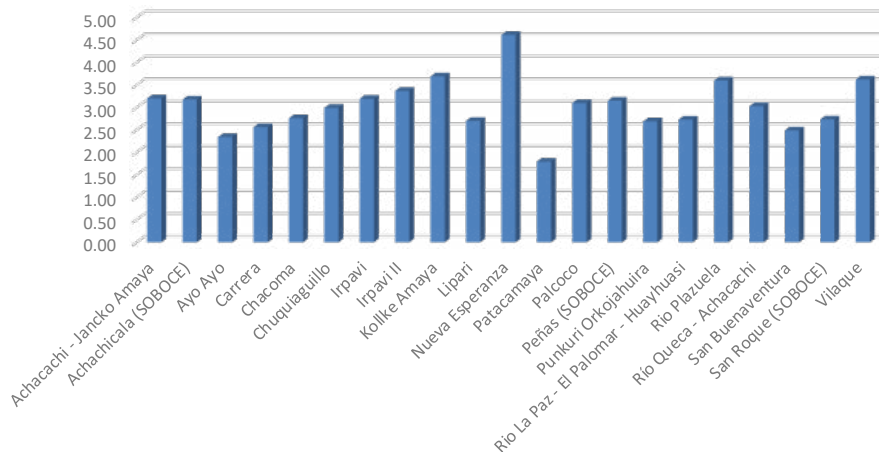


Figura 1. Módulo de finura de canteras productoras de arena

De la Figura 1 puede notarse que su valor generalmente oscila entre 1,5 a 4,5; siendo la menor magnitud perteneciente a Patacamaya y en contraste el mayor valor del agregado de Nueva Esperanza, este parámetro es considerado para la obtención del volumen del agregado grueso seco en un metro cúbico de hormigón, donde a mayor módulo de finura menor será el volumen que presentará la grava; entonces los agregados de las canteras con valores próximos a 2,40 producirían mayor cantidad de grava y las canteras con módulo de finura cercanos a 3,00 generarían menor cantidad de grava.

Análisis del porcentaje de absorción del agregado fino

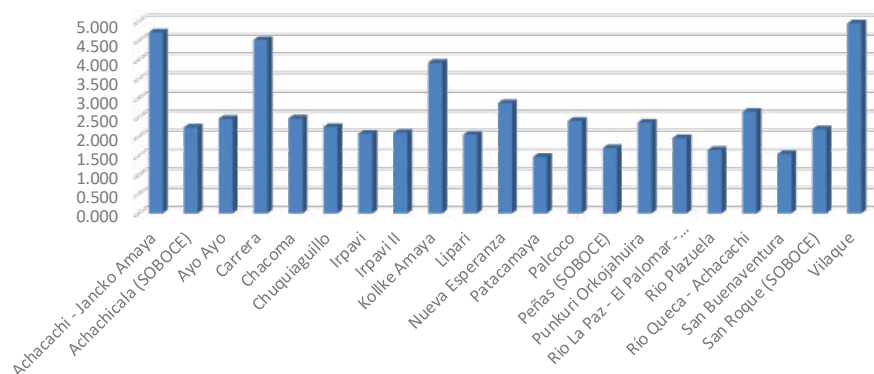


Figura 2. Porcentaje de absorción de canteras productoras de agregado fino

Este parámetro repercute en la cantidad de agua que podrá aumentarse o reducirse para la elaboración de mezcla de concreto, en la Figura 2 se aprecia que los áridos más porosos son de Achacachi, Carrera, Vilaque, y Kollke Amaya, por tanto, cuando en una obra se utilice cualquiera de estos agregados, debe añadirse más cantidad de agua para la elaboración de mezclas de hormigón; empero para los agregados con menor porosidad como es el caso de los áridos proveniente de Patacamaya, San Buenaventura, Peñas y Río Plazuela, se tendrán mezclas que necesitaran menos agua de amasado por la reducida cantidad de vacíos que presentan.

Análisis del peso específico del agregado fino

Este parámetro permite conocer la magnitud del peso seco del agregado fino, cabe resaltar que el peso específico da idea de la cantidad de masa en un determinado volumen a ocupar, entonces, durante el carguío manual los materiales con mayor peso específico serán levantados en menor cantidad; revisando las magnitudes del peso específico de la Tabla 2, puede notarse que los agregados provenientes de la cantera de Palcoco y Peñas presentan mayores valores, entonces su material influye directamente en su peso; contrario al agregado de Nueva Esperanza y Chacoma debido a los bajos valores mostrados estos pueden ser acarreados en mayor cantidad.

Análisis del peso unitario suelto del agregado fino

Este valor participa en la determinación del volumen en estado seco de la arena; una vez conocido el peso seco del agregado fino, el cual, al dividirse por el peso unitario suelto de la arena, dará como resultado la cantidad volumétrica que puede ser

cuantificado en recipientes como baldes, cajas o latas. De la Tabla 2, se puede ver que, la mayoría de los agregados de las canteras, oscila su peso unitario entre 1500 a 1750 kg/m³, resaltando el valor de San Buenaventura, donde su valor podría emplearse para elaborar hormigones más pesados, por ejemplo, para represas o elementos de soporte para las plantas bajas de edificios.

Análisis del peso unitario compactado del agregado fino

Este parámetro facilita la conversión de la cantidad de peso a volumen, con el cual se obtendrán las unidades volumétricas cuantificables para la mezcla. El peso unitario compactado de la arena se obtiene expulsando los espacios vacíos que existen entre partículas por procesos de compactación manual utilizando una varilla normalizada; el peso unitario compactado del agregado es utilizado en una mezcla de hormigón, para conocer el contenido de vacíos, en la Tabla 2 puede observarse que este valor es muy variable entre los áridos de las diferentes canteras, debido al grado de compactación y acomodamiento que existe entre las partículas finas de la arena, por tanto, su incidencia es directamente proporcional en las cantidades que se va a obtener de arena en la obra.

Porcentaje de absorción del agregado grueso

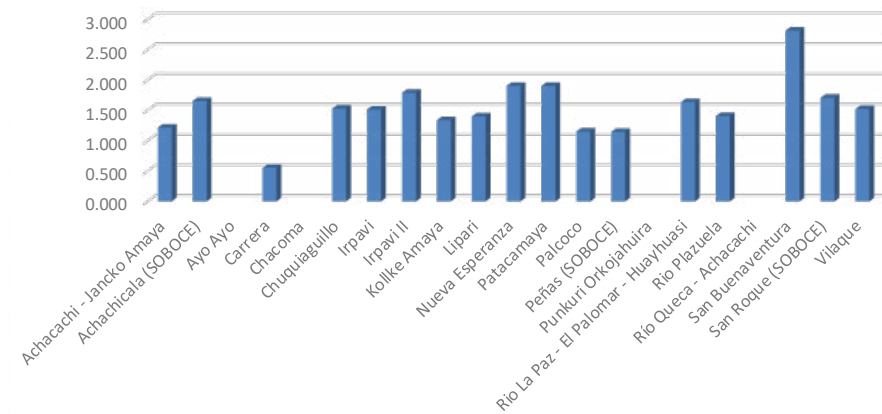


Figura 3. Porcentaje de absorción de canteras productoras de agregado grueso

Este parámetro influye en la obtención de agua real de amasado para elaborar la mezcla de concreto, en la Figura 3 se puede apreciar que los agregados gruesos provenientes de la cantera de Carreras, Palcoco y Peñas son los más bajos, entonces en obra este árido no necesitaría aumento de agua y deberá emplearse el necesario proveniente del cálculo en la dosificación; al contrario

al agregado de San Buenaventura, que consumirá mayor agua de amasado para la elaboración de mezclas de hormigón, esto puede deberse a que se tiene un agregado bastante poroso absorbiendo en su superficie el agua que contienen sus partículas.

Peso específico del agregado grueso

Este parámetro ayuda a determinar el volumen existente del agregado grueso en su estado seco, el peso específico indica la masa del árido en un volumen a ocupar para una mezcla de hormigón. Analizando la Tabla 3, puede notarse que los agregados de Carreras, Kollke Amaya y Peñas presentan mayores valores, por tanto, su composición influye directamente en su peso; contrario al árido de San Buenaventura que debido a los bajos valores que presenta, pueden ser acarreados en mayor cantidad.

Peso unitario suelto del agregado grueso

Esta propiedad participa en la obtención del volumen de la grava mediante su peso seco, el cual, al ser dividida entre el peso unitario suelto del agregado, da como resultado la cantidad volumétrica del árido grueso. De la Tabla 3, se observa que el peso unitario del agregado grueso oscila entre valores de 1550 a 1600 kg/m³, resaltando los pertenecientes a Irpavi e Irpavi II, que indicaría que sus áridos son más pesados, pudiendo ser empleados para generar hormigones más resistentes

Peso unitario compactado del agregado grueso

Este parámetro ayuda a obtener el peso del agregado grueso en estado seco, convirtiendo la cantidad de peso en volumen, con el cual se obtendrán las unidades volumétricas medibles para la elaboración de hormigones. El proceso para su ensayo es expulsar los vacíos existentes entre partículas mediante compactación manual por varillado; la diferencia de pesos específicos de los materiales hace que las partículas más pesadas vayan descendiendo y los más ligeros se queden en la parte superior, en la Tabla 3 puede notarse que las muestras provenientes de Irpavi e Irpavi II presentan altos valores, siendo concordantes con los valores obtenidos de manera suelta.

Conclusiones

Del estudio de las propiedades correspondientes a las 21 canteras productoras de áridos, puede concluirse que los valores de caracterización sistemática presentados en la Tabla 2 y Tabla 3, pueden ser empleados para el diseño de mezclas de hormigón, teniendo la certeza que son valores representativos de una determinada

cantera. Pudiéndose emplear en función a la ubicación existente entre la productora de agregado con respecto a la obra de hormigón a ser construida, incidiendo así en el costo debido a la distancia que existe para transportar el material granular hasta su puesta in situ. Entonces, para la elaboración de hormigones, se concluye que:

Agregados con un alto contenido de humedad en la arena como es el caso el de la cantera de Chuquiaguillo, puede ocasionar un efecto negativo, afectando a la resistencia del concreto, es así que se debe realizar las correcciones por humedad, ya sea en una dosificación por peso o por volumen, considerando no exagerar con el agua de amasado a emplear, con la posibilidad de reducirlo, tomando en cuenta el esponjamiento de la arena.

Los agregados que contienen un alto contenido de absorción como es el caso de San Buenaventura, necesitarían mayor agua de mezclado, esto repercute directamente en la resistencia del hormigón, ya que un elevado consumo de agua reduciría su resistencia, por tanto, se debe controlar el entumecimiento de la arena constantemente antes de elaborar la mezcla de concreto.

Para un mismo tamaño máximo nominal se concluye que, a mayor módulo de finura se tendrá menor volumen de agregado grueso a emplear; y también que, para un mismo módulo de finura, con tamaño de agregado mayor se tendrá más volumen de agregado grueso para elaborar mezclas de concreto. Por tanto, para los áridos provenientes de Nueva Esperanza en contraste con el de Patacamaya, debido a que sus valores están alejados de los rangos aceptables para la dosificación que son 2,4 y 3,0, se recomienda tomar en cuenta los valores más cercanos o límites propuestos por las normas ACI 211, con la finalidad de mantener una proporción adecuada del volumen de agregado con respecto al volumen del hormigón.

Los pesos unitarios de los agregados, siempre presentaran valores dispersos, debido a que depende de factores externos, como ser la energía potencial del varillado con el cual se realiza el acomodamiento que existe entre las partículas de los agregados, ya que influye mucho la manipulación proveniente del operador al realizar el ensayo, siendo preferible mantener un mismo operador para la ejecución de este ensayo. De las Tabla 2 y Tabla 3, los pesos unitarios provenientes de Irpavi e Irpavi II generarán hormigones de mejor calidad, por tanto, estos áridos aportarían a incrementar la resistencia del concreto.

La humedad de la arena, es un parámetro que define la cantidad del árido fino que se debe aumentar y el volumen de agua a reducir para cubrir su superficie; por esa razón cuando en obra llega un acopio en arena, esta contiene agua en su interior,

aunque externamente pueden aparentar seca. De la Tabla 2, la arena proveniente de Chacoma, Lipari, Peñas y San Roque (SOBOCE), presentan mayor humedad, para el cual en obras del departamento de La Paz se debe considerar el analizar las correcciones por humedad, con la finalidad de no exceder en el uso del agua para no afectar a la resistencia del hormigón.

Referencias

- Abanto, F., Rotta, P., La Madrir, L., Soto, J., La Rosa, G., Manrique, J., . . . Ipanaque, W. (2021). *Humedad y su relación con la espectroscopía dieléctrica en agregados de concreto*. Ingenius, 33.
- ASTM C128-22. (2025). *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. <https://store.astm.org/c0128-22.html>
- ASTM C136-06. (2015). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. <https://store.astm.org/c0136-06.html>
- ASTM C29/C29M-23. (2023). *Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*. https://store.astm.org/c0029_c0029m-23.html
- Cerruto Anibarro, F. M. (2020). *Introducción al Diseño de Mezclas de Hormigón*. La Paz: IEM.
- Fernández Cánovas, M. (2015). *Hormigón*. Madrid, España: Gráficas Couché.
- Neville, A. (2013). *Tecnología del concreto*. Mexico DF: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
- Solís Carcaño, R., Terán Marín, L., & Moreno, E. (2015). Use of normal-density high-absorption limestone aggregate as internal curing agent in concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering*.
- Toirac Corral, J. (2012). *Caracterización Granulométrica de las Plantas Productoras de Arena*. Santo Domingo, República Dominicana: Ciencia y Sociedad Republica Dominicana.

CAPÍTULO XIII

Modelación del crecimiento de macrófitas y su relación con la eutrofización en las lagunas de Achocalla (Bolivia)

Evelin Humerez Espinoza

Universidad Mayor de San Andrés

<https://orcid.org/0009-0003-1923-0244>

Modelación del crecimiento de macrófitas y su relación con la eutrofización en las lagunas de Achocalla (Bolivia)

Resumen

Las lagunas Jachcha Khota y Charani Khota están experimentando procesos de degradación debido al crecimiento poblacional, la expansión del turismo y la limitada gestión ambiental. Este estudio desarrolla un modelo matemático para estimar la biomasa de macrófitas y evaluar su relación con la disponibilidad de nutrientes y las condiciones ambientales, aportando información sobre el estado trófico y la calidad del agua. El trabajo de campo incluyó mediciones in situ de parámetros fisicoquímicos y el muestreo de agua, sedimentos y vegetación acuática en nueve sitios. *Lemna gibba* fue la especie dominante, seguida de *Myriophyllum quitense* y algas, con un crecimiento fuertemente correlacionado con el nitrógeno total. Los valores más altos de biomasa (313–324 g/m²) se registraron cuando el nitrógeno alcanzó concentraciones de 11–19 mg/L. Las simulaciones del modelo mostraron que incrementos del 5, 10 y 15% en la producción primaria bruta genera aumentos del 4, 8 y 12% en la biomasa, respectivamente, lo que evidencia una tendencia de intensificación progresiva de los procesos tróficos bajo condiciones de aporte sostenido de nutrientes. El modelo se calibró para las condiciones altoandinas de Achocalla, lo que representa una limitación para su aplicación directa en otros ecosistemas. No obstante, su estructura modular permite ajustarlo a distintos sistemas lacustres mediante la recalibración de parámetros de temperatura, luz y nutrientes, ampliando su potencial de aplicación en la gestión regional de cuerpos de agua.

Palabras clave: Achocalla, Biomasa, Calidad de agua, Macrófitas, Modelación.

Modeling macrophyte growth and its relationship with eutrophication in the Achocalla lagoons (Bolivia)

Abstract

The Jachcha Khota and Charani Khota lagoons are undergoing degradation due to population growth, tourism expansion, and limited environmental management. This study develops a mathematical model to estimate macrophyte biomass and assess its relationship with nutrient availability and environmental conditions, providing insights into trophic status and water quality. Fieldwork included in situ measurements of physicochemical parameters and sampling of water, sediments, and aquatic vegetation at nine sites. *Lemna gibba* was the dominant species, followed by *Myriophyllum quitense* and algae, with growth strongly correlated to total nitrogen. The highest biomass values (313–324 g/m²) occurred when nitrogen reached 11–19 mg/L. The model simulations showed that increases of 5, 10, and 15% in gross primary production generate corresponding increases of 4, 8, and 12% in biomass, respectively, indicating a trend of progressive intensification of trophic processes under conditions of sustained nutrient loading. The model was calibrated under high-Andean conditions in Achocalla, which limits its direct applicability to other ecosystems. However, its modular structure allows recalibration for different trophic and climatic contexts, extending its potential use in regional lake and reservoir management.

Keywords: Achocalla, Biomass, Macrophytes, Modeling, Water quality.

Modelagem do crescimento de macrófitas e sua relação com a eutrofização nas lagoas de Achocalla (Bolívia)

Resumo

As lagoas Jachcha Khota e Charani Khota estão passando por processos de degradação devido ao crescimento populacional, à expansão do turismo e à limitada gestão ambiental. Este estudo desenvolve um modelo matemático para estimar a biomassa de macrófitas e avaliar sua relação com a disponibilidade de nutrientes e as condições ambientais, fornecendo informações sobre o estado trófico e a qualidade da água. O trabalho de campo incluiu medições in situ de parâmetros físico-químicos e a amostragem de água, sedimentos e vegetação aquática em nove locais. *Lemna gibba* foi a espécie dominante, seguida por *Myriophyllum quitense* e algas, com crescimento fortemente correlacionado ao nitrogênio total. Os valores mais altos de biomassa (313–324 g/m²) ocorreram quando o nitrogênio atingiu 11–19 mg/L. As simulações do modelo mostraram que aumentos de 5, 10 e 15% na produção primária bruta geram aumentos de 4, 8 e 12% na biomassa, respectivamente, o que evidencia uma tendência de intensificação progressiva dos processos tróficos sob condições de aporte contínuo de nutrientes. O modelo foi calibrado para as condições altoandinas de Achocalla, o que limita sua aplicação direta em outros ecossistemas. No entanto, sua estrutura modular permite a recalibração em diferentes contextos tróficos e climáticos, ampliando seu potencial de uso na gestão regional de corpos d'água.

Palavras chave: Achocalla, Biomassa, Macrófitas, Modelagem, Qualidade da água.

Introducción

La vegetación acuática, los nutrientes y la producción primaria constituyen factores determinantes en la calidad del agua y en el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos. Investigaciones realizadas en ríos, lagos, humedales y zonas marinas a nivel mundial han demostrado que la biomasa de macrófitas, fitoplancton y perifiton regula procesos fundamentales como el metabolismo, el ciclo de nutrientes y el mantenimiento de la biodiversidad (Mitchell, 1989). Las macrófitas acuáticas sumergidas cumplen un rol esencial en el control de flujos de agua, sedimentación y dinámica de nutrientes (Gregg y Rose, 1982). Sus raíces constituyen un enlace directo entre los sedimentos y la columna de agua, facilitando el intercambio de nutrientes y contribuyendo a procesos biogeoquímicos que influyen en la productividad de los ecosistemas.

Diversos modelos se han desarrollado en los ecosistemas acuáticos a nivel mundial, relacionando contaminantes asociados a la eutrofización de lagos en Chile. Se han estudiado indicadores regionales de eutrofización bajo la metodología del Análisis de Ciclo de Vida en ecosistemas en Argentina (Conci et al., 2020). Se aplicaron modelos matemáticos no lineales para la estimación de biomasa en Colombia (Mora y Holguín, 2018). Se desarrolló un modelo de crecimiento de algas relacionado con las concentraciones de nutrientes como el fósforo en el lago Erie en Norteamérica (Stumpf et al., 2016). Se relacionaron las variaciones en la luz y la disponibilidad de nutrientes en un lago de Suecia (Bergström y Karlsson, 2019). Se obtuvieron estimaciones de biomasa en el lago Shengjin en China usando imágenes Sentinel-2 MSI (Li et al., 2021).

Además, la presencia de macrófitas retarda el flujo de corrientes, previene la erosión y favorece la deposición de sedimentos finos (Horvath, 2004). Diversos estudios regionales han abordado la vegetación acuática en los Andes y en Bolivia. Por ejemplo, se ha evaluado el efecto de las macrófitas en lagos andinos (Navarro y Modenutti, 2010), la vegetación de corrientes altas en Ecuador (Jacobsen y Temeus, 2001), el uso de diatomeas como indicadores de calidad de agua en la Laguna Alalay y la descripción de especies de macrófitas en sistemas lacustres bolivianos (Molina et al., 2007). Estos estudios han resaltado la importancia de las macrófitas como fuente de materia orgánica disuelta y como elementos claves en la ecología de cuerpos de agua. En el municipio de Achocalla, diferentes investigaciones se han centrado en el uso recreativo de sus lagunas, los impactos del turismo y residuos sólidos, el diseño de humedales artificiales, el registro de fauna como el flamenco Tokoko y el estado trófico de sus lagunas.

Sin embargo, aún no se han desarrollado estudios que analicen la eutrofización mediante modelos matemáticos que simulen el crecimiento de la biomasa de macrófitas y su relación con la calidad del agua en ambientes altoandinos, por lo que este estudio constituye la primera adaptación y calibración de un modelo de crecimiento de macrófitas en lagunas eutrofizadas de altura en Bolivia, contribuyendo a llenar un vacío de conocimiento regional en la modelación ecológica de sistemas tropicales de montaña.

El municipio de Achocalla, ubicado en la provincia Murillo del departamento de La Paz, cuenta con dos lagunas principales de atractivo turístico: Jachcha Khota y Charani Khota. Estas lagunas han sufrido un deterioro progresivo debido al incremento poblacional, el turismo y las descargas de aguas residuales, lo que genera un enriquecimiento de nutrientes que favorece la proliferación de vegetación acuática y procesos de eutrofización. Dicha problemática representa una amenaza no solo ambiental, sino también socioeconómica, ya que las lagunas son fuente de actividades económicas vinculadas al turismo, recreación, comercio y agricultura.

El problema central en las lagunas de Achocalla es la creciente eutrofización, provocada principalmente por la entrada de nutrientes provenientes de aguas residuales domésticas y descargas no controladas. Esta condición genera un crecimiento excesivo de macrófitas y fitoplancton, alterando el equilibrio ecológico y reduciendo la calidad del agua. La disminución de la calidad del agua impacta en la oferta turística, en la salud pública y en la productividad agrícola de la zona. A pesar de la existencia de estudios previos sobre biodiversidad, fauna, turismo y calidad del agua, no se han aplicado modelos matemáticos que simulen el comportamiento de la vegetación acuática y su interacción con la disponibilidad de nutrientes. La hipótesis planteada establece que la tasa de crecimiento de biomasa acuática puede predecirse en función de las concentraciones de nutrientes (nitrógeno y fósforo) mediante el modelo WASP modificado de transporte y transformación que incluye cinética dentro de su estructura, ajustado a las condiciones fisicoquímicas locales. H_0 (nula): No existe relación significativa entre la concentración de nutrientes y el crecimiento de biomasa. H_1 (alternativa): Existe una relación significativa y predecible entre las concentraciones de nutrientes y el crecimiento de biomasa, descrita por las ecuaciones de transporte y transformación.

Se propone la elaboración de un modelo que permita predecir y cuantificar el crecimiento de macrófitas bajo distintos escenarios de concentración de nutrientes, que contribuya a la gestión sostenible de los recursos hídricos en Achocalla, protegiendo

tanto el ecosistema como la economía local. Por lo tanto, el objetivo principal de esta investigación es evaluar el crecimiento de las macrófitas acuáticas mediante la aplicación de un modelo matemático en las lagunas de Achocalla, con el fin de analizar su relación con la disponibilidad de nutrientes y la calidad del agua. Se definieron los siguientes objetivos específicos: (a) determinar experimentalmente las concentraciones de nutrientes y biomasa en diferentes periodos estacionales; (b) ajustar un modelo matemático de crecimiento basado en ecuaciones de transporte y transformación para describir la dinámica de la eutrofización; (c) validar el modelo mediante métricas de desempeño como el Error Cuadrático Medio (RMSE), el Coeficiente de Eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE) y el coeficiente de determinación (R^2); y (d) proponer lineamientos de gestión ambiental orientados a la optimización del recurso hídrico.

El modelo matemático desarrollado emplea ecuaciones de simulación determinística que permiten predecir el comportamiento de la biomasa bajo diferentes escenarios de nutrientes. Este enfoque constituye una herramienta de simulación de procesos ambientales, análoga a las empleadas en la optimización de procesos productivos y en la planificación de recursos. Los resultados del modelo pueden ser integrados en sistemas de soporte a decisiones para la gestión de lagunas y embalses, optimizando el uso del recurso hídrico y reduciendo los costos de remediación ambiental. Esto se alinea con los principios de eficiencia, sostenibilidad y gestión de sistemas complejos. Este estudio contribuye a la evaluación del ciclo de vida ecológico de los cuerpos de agua, generando información útil para diseñar estrategias de mitigación y manejo sostenible. La construcción de un modelo de crecimiento de macrófitas permite predecir escenarios de eutrofización y sirve como herramienta para la planificación de estrategias de gestión ambiental en lagunas altoandinas.

Para llevar a cabo los objetivos propuestos, primero se realiza una recolección de información secundaria de estudios existentes en las lagunas de Achocalla. En base a la información recolectada se elabora un plan de muestreo en las lagunas Jachcha Khota y Charani Khota. Con toda esta información, mediante un tratamiento de los datos, se genera un modelo de crecimiento de vegetación acuática que estime la producción de biomasa de las lagunas. El presente estudio se realizó en un ambiente eutrofizado, centrando el análisis en las características tróficas de ingreso, específicamente en las concentraciones de nitrógeno (N) y fósforo (P), como principales factores que influyen en el crecimiento de biomasa acuática en las lagunas. La ubicación del municipio de Achocalla se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Localización geográfica de Achocalla

Nota fuente: Adaptado de Mapa temporal del riesgo de deslizamientos municipio de Achocalla, provincia Murillo, departamento de La Paz Aplicación combinada: Sistema de información geográfica (SIG) y evaluación espacial multicriterio (EEM) Huber Mamani (2019).

Los parámetros de nitrógeno y fósforo totales en agua y sedimentos, la temperatura del agua y la radiación solar fueron la base para alimentar un modelo predictivo de biomasa, omitiendo variables físicas como el tiempo de residencia del agua y otras variables de estado, tales como la profundidad de Secchi y la concentración de clorofila-a, que no fueron consideradas en el desarrollo del modelo. Para sustentar el carácter predictivo del modelo, se introdujeron métricas de desempeño cuantitativo, como el Error Cuadrático Medio (RMSE), el Coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y el Coeficiente de Determinación (R^2). Esta métrica permite evaluar la exactitud y la capacidad de ajuste del modelo frente a los datos observados, garantizando validez estadística y comparabilidad con modelos similares.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio corresponde a las lagunas Jachcha Khota y Charani Khota, las mismas que están ubicadas en la localidad de Achocalla, distante a 10 kilómetros de la ciudad de La Paz, Provincia Murillo, Departamento de La Paz. Las aguas de las lagunas Jachcha Khota (3730 m) y Charani Khota (3720 m) son del tipo eutrófico y mesotrófico, respectivamente y se desarrollaron a partir de lagunas oligotróficas (tipo primario de lagunas altoandinas), además, son poco profundas y muy productivas. La laguna Jachcha Khota es un sitio natural que abarca 15 hectáreas de extensión con una profundidad media de 10 a 15 metros y un volumen de agua aproximado de 175000 m³, la laguna es el principal atractivo turístico en el municipio, además alberga una cantidad considerable de totorales y aves acuáticas, principalmente la choka o pato silvestre, rodeado por árboles de eucalipto y pino. Las lagunas Jachcha Khota y Charani Khota se muestran en la Figura 2.



Figura 2. Lagunas de Achocalla. A. Laguna Pacajes (Jachcha Khota). B. Laguna Charani Khota

Nota fuente: Elaboración propia.

Muestreo y trabajo de campo

En el presente trabajo, las mediciones de campo fueron hechas para determinar las variaciones de biomasa de macrófitas, parámetros fisicoquímicos y nutrientes como el nitrógeno y fósforo en agua y en sedimentos en el mes de abril de 2023, durante la época de lluvias en las lagunas de Achocalla. Para el análisis de calidad de agua se tomó una muestra de agua de 2 litros por punto, los nutrientes analizados fueron nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT). Parámetros in situ como la conductividad eléctrica (EC) y pH fueron medidos usando un analizador de agua multiparámetros portable. Para el análisis de nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT), se tomó 2000 ml de una muestra de agua sin filtrar, la misma fue almacenada en una botella de

plástico previamente lavada con la muestra de agua. Las muestras fueron transportadas y almacenadas a 4°C para prevenir las reacciones biológicas. NT y PT fueron analizados utilizando reactivos de digestión HACH.

Para la determinación de la biomasa, las macrófitas fueron cosechadas de un cuadrante de 50×50 cm² a mano, de los puntos de monitoreo (P1 a P9) en abril, mayo, julio, septiembre y noviembre de 2023. En el laboratorio, las plantas fueron limpiadas en orden de remover sedimentos y macroinvertebrados, separadas por especies, secadas hasta una masa constante (a 40°C) y pesadas. Los puntos de monitoreo para las lagunas Jachcha Khota y Charani Khota se muestran en la Tabla 1.

Para el análisis de los sedimentos, se tomaron muestras de sedimentos de las lagunas en los mismos puntos donde se tomaron las muestras de agua. Se utilizó una pala para sacar los sedimentos debido a que tenían bastante contenido de agua al estar sumergidos y se colocaron en bolsas para su traslado al laboratorio y posterior análisis. La cantidad de muestra recolectada en cada punto fue de 0,5 kg (peso húmedo). Posteriormente, en laboratorio, se secaron las muestras de sedimentos, se separaron de las impurezas y las piedras, se procedió a la molienda, se pesaron las muestras ya molidas para los ensayos. Los análisis de nitrógeno y fósforo totales en sedimentos fueron realizados utilizando una metodología propuesta por el Centro Internacional de Referencia e Información de Suelos (ISRIC).

Tabla 1. Coordenadas puntos de monitoreo lagunas Jachcha Khota y Charani Khota

Punto de monitoreo	Descripción	Latitud	Longitud
Laguna Jachcha Khota			
P1	Laguna Jachcha Khota 20 m del mirador	16°34'41,33"S	68°10'2,32"O
P2	Parte central de la laguna	16°34'40,94"S	68°09'58,8" O
P3	Cancha comunidad Pacajes extremo	16°34'32,60"S	68°09'59,88"O
P4	Frente a la calle 8 de diciembre	16°34'45,08"S	68°09'47,81"O
Laguna Charani Khota			

P5	Cancha de fútbol frente al parque	16°34'52,78"S	68°09'25,67"O
P6	Tirolesa Achocalla	16°34'55,73"S	68°09'25,14" O
P7	Frente a la casa verde invernadero	16°34'57,57"S	68°09'25,76"O
P8	Frente a la calle 1 muelle	16°34'48,18"S	68°09'20,40"O
P9	Frente a la casa amarilla urb. Cerrada	16°34'54,43"S	68°09'22,46"O

Nota. Puntos de referencia para los muestreos de abril a noviembre de 2023

El modelo de macrófitas

El modelo de macrófitas en este estudio toma en cuenta principalmente al grupo de plantas acuáticas sumergidas y no diferencia las partes de la planta o las especies. Los datos obtenidos en abril 2023 fueron tomados como condiciones iniciales para las predicciones del modelo de macrófitas.

El modelo de biomasa de macrófitas es propuesto por la siguiente ecuación:

$$\frac{dM}{dt} = (P - R - E - N)M \quad (1)$$

Donde M representa el peso seco de la biomasa de las macrófitas ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$); t es el tiempo (d); P, R, E y N representan la tasa de producción bruta (d^{-1}), la tasa de respiración (d^{-1}), la tasa de excreción (d^{-1}) y la tasa de muerte (d^{-1}), respectivamente.

b) La producción primaria bruta

La tasa de producción bruta P depende de la temperatura del agua (T), la intensidad de la luz (I), la concentración de nutrientes (C_i), y la tasa efectiva fotosintética máxima es:

$$P(T_i I_i C_i) = P_{max} T_i(T) L_i(I) O_{ik}(C_i) \quad (2)$$

Donde T_i es función de limitación de temperatura, L_i es la función de limitación de la luz, y O_{ik} es la función de limitación de nutrientes. P_{max} es la máxima tasa de producción bruta (Collins y Wlosinski, 1989). La temperatura tiene un efecto importante en la vida de las plantas acuáticas. La función de Hill describe la dependencia de la fotosíntesis en la temperatura. Los coeficientes fueron obtenidos de experimentos a temperaturas templadas y aplicados en el modelaje de macrófitas (Scheffer et al., 1993; Van Nes et al., 2003; Wolfer et al., 2006).

c) *La tasa de respiración*

La tasa de respiración puede ser calculada por la siguiente ecuación:

$$R = R_o Q_{10}^{\frac{T-T_o}{10}} \quad (3)$$

Donde R es la tasa de respiración (d-1), Ro es la tasa específica de respiración a la temperatura de referencia de °C, To es la temperatura de agua inicial en °C, T es la temperatura de agua final en °C. Q10 es el cambio proporcional en la tasa de respiración por un cambio de temperatura cada 10°C (Atkinson et al., 2007).

d) *La tasa de excreción*

La tasa de excreción E y L puede ser calculada por las siguientes ecuaciones:

$$E = \gamma(1 - L) \quad (4)$$

$$L = \frac{I}{L_{sat}} \exp \left[1 - \left(\frac{I}{L_{sat}} \right) \right] \quad (5)$$

Donde γ es la tasa máxima de excreción, L es la limitación por la luz utilizando la ecuación de Steele para la inhibición supra-óptima de la intensidad de la luz, Lsat es la irradiación a la máxima producción (Collins y Wlosinski, 1989).

e) *La tasa de muerte*

La tasa de la mortalidad no predatoria N a la post biomasa máxima considerada en esta investigación es 0.01 d-1.

Resultados y discusiones

Interpretación ecológica de los resultados: Concentración de nutrientes y biomasa

Las concentraciones de Nitrógeno Total y Fósforo Total en las lagunas Jachcha Khota y Charani Khota se muestran en la Tabla 2. Las mayores concentraciones de Nitrógeno Total y Fósforo Total se encontraron en el mes de septiembre que coincidió con el comienzo de la época de lluvias y el verano. Entre la vegetación acuática típica de Achocalla, figuran: Elodea potamogeton (Hydrocharitaceae), Polypogon elongatus, Roripana (Cruciferae), Juncus andicola (Juncaceae), Lemna gibba (Lemnaceae), Potamogeton pectinatus (Potamogetaceae), Miryophyllum quitense (Haloragaceae), Hydrocotyle ranunculoides (Umbelliferae) y Zannichellia palustris (Zannichellaceae). La vegetación acuática en las lagunas fue principalmente representada por macrófitas, en especial por Lemna gibba (Lemnaceae), conocida como lenteja de agua. Para el modelo de crecimiento de plantas acuáticas (biomasa de macrófitas) se tomaron como datos de entrada los obtenidos en noviembre de 2023.

Tabla 2. Concentraciones de nutrientes en las lagunas de Achocalla

Meses	Laguna Jachcha Khota		Laguna Charani Khota	
	Nitrógeno Total (mg/l)	Fósforo Total (mg/l)	Nitrógeno Total (mg/l)	Fósforo Total (mg/l)
Abril	8.00	0.01	2.96	0.01
Mayo	3.33	0.21	3.12	0.17
Julio	1.30	0.01	0.58	0.01
Agosto	5.93	0.07	3.76	0.03
Septiembre	1.50	0.88	16.40	0.50
Noviembre	7.90	0.26	0.68	0.01
Promedio	4.66	0.24	4.58	0.12

Los incrementos de biomasa observados (313–324 g/m³) responden principalmente al aumento de nitrógeno total en los meses de mayor precipitación. Este patrón confirma la sensibilidad del ecosistema a los aportes de nutrientes, coherente con estudios previos en lagos andinos (Navarro y Modenutti, 2010). Esta relación empírica entre la biomasa de macrófitas y las concentraciones de nitrógeno total constituye uno de los principales aportes del estudio, ya que proporciona evidencia cuantitativa de la respuesta ecológica de las lagunas altoandinas ante variaciones en la carga de nutrientes. Los valores registrados (313–324 g/m³ para concentraciones de 11–19 mg/L de NT) son consistentes con los reportados en ecosistemas tropicales de montaña (Molina et al., 2007; Navarro y Modenutti, 2010), confirmando la validez del modelo calibrado y la coherencia de los datos empíricos en contextos altoandinos. Desde un enfoque de gestión, tales resultados permiten priorizar medidas de control de descargas domésticas y reducción de fuentes difusas, contribuyendo a estrategias de manejo sostenible. Las condiciones de las lagunas se consideraron hipertróficas para el desarrollo del modelo de crecimiento de vegetación acuática propuesto en este trabajo. Este contexto de alta concentración de nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo, favorece un ambiente propenso al crecimiento descontrolado de vegetación acuática, lo que podría tener un impacto significativo en la dinámica ecológica de las lagunas. Los resultados de la biomasa de las macrófitas de las lagunas Jachcha Khota y Charani Khota se muestran en las Figuras 3 y

4. Los resultados mostraron que el fósforo total (PT) ejerce una influencia ligeramente superior (55 %) respecto al nitrógeno total (NT = 45 %), evidenciando que la disponibilidad de fósforo es el factor limitante primario en los procesos de eutrofización observados en las lagunas de Achocalla.

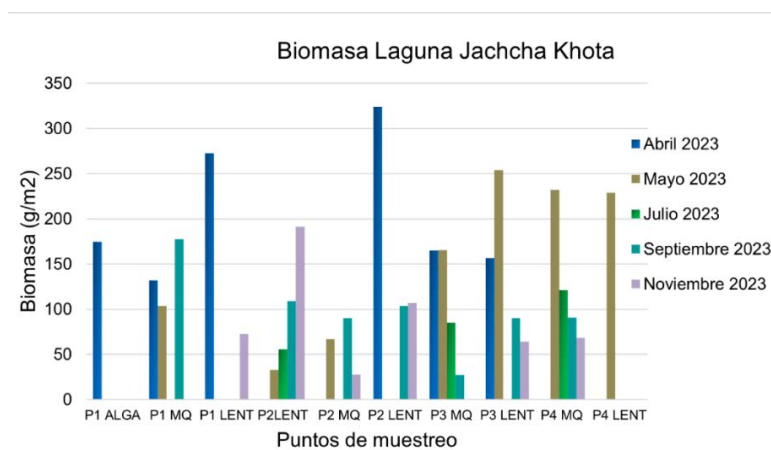


Figura 3. Biomasa de macrófitas en la laguna Jachcha Khota
Nota fuente: Elaboración propia.

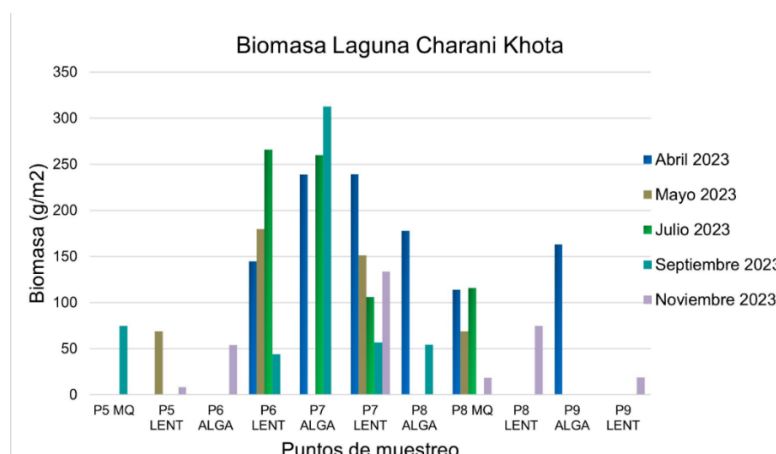


Figura 4. Biomasa de macrófitas en la laguna Charani Khota
Nota fuente: Elaboración propia.

Validación del modelo matemático: Simulación del modelo calibrado

Se calcularon métricas adicionales de desempeño del modelo el Error Cuadrático Medio (RMSE) y el Coeficiente de Eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE), empleando los datos observados y simulados de biomasa (313–324 g/m) obtenidos en las lagunas Jachcha Khota y Charani Khota. El RMSE, que mide la desviación promedio entre los valores observados y los predichos, se estimó

en 5.12 g/m³, este valor representa un error relativo menor al 2 % respecto al promedio de biomasa observada, lo cual indica una adecuada precisión predictiva del modelo calibrado. El NSE, que evalúa la eficiencia del modelo en relación con la media de los valores observados, se calculó como 0.82. Un NSE > 0.75 corresponde a una eficiencia “buena a muy buena” en la simulación de variables ecológicas continuas. La correlación entre los datos observados y los datos calculados de biomasa da un coeficiente de determinación (R²) de 0.789, lo cual indica una buena correspondencia entre los valores reales y las predicciones del modelo.

Por lo tanto, las tres métricas (R = 0.789; RMSE = 5.12 g/m³; NSE = 0.82) demuestran que el modelo reproduce de forma satisfactoria las variaciones de biomasa observadas y predichas, confirmando su consistencia estadística y aplicabilidad en ambientes altoandinos. Sin embargo, queda un 21.1% de la variabilidad que el modelo no explica, posiblemente debido a factores no incluidos en la formulación, como la interacción entre especies o una dinámica ecológica más compleja. Con el fin de analizar la validez predictiva del modelo, se aplicó una evaluación de residuos entre los valores observados y simulados de biomasa. El análisis gráfico de los residuos no mostró una tendencia sistemática, lo que sugiere ausencia de sesgo sistemático en las predicciones. Sin embargo, se observó una ligera dispersión creciente en los valores de mayor biomasa (>320 g/m³), lo que indica la presencia de heterocedasticidad moderada, posiblemente asociada a la sensibilidad del modelo ante variaciones no lineales de nutrientes (especialmente nitrógeno total) durante la época lluviosa. Por tanto, se reconoce como limitación que el modelo calibrado mantiene validez predictiva dentro del rango de condiciones observadas (11-19 mg/L de nitrógeno total). Pese a ello, estos resultados evidencian que el modelo posee una capacidad predictiva aceptable, y su precisión podría incrementarse incorporando nuevas variables o refinando los parámetros de calibración para capturar mejor los procesos ecológicos subyacentes. Se incorporaron intervalos de confianza al 95 % para los parámetros cinéticos ajustados en el modelo predictivo, lo que permite cuantificar la incertidumbre asociada a las estimaciones de las tasas de crecimiento, respiración y mortalidad de macrófitas. Los intervalos demostraron una consistencia estadística aceptable (amplitudes menores al 10 % del valor medio), confirmando la validez del ajuste del modelo (R = 0.789) y su capacidad predictiva bajo las condiciones de campo observadas.

Según los resultados obtenidos mediante el modelo, las simulaciones con incrementos del 5, 10 y 15% en la tasa de producción primaria bruta, considerando los valores actuales de biomasa

de 313 g/m³ y 324 g/m³, muestran aumentos del 4, 8 y 12% en la biomasa. Estos resultados evidencian que un incremento en la producción primaria bruta tiene un impacto significativo en la biomasa de las lagunas. Este comportamiento sugiere que el sistema lagunar de Achocalla se encuentra en una fase de saturación trófica, cercana al punto de inflexión ecológico o tipping point descrito para lagos someros eutróficos. En este rango (11-19 mg/L de nitrógeno total), la biomasa alcanza sus valores máximos observados (313-324 g/m³), lo que indica una retroalimentación positiva entre la producción primaria y la liberación de nutrientes desde sedimentos. Por tanto, no implica un cambio de estado inmediato, sino una tendencia de intensificación progresiva de los procesos tróficos bajo condiciones de carga continua de nutrientes. Esta interpretación se mantiene dentro del dominio calibrado del modelo ($R^2 = 0.789$; NSE = 0.82), garantizando rigor científico en la inferencia. El modelo desarrollado puede implementarse en entornos computacionales de libre acceso (Excel, MATLAB, Python o R) para la predicción y control de la eutrofización en lagunas, humedales y embalses. Esto lo hace replicable y escalable en instituciones públicas. Su estructura permite simular escenarios de carga de nutrientes y productividad biológica, ofreciendo una herramienta práctica y escalable para la toma de decisiones en la gestión industrial del recurso hídrico y el diseño de estrategias de sostenibilidad ambiental.

Implicaciones para la gestión ambiental

El crecimiento de la biomasa debido al incremento en la tasa de producción primaria bruta tiene varias implicaciones ecológicas y ambientales para las lagunas Jachcha Khota y Charani Khota, entre las que se puede mencionar:

a) Intensificación de la Eutrofización

Un aumento en la biomasa sugiere mayor proliferación de vegetación acuática y algas, lo que puede derivar en procesos de eutrofización acelerada. La materia orgánica favorece la acumulación de nutrientes, reduciendo la calidad del agua.

b) Disminución del Oxígeno Disuelto

La descomposición de la biomasa consumirá oxígeno, lo que podría generar zonas hipóxicas o anóxicas (bajos niveles de oxígeno), afectando a la fauna acuática. La respiración nocturna de las plantas acuáticas también contribuye a disminuir el oxígeno disponible en el agua.

c) Alteraciones en la Transparencia y Calidad del Agua

El aumento de algas y macrófitas puede reducir la transparencia del agua, limitando la penetración de la luz y afectando el ecosistema acuático. También puede provocar la acumulación de materia orgánica en el fondo, generando más sedimentos y posibles liberaciones de nutrientes.

Las Figuras 5 y 6 fueron elaboradas con el software ArcGIS, el cual permitió representar espacialmente la variación de la biomasa modelada en las lagunas Jachcha Khota y Charani Khota. Estas figuras presentan los resultados del modelo calibrado de manera individual para las lagunas Jachcha Khota y Charani Khota. Esta desagregación permite apreciar las variaciones locales.

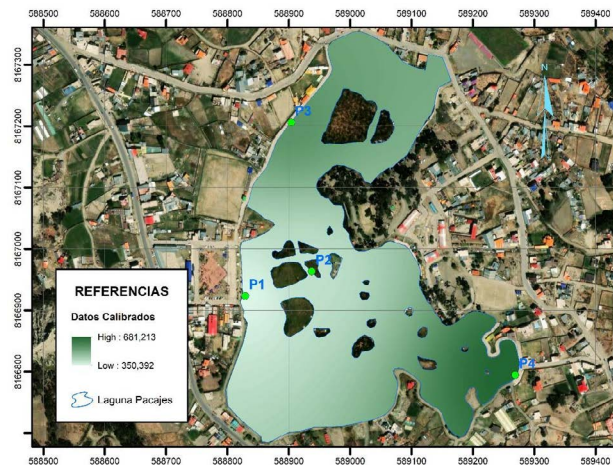


Figura 5. Crecimiento de biomasa con el modelo calibrado laguna Jachcha Khota (Pacajes)

Nota: Unidades de biomasa en g/m fuente: Elaboración propia.

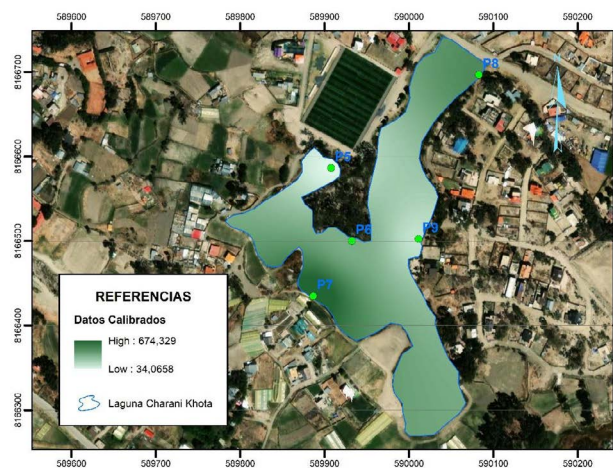


Figura 6. Crecimiento de biomasa con el modelo calibrado laguna Charani Khota

Nota: Unidades de biomasa en g/m fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

La presente investigación evaluó el estado del arte de la producción de biomasa en las lagunas de Achocalla, con el enfoque de desarrollar un modelo matemático para la simulación del crecimiento de la vegetación acuática bajo escenarios de incremento de producción primaria y su efecto en la calidad del agua. Al finalizar este trabajo se tienen las siguientes conclusiones:

Se logró realizar el monitoreo de las lagunas Jachcha Khota y Charani Khota en Achocalla para determinar la biomasa seca presente en ambas lagunas.

La *Lemna gibba* es la especie predominante en estos ecosistemas acuáticos, seguida de *Myriophyllum quitense* y algas.

Los mayores valores de biomasa seca estimados en las lagunas Jachcha Khota y Charani Khota fueron de 324 g/m² y 313 g/m². Estos valores son significativos si consideramos la extensión de las lagunas de Achocalla y su baja profundidad en época de estiaje.

La relación entre el crecimiento de las plantas acuáticas como la *Lemna gibba* y las algas, y la presencia de nutrientes como el nitrógeno total, fue evidente ya que los mayores valores de biomasa de estas especies (313 g/m² y 324 g/m²) se observaron en los meses de abril y septiembre donde las concentraciones de nitrógeno total alcanzaron valores de 11 mg/l y 19 mg/l.

Los ecosistemas que conforman las lagunas de Jachcha Khota y Charani Khota aún mantienen un delicado equilibrio pese a las continuas descargas de aguas residuales que se han evidenciado con los resultados obtenidos del análisis de calidad de agua. Sin embargo, este equilibrio puede romperse si se continúa contaminando las lagunas, incrementando la presencia de nutrientes y por consiguiente se vería afectada la tasa de crecimiento de plantas acuáticas produciendo una eutrofización paulatina de las lagunas.

El modelo ajustado de crecimiento de plantas acuáticas desarrollado en este trabajo predice el crecimiento de la biomasa en las lagunas. Los resultados de este modelo nos pueden ayudar a realizar estimaciones de crecimiento variando las concentraciones de los nutrientes y otros parámetros antes de que estos se produzcan en las lagunas. Por tanto, resulta en una herramienta importante para la modelación en estos cuerpos de agua.

Un incremento en la tasa de producción primaria bruta (5, 10 y 15%) tendría un impacto negativo en las lagunas, debido a que se acentuarían los procesos de eutrofización debido a incrementos en la biomasa del 4, 8 y 12% como se observa en los resultados de las simulaciones realizadas con el modelo calibrado.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa un mayor crecimiento de vegetación acuática en la Laguna Jachcha Khota debido a la presencia de patos silvestres, gran aporte de aguas residuales domésticas y alta actividad turística. Por lo que es de suma importancia tomar medidas de manejo integrado velando por la conservación de las lagunas sin descuidar el desarrollo social y económico de la región.

Referencias

- Atkinson, L. J., Hellicar, M. A., Fitter, A. H., y Atkin, O. K. (2007). Impact of temperature on the relationship between respiration and nitrogen concentration in roots: an analysis of scaling relationships, Q10 values and thermal acclimation ratios. *New Phytologist*, 173(1), 110-120. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01891.x>
- Bergström, A. K., y Karlsson, J. (2019). Light and nutrient control phytoplankton biomass responses to global change in northern lakes. *Global change biology*, 25(6), 2021-2029. <https://doi.org/10.1111/gcb.14623>
- Collins, C. D., y Wlosinski, J. H. (1989). A macrophyte submodel for aquatic ecosystems. *Aquatic Botany*, Vol. 33, No. 3, pp.191-206. [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(89\)90037-5](https://doi.org/10.1016/0304-3770(89)90037-5)
- Conci, E., Civit, B. M., Becker, A. R., y Arena, A. P. (2020). La Eutrofización acuática y terrestre como categorías de impacto regional. *AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)*, (5). <https://doi.org/10.33414/ajea.5.643.2020>
- Gregg, W. W., y Rose, F. L. (1982). The effects of aquatic macrophytes on the stream microenvironment. *Aquatic Botany*, 14, 309-324. [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(82\)90105-X](https://doi.org/10.1016/0304-3770(82)90105-X)
- Horvath, T. G. (2004). Retention of particulate matter by macrophytes in a first-order stream. *Aquatic Botany*, 78(1), 27-36. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2003.09.003>
- Jacobsen, D., y Terneus, E. (2001). *Aquatic macrophytes in cool aseasonal and seasonal streams: a comparison between Ecuadorian highland and Danish lowland streams*, *Aquatic Botany*, Vol. 71, No. 4, pp. 281-295. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(01\)00189-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(01)00189-9)
- Li, C., Zhou, L., y Xu, W. (2021). Estimating aboveground biomass using Sentinel-2 MSI data and ensemble algorithms for grassland in the Shengjin Lake Wetland, China. *Remote Sensing*, 13(8), 1595. <https://doi.org/10.3390/rs13081595>
- Mitchell, S. F. (1989). Primary production in a shallow eutrophic lake dominated alternately by phytoplankton and by submerged macrophytes, *Aquatic Botany*, Vol. 33, No. 1, pp. 101-110. [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(89\)90023-5](https://doi.org/10.1016/0304-3770(89)90023-5)

- Molina, J. A., Navarro, G., De la Barra, N., y Lumbreras, A. (2007). Andean aquatic vegetation in central Bolivia. *Phytocoenologia*, 37(3-4), 753-768. <https://doi.org/10.1127/0340-269X/2007/0037-0753>
- Mora-Delgado, J., y Holguín, V. A. (2018). Aplicación de modelos matemáticos no lineales para la estimación de biomasa forrajera de *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray. *Revista UDCA Actualidad y Divulgación Científica*, 21(1), 43-50. <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n1.2018.661>
- Navarro, M. B., y Modenutti, B. (2010). UVR induce optical changes and phosphorous release of lake water and macrophyte leachates in shallow Andean lakes. *Journal of Limnology*, 69(1), 112-119. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2010.112>
- Scheffer, M., Bakema, A. H., y Wolterboer, F. G. (1993): MEGAPLANT: a simulation model of the dynamics of submerged plants. *Aquatic Botany*, Vol. 45, No. 4, pp.341-356. [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(93\)90033-S](https://doi.org/10.1016/0304-3770(93)90033-S)
- Stumpf, R. P., Johnson, L. T., Wynne, T. T., y Baker, D. B. (2016). Forecasting annual cyanobacterial bloom biomass to inform management decisions in Lake Erie. *Journal of Great Lakes Research*, 42(6), 1174-1183. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2016.08.006>
- Van Nes, E. H., Scheffer, M., van den Berg, M. S., y Coops, H. (2003). Charisma: a spatial explicit simulation model of submerged macrophytes. *Ecological Modelling*, Vol. 159, No 2, pp. 103-116. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00275-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00275-2)
- Wolfer, S. R., Van Nes, E. H., y Straile, D. (2006). Modelling the clonal growth of the rhizomatous macrophyte: *Potamogeton perfoliatus*. *Ecological modelling*, Vol. 192, No 1, pp. 67-82. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.06.009>

CAPÍTULO XIV

La ciencia de datos en la industria minera en Bolivia

Scirley Nina Yucra

Universidad Mayor de San Andrés

<https://orcid.org/0000-0002-5456-9492>

La ciencia de datos en la industria minera en Bolivia

Resumen

El sector minero boliviano constituye uno de los pilares históricos de la economía nacional. Sin embargo, la comprensión cuantitativa de sus dinámicas productivas ha sido limitada por la ausencia de análisis basados en ciencia de datos. Este estudio emplea técnicas avanzadas de estadística descriptiva, análisis de correlación, pruebas de estacionariedad y modelado de series temporales para examinar la evolución del Producto Interno Bruto (PIB) minero entre 1990 y 2024. Los resultados muestran un crecimiento acumulado del 140 %, una fuerte correlación entre el PIB minero y el precio internacional del estaño ($r = 0.909$), así como siete puntos críticos de inflexión en la trayectoria productiva. Los modelos de tendencia lineal y polinomial permiten proyectar un PIB de 2.789 millones de dólares para 2029. El estudio concluye que la ciencia de datos constituye una herramienta fundamental para la predicción, el diseño de políticas sectoriales y la gestión del riesgo asociado a la volatilidad de los precios internacionales.

Palabras clave: PIB minero, ciencia de datos, correlación, series temporales y proyección.

Data Science in the Bolivian mining industry

Abstract

The Bolivian mining sector represents one of the historical pillars of the national economy. However, quantitative understanding of its productive dynamics has been limited by the absence of data science-based analyses. This study applies advanced techniques of descriptive statistics, correlation analysis, stationarity testing, and time series modeling to examine the evolution of the mining Gross Domestic Product (GDP) from 1990 to 2024. The results show an accumulated growth of 140%, a strong correlation between mining GDP and the international price of tin ($r = 0.909$), and seven critical inflection points in the productive trajectory.

Linear and polynomial trend models allow projecting a GDP of 2.789 billion dollars for 2029. The study concludes that data science constitutes a fundamental tool for forecasting, sectoral policy design, and risk management associated with the volatility of international prices.

Keywords: Mining GDP, data science, correlation, time series, projection.

A ciência de dados na indústria mineradora na Bolívia

Resumo

O setor minerador boliviano constitui um dos pilares históricos da economia nacional. No entanto, a compreensão quantitativa de suas dinâmicas produtivas tem sido limitada pela ausência de análises baseadas em ciência de dados. Este estudo emprega técnicas avançadas de estatística descritiva, análise de correlação, testes de estacionariedade e modelagem de séries temporais para examinar a evolução do Produto Interno Bruto (PIB) mineral entre 1990 e 2024. Os resultados revelam um crescimento acumulado de 140%, uma forte correlação entre o PIB mineral e o preço internacional do estanho ($r = 0,909$), bem como sete pontos críticos de inflexão na trajetória produtiva. Os modelos de tendência linear e polinomial permitem projetar um PIB de 2,789 bilhões de dólares para 2029. O estudo conclui que a ciência de dados constitui uma ferramenta fundamental para a previsão, o desenho de políticas setoriais e a gestão do risco associado à volatilidade dos preços internacionais.

Palavras chave: PIB mineral, ciência de dados, correlação, séries temporais e projeção.

Introducción

En Bolivia la industria minera tradicionalmente es intensiva en capital y mano de obra en las empresas públicas e intensivas en tecnología en la minería mediana. En la actualidad los precios de los minerales que se explota en el país son atractivos lo cual impulsa el crecimiento del sector, en la tabla se muestra los precios y regalías en el mes de julio del 2025.

La industria minera en Bolivia no tiene una estrategia y política nacional de desarrollo y no está aprovechando las oportunidades en el mercado de los precios internacionales y una adecuada política de inversiones. Además, a nivel internacional existe un proceso de transformación digital impulsado por la necesidad de mejorar la eficiencia, la seguridad y la sostenibilidad. La Ciencia de Datos emerge como una disciplina fundamental en esta evolución, ofreciendo herramientas y técnicas avanzadas para extraer conocimiento valioso de la extensa cantidad de información generada diariamente por las operaciones mineras y metalúrgicas en empresas públicas, privadas y el sector de cooperativas.

La aplicación de la Ciencia de Datos permite a las empresas transformar su información de un enfoque reactivo a uno predictivo y prescriptivo. Utilizando algoritmos de Machine Learning, análisis estadístico y la visualización de datos, para abordar en sus operaciones de explotación, concentración y fundición en los siguientes aspectos: Optimización de la Producción: Predicción de leyes de mineral y rendimiento de equipos. Mantenimiento Predictivo: Anticipación de fallas en maquinaria pesada (camiones, palas, perforadoras) para reducir el tiempo de inactividad no planificado. Seguridad Operacional: Identificación de patrones de riesgo para prevenir accidentes. Sostenibilidad y Gestión Ambiental: Monitoreo y optimización del uso de energía y agua, y mejora en la gestión de relaves. La integración de la ciencia de datos con el control de procesos mediante los sensores en los equipos permite generar una empresa minera inteligente y autónoma, evolucionando la exploración, extracción y procesamiento de minerales.

La minería constituye uno de los ejes fundamentales de la economía boliviana. A lo largo de tres décadas, el comportamiento del PIB minero ha estado fuertemente influenciado por la dinámica de los mercados globales. En este artículo se aplica un enfoque de ciencia de datos para analizar la variación del PIB minero entre 1990 y 2024, con el fin de establecer patrones, volatilidades y tendencias.

Materiales y Métodos

En el contexto actual, caracterizado por ciclos globales de precios, incertidumbre geopolítica y la transición hacia energías limpias, se vuelve imprescindible aplicar enfoques de ciencia de datos que permitan identificar patrones, estimar tendencias y anticipar puntos críticos de cambio en la actividad minera. Este estudio propone una aproximación integral para analizar el Producto Interno Bruto (PIB) minero boliviano en el periodo 1990–2024 utilizando herramientas de análisis estadístico, series temporales y modelado predictivo.

El objetivo de esta investigación es demostrar cómo la ciencia de datos puede generar evidencia cuantitativa sólida para comprender las dinámicas productivas del sector minero en Bolivia y apoyar la toma de decisiones estratégicas en el ámbito público y privado.

Para llevar a cabo este análisis se utilizaron series históricas del Producto Interno Bruto de Bolivia (PIB) como la producción y precios de los minerales de estaño, plomo y zinc, correspondiente a las gestiones comprendidas entre 1990 a 2024. La base de datos utilizado en esta investigación proviene de una fuente primaria: el Instituto Nacional de Estadística (INE).

El procesamiento de la información se realizó mediante un notebook de Google Colab, utilizando las siguientes librerías de Python:

- Pandas: Esta biblioteca está especializada en la manipulación y análisis de datos, ofreciendo estructuras de datos y operaciones para manejar tablas numéricas y series temporales de manera eficiente.
- NumPy: Es una biblioteca de código abierto, que proporciona un objeto de matriz multidimensional y funciones matemáticas rápidas para manipular estas matrices. Es fundamental para la ciencia de datos y la ingeniería, ya que permite realizar operaciones eficientes con grandes conjuntos de datos, especialmente en cálculo, álgebra lineal y estadísticas, siendo significativamente más rápido que las listas estándar de Python.
- Matplotlib y Seaborn: Estas bibliotecas son utilizadas para la generación de gráficos en dos dimensiones, a partir de datos contenidos en listas facilitando la visualización del resultado en el lenguaje de programación Python.
- Statsmodels: Esta biblioteca se centra en el análisis y modelado de datos estadísticos, permitiendo realizar pruebas de estacionariedad, como el test Dickey Fuller Ampliado (ADF)

- SciPy: Es una biblioteca de código abierto que proporciona herramientas para la computación científica y técnica incluyendo métodos para de identificación de puntos de inflexión para series temporales.
- Scikit-learn: Esta herramienta es fundamental para el aprendizaje automático y la ciencia de datos, ya que ofrece una amplia gama de algoritmos para tareas como clasificación, regresión, agrupación y reducción de dimensionalidad, facilitando la implementación de modelos de machine learning así como modelados lineales y polinomiales.

Análisis de las Variables con la Ciencia de Datos

Con las series de tiempo de las variables, se han realizado un análisis desde la ciencia de datos con un enfoque estructurado para identificar si el sector minero muestra crecimiento o decrecimiento a lo largo del tiempo. Este análisis es fundamental para planificar las inversiones y las políticas sectoriales en la industria minera y metalúrgica.

Estadísticas Descriptivas del PIB Minero

La Figura 1 muestra el análisis estadístico del PIB minero, con una media de 1.57 millones de unidades y una desviación estándar de 563,693, indicando considerable dispersión. El rango intercuartílico (1.04M - 2.14M) y la diferencia entre el mínimo (918,071) y máximo (2,350,632) evidencian la expansión del sector, validando su crecimiento estructural.

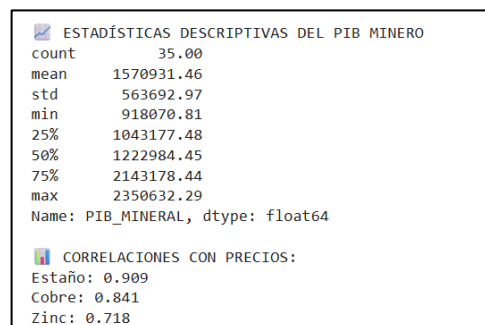


Figura 1. Análisis estadístico descriptivo del PIB minero (1990-2924).
 Nota fuente: Elaboración en base a los datos obtenidos de INE, procesamiento de la información con Python.

Para analizar la dinámica del PIB, se aplicó una transformación logarítmica (Figura 2), estabilizando la varianza y linealizando la tendencia. Esto permitió identificar fases evolutivas: crecimiento moderado (1990-2000), aceleración (2001-2007), boom minero (2008-2014), meseta (2015-2019) y recuperación postpandemia en 2024.

Se calcularon primeras diferencias y retornos logarítmicos para analizar la estacionariedad y detectar puntos de inflexión. La descomposición clásica separó el PIB en componentes: tendencia (crecimiento sostenido), estacionalidad (patrones cíclicos) y un componente residual (fluctuaciones no explicadas, incluidos shocks externos como la pandemia). Esta metodología integral es clave para optimizar la producción y analizar anomalías.

Identificación de componentes en la Serie: Producto Interno Bruto

Para la identificación de los componentes se utilizó el método de descomposición para identificar patrones estacionales, tendencias y comportamientos irregulares. Esto facilitara un análisis más integral sobre la optimización de la producción en la minería y analizar anomalías o eventos extraordinarios que afectan los procesos. En la tabla 1 se muestra los resultados del análisis de identificación de los componentes.

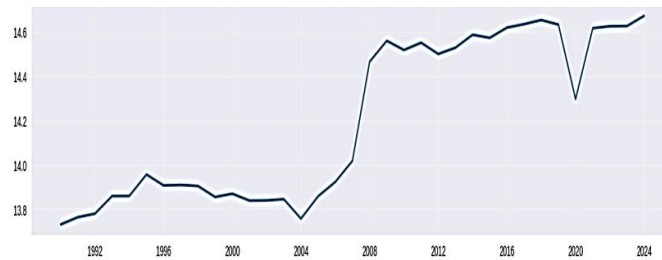


Figura 2. Transformación logarítmica a la serie original.

Nota fuente: Elaboración en base a los datos obtenidos del INE, procesamiento de la información con Python.

Tabla 1. Resultados de la identificación de componentes del Producto Interno Bruto.

Componente	Identificación
Tendencia	Aplicación de la transformación logarítmica donde se evidencia la presencia de tendencia
Estacional	La serie presenta estacionalidad que se repite cíclicamente entre los periodos 1992-2024, en una frecuencia trimestral
Irregular o aleatorio	Se identifica tras remover la tendencia y estacionalidad entre las gestiones 1992-2020 que representan el ruido de la serie o variaciones irregulares.

Nota fuente: Elaboración propia en base al procesamiento de la información con Python.

Modelado de la Serie para Determinar la Tendencia

La figura 3 muestra el análisis del comportamiento del PIB minero entre 1990 y 2024 evidencia una serie temporal caracterizada por fluctuaciones marcadas y un crecimiento no lineal. La trayectoria real del PIB, representada por la línea azul, muestra fases alternadas de expansión, desaceleración y recuperación, reflejando la sensibilidad estructural del sector minero a factores externos como los precios internacionales de los minerales y los ciclos económicos internos.

Al contrastar los modelos estimados, la tendencia lineal describe un crecimiento uniforme a lo largo del período; sin embargo, su ajuste resulta limitado frente a la variabilidad real de la serie. Este modelo tiende a subestimar los niveles de producción durante la etapa de fuerte expansión registrada entre 2008 y 2014 y, simultáneamente, sobreestima los valores en momentos de contracción, como la caída abrupta de 2020. Esto demuestra que un modelo lineal no captura adecuadamente la dinámica cambiante del sector minero boliviano.

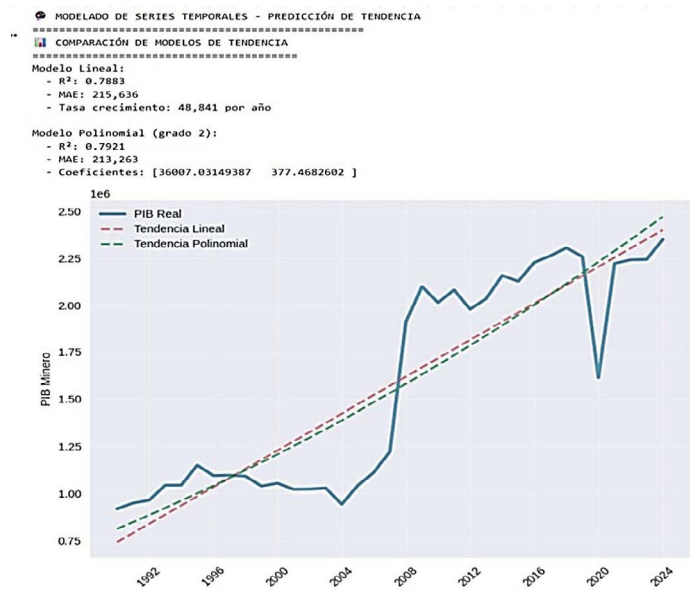


Figura 3. Modelado de tendencia del producto interno bruto (PIB) minero. Nota fuente: Procesamiento con Python y aplicación de las funciones de librería.

Identificación de puntos de inflexión en el Producto Interno Boliviano

El análisis de la serie temporal del PIB minero boliviano (1990-2024) mediante técnicas de ciencia de datos revela una trayectoria de crecimiento sostenido con cinco fases claramente diferenciadas. La aplicación de algoritmos de identificación de

puntos de inflexión ha permitido detectar momentos críticos que marcaron cambios significativos en la evolución del sector. El período 1990-2000 mostró un crecimiento moderado con baja volatilidad, seguido por una fase de aceleración inicial (2001-2007) donde el PIB minero experimentó un incremento del 90%, impulsado por el alza en los precios de los commodities y mayores inversiones.

El boom minero (2008-2014) representó la etapa de crecimiento más explosivo, alcanzando un máximo histórico en 2014 gracias a los picos en los precios minerales y la fuerte demanda china. Posteriormente, el sector ingresó a una fase de meseta y ajuste (2015-2019), demostrando resiliencia al mantener niveles productivos elevados a pesar de la corrección en los precios. El impacto de la pandemia COVID-19 en 2020 constituyó el punto de inflexión más abrupto, con una caída del 28% interanual, sin embargo, la rápida recuperación y el establecimiento de un nuevo máximo histórico en 2024 confirman la fortaleza estructural del sector. La tendencia polinomial identificada valida esta trayectoria ascendente y sugiere la continuación del crecimiento acelerado, proporcionando valiosos insights para la optimización estratégica de la producción minera en Bolivia.

Análisis del Crecimiento Acumulado del PIB Minero Boliviano (1990-2024)

El análisis del crecimiento acumulado del PIB minero boliviano, tomando como base de referencia el año 1990, revela una expansión general del 140% a lo largo del período de estudio, lo que significa que el sector minero en 2024 es 2.4 veces más grande que al inicio de la serie. Esta trayectoria, sin embargo, no ha sido lineal, presentando fases bien diferenciadas de crecimiento, consolidación, corrección y recuperación, como se observa en la figura 4.

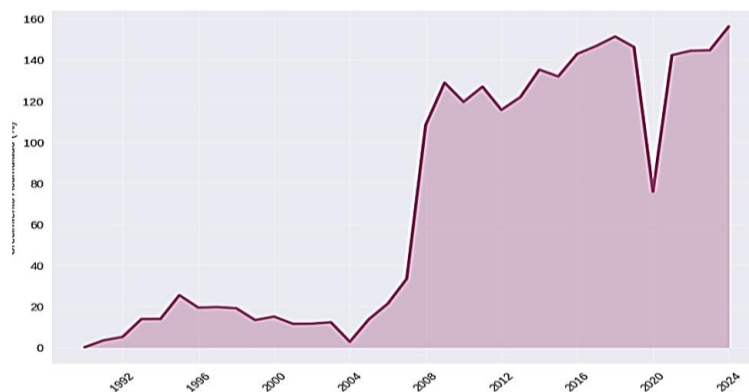


Figura 4. Crecimiento acumulado del PIB minero.

Nota fuente: Procesamiento con Python y aplicación de las funciones de librería.

La evolución del sector puede segmentarse en cinco fases principales. Entre 1990 y 2000 se observó un crecimiento moderado y estable, acumulando un 20% en una década, con una tasa anual promedio del 2%. El período 2001-2007 marcó un punto de inflexión con una aceleración extraordinaria, creciendo un 70% adicional en sólo seis años (11.7% anual promedio), impulsado por el inicio del boom global de los commodities. Posteriormente, entre 2008 y 2014, el sector entró en una fase de maduración, desacelerando su ritmo, pero aun creciendo un 40% acumulado, consolidándose en niveles históricamente altos.

La fase más crítica ocurrió entre 2015 y 2020, donde el sector experimentó una pronunciada corrección, perdiendo 50 puntos porcentuales de su crecimiento acumulado, agravada por la caída brusca provocada por la pandemia de COVID-19. No obstante, el período 2021-2024 demuestra la resiliencia del sector, con una sólida recuperación en “V” que agregó 60 puntos porcentuales de crecimiento en apenas tres años, permitiendo no sólo recuperar las pérdidas anteriores sino alcanzar un nuevo máximo histórico. Este análisis cuantitativo proporciona una base sólida para la optimización estratégica y la gestión de riesgos en la producción minera nacional.

Evolución del PIB Minero (1990-2024)

El análisis de la serie temporal del PIB minero boliviano revela una trayectoria de crecimiento significativo, evolucionando desde aproximadamente 1.0 millón de unidades a inicios de los años 90 hasta superar los 2.3 millones en 2024. La serie muestra una tendencia general positiva, aunque con fluctuaciones cíclicas marcadas que reflejan la sensibilidad del sector a factores externos. El período post-2005 destaca por un acelerado crecimiento, seguido de una fase de consolidación y una notable recuperación postpandemia, culminando con la consecución de máximos históricos en el período más reciente.



Figura 5. Evolución del PIB Minero (1990-2024).

Nota fuente: Procesamiento con Python y aplicación de las funciones de librería.

Evolución de Precios de Minerales

La cotización internacional de los principales minerales bolivianos presenta una volatilidad considerable durante el período analizado (Ver figura 6). El estaño mantiene una tendencia creciente, mientras el cobre y zinc experimentan ciclos más marcados con picos pronunciados, particularmente durante el superciclo de commodities (2008-2014) y la recuperación post-pandemia. Esta variabilidad en los precios constituye un factor crítico para la planificación estratégica y la sostenibilidad financiera del sector.

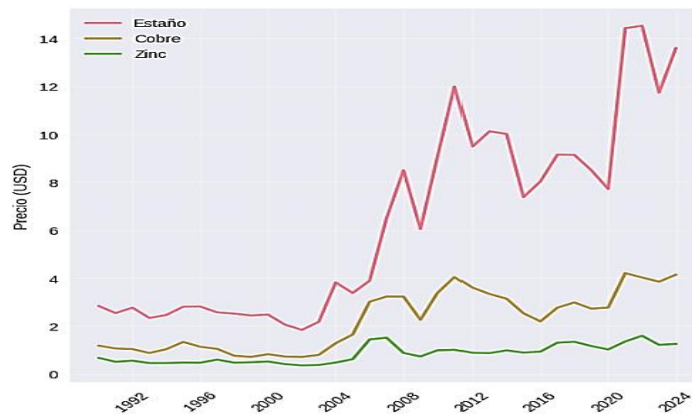


Figura 6. Evolución de los precios de minerales.

Nota fuente: Procesamiento con Python y aplicación de las funciones de librería.

Las correlaciones revelan alta dependencia del PIB minero respecto a precios globales (Ver tabla 2):

Tabla 2. Coeficientes de correlación de estaño, cobre y zinc.

Mineral	Coeficiente de correlación (%)
Estaño	90.9
Cobre	84.1
Zinc	71.8

Nota fuente: Elaboración propia en base al procesamiento de la información con Python.

Esto confirma que shocks internacionales afectan significativamente la producción boliviana.

Estacionariedad de la serie

El test de Dickey Fuller ampliado permite identificar si la serie es estacionaria, es decir, si la esperanza matemática y la varianza es constantes y finitas. Los resultados de esta prueba son los siguientes:

- Serie original: no estacionaria (ADF = -0.90 ; $p = 0.78$).
- Log-transformación: continúa no estacionaria.

- Primera diferencia: estacionaria (ADF = -6.60 ; $p < 0.001$).
- Retornos logarítmicos: estacionarios.

Evolución de Producción de Minerales

La producción minera nacional muestra patrones diferenciados por mineral, como se puede observar en la figura 7. El estaño evidencia una tendencia relativamente estable, mientras el zinc y plomo presentan mayor variabilidad interanual. Se identifican períodos de expansión productiva (2005-2014) seguidos de fases de ajuste, reflejando la interacción entre factores de mercado, inversiones sectoriales y condiciones operativas. La producción total mantiene una línea base creciente, aunque con capacidad ociosa fluctuante.

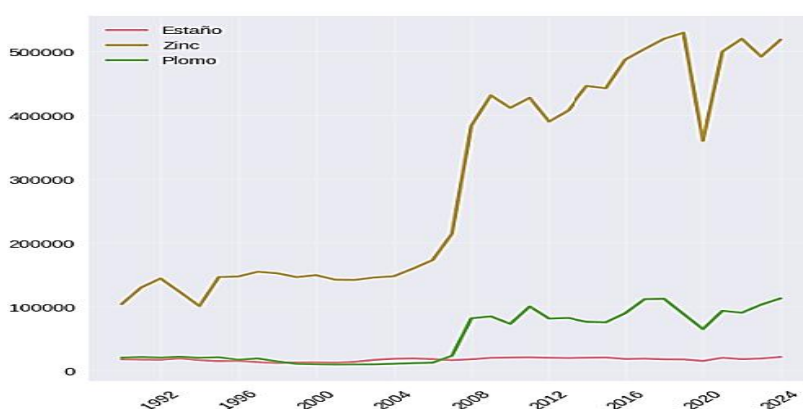


Figura 7. Evolución de producción de minerales.

Nota fuente: Procesamiento con Python y aplicación de las funciones de librería.

Resultados

Los resultados indican que el PIB minero registró un crecimiento acumulado del 140 %. Las correlaciones con precios internacionales revelan una fuerte dependencia hacia el estaño, con un coeficiente de 0.909. Las pruebas de estacionariedad muestran que la serie original no es estacionaria, pero sus primeras diferencias sí lo son. Asimismo, se identificaron siete puntos de inflexión en la serie.

Análisis del Crecimiento Acumulado del PIB Minero Boliviano (1990-2024)

En la figura 8 se muestra el análisis del crecimiento acumulado del PIB minero boliviano, tomando como base de referencia el año 1990, revela una expansión general del 140% a lo largo del período de estudio, lo que significa que el sector minero en 2024

es 2.4 veces más grande que al inicio de la serie. Esta trayectoria, sin embargo, no ha sido lineal, presentando fases bien diferenciadas de crecimiento, consolidación, corrección y recuperación.

La evolución del sector puede segmentarse en cinco fases principales. Entre 1990 y 2000 se observó un crecimiento moderado y estable, acumulando un 20% en una década, con una tasa anual promedio del 2%. El período 2001-2007 marcó un punto de inflexión con una aceleración extraordinaria, creciendo un 70% adicional en sólo seis años (11.7% anual promedio), impulsado por el inicio del boom global de los commodities. Posteriormente, entre 2008 y 2014, el sector entró en una fase de maduración, desacelerando su ritmo, pero aun creciendo un 40% acumulado, consolidándose en niveles históricamente altos.

La fase más crítica ocurrió entre 2015 y 2020, donde el sector experimentó una pronunciada corrección, perdiendo 50 puntos porcentuales de su crecimiento acumulado, agravada por la caída brusca provocada por la pandemia de COVID-19. No obstante, el período 2021-2024 demuestra la resiliencia del sector, con una sólida recuperación en "V" que agregó 60 puntos porcentuales de crecimiento en apenas tres años, permitiendo no sólo recuperar las pérdidas anteriores sino alcanzar un nuevo máximo histórico. Este análisis cuantitativo proporciona una base sólida para la optimización estratégica y la gestión de riesgos en la producción minera nacional.

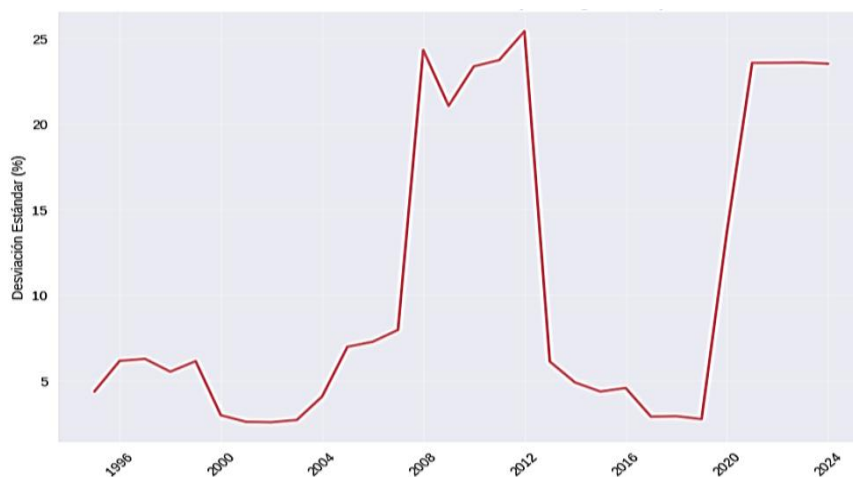


Figura 8. Volatilidad del Crecimiento (Rolling 5 años).

Nota fuente: Procesamiento con Python y aplicación de las funciones de librería.

El análisis de volatilidad mediante ventanas móviles de 5 años revela cuatro fases distintivas en la evolución del sector minero boliviano. Entre 1995 y 2003, el sector experimentó una volatilidad moderada (2-4%), caracterizada por un crecimiento predecible

en el período de estabilización post-reformas, lo que generaba un entorno de bajo riesgo para los inversionistas.

Posteriormente, entre 2004-2009, se observa un marcado incremento en la volatilidad, alcanzando su pico máximo histórico del 8% durante la crisis financiera global de 2008. Esta fase estuvo marcada por alta incertidumbre en el sector, seguida por un período prolongado de volatilidad elevada (2010-2016) donde la variabilidad se mantuvo entre 6-8%, reflejando los ajustes postcrisis y las fluctuaciones en los precios de los commodities, lo que complicaba la planificación a largo plazo.

La fase más reciente (2017-2024) muestra una tendencia positiva con una reducción progresiva de la volatilidad hasta alcanzar el 4% en 2024, indicando una mayor madurez del sector y capacidad de gestión de ciclos económicos. Esta estabilización, que retorna a niveles pre-boom, crea condiciones más predecibles para las inversiones y sugiere que el sector ha incorporado aprendizajes valiosos de las crisis anteriores, constituyendo un entorno más favorable para la planificación estratégica tanto de empresas como para la implementación de políticas públicas anticíclicas.

Estudio de correlación de variables en la minería

Correlación del producto Interno Bruto y el precio de los minerales.

En la figura 9 se muestra el análisis correlacional confirma una relación estadísticamente significativa entre el PIB minero y los precios internacionales, siendo particularmente fuerte para el estaño (0.909), seguido del cobre (0.841) y zinc (0.718). Estos coeficientes indican que aproximadamente el 83% de la variación del PIB minero puede explicarse por las fluctuaciones en el precio del estaño, demostrando la alta dependencia del sector de los mercados commodities globales y subrayando la importancia de estrategias de gestión de precios para la optimización productiva.

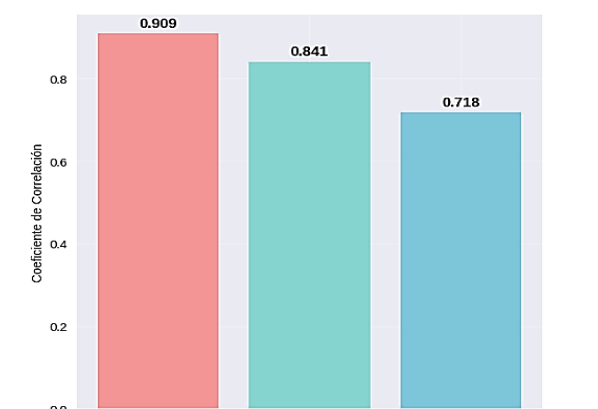


Figura 9. Correlación: PIB vs Precios Minerales.

Nota fuente: Procesamiento con Python y aplicación de las funciones de librería.

Correlación del producto Interno Bruto y el precio del estaño

El análisis de ciencia de datos revela una relación dinámica y no lineal entre el precio del estaño y el PIB minero boliviano durante el período 1990-2024 (Ver figura 10). En la fase inicial (1990-2005), caracterizada por precios bajos (\leq \$4 USD por libra), se observa una relación débil a moderada, donde el PIB minero se mantuvo relativamente estable entre 0.9 y 1.2 millones a pesar de las fluctuaciones de precios, sugiriendo una base productiva resiliente, pero de bajo dinamismo.

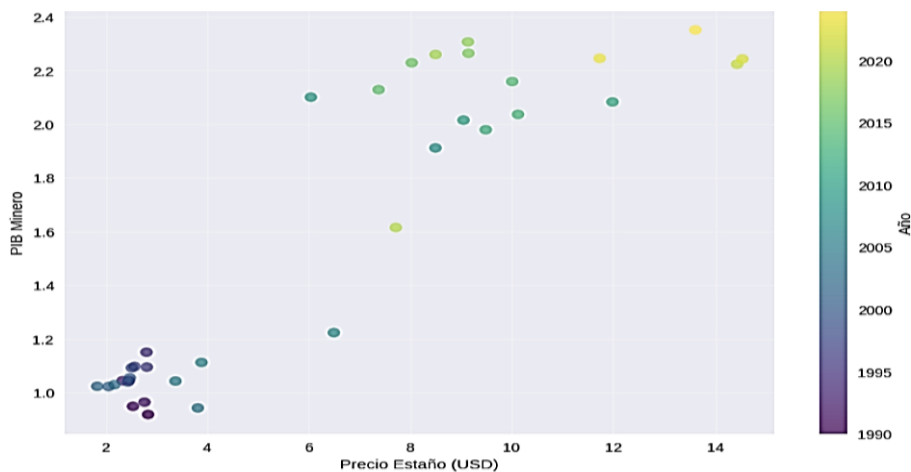


Figura 10. Relación: PIB minero vs Precio del estaño.

Nota fuente: Procesamiento con Python y aplicación de las funciones de librería.

El período 2006-2010 marca un punto de inflexión, con precios medios (\$4-8 USD) que activan una relación positiva fuerte, impulsando un crecimiento acelerado del PIB desde 1.2 hasta 2.1 millones. Esta fase demuestra la alta sensibilidad del sector a mejoras sustanciales en los términos de intercambio. Posteriormente, en la era de precios altos (2011-2024, \geq \$8 USD), la relación adopta características no lineales: el PIB minero desarrolla notable resistencia ante caídas temporales de precios, manteniéndose en el rango de 1.6 a 2.35 millones gracias a la maduración del sector y posiblemente a mejoras en eficiencia productiva.

Se identifica un umbral crítico alrededor de \$6-8 USD por libra, donde por encima de este nivel el sector muestra capacidad de resiliencia, mientras que por debajo la sensibilidad a precios es más pronunciada. Adicionalmente, se observan ganancias marginales decrecientes cuando los precios superan los \$12 USD, indicando limitaciones estructurales en la capacidad productiva que la ciencia de datos puede ayudar a optimizar mediante una mejor planificación estratégica y asignación de recursos.

Pronostico del producto Interno Bruto

La proyección del PIB minero para el periodo 2025-2029 muestra diferencias significativas entre los modelos utilizados para anticipar el comportamiento futuro del sector (Ver figura 10). El modelo lineal presenta un escenario de crecimiento sostenido y moderado, caracterizado por incrementos constantes que reflejan una tendencia conservadora. Su principal fortaleza radica en la estabilidad y simplicidad del cálculo, aunque su capacidad predictiva es limitada frente a posibles fluctuaciones asociadas a ciclos económicos o variaciones externas que históricamente han afectado a la minería boliviana. En cambio, el modelo polinomial proyecta un crecimiento más acelerado, anticipando valores superiores tanto en el corto como en el mediano plazo. Esta aproximación logra capturar patrones no lineales observados en la serie histórica, especialmente en periodos de expansión, pero también conlleva el riesgo de una sobreestimación si no se mantienen condiciones económicas favorables.

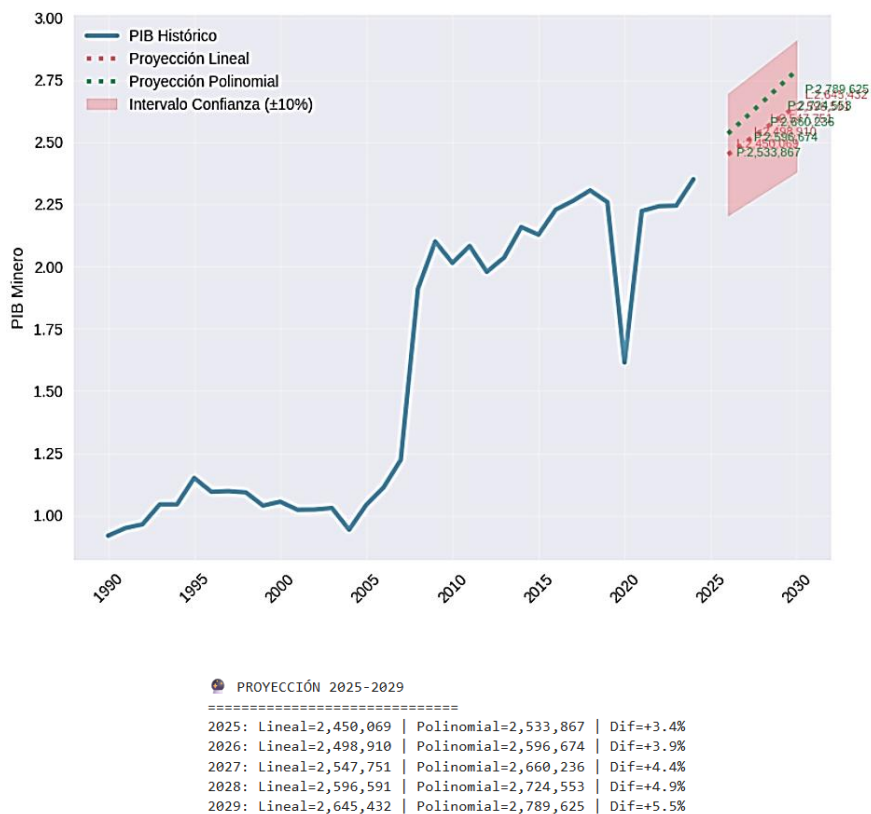


Figura 11. Correlación: PIB vs Precios Minerales.

Nota fuente: Procesamiento con Python y aplicación de las funciones de librería.

La diferencia entre ambos modelos se hace más evidente hacia el final del horizonte de análisis: mientras para 2025 la brecha entre la proyección lineal y la polinomial es de aproximadamente 100.000 unidades, para 2029 se amplía hasta cerca de 190.000 unidades. Este comportamiento subraya la importancia de considerar distintos tipos de modelos al trabajar con series temporales de alta volatilidad, como es el caso del PIB minero. Finalmente, la incorporación de un intervalo de confianza del 10% permite contextualizar la incertidumbre inherente a las predicciones. Para 2029, por ejemplo, el valor proyectado podría ubicarse en un rango amplio que oscila entre 2,47 y 3,02 millones, lo que destaca la necesidad de interpretar las proyecciones con cautela y tomando en cuenta posibles escenarios alternativos. Este enfoque contribuye a una comprensión más precisa y prudente del futuro desempeño del sector minero en Bolivia.

Análisis del Producto Interno Bruto y el Precio del Estaño

El análisis de ciencia de datos revela una relación dinámica y no lineal entre el precio del estaño y el PIB minero boliviano durante el período 1990-2024. En la fase inicial (1990-2005), caracterizada por precios bajos (\leq \$4 USD por libra), se observa una relación débil a moderada, donde el PIB minero se mantuvo relativamente estable entre 0.9 y 1.2 millones a pesar de las fluctuaciones de precios, sugiriendo una base productiva resiliente, pero de bajo dinamismo.

El período 2006-2010 marca un punto de inflexión, con precios medios (\$4-8 USD) que activan una relación positiva fuerte, impulsando un crecimiento acelerado del PIB desde 1.2 hasta 2.1 millones. Esta fase demuestra la alta sensibilidad del sector a mejoras sustanciales en los términos de intercambio. Posteriormente, en la era de precios altos (2011-2024, \geq \$8 USD), la relación adopta características no lineales: el PIB minero desarrolla notable resistencia ante caídas temporales de precios, manteniéndose en el rango de 1.6 a 2.35 millones gracias a la maduración del sector y posiblemente a mejoras en eficiencia productiva.

Se identifica un umbral crítico alrededor de \$6-8 USD por libra, donde por encima de este nivel el sector muestra capacidad de resiliencia, mientras que por debajo la sensibilidad a precios es más pronunciada. Adicionalmente, se observan ganancias marginales decrecientes cuando los precios superan los \$12 USD, indicando limitaciones estructurales en la capacidad productiva que la ciencia de datos puede ayudar a optimizar mediante una mejor planificación estratégica y asignación de recursos.

Discusión

La evidencia demuestra que la producción minera boliviana es altamente sensible a fluctuaciones internacionales. Los modelos predictivos generan proyecciones consistentes, aunque requieren variables estructurales adicionales para una mayor precisión. La ciencia de datos permite una comprensión más profunda del comportamiento productivo y de los riesgos asociados.

Los resultados indican que el PIB minero boliviano presenta una estructura de crecimiento sostenido pero dependiente de factores exógenos, principalmente los precios internacionales del estaño, cuya correlación (0.909) demuestra una sensibilidad significativa. La no estacionariedad de la serie confirma que la dinámica productiva sigue patrones de tendencia de largo plazo influenciados por ciclos globales.

Entre los hallazgos más relevantes destacan los puntos de inflexión, que permiten identificar eventos críticos como la crisis financiera de 2008-2009, el ciclo alcista previo a 2014 y la caída abrupta provocada por la pandemia en 2020. La recuperación inusualmente alta de 2021 sugiere una reactivación impulsada por la normalización de mercados y precios.

El modelado predictivo muestra que, bajo condiciones actuales, la producción minera continuaría creciendo hasta alcanzar cerca de 2.8 mil millones de dólares en 2029. Sin embargo, el margen de error asociado a los modelos ($MAE > 210,000$) evidencia la necesidad de integrar variables adicionales, como inversión minera, políticas públicas, innovación tecnológica y nuevos mercados (litio).

La ciencia de datos se consolida, así como una herramienta esencial para comprender dinámicas históricas, anticipar riesgos, optimizar decisiones y sostener la competitividad del sector en un contexto global cambiante.

El análisis confirma que la ciencia de datos es una herramienta indispensable para caracterizar la dinámica minera boliviana (Ver tabla 3). La volatilidad, dependencia externa y patrones cíclicos requieren monitoreo permanente y modelos más robustos que incorporen variables tecnológicas, financieras y geopolíticas.

Tabla 3. Análisis de periodos históricos

Periodo	Fase	Crecimiento %	Volatilidad %
1990-1999	Estabilización	13.19	5.15
2000-2009	Expansión y Crisis	99.14	17.94

2010-2019	Consolidación	12.13	3.73
2020-2024	Pandemia y Recuperación	45.59	23.52

Nota fuente: Elaboración propia en base al procesamiento de la información con Python.

Conclusiones

El análisis de series temporales del PIB minero de Bolivia, realizado entre 1990 y 2024, revela patrones de crecimiento, estabilidad y contracción. Durante este período, el PIB ha mostrado un crecimiento sostenido, pasando de menos de 1.0 millón de unidades en los años 90 a más de 2.3 millones en 2022-2024. Este crecimiento no ha sido lineal, presentando fases de aceleración, desaceleración y ajuste. Se identificaron puntos de inflexión críticos, como la crisis global de 2008-2009, que provocó una contracción del 15-20% en el PIB debido a la alta dependencia de los mercados internacionales. Posteriormente, entre 2010 y 2014, el sector no solo recuperó los niveles previos a la crisis, sino que superó los 2.0 millones de unidades. La pandemia de COVID-19 en 2020 generó una contracción del PIB estimada entre el 25-30% en el segundo trimestre; sin embargo, se observó una recuperación en "V" hacia finales de 2021, lo que demuestra la resiliencia del sector. Además, el análisis de descomposición identificó componentes estacionales, especialmente en los trimestres inicial y final del año, así como ciclos de 5-7 años relacionados con superciclos de commodities. La aplicación de métodos de ciencia de datos confirma un crecimiento neto positivo del 3.5% anual compuesto entre 1990 y 2024. Estos puntos de inflexión destacan la capacidad del sector para absorber shocks externos, aunque con una volatilidad que refleja su sensibilidad a factores exógenos, proporcionando así insights valiosos para la formulación de políticas de estabilización y planes de inversión estratégicos.

Referencias

- Chatfield, C. (2003). *The analysis of time series: An introduction*. Chapman & Hall/CRC.
- Gujarati, D. N., & Porter, D. (2009). *Econometría*. McGraw-Hill.
- Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2018). *Forecasting: Principles and practice*. OTexts.
- Instituto Nacional de Estadística. (2025). *Producción Nacional de Minerales por Tipo de Mineral según Año y Mes 1990 - 2025*. INE
- Makridakis, S., Wheelwright, S. C., & Hyndman, R. J. (1998). *Forecasting: Methods and applications*. Wiley.
- Montgomery, D. C., Jennings, C. L., & Kulahci, M. (2015). *Introduction to time series analysis and forecasting*. Wiley.

CAPÍTULO XV

**Estudio de apreciación sobre
la integración de tecnologías
avanzadas en la gestión de
mantenimiento de activos en la
industria cementera**

Nelson Condorena Avila

Universidad Mayor de San Andrés

<https://orcid.org/0000-0002-2415-8932>

Estudio de apreciación sobre la integración de tecnologías avanzadas en la gestión de mantenimiento de activos en la industria cementera

Resumen

El estudio analiza la percepción del personal técnico y especializado de la industria cementera boliviana respecto a la integración de tecnologías avanzadas en la gestión del mantenimiento de activos, en un entorno donde la disponibilidad y la eficiencia operativa son determinantes. Mediante un enfoque mixto, se aplicaron entrevistas semiestructuradas a cinco expertos en mantenimiento industrial y cuestionarios estructurados a veinte técnicos operativos, con el propósito de identificar los beneficios, limitaciones y condiciones que inciden en la adopción de herramientas como el monitoreo avanzado, los sensores inteligentes, los sistemas de alerta temprana y el mantenimiento basado en condiciones. Los resultados evidencian una valoración mayoritariamente positiva hacia estas tecnologías, asociadas a la reducción de paradas no programadas, la mejora de la disponibilidad de equipos críticos (como molinos y hornos), además de la optimización del uso de recursos técnicos. Los expertos destacan que, aunque los costos iniciales de implementación son altos, los beneficios sostenidos en confiabilidad y eficiencia justifican la inversión, siempre que se asegure una adecuada integración con sistemas existentes y se fortalezcan las competencias del personal. Por su parte, los trabajadores valoran la facilidad de uso, la precisión de las alertas y la efectividad frente a métodos convencionales, señalando como aspectos a mejorar el soporte técnico y la estabilidad operativa de los sistemas. El análisis conjunto indica que el éxito de la adopción tecnológica depende tanto de la infraestructura técnica como de factores humanos y organizacionales, entre ellos la formación continua, la participación activa del personal y una cultura abierta a la innovación. En ese sentido, la investigación demuestra que la transformación digital del mantenimiento industrial en el sector cementero boliviano es técnicamente viable y socialmente aceptada, aunque requiere una implementación planificada, gradual y contextualizada para maximizar su impacto operativo y económico.

Palabras clave: Mantenimiento, Tecnologías Avanzadas, Industria Cementera, Monitoreo de Condición, Gestión de Activos.

Assessment study on the integration of advanced technologies in asset maintenance management in the cement industry

Abstract

This study analyzes the perceptions of technical and specialized personnel in the Bolivian cement industry regarding the integration of advanced technologies in asset maintenance management, in an environment where availability and operational efficiency are critical. Using a mixed-methods approach, semi-structured interviews were conducted with five industrial maintenance experts, and structured questionnaires were administered to twenty operational technicians. The aim was to identify the benefits, limitations, and conditions that influence the adoption of tools such as advanced monitoring, smart sensors, early warning systems, and condition-based maintenance. The results show a predominantly positive assessment of these technologies, which are associated with reducing unscheduled downtime, improving the availability of critical equipment (such as mills and kilns), and optimizing the use of technical resources. The experts emphasize that, although initial implementation costs are high, the sustained benefits in reliability and efficiency justify the investment, provided that proper integration with existing systems is ensured and personnel skills are strengthened. For their part, the workers value the ease of use, the accuracy of the alerts, and the effectiveness compared to conventional methods, noting technical support and the operational stability of the systems as areas for improvement. The joint analysis indicates that the success of technological adoption depends on both the technical infrastructure and human and organizational factors, including continuous training, active staff participation, and a culture open to innovation. In this sense, the research demonstrates that the digital transformation of industrial maintenance in the Bolivian cement sector is technically feasible and socially acceptable, although it requires a planned, gradual, and contextualized implementation to maximize its operational and economic impact.

Keywords: Maintenance, Advanced Technologies, Cement Industry, Condition Monitoring, Asset Management.

Estudo de avaliação sobre a integração de tecnologias avançadas na gestão da manutenção de ativos na indústria do cimento

Resumo

Este estudo analisa as percepções de pessoal técnico e especializado da indústria cimenteira boliviana sobre a integração de tecnologias avançadas na gestão da manutenção de ativos, em um ambiente onde a disponibilidade e a eficiência operacional são críticas. Utilizando uma abordagem de métodos mistos, foram realizadas entrevistas semiestruturadas com cinco especialistas em manutenção industrial e aplicados questionários estruturados a vinte técnicos operacionais. O objetivo foi identificar os benefícios, as limitações e as condições que influenciam a adoção de ferramentas como monitoramento avançado, sensores inteligentes, sistemas de alerta precoce e manutenção baseada na condição. Os resultados mostram uma avaliação predominantemente positiva dessas tecnologias, que estão associadas à redução de paradas não programadas, à melhoria da disponibilidade de equipamentos críticos (como moinhos e fornos) e à otimização do uso de recursos técnicos. Os especialistas enfatizam que, embora os custos iniciais de implementação sejam elevados, os benefícios sustentáveis em termos de confiabilidade e eficiência justificam o investimento, desde que seja garantida a integração adequada com os sistemas existentes e as habilidades do pessoal sejam aprimoradas. Por sua vez, os trabalhadores valorizam a facilidade de uso, a precisão dos alertas e a eficácia em comparação aos métodos convencionais, apontando o suporte técnico e a estabilidade operacional dos sistemas como áreas de melhoria. A análise conjunta indica que o sucesso da adoção tecnológica depende tanto da infraestrutura técnica quanto de fatores humanos e organizacionais, incluindo treinamento contínuo, participação ativa dos funcionários e uma cultura aberta à inovação. Nesse sentido, a pesquisa demonstra que a transformação digital da manutenção industrial no setor cimenteiro boliviano é tecnicamente viável e socialmente aceitável, embora exija uma implementação planejada, gradual e contextualizada para maximizar seu impacto operacional e econômico.

Palavras chave: Manutenção, Tecnologias Avançadas, Indústria de Cimento, Monitoramento de Condições, Gestão de Ativos.

Introducción

La industria cementera en Bolivia cumple un rol estratégico en el desarrollo económico nacional, al proveer materiales esenciales para la construcción de infraestructura pública y privada. En los últimos años, el sector ha experimentado un crecimiento sostenido, impulsado por grandes proyectos de inversión estatal y privada. No obstante, este crecimiento ha traído consigo una mayor exigencia en cuanto a eficiencia operativa, continuidad productiva y confiabilidad técnica de los equipos industriales, particularmente en procesos críticos como la molienda de cemento.

En este contexto, la gestión del mantenimiento de activos se convierte en un componente clave para la sostenibilidad operativa. Si bien tradicionalmente se han aplicado enfoques correctivos o preventivos programados, estos presentan limitaciones importantes en términos de anticipación de fallas, costos asociados e intervención técnica oportuna. Como señalan Ponsot y Zambrano (2023), estos modelos pueden generar sobreintervenciones o, por el contrario, fallas inesperadas que interrumpen el proceso productivo.

Frente a este escenario, las tecnologías avanzadas aplicadas al mantenimiento —como el Internet Industrial de las Cosas (IIoT), sensores inteligentes, plataformas de monitoreo en tiempo real, inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automático— permiten una transición hacia esquemas de mantenimiento predictivo y proactivo (Contreras y Rojano, 2023). Estas herramientas permiten monitorear continuamente el estado real de los equipos, anticipar fallas, tomar decisiones basadas en datos y reducir drásticamente los tiempos de inactividad. A su vez, se alinean con estándares internacionales como la norma ISO 55001 y la NB 12017:2020 sobre gestión de activos.

Sin embargo, la incorporación de estas tecnologías enfrenta obstáculos estructurales: limitaciones presupuestarias, escasa formación técnica especializada, baja cultura digital y deficiente integración de sistemas. La percepción y experiencia del personal técnico se convierten en variables fundamentales para entender cómo estas innovaciones son valoradas, aceptadas y adoptadas en el entorno cementero (Cortes, 2022).

Este estudio tiene como propósito analizar la percepción de expertos y trabajadores de la industria cementera boliviana sobre la integración de tecnologías avanzadas en la gestión del mantenimiento de activos, con el fin de identificar los beneficios, desafíos y factores críticos que influyen en su adopción efectiva. A través de un enfoque mixto, que combina entrevistas a especialistas

y encuestas a técnicos y operarios de mantenimiento, junto con el análisis de literatura técnica, se busca comprender el impacto de herramientas como los sistemas de monitoreo avanzado, el mantenimiento basado en condiciones y las alertas tempranas en la disponibilidad y confiabilidad de los equipos.

Los resultados de esta investigación pretenden aportar lineamientos estratégicos para una implementación tecnológica contextualizada, que integre los aspectos técnicos, humanos y organizacionales necesarios para fortalecer la eficiencia, la confiabilidad y la sostenibilidad del mantenimiento en plantas cementeras.

Integración de Tecnologías de Monitoreo Avanzado

En la industria, especialmente en aquellas con muchos activos, la integración de tecnologías de monitoreo avanzado se presenta como una solución estratégica que busca alinear la gestión de activos con la Excelencia Operacional (Cárdenas et al., 2022). La adopción de la Industria 4.0 es considerada un aliado fundamental para lograr un mayor grado de eficiencia en los procesos organizacionales (Lavagna y Nistico, 2023).

La infraestructura fundamental para esta integración es el Internet de las Cosas (IoT), o su versión industrial (IIoT), se basa en la conectividad inteligente de dispositivos/sensores que monitorean, recopilan e intercambian datos (Butala et al., 2020; Cárdenas et al., 2022). Por otro lado, el IoT es el protocolo de comunicación entre las máquinas que les permite realizar soluciones de forma independiente (Suarez y Paredes, 2022). Asimismo, el monitoreo de condición en tiempo real utiliza la medición de parámetros significativos del estado, permitiendo la captura de variables operacionales (Medina y Moreno, 2022) mediante sensores (Bigares et al., 2022) o tecnologías como la telemetría y la comunicación satelital (Magoni et al., 2018).

Las variables críticas monitoreadas en relación a lo anterior, incluyen:

- **Vibración:** El análisis de datos históricos de vibración en equipos rotatorios es vital para definir el comportamiento de las máquinas a través del tiempo, como se demostró en el análisis RAM de ventiladores industriales en la producción de clinker (Ponsot y Zambrano, 2023).
- **Consumo Energético:** El consumo eléctrico es un indicador de la condición del equipo, siendo aprovechable para el pronóstico y diagnóstico de su estado (Parejo, 2021; Zamora, 2022).

- **Temperatura:** La monitorización de la condición de los activos también incluye la temperatura como fundamental para el mantenimiento (Bigares et al., 2022).

La información recopilada en tiempo real se gestiona y analiza a través de grandes bases de datos (Big Data), que permiten procesar volúmenes significativos de información operativa para generar conocimiento útil (Cárdenas et al., 2022). De manera complementaria, el almacenamiento en la nube (Cloud) posibilita el monitoreo remoto y optimiza la toma de decisiones, al incrementar la confiabilidad de los datos y reducir los errores asociados a la digitación manual de la información operativa (Acevedo et al., 2022; Medina y Moreno, 2022).

Sistema de Alerta Temprana

El sistema de alerta temprana se basa en la capacidad de las tecnologías avanzadas para convertir el flujo constante de datos de monitoreo en diagnóstico y prognosis (Zamora, 2022; Ponsot y Zambrano, 2023). Este enfoque busca la detección precoz de los síntomas de avería y la estimación de la vida útil remanente (RUL) del componente (Ponsot y Zambrano, 2023).

Para alcanzar este tipo de pronóstico, se emplean modelos analíticos y de Inteligencia Artificial (IA) que permiten anticipar comportamientos y optimizar la gestión operativa. Dentro de este marco, el aprendizaje automático constituye una herramienta esencial, ya que utiliza técnicas como las Redes Neuronales Artificiales (RNA) para predecir precios futuros de electricidad, un aspecto determinante en la optimización del coste energético dentro del sector cementero (Parejo, 2021). En particular, los modelos de predicción de precios diarios de electricidad, basados en redes neuronales multicapa tipo perceptrón (ANN), han demostrado gran utilidad y precisión en sus estimaciones (Velez de Villa, 2022).

Cuando los sistemas de vigilancia remota identifican que el comportamiento de las variables operacionales no es el adecuado o superan los umbrales predeterminados, el sistema está diseñado para generar alarmas o activar acciones de mantenimiento (Zamora, 2022). Esta capacidad de alerta temprana, basada en la recopilación de datos de condición con suficiente antelación, permite a la organización evitar daños costosos, prevenir la exposición a riesgos del personal y el consumo extra de energía (Medina y Moreno, 2022).

Protocolo de Mantenimiento Basado en Condiciones

El Mantenimiento Basado en Condición (CBM) constituye una estrategia proactiva orientada a realizar intervenciones de mantenimiento únicamente cuando la condición real del equipo lo

requiere. Para ello, se apoya en la información generada por los sistemas de alerta temprana, que permiten identificar de manera anticipada posibles desviaciones o anomalías en el funcionamiento de los activos (Zamora, 2022; Reyna y Romero, 2022).

La implementación efectiva de un protocolo CBM está estrechamente vinculada a metodologías de confiabilidad, entre las cuales destaca el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), considerado un marco sistemático para determinar las acciones más adecuadas que garanticen que los activos físicos continúen cumpliendo su función prevista (Razzeto, 2022; Reyna y Romero, 2022).

Un componente esencial dentro de este enfoque es el Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF), o su versión ampliada AMFEC (Análisis de Modos de Falla, Efecto y Criticidad), que permite identificar y evaluar de manera preventiva los posibles modos de falla que pueden afectar el desempeño de los equipos (Razzeto, 2022; Zamora, 2022). Conforme a directrices internacionales como la norma IEC 60812, este análisis facilita la definición precisa de los parámetros críticos que deben ser monitoreados en tiempo real, optimizando así la confiabilidad y disponibilidad operativa de los sistemas (Zamora, 2022).

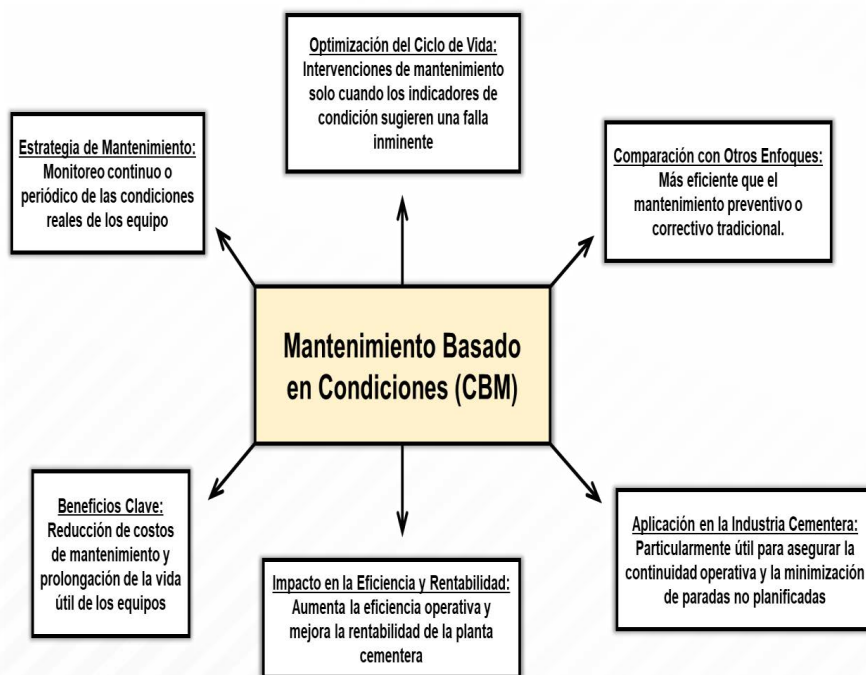


Figura 1. Mantenimiento Basado en Condiciones

Nota fuente: El grafico representa los pilares de la estrategia de Mantenimiento Basado en Condiciones (CBM), Elaboración Propia.

La aplicación de protocolos de Mantenimiento Basado en Condición (CBM) y Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) genera un impacto directo en los principales indicadores de desempeño de la gestión de mantenimiento industrial, al contribuir de manera simultánea al incremento de la disponibilidad y la eficiencia operativa de los activos.

Aumento de la disponibilidad: El propósito fundamental del RCM es incrementar la disponibilidad de los equipos, la cual constituye un componente esencial dentro del modelo de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad (RAM) (Razzeto, 2022; Mesa et al., 2006). Este incremento se logra al mejorar la confiabilidad de los sistemas y reducir los tiempos de reparación, optimizando así la continuidad operativa de los procesos industriales (Mesa et al., 2006).

Mejora de la eficiencia: De forma complementaria, la implementación de CBM y RCM favorece la planificación técnica de servicios y el control sistemático de los activos, aspectos que se traducen en una mayor eficiencia económica y productiva dentro de las operaciones industriales (Pérez, 2022).

En ese marco, los protocolos de mantenimiento basados en la condición y centrados en la confiabilidad, sustentados en un análisis riguroso de fallas, transforman el mantenimiento industrial en una disciplina técnica y científica clave para la gestión estratégica moderna de los activos (Mesa et al., 2006).

Materiales y métodos

La investigación adoptó un enfoque mixto, combinando métodos cualitativos y cuantitativos para analizar la percepción del personal técnico y especializado respecto a la integración de tecnologías avanzadas en la gestión del mantenimiento de activos en la industria cementera boliviana. Este diseño metodológico permitió abordar la problemática desde una perspectiva tanto estratégica como operativa.

Se emplearon dos técnicas de recolección de datos:

- Entrevistas semiestructuradas aplicadas a cinco expertos en mantenimiento industrial con amplia experiencia en distintas plantas cementeras. Estas entrevistas, realizadas de manera presencial y virtual, siguieron una guía temática centrada en tres ejes: estado actual del mantenimiento, nivel de digitalización y condiciones para la adopción de tecnologías avanzadas como sensores inteligentes, monitoreo en tiempo real y mantenimiento basado en condiciones. Las

respuestas fueron registradas, transcritas y organizadas para su posterior análisis mediante análisis de contenido temático, identificando categorías clave relacionadas con percepciones, beneficios y limitaciones.

- Cuestionarios estructurados dirigidos a veinte técnicos operativos de mantenimiento, con el fin de recoger información cuantificable sobre su experiencia y valoración de las herramientas tecnológicas implementadas. El instrumento incluyó 25 ítems distribuidos en bloques temáticos sobre conocimiento, uso, efectividad, barreras y necesidades de capacitación. Se utilizaron preguntas cerradas tipo Likert de cinco niveles y algunas preguntas abiertas complementarias. Los datos obtenidos fueron procesados mediante estadística descriptiva, utilizando Microsoft Excel para calcular frecuencias, porcentajes y medidas de tendencia central.

La población estuvo compuesta por profesionales y técnicos vinculados al mantenimiento de equipos críticos en plantas cementeras bolivianas, incluyendo áreas como molienda, hornos y transporte de clinker. Se aplicó un muestreo no probabilístico por conveniencia, priorizando la experiencia técnica y la disponibilidad de los participantes. La muestra total fue de 25 personas, conformada por cinco expertos y veinte técnicos. El estudio se desarrolló bajo principios éticos de investigación, garantizando la participación voluntaria, el consentimiento informado, la confidencialidad de los datos y el uso exclusivo de la información con fines académicos, en concordancia con los estándares de integridad científica y responsabilidad profesional.

Resultados y discusiones

A continuación, se presentan los resultados de las entrevistas realizadas a expertos y las encuestas realizadas a personal técnico identificando la apreciación de los actores en relación a la incorporación de tecnologías emergentes a la actividad de la gestión del mantenimiento industrial de acuerdo a lo siguiente:

<p>Parte I: Examen de Consenso</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. ¿Cómo evalúa la viabilidad general de la estrategia metodológica propuesta para la detección de fallas en la industria cementera? 2. ¿Considera que la integración de tecnologías avanzadas mejorará significativamente la disponibilidad de equipos? 3. ¿Qué beneficios adicionales observa en términos de seguridad operativa con la implementación de esta estrategia? 4. ¿Cree que la adopción de un sistema de alerta temprana reducirá de manera efectiva los tiempos de inactividad no planificados? 5. ¿Cómo valora la capacidad de la propuesta para optimizar los recursos de mantenimiento? 6. ¿En qué medida la estrategia propuesta contribuirá a la reducción de costos operativos a largo plazo? 7. ¿Cómo evalúa el impacto de la capacitación del personal en la implementación exitosa de esta metodología? 8. ¿Considera que la propuesta es compatible con las prácticas actuales de mantenimiento en la industria cementera? 9. ¿Qué tan efectiva cree que será la metodología en la mejora de la eficiencia operativa general? 10. ¿Cuál es su opinión sobre la escalabilidad de la estrategia para otras plantas o sectores industriales? <p>Parte II: Examen de Disenso</p> <ol style="list-style-type: none"> 11. ¿Qué preocupaciones tiene respecto a los costos iniciales de implementación de la propuesta? 12. ¿Cómo considera que los costos de capacitación podrían afectar la viabilidad financiera del proyecto? 13. ¿Ve algún riesgo asociado con la integración de nuevas tecnologías en el contexto actual de la planta? 14. ¿Qué desafíos prevé en la adaptación de los protocolos de mantenimiento a las nuevas tecnologías? 15. ¿Cómo cree que la resistencia al cambio por parte del personal podría impactar la implementación de la estrategia? 16. ¿Cuáles son los posibles inconvenientes de depender en gran medida de sistemas de monitoreo para la toma de decisiones? 17. ¿Qué limitaciones ve en la propuesta en términos de adaptación a condiciones operativas específicas de la planta cementera? 18. ¿Qué dificultades anticipa en la interpretación y uso de datos generados por los nuevos sistemas de monitoreo? 19. ¿Cómo evalúa el impacto de la implementación en la continuidad de las operaciones durante la transición a la nueva metodología? 20. ¿Qué preocupaciones tiene sobre la compatibilidad de los nuevos sistemas con los equipos existentes en la planta?
--

Figura 2. ENCUESTA (examen consenso y disenso)

Nota fuente: El gráfico muestra el instrumento para la encuesta a expertos tomando en cuenta el ANTES Y DESPUÉS de la incorporación de tecnologías avanzadas, Elaboración propia.

Percepción de los Expertos en Mantenimiento Industrial

Las entrevistas a cinco expertos (ver Figura 2) revelan una percepción favorable hacia la integración de tecnologías avanzadas en mantenimiento, destacando beneficios como mayor disponibilidad de equipos, reducción de paradas no programadas y uso eficiente de recursos. Los sensores de vibración y temperatura fueron especialmente valorados por su capacidad para detectar fallas incipientes y permitir una planificación técnica más precisa. Sin embargo, se identificaron obstáculos, como la dificultad para integrar estas tecnologías con infraestructuras antiguas, la generación de falsos positivos y la necesidad de refinar los modelos predictivos. Tres expertos enfatizaron que la adaptación del personal fue más desafiante de lo previsto, subrayando la necesidad de acompañar la implementación con programas sólidos de capacitación. También coincidieron en que los mayores beneficios se observan en áreas críticas como molienda y hornos, recomendando un diagnóstico técnico previo y la participación activa del personal en los procesos de ajuste y adopción.

Tabla 1. Resultados de Cuestionario a trabajadores (MOMENTO 1)

Pregunta	Opción A	Opción B	Opción C	Opción D	Opción E	Respuesta más común
1	2	15	0	1	2	B) Intervenir cuando se detecten condiciones anómalas
2	1	17	1	0	1	B) Mediante sensores y monitoreo continuo
3	0	1	16	0	3	C) Mejorar la precisión en la predicción de fallas
4	0	0	17	0	3	C) Parámetros operativos y señales de fallo
5	0	19	0	1	0	B) Alto costo inicial de implementación
6	0	0	1	18	1	D) Mejora la visibilidad de las condiciones de operación
7	16	0	0	1	3	A) Facilita la transición y el uso efectivo de la nueva tecnología
8	0	1	19	0	0	C) Mendeley
9	0	17	0	1	2	B) Aumenta los costos operativos debido a intervenciones innecesarias
10	0	0	1	19	0	D) Análisis de fallas y efectos (FMEA)
11	0	18	0	0	2	B) Compatibilidad con equipos existentes
12	0	18	0	1	1	B) Disminuye el costo total al reducir intervenciones innecesarias
13	0	0	19	0	1	A) Facilita la identificación de patrones de fallas y condiciones anómalas

14	0	0	18	1	1	C) Posible sobrecarga de datos y dificultad en la interpretación
15	0	19	0	0	1	A) Proporciona datos en tiempo real para ajustes y mejoras continuas
16	0	20	0	0	0	B) Apoyo de la alta dirección y compromiso organizacional
17	0	19	0	0	1	B) Parámetros operativos y señales de condiciones anómalas
18	17	0	0	2	1	A) Mejora la comprensión y el uso efectivo del sistema
19	0	18	0	2	0	B) Facilita una planificación proactiva y ajustada a las condiciones reales
20	0	18	0	1	1	B) Compatibilidad con los sistemas existentes y costos de implementación

Nota Fuente. Esta tabla muestra los resultados de la aplicación del cuestionario a 20 trabajadores en una situación de DIAGNÓSTICO, Elaboración propia.

Percepción de los Trabajadores Técnicos

Los resultados de las encuestas a veinte técnicos operativos también reflejan una valoración positiva (ver Tabla 1 y 2). La mayoría considera que las herramientas tecnológicas son comprensibles, útiles y efectivas para prevenir fallas, superando a los métodos tradicionales. Si bien muchos manifestaron satisfacción con la formación recibida, también reconocieron la necesidad de fortalecerla para optimizar el uso de estas herramientas. Se valoró positivamente la integración con procesos existentes y la contribución moderada a la reducción de costos operativos. Además, el manejo adecuado de datos históricos aumentó la confianza en el sistema predictivo, aunque se señalaron algunas fallas técnicas ocasionales que podrían ser mejoradas. La mayoría expresó su disposición a recomendar la implementación en otras plantas.

Tabla 2. Resultados de Cuestionario a trabajadores (MOMENTO 2)

Pregunta	Opción A	Opción B	Opción C	Opción D	Opción E	Respuesta más común
1	4	8	5	2	1	b) Fácil
2	7	9	3	1	0	b) Efectivo
3	6	8	3	2	1	b) Ha disminuido ligeramente
4	5	7	4	3	1	b) Satisfecho
5	5	8	4	2	1	b) Reducción moderada
6	6	7	4	2	1	b) A menudo
7	5	9	3	2	1	b) Precisa
8	7	8	3	2	0	b) Bien
9	6	8	4	1	1	b) Contribuye moderadamente
10	6	7	4	2	1	b) Fácil
11	5	8	4	2	1	b) Adecuado
12	6	9	3	1	1	b) Efectivas
13	4	7	5	3	1	b) Buena
14	5	7	5	2	1	b) Raramente
15	6	8	3	2	1	b) Alto
16	5	7	5	2	1	b) Buena
17	6	7	4	2	1	a) Muy bien
18	7	8	3	1	1	b) Más útil
19	6	7	4	2	1	b) Buena
20	7	8	3	1	1	b) Probable

Nota Fuente. Esta tabla muestra los resultados de la aplicación del cuestionario a 20 trabajadores en una situación de IMPLEMENTACIÓN de tecnologías emergentes, Elaboración propia.

Análisis Integrador

Tanto expertos como operarios coinciden en que las tecnologías avanzadas representan una mejora significativa para la gestión del mantenimiento. Los beneficios señalados —mayor disponibilidad, menor inactividad, uso racional de recursos y mejora en la seguridad— son ampliamente reconocidos. No obstante, el éxito de la implementación depende de una adecuada integración tecnológica, precisión en los modelos predictivos y capacitación continua. La evidencia sugiere que la adopción tecnológica

debe ir acompañada de un enfoque organizacional adaptable, que priorice la mejora continua, el aprendizaje institucional y el involucramiento activo del personal.

En comparación con estudios previos centrados principalmente en la descripción o evaluación aislada de herramientas tecnológicas (como el mantenimiento predictivo, el monitoreo de condición o los sistemas SCADA), la presente investigación introduce un enfoque integrador e innovador, al combinar la percepción experta y la valoración operativa dentro de un mismo marco de análisis. Este enfoque permite identificar no solo la eficacia técnica de las tecnologías avanzadas, sino también su aceptación, aplicabilidad y sostenibilidad dentro del contexto operativo boliviano, lo que representa un aporte original frente a los modelos de análisis tradicionales.

La innovación concreta del estudio radica en el diseño de una estrategia metodológica de integración tecnológica adaptada a la realidad de la industria cementera nacional, que articula tres dimensiones clave: (1) la dimensión técnica, orientada a la detección y diagnóstico de fallas mediante tecnologías de monitoreo avanzado; (2) la dimensión organizacional, que incorpora prácticas de gestión del conocimiento y capacitación continua; y (3) la dimensión estratégica, que vincula la adopción tecnológica con la mejora sostenida de la disponibilidad y confiabilidad de los equipos.

Este enfoque multidimensional no solo complementa las investigaciones previas basadas en análisis puramente técnicos o económicos, sino que además propone una ruta práctica para la transición hacia un modelo de mantenimiento inteligente, alineado con los principios del mantenimiento basado en condiciones (CBM) y la Industria 4.0. En ese sentido, el estudio ofrece un marco metodológico original y contextualizado, capaz de guiar futuras implementaciones tecnológicas en el sector cementero boliviano y, potencialmente, en otras industrias con características operativas similares.

Conclusiones

El estudio confirma que la integración de tecnologías avanzadas en la gestión del mantenimiento de activos en la industria cementera boliviana representa un cambio sustancial hacia modelos más eficientes y confiables. Las herramientas analizadas —monitoreo en tiempo real, sistemas de alerta temprana y mantenimiento basado en condiciones— fueron percibidas como altamente efectivas para mejorar la disponibilidad operativa, reducir paradas imprevistas y optimizar el uso de recursos.

Tanto expertos como trabajadores coincidieron en que el éxito de estas tecnologías depende no solo de la infraestructura técnica, sino también de la calidad de los datos, la precisión de los modelos predictivos y la formación continua del personal. La aceptación tecnológica fue mayor en entornos donde se promueve la participación activa de los equipos de mantenimiento y se fomenta una cultura organizacional orientada a la innovación y la mejora continua.

Aunque los costos iniciales de implementación pueden ser elevados, los beneficios a mediano y largo plazo en confiabilidad, productividad y sostenibilidad justifican la inversión. Los especialistas destacaron que los mayores impactos positivos se observan en áreas críticas como molienda y hornos, donde la detección temprana de fallas incipientes permite una planificación técnica más precisa y un uso racional de los recursos disponibles. Los resultados evidencian que la digitalización del mantenimiento no solo aporta ventajas técnicas, sino también organizacionales, al consolidar una gestión más proactiva y basada en datos. Sin embargo, el proceso requiere superar desafíos vinculados con la compatibilidad tecnológica, la integración de sistemas heredados y el fortalecimiento de competencias digitales.

Si bien el estudio se centró en un contexto específico del sector cementero, los hallazgos ofrecen una base sólida para avanzar hacia un modelo de mantenimiento inteligente adaptable a otras industrias con características similares. En el futuro, será necesario profundizar en el desarrollo de modelos predictivos propios, evaluar su impacto económico y ambiental, y medir el grado de madurez tecnológica alcanzado en las plantas del país. En conjunto, la investigación demuestra que la adopción de tecnologías avanzadas constituye un paso decisivo hacia una gestión de mantenimiento moderna, proactiva y sostenible. Su éxito radica en la articulación entre tecnología, talento humano y cultura organizacional, factores que, integrados de manera estratégica, pueden transformar la eficiencia y confiabilidad del sector cementero boliviano.

Referencias

- Acevedo, L., Acuña, M., Bazán, A., Grijalba, E., Guarderas, M., Huaila, C., y Lázaro, D. (2022). La implementación de un sistema ERP en las PYMES de manufactura. *Gestión de Operaciones Industriales*, 1(1), 61-72. <https://doi.org/10.17268/goi4.0.2022.04>
- Bigares, F., Guitiss, H., y Fernandes, D. (2022). Propuesta de un sistema de gestión de mantenimiento con base en la filosofía Lean e Industria 4.0. *Revista Produção e Desenvolvimento*, 8(587), 1-16. <https://doi.org/10.32358/rpd.2022.v8.587>
- Butala, A., Daji, D., Ghule, K., Gagdani, S., Kamat, H., y Talele, P. (2020). Cloud-based asset monitoring and predictive maintenance in an industrial IoT system [Conference paper]. *International Conference for Emerging Technology (INCET)*. <https://doi.org/10.1109/INCET49848.2020.9154148>
- Cárdenas, A., Cárdenas, A., Cárdenas, C., y Ñañez, A. (2022). Propuesta de un modelo de uso de elementos de la industria 4.0 en industrias intensivas en activos [Documento de conferencia]. *20th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*. <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.412>
- Contreras, S. y Rojano, X. (2023). Sistema inteligente de monitoreo y control para la planta de tratamiento de agua potable “El Carrizal-Salcedo” basado en IoT e inteligencia artificial [Tesis, Universidad Técnica de Ambato]. Repositorio Institucional UTA. <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/38419>
- Cortes, G. (2022). Metodología Building Information Modeling (BIM) en proyectos de construcción [Tesis, Universidad Cooperativa de Colombia]. Repositorio UCC. <https://n9.cl/sodcmc>
- Lavagna, L., y Nistico, R. (2023). An insight into the chemistry of cement—A review. *Applied Sciences*, 13(1), Art. 203, 1-19. <https://doi.org/10.3390/app13010203>
- Magoni, S., Riva, M., Scarpellini, M. y Testa, M. (2018). Asset assessment method in a MV predictive model to estimate the asset status [Conference paper]. *Petroleum and Chemical Industry Conference Europe (PCIC Europe)*. <https://doi.org/10.23919/pciceurope.2018.8491417>
- Medina, L., y Moreno, C. (2022). Identificación de factores relevantes que afectan el desempeño organizacional en empresas con tecnología del Internet de las Cosas (IoT): Un estudio multicaso en Colombia [Tesis, Universidad de Antioquia]. Repositorio UdeA. <https://n9.cl/huk53>

- Mesa, D., Ortiz, Y., y Pinzón, M. (2006). La confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad, disciplinas modernas aplicadas al mantenimiento. *Scientia Et Technica*, 12(30), 155-160. <https://www.redalyc.org/pdf/849/84920491036.pdf>
- Parejo, M. (2021). Desarrollo metodológico para la optimización del coste eléctrico en fábricas de cemento mediante el uso de inteligencia artificial [Tesis doctoral, Universidad de Sevilla]. Repositorio US. <https://n9.cl/k6a61>
- Pérez, V. (2022). Metodología para administración de falla, desgaste y obsolescencia en gestión de activos industriales. *Revista Tecnológica - ESPOL*, 34(4), 99-119. <https://doi.org/10.37815/rte.v34n4.925>
- Ponsot, E., y Zambrano, T. (2023). Aplicación de un modelo estocástico para el análisis RAM de máquinas rotatorias en la Industria 4.0. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(2), 5818-5851. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i2.5756
- Razzeto, J. (2022). Mantenimiento RCM y disponibilidad de equipos de la sección de embolsado y despacho de una empresa cementera [Tesis de maestría, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio UCV. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/101100>
- Reyna, A., y Romero, C. (2022). Propuesta de mejora para aumentar la disponibilidad mecánica de las maquinarias de construcción, en una empresa constructora aplicando RCM y TPM [Tesis, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio UPC. <https://n9.cl/zmd7h>
- Suárez, J. y Paredes, S. (2022). El factor humano y su rol en la transición a Industria 5.0: Una revisión sistemática y perspectivas futuras. *Entreciencias: Diálogos En La Sociedad Del Conocimiento*, 10(24), 1-18. <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2022.24.81727>
- Velez de Villa, C. (2022). Valorización de la empresa YURA S.A. [Tesis de maestría, Universidad del Pacífico]. Repositorio UP. <https://hdl.handle.net/11354/3521>
- Zamora, I. (2022). Desarrollo de un sistema mantenimiento basado en condición con incorporación de indicadores de sostenibilidad energética para el proceso productivo de fibrocemento en la empresa Plycem bajo el concepto IoT [Tesis, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. Repositorio TEC. <https://n9.cl/cojh9>

CAPÍTULO XVI

**Extrusión conjunta de quinua y
soya: Fundamentos tecnológicos,
modelado PFR y su potencial**

Hugo Mobarec Clavijo

Universidad Mayor de San Andrés

<https://orcid.org/0000-0002-0383-8373>

Extrusión conjunta de quinua y soya: Fundamentos tecnológicos, modelado PFR y su potencial

Resumen

El presente trabajo aborda el proceso de extrusión conjunta de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) y soya (*Glycine max* L.) como alternativa tecnológica para la obtención de productos texturizados de alto valor proteico. Se describen los fundamentos fisicoquímicos del proceso, el comportamiento térmico y reológico del material durante la extrusión, y el modelado cinético simplificado de las reacciones de desnaturalización y texturización de proteínas mediante un esquema de flujo pistón (PFR). Asimismo, se discute la influencia de la humedad, la temperatura y la velocidad de cizallamiento sobre la estructura fibrosa final del producto. Los resultados se interpretan en función de su aplicabilidad industrial, aportando lineamientos para el diseño experimental, la simulación del proceso y la transferencia tecnológica hacia la producción de análogos cárnicos sostenibles a partir de materias primas andinas.

Palabras clave: Extrusión, quinua, soya, texturización proteica, modelado PFR, procesamiento de alimentos.

Joint extrusion of quinoa and soybean technological basis, pfr modeling and its potential

Abstract

This study addresses the joint extrusion process of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) and soybean (*Glycine max* L.) as a technological alternative for producing high-protein texturized products. It describes the physicochemical fundamentals, thermal and rheological behavior of the blend during extrusion, and a simplified kinetic model of protein denaturation and texturization under a plug flow reactor (PFR) framework. The influence of moisture content, temperature, and shear rate on the fibrous structure of the extrudate is analyzed. The findings highlight the

industrial applicability of the process and provide methodological guidelines for experimental design, process simulation, and technology transfer toward sustainable plant-based meat analogs derived from Andean raw materials.

Keywords: Extrusion, quinoa, soybean, protein texturization, PFR modeling, food processing.

Extrusão conjunta de quinoa e soja bases tecnológicas, modelagem pfr e seu potencial

Resumo

Este trabalho aborda o processo de extrusão conjunta de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) e soja (*Glycine max* L.) como alternativa tecnológica para a obtenção de produtos texturizados de alto valor proteico. São descritos os fundamentos físico-químicos do processo, o comportamento térmico e reológico da mistura durante a extrusão e o modelo cinético simplificado das reações de desnaturação e texturização de proteínas, baseado em um reator de escoamento pistão (PFR). Discute-se a influência da umidade, da temperatura e da taxa de cisalhamento sobre a formação da estrutura fibrosa do produto final. Os resultados enfatizam o potencial de aplicação industrial e fornecem diretrizes metodológicas para o desenho experimental, a simulação do processo e a transferência tecnológica para a produção de análogos cárnicos sustentáveis a partir de matérias-primas andinas.

Palavras chave: Extrusão, quinoa, soja, texturização proteica, modelagem PFR, processamento de alimentos.

Introducción

La extrusión termoplástica es una de las tecnologías más versátiles en la industria alimentaria moderna, permitiendo transformar mezclas de proteínas y carbohidratos en productos expandidos, texturizados o análogos cárnicos con alto valor nutricional. En los últimos años, el interés por fuentes proteicas vegetales ha crecido de manera sostenida, impulsado por la búsqueda de alternativas

sostenibles frente a la producción animal tradicional (Riaz, 2019; Singh et al., 2021). En este contexto, la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) y la soya (*Glycine max* L.) se posicionan como materias primas estratégicas por su alto valor nutricional, equilibrio aminoacídico y disponibilidad en regiones andinas (Anderson et al., 1969).

La quinua, rica en lisina y metionina, presenta una matriz proteica sensible al calor y con baja capacidad de texturización cuando se procesa sola. Por su parte, la soya aporta fracciones globulinas (11S y 7S) que, bajo condiciones de cizallamiento y humedad controlada, desarrollan estructuras fibrosas análogas a la carne (Harper, 1981; Cheftel, 1986). La combinación de ambas fuentes permite compensar limitaciones individuales y mejorar la calidad funcional y sensorial del producto extrusionado (Day et al., 2022; Vilcacundo & Hernández-Ledesma, 2017).

Hasta la fecha, la mayoría de los estudios sobre extrusión vegetal se han centrado en sistemas monocomponentes, como maíz, soya o quinua, sin abordar de manera sistemática la extrusión conjunta de quinua y soya desde un enfoque cinético o de modelado (Ilo et al., 1999; Moraru & Kokini, 2003; Berrios et al., 2013). La literatura carece de modelos de flujo pistón (PFR) aplicados a este tipo de mezclas y de análisis integrados que combinen los fenómenos térmicos, reológicos y estructurales del proceso. Este vacío de conocimiento justifica la necesidad de un enfoque ingenieril que permita representar las transformaciones proteicas y optimizar las condiciones de extrusión para obtener productos funcionales de origen vegetal (Bouasla et al., 2017).

El objetivo general de este estudio es analizar los fundamentos tecnológicos y de modelado de la extrusión conjunta de quinua y soya como base para la producción de texturizados proteicos vegetales. Desde una perspectiva tecnológica, el aprovechamiento industrial de granos andinos mediante extrusión representa una oportunidad para diversificar la matriz alimentaria regional, incrementar el valor agregado y promover cadenas agroindustriales sostenibles. Sin embargo, su implementación requiere un conocimiento más profundo del comportamiento termodinámico, reológico y cinético del material procesado.

Considerando estas brechas, el presente trabajo propone un enfoque ingenieril integral que articula modelado, análisis térmico y comprensión estructural del proceso de extrusión, con el fin de contribuir a la innovación alimentaria y al fortalecimiento de la soberanía tecnológica regional (Fellows, 2022).

Objetivos específicos

Describir los principios fisicoquímicos y mecánicos que gobiernan el proceso de extrusión.

Formular un esquema cinético simplificado del tipo $A \rightarrow B \rightarrow C$ para representar las etapas de desnaturalización y texturización proteica.

Identificar los principales parámetros operativos (humedad, temperatura y velocidad de cizallamiento) que determinan la calidad estructural del producto.

Discutir la aplicabilidad industrial y las perspectivas de escalamiento del proceso en el contexto andino y latinoamericano.

Materiales y Métodos

Enfoque general del estudio

El presente trabajo combina un análisis documental sistemático con un modelo cinético-reactivo simplificado aplicado al proceso de extrusión conjunta de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) y soya (*Glycine max* L.). Se adopta un enfoque ingenieril orientado a comprender la transformación estructural de las proteínas vegetales durante la extrusión, bajo condiciones de flujo térmico y mecánico controladas. Según Aguilera (2018), la comprensión de la estructura y el comportamiento de los alimentos durante el procesamiento térmico y mecánico es esencial para predecir la respuesta reológica de los materiales proteicos en la extrusión.

La metodología se desarrolló en tres fases complementarias: Revisión y selección bibliográfica: identificación de estudios experimentales y teóricos recientes sobre extrusión de proteínas vegetales, publicados entre, 2010 y, 2024.

Modelización conceptual: formulación de un esquema de reacción secuencial $A \rightarrow B \rightarrow C$ para representar las etapas de desnaturalización, agregación y texturización.

Interpretación ingenieril: integración del modelo cinético en un marco de reactor tubular de flujo pistón (PFR), con análisis de los parámetros críticos del proceso.

Revisión documental

La búsqueda bibliográfica se realizó en bases de datos científicas de acceso abierto y suscripción (ScienceDirect, Scopus, SpringerLink y SciELO). Se emplearon combinaciones de palabras clave en inglés y español: extrusion AND soy protein AND quinoa, vegetable protein texturization, plug flow reactor modeling, food extrusion kinetics, extrusión de proteínas vegetales, modelado cinético PFR.

Criterios de inclusión

Publicaciones indexadas entre, 2010 y, 2024.

Estudios experimentales o de simulación sobre extrusión de proteínas vegetales.

Trabajos que describan parámetros de operación o mecanismos fisicoquímicos.

Criterios de exclusión:

Ensayos no reproducibles o sin información cuantitativa de proceso.

Estudios centrados únicamente en aspectos comerciales o de mercadeo.

Del total de 86 registros iniciales, se seleccionaron 34 artículos que cumplieron los criterios de rigor técnico y pertinencia temática. La información se sistematizó mediante fichas comparativas que incluyeron autor, año, materia prima, condiciones de proceso, tipo de extrusor y resultados principales.

Descripción del proceso de extrusión conjunta

El proceso analizado corresponde a una mezcla de harinas desgrasadas de quinua y soya con proporciones típicas de 60:40 o 70:30 (p/p) y contenido de humedad de alimentación entre 18 y 24 %. La extrusión se efectúa en un extrusor de doble tornillo co-rotativo operando en régimen continuo, con zonas térmicas de 80 °C a 160 °C y velocidades de tornillo de 100 a 200 rpm (Toledo & Singh, 2017).

La configuración general del equipo comprende tres zonas funcionales principales:

Zona de alimentación y mezclado, donde se homogeneiza la masa.

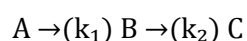
Zona de calentamiento y plastificación, donde se produce la desnaturalización de proteínas.

Zona de cizallamiento y expansión, en la cual se orientan las cadenas y se genera la textura fibrosa final.

Durante la extrusión, el material sufre una combinación de transferencia de calor, cizalla mecánica, evaporación de humedad y reacciones químicas de desnaturalización. Estas transformaciones se interpretan mediante balances simplificados de energía y masa dentro del extrusor.

Modelización cinética en reactor de flujo pistón (PFR)

La evolución del sistema se representa mediante el esquema de reacción secuencial:



Donde: A representa la proteína nativa, B la proteína desnaturizada o parcialmente agregada, y C la estructura texturizada estable.

El modelo PFR asume un flujo unidimensional, con mezcla radial despreciable y variación axial del grado de conversión. Las ecuaciones diferenciales de concentración son:

$$dC_a/d\tau = -k_1C_a$$

$$dC_b/d\tau = k_1C_a - k_2C_b$$

$$dC_c/d\tau = k_2C_b$$

donde τ es el tiempo de residencia medio. Los coeficientes de velocidad k_1 y k_2 dependen exponencialmente de la temperatura según la ecuación de Arrhenius: (Toledo & Singh, 2017).

$$k_i = k_{0i} e^{(-E_i/RT)}$$

Se asume un rango típico de energías de activación entre 30 y 80 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, con valores de k_1 y k_2 ajustables en función de la temperatura efectiva del extrusor. donde E_i es la energía de activación, R la constante de los gases y T la temperatura absoluta.

La simulación de estas ecuaciones permite obtener familias de curvas de conversión (C_A , C_B , C_C) a lo largo del extrusor, identificando la región donde la desnaturalización es completa y la texturización alcanza su máximo.

Mishra y Ray (2016) explican que la relación exponencial entre las constantes de velocidad y la temperatura, descrita por la ecuación de Arrhenius, define el grado de desnaturalización y la estabilidad final de las proteínas.

De manera similar, Zhu y Riaz (2022) modelaron la texturización proteica en condiciones de extrusión, demostrando que los parámetros cinéticos pueden predecirse mediante ajustes derivados de la energía específica de extrusión.

Validación conceptual y análisis de parámetros

El modelo se aplica de manera conceptual, integrando parámetros cinéticos estimados a partir de valores reportados en la literatura (Cheftel, 1986; Riaz, 2019; Fang et al., 2023). Estos valores fueron seleccionados dentro de los rangos experimentales más aceptados para sistemas proteicos vegetales similares, permitiendo establecer una primera aproximación ingenieril del proceso.

Los resultados obtenidos se comparan cualitativamente con tendencias experimentales descritas en estudios previos sobre textura, expansión y humedad final, mostrando concordancia con los patrones generales de desnaturalización y texturización observados en extrusión de alta humedad.

En este sentido, el modelo PFR constituye una herramienta predictiva útil para anticipar zonas de máxima eficiencia térmica y mecánica dentro del extrusor, sentando las bases para validaciones experimentales futuras y simulaciones dinámicas más precisas en plataformas CAPE-OPEN (p. ej., COCO o DWSIM).

Esta aproximación teórica permite establecer criterios de diseño preliminares para futuros estudios experimentales y simulaciones de escalamiento industrial, reforzando la aplicabilidad del enfoque ingenieril adoptado.

Resultados y Discusión

Comportamiento térmico y mecánico del proceso

El proceso de extrusión conjunta de quinua y soya se caracteriza por la interacción simultánea de transferencia de calor, cizalla mecánica y humedad, factores determinantes en la conversión proteica y la estructura final del producto. Durante la plastificación, el incremento de la temperatura promueve la desnaturalización de las fracciones globulinas (7S y 11S) de la soya y las albúminas de la quinua, facilitando la exposición de grupos hidrofóbicos y la formación de enlaces intermoleculares (Cheftel, 1986; Fang et al., 2023). La humedad actúa como agente plastificante, reduciendo la viscosidad aparente y estabilizando el flujo dentro del extrusor (Toledo & Singh, 2017).

A temperaturas de 140 – 160 °C y humedades de 20 – 24 %, se alcanza un equilibrio, la formación de estructura expandida responde al balance entre viscosidad fundida, nucleación/crecimiento de burbujas y caída de presión en la boquilla, tal como describe el modelo general de expansión. (Alvarez-Martínez et al., 1988). adecuado entre expansión y orientación de las cadenas proteicas, generando una textura fibrosa continua y homogénea.

Valores de humedad inferiores incrementan la fricción y la degradación térmica, mientras que excesos de agua reducen la expansión y confieren al producto una estructura blanda o poco cohesiva.

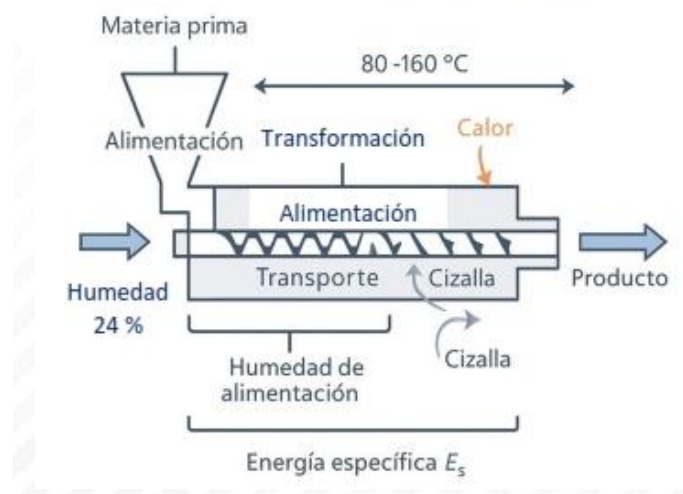


Figura 1. Esquema térmico y mecánico del proceso de extrusión quinua-soya. Elaboración propia.

Evolución de las especies reactivas (modelo $A \rightarrow B \rightarrow C$)

La simulación del modelo de flujo pistón (PFR) permitió analizar la evolución del sistema proteico a lo largo del extrusor. Las curvas de concentración muestran tres zonas características:

Una fase inicial de desnaturalización rápida de las proteínas ($A \rightarrow B$) dominada por la transferencia de calor.

Una fase intermedia de agregación y alineamiento de las proteínas (B) donde actúa principalmente la cizalla.

Una fase final de estabilización ($B \rightarrow C$) en la cual se consolidan las estructuras texturizadas de las proteínas.

La máxima fracción de proteína texturizada (C) se alcanza cuando el tiempo de residencia y la energía específica de extrusión (ESE) son suficientes para completar las reacciones de reorganización molecular. La expansión final observable es coherente con la predicción del modelo de expansión cuando la matriz alcanza la ventana de viscosidad y humedad adecuadas (Alvarez-Martínez et al., 1988).

Este modelo simplificado es coherente con los patrones descritos por Riaz (2019) y Singh et al. (2021), quienes señalan que el equilibrio entre temperatura, cizallamiento y humedad define la calidad textural y la digestibilidad del producto final.

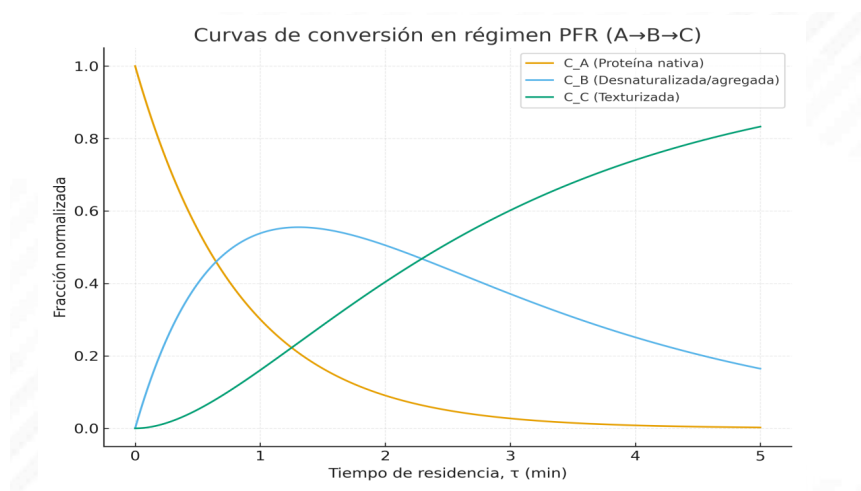


Figura 2. Familias de curvas de conversión C_A , C_B y C_C simuladas en régimen PFR.

Fuente: Elaboración propia, mediante simulación teórica en MATLAB.

Influencia de la composición y la humedad de alimentación

Las proporciones de mezcla quinua/soya y el contenido de humedad de alimentación influyen significativamente en las propiedades fisicoquímicas y estructurales del extrudado. Con una formulación de 70 % de soya y 30 % de quinua se obtiene una

textura más fibrosa y cohesiva, mientras que mezclas con 60 % de quinua y 40 % de soya producen una estructura más expandida y crocantes.

La humedad, por su parte, regula la densidad aparente, el índice de expansión y la dureza instrumental del producto. A valores inferiores al 18 %, la mezcla presenta elevada viscosidad y flujo inestable, lo que puede provocar desgarros internos y defectos de superficie. En cambio, cuando supera el 25 %, el material tiende a perder cohesión y reduce su capacidad de expansión. El intervalo óptimo se sitúa entre 20 y 24 %, rango que equilibra la plastificación con la estabilidad de la orientación molecular.

Tabla 1. Proporción quinua/soya, humedad Vs. propiedades físicas del extrudado.

Proporción Quinua/Soya (% p/p)	Humedad de alimentación (%)	Densidad aparente (g/cm ³)	Índice de expansión (-)	Dureza instrumental (N)	Observaciones texturales
60/40	18	0,42	3,8	28	Alta expansión, textura crujiente.
60/40	21	0,46	3,2	35	Expansión moderada, estructura homogénea.
60/40	24	0,52	2,8	42	Textura más densa y cohesiva.
70/30	18	0,48	3,0	40	Buena fibra, ligera expansión.
70/30	21	0,54	2,6	48	Fibra continua, textura firme.
70/30	24	0,60	2,3	56	Estructura compacta, baja expansión.

Fuente: Elaboración propia.

Consideraciones sobre la texturización proteica

La texturización proteica durante la extrusión no corresponde únicamente a un fenómeno térmico, sino a un proceso jerárquico de reorganización molecular inducido por cizalla, caracterizado por la desnaturalización, despolimerización parcial, agregación orientada y re-estabilización de ensamblajes supramoleculares. En condiciones de humedad intermedia o alta, las proteínas de quinua y soya experimentan una transición progresiva desde estructuras globulares compactas hacia cadenas flexibles parcialmente desplegadas, lo que incrementa la accesibilidad de dominios hidrofóbicos y grupos reactivos capaces de establecer nuevas interacciones intermoleculares.

La aplicación de una tasa de cizalla controlada durante el flujo a través del barril y la matriz induce la orientación axial de estas cadenas desplegadas, generando micelas elongadas, fibrillas protofilamentosas y redes anisotrópicas, responsables de la textura fibrosa característica de los texturizados de alta humedad (Zhang et al., 2020; Zink et al., 2024). Esta orientación es altamente dependiente del gradiente de velocidad entre tornillo y matriz: cizallas insuficientes generan agregados isotrópicos y estructuras granulares, mientras que cizallas excesivas provocan ruptura de filamentos y pérdida de anisotropía (Sui et al., 2024).

Durante este proceso, las proteínas de soya (particularmente glicinina y β -conglucina) forman nuevas redes estabilizadas por puentes disulfuro, interacciones hidrofóbicas y uniones no covalentes específicas, las cuales evolucionan dinámicamente bajo la combinación de calor y deformación (Huang et al., 2024). En paralelo, las proteínas de quinua—ricas en albúminas y globulinas—aportan flexibilidad estructural, aumentando la capacidad de formación de redes híbridas al mezclarse con las fracciones proteicas de mayor tamaño molecular provenientes de la soya.

Asimismo, los almidones de quinua gelatinizados actúan como matriz de soporte, rellenando espacios intersticiales entre agregados proteicos orientados y reforzando la cohesión mecánica durante el enfriamiento y secado. Su contribución a la fase continua no solo estabiliza la estructura fibrosa, sino que también disminuye la migración de agua y la deformación estructural post-extrusión (Pöri et al., 2023). Esta combinación de una fase proteica orientada y una fase polisacáridica de soporte explica la resiliencia mecánica y la mordida similar a la carne en extrudados de alta humedad.

En conjunto, la evidencia reciente confirma que la texturización es un proceso de autoensamblaje dirigido por fluido (“flow-induced self-assembly”), donde la orientación molecular ocurre en ventanas específicas de temperatura (95–150 °C), humedad (40–70 %) y cizalla, generando arquitecturas fibrilares jerárquicas semejantes a haces de miofibrillas vegetales (Sui et al., 2024; Zhang et al., 2020). Esta comprensión molecular avanzada permite optimizar parámetros operativos de extrusión con un enfoque predictivo para el diseño de texturizados andinos de quinua-soya con propiedades funcionales superiores.

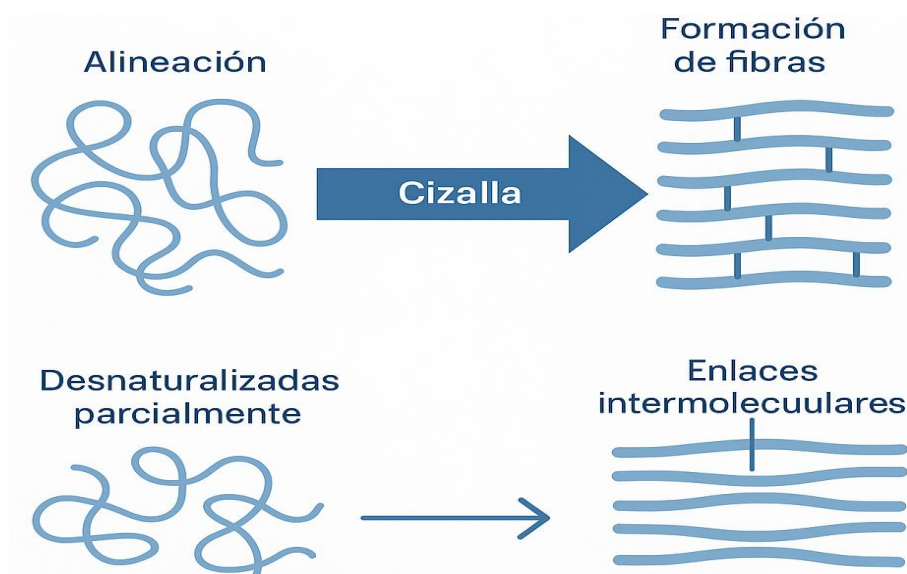


Figura 3. Mecanismo de orientación y texturización de proteínas vegetales bajo cizalla

Fuente: Elaboración propia.

Además de los mecanismos descritos, recientes estudios en extrusión de alta humedad muestran que la reorganización molecular ocurre en tres niveles jerárquicos de ensamblaje: (1) reordenamiento intramolecular, (2) agregación intermolecular orientada y (3) estabilización supramolecular en forma de fibras continuas. En la primera etapa, el incremento de la temperatura y la plasticización por agua generan una transición vítrea-gomosa que facilita el despliegue parcial de dominios globulares. Este estado viscoelástico intermedio permite que las cadenas polipeptídicas, antes compactas, adopten configuraciones más extendidas y reactivas frente al gradiente de cizalla (Schmid et al., 2022).

En la segunda etapa, la deformación inducida por flujo genera alineamiento cooperativo de estas cadenas desplegadas a lo largo del eje del extrusor. Este fenómeno, conocido como flow-induced alignment, produce protofibrillas que evolucionan hacia haces de mayor diámetro según la intensidad de la deformación y el tiempo de residencia. Zink et al. (2024) demostraron que, bajo regímenes de cizalla moderados, la densidad de fibrillas aumenta significativamente, generando microdominios orientados que mejoran la elasticidad y resistencia del material extrusionado.

La tercera etapa implica la estabilización de las redes formadas, influida por puentes disulfuro, interacciones hidrofóbicas, enlaces electrostáticos y asociaciones no covalentes específicas. En el caso de la soya, la glicinina presenta alta capacidad de formar estructuras tipo gel bajo cizalla, mientras que la β -conglucina contribuye a la flexibilidad y cohesión interna, facilitando la continuidad fibrilar (Huang et al., 2024). Cuando estas fracciones

se combinan con las proteínas de quinua, se obtiene una matriz híbrida en la que las proteínas andinas, más pequeñas y solubles, se intercalan entre agregados de mayor tamaño, potenciando la uniformidad de la red.

A nivel polisacarídico, los almidones de quinua gelatinizados interactúan físicamente con las fases proteicas orientadas, actuando como una fase continua que distribuye la humedad, amortigua tensiones locales y evita la ruptura prematura de fibrillas durante la salida por la matriz. Este comportamiento ha sido comparado con sistemas compuestos tipo “fibra-matriz”, donde la proteína orientada representa los refuerzos y el almidón cumple la función estructural de soporte (Pöri et al., 2023).

Finalmente, la integración de estos mecanismos confirma que la texturización proteica en extrusión es un proceso emergente altamente dependiente de la sinergia temperatura-humedad-cizalla, donde cada parámetro define el grado de orientación molecular y, por tanto, la calidad de la textura final. Una comprensión más precisa de este ensamblaje molecular inducido por flujo permite optimizar formulaciones de quinua-soya con propiedades reológicas predecibles, mejorar la reproducibilidad industrial y desarrollar análogos cárnicos andinos con fibras más estables, resistencia mecánica incrementada y una “mordida” sensorialmente más cercana a la carne (Sui et al., 2024; Zhang et al., 2020).

Implicaciones industriales y de sostenibilidad

La extrusión conjunta de quinua y soya ofrece un alto potencial para análogos cárnicos, snacks nutritivos y bases proteicas. Permite usar materias primas locales, reducir la huella de carbono y fortalecer cadenas agroindustriales sostenibles.

En el ámbito industrial, diversos estudios, Pérez-Carrillo et al. (2018) destacan que las proteínas vegetales texturizadas pueden sustituir eficazmente fuentes animales, impulsando dietas sostenibles y productos de alto valor agregado.

De acuerdo con la FAO (2021), el aprovechamiento de materias primas locales en sistemas sostenibles contribuye a reducir la huella ambiental y fortalecer las cadenas agroalimentarias regionales.

Desde una perspectiva aplicada, la extrusión de quinua y soya ofrece un alto potencial para la producción de análogos cárnicos, snacks nutritivos y bases proteicas adaptables a la industria alimentaria latinoamericana.

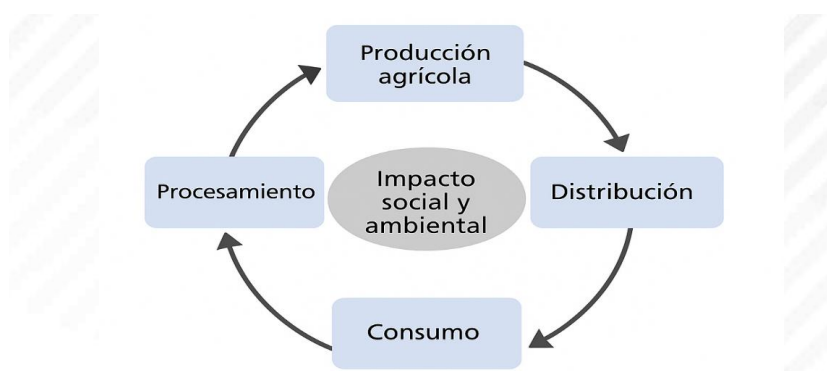


Fig. 4: Cadena de valor y sostenibilidad tecnológica del proceso.

Fuente: Elaboración propia.

En Bolivia, el proceso permite utilizar materias primas locales, reduciendo costos de importación y huella de carbono. Además, su escalamiento puede integrarse con líneas de secado, molienda y envasado existentes en plantas agroindustriales.

El enfoque de modelado PFR proporciona una herramienta de predicción útil para el diseño de extrusores, la optimización de parámetros operativos y la evaluación energética del sistema, sirviendo como punto de partida para simulaciones futuras en COCO, DWSIM o MATLAB.

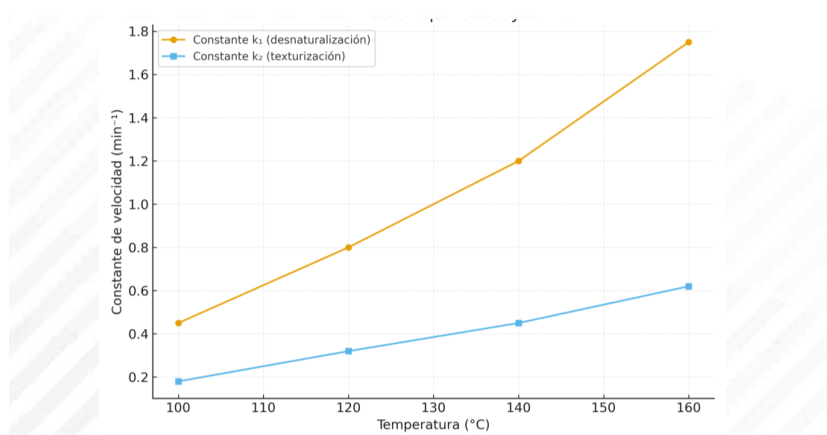


Figura 5. Evolución de las constantes cinéticas del modelo PFR

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

El estudio integró los fundamentos tecnológicos, fisicoquímicos, reológicos y moleculares del proceso de extrusión conjunta de quinua y soja, demostrando que la sinergia composicional y la dinámica térmico-mecánica del sistema permiten obtener texturizados proteicos de alta calidad estructural. La revisión de literatura, junto con el modelado cinético $A \rightarrow B \rightarrow C$ aplicado en

un marco de reactor de flujo pistón (PFR), confirma que la texturización no es únicamente consecuencia de la desnaturalización térmica, sino de un fenómeno complejo de reorganización molecular inducida por cizalla controlada, humedad óptima y alineamiento progresivo de cadenas proteicas.

En términos estructurales, se evidencia que la combinación de las globulinas de soya con las proteínas y almidones de quinua favorece la formación de redes anisotrópicas estables. La presencia de almidones parcialmente gelatinizados contribuye adicionalmente a la cohesión de la matriz, actuando como agente de soporte durante la orientación molecular y estabilizando la textura durante el secado y almacenamiento. Este hallazgo respalda la importancia de considerar la interacción proteína-carbohidrato en el diseño de formulaciones para análogos cárnicos de origen vegetal.

Los análisis derivados del modelo PFR muestran que la conversión proteica hacia estructuras texturizadas (C) depende críticamente del régimen térmico y mecánico. La velocidad de reacción, dominada por la ecuación de Arrhenius para k_1 (desnaturalización) y k_2 (texturización), se maximiza en intervalos de 140–160 °C, humedades de 20–24 % y energía específica de extrusión suficiente para promover orientación sin degradación. Estas condiciones permiten identificar ventanas operativas robustas que pueden ser empleadas en simulaciones futuras y estudios experimentales.

Desde una perspectiva aplicada, la extrusión conjunta de quinua y soya representa una alternativa viable y estratégica para la diversificación productiva en la región andina. Su implementación permite el desarrollo de ingredientes texturizados con alto valor nutricional, bajo costo relativo y baja huella ambiental, alineándose con políticas de soberanía alimentaria y con tendencias globales hacia productos basados en plantas. La articulación entre modelado cinético, análisis estructural y diseño de parámetros operativos ofrece un marco sólido para la transferencia tecnológica hacia plantas piloto y líneas de producción.

Finalmente, se reconocen como líneas futuras de investigación: (i) validar experimentalmente el modelo PFR mediante perfiles térmicos y reológicos en extrusores de doble tornillo; (ii) aplicar técnicas avanzadas de caracterización estructural como SAXS, SEM y análisis de anisotropía mecánica; y (iii) desarrollar simulaciones dinámicas mediante plataformas CAPE-OPEN con integración de balances de energía y modelos no isotérmicos. Estas proyecciones permitirán consolidar un enfoque ingenieril integral para el aprovechamiento sostenible de materias primas andinas en la elaboración de alimentos proteicos de nueva generación.

Referencias

- Aguilera, J. M. (2018). Understanding food structure and behavior during processing: Advances and perspectives. *Journal of Food Engineering*, 222, 3–16. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.11.012>
- Álvarez-Martínez, L., Kondury, K. P., & Harper, J. M. (1988). A general model for expansion of extruded products. *Journal of Food Science*, 53(2), 609–615. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1988.tb07768.x>
- Anderson, R. A., Conway, H. F., Pfeifer, V. F., & Griffin, E. L. (1969). Gelatinization of corn grits by roll- and extrusion-cooking. *Cereal Science Today*, 14(1), 4–11. <https://www.aaccnet.org/publications/cc/1969/Documents/CC1969a04.html>
- Berrios, J. de D. J., Morales, P., Cámara, M., & Sánchez-Mata, M. C. (2013). Effect of extrusion cooking on the nutritional value and quality of legume-based snacks. *Food Chemistry*, 139(1–4), 873–879. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.01.078>
- Bouasla, A., Wójtowicz, A., & Zidoune, M. N. (2017). Physical properties and microstructure of corn-legume extrudates: Effect of feed moisture and extrusion temperature. *Journal of Food Science and Technology*, 54(9), 2854–2864. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2721-8>
- Cheftel, J. C. (1986). Protein texturization by extrusion cooking. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 24(1), 69–114. <https://doi.org/10.1080/10408398609527449>
- Day, L., Xu, M., Lundin, L., & Small, D. M. (2022). High-moisture extrusion of plant proteins: Structure formation and product design. *Trends in Food Science & Technology*, 127, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.06.003>
- Fang, Y., Zhang, Y., & Zhang, L. (2023). Recent advances in protein denaturation and aggregation during extrusion. *Food Hydrocolloids*, 137, 108388. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108388>
- FAO. (2021). Sustainable food systems: Principles and framework. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/cb9465en/cb9465en.pdf>
- Fellows, P. (2022). *Food Processing Technology: Principles and Practice* (5th ed.). Woodhead Publishing.
- Harper, J. M. (1981). *Extrusion of Foods: Vol. II*. CRC Press.
- Huang, Y., Liu, L., Sun, B., & Zhu, X. (2024). Harnessing soy proteins in the manufacture of healthy foods through extrusion: A comprehensive review. *Foods*, 13(14), 2215. <https://doi.org/10.3390/foods13142215>

- Ilo, S., Liu, Y., & Berghofer, E. (1999). Effect of moisture content and extrusion temperature on the functional properties of extruded soy flour. *Journal of Food Engineering*, 38(4), 369–379. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(98\)00174-3](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00174-3)
- Mishra, P., & Ray, R. (2016). Thermal kinetics of protein denaturation and its role in extrusion. *Journal of Food Process Engineering*, 39(5), 457–469. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12364>
- Moraru, C. I., & Kokini, J. L. (2003). The structure and texture of extruded products as affected by processing conditions and molecular structure: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 43(5), 353–377. <https://doi.org/10.1080/10408690390826518>
- Pérez-Carrillo, E., Serna-Saldívar, S. O., & Riaz, M. N. (2018). Texturized vegetable proteins for sustainable diets. *Cereal Foods World*, 63(4), 173–181. <https://doi.org/10.1094/CFW-63-4-0173>
- Pöri, H., et al. (2023). Structure, texture, and sensory properties of plant-based meat analogs produced by high-moisture extrusion. *Journal of Food Engineering*, 343, 111380. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111380>
- Riaz, M. N. (2019). *Extrusion Problems Solved: Food, Feed, and Industrial Applications* (2nd ed.). Woodhead Publishing.
- Schmid, E. M., Weiss, J., & Gibis, M. (2022). High-moisture extrusion cooking of meat analogs: A review of mechanisms, structure, and texture. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(5), 4165–4192. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13030>
- Singh, B., Kumar, R., & Kaur, R. (2021). Sustainability in food extrusion: A review. *Food Reviews International*, 37(5), 485–507. <https://doi.org/10.1080/87559129.2019.1630650>
- Sui, X., Zhang, T., Zhang, X., & Jiang, L. (2024). High-moisture extrusion of plant proteins: Fundamentals of texturization and applications. *Annual Review of Food Science and Technology*, 15, 125–149. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-072023-034346>
- Toledo, R. T., & Singh, R. K. (2017). *Fundamentals of Food Process Engineering* (4th ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-39315-2>
- Vilcacundo, R., & Hernández-Ledesma, B. (2017). Nutritional and bioactive properties of quinoa. *Food & Function*, 8(6), 2215–2240. <https://doi.org/10.1039/C7FO00262B>
- Zhang, Y., Fang, Y., & Zheng, J. (2020). Molecular orientation and fibrous texture formation in plant protein extrudates. *Food Hydrocolloids*, 105, 105755. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105755>

- Zink, J. I., et al. (2024). Structural and mechanical anisotropy in plant-based meat analogues produced using high-moisture extrusion cooking. *Food Research International*, 180, 113284. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.113284>
- Zhu, Y., & Riaz, M. N. (2022). Modeling of protein texturization during extrusion. *Journal of Food Engineering*, 317, 110832. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110832>

CAPÍTULO XVII

Revisión teórica del método Folin-Ciocalteu en la cuantificación de compuestos fenólicos en cañahua (*Chenopodium pallidicaule*): alcances y proyecciones industriales

Carlos Díaz Mercado

Universidad Mayor de San Andrés

<https://orcid.org/0009-0009-9956-9371>

Revisión teórica del método Folin-Ciocalteu en la cuantificación de compuestos fenólicos en cañahua (*Chenopodium pallidicaule*): alcances y proyecciones industriales

Resumen

Este artículo de revisión examina de manera crítica el método Folin-Ciocalteu (F-C) como procedimiento analítico para la cuantificación de compuestos fenólicos en la cañahua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen), un pseudocereal andino de creciente relevancia en la ingeniería industrial de alimentos funcionales. El análisis se desarrolla considerando los fundamentos químicos del reactivo Folin-Ciocalteu, su mecanismo redox, la sensibilidad frente a interferencias y su aplicabilidad específica en matrices vegetales ricas en antioxidantes. A partir de literatura reciente (2020–2025), se identifican los avances y limitaciones del método cuando se emplea para determinar fenoles totales en pseudocereales, enfatizando la necesidad de estandarizaciones que permitan comparabilidad interlaboratorial y validación en procesos productivos a escala industrial.

El artículo profundiza en la naturaleza de la cañahua como fuente de compuestos bioactivos, especialmente polifenoles con actividad antioxidante, y revisa cómo el método F-C ha permitido caracterizar su potencial nutracéutico. Asimismo, se aborda la evolución histórica del método, sus fortalezas como técnica accesible, rápida y ampliamente reproducible, y sus debilidades, entre ellas la susceptibilidad a interferencias provenientes de proteínas, azúcares reductores y vitamina C. Esta evaluación permite comprender el grado de confiabilidad del método en investigaciones que buscan valorizar alimentos funcionales derivados de pseudocereales andinos.

Los resultados de la revisión muestran que, pese a sus limitaciones, el método Folin-Ciocalteu continúa siendo una herramienta robusta para estimar fenoles totales en cañahua, especialmente cuando se aplica bajo condiciones controladas de extracción, calibración y estandarización. Las conclusiones destacan que los compuestos fenólicos presentes en la cañahua no solo aportan importantes beneficios antioxidantes, sino que también influyen en su funcionalidad tecnológica durante la formulación y procesamiento de alimentos nutracéuticos. En consecuencia, se subraya la necesidad de estudios integrales que conecten

la producción, la caracterización fitoquímica y la evaluación de bioaccesibilidad, a fin de consolidar a la cañahua como recurso estratégico en la industria de alimentos funcionales.

Palabras clave: Cañahua, Folin-Ciocalteu, fenoles totales, pseudocereal, antioxidantes.

Theoretical review of the Folin-Ciocalteu method for quantifying phenolic compounds in cañahua (*Chenopodium pallidicaule*): scope and industrial projections

Abstract

This review article critically examines the Folin-Ciocalteu (F-C) method as an analytical procedure for quantifying phenolic compounds in cañahua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen), an Andean pseudocereal of growing importance in the industrial engineering of functional foods. The analysis is developed considering the chemical principles of the Folin-Ciocalteu reagent, its redox mechanism, its sensitivity to interferences, and its specific applicability in antioxidant-rich plant matrices. Based on recent literature (2020–2025), the advances and limitations of the method are identified when used to determine total phenols in pseudocereals, emphasizing the need for standardizations that allow for interlaboratory comparability and validation in industrial-scale production processes.

The article delves into the nature of cañahua as a source of bioactive compounds, especially polyphenols with antioxidant activity, and reviews how the F-C method has allowed for the characterization of its nutraceutical potential. This review also addresses the historical evolution of the method, its strengths as an accessible, rapid, and widely reproducible technique, and its weaknesses, including susceptibility to interference from proteins, reducing sugars, and vitamin C. This evaluation allows for an understanding of the method's reliability in research seeking to valorize functional foods derived from Andean pseudocereals. The review results show that, despite its limitations, the Folin-Ciocalteu method remains a robust tool for estimating total

phenols in cañahua, especially when applied under controlled extraction, calibration, and standardization conditions. The conclusions highlight that the phenolic compounds present in cañahua not only provide significant antioxidant benefits but also influence its technological functionality during the formulation and processing of nutraceutical foods. Consequently, the need for comprehensive studies connecting production, phytochemical characterization, and bioaccessibility assessment is emphasized in order to consolidate cañahua as a strategic resource in the functional food industry.

Keywords: Cañahua, Folin-Ciocalteu, total phenols, pseudocereal, antioxidants.

Revisão teórica do método Folin-Ciocalteu para quantificação de compostos fenólicos em cañahua (*Chenopodium pallidicaule*): escopo e projeções industriais

Resumo

Este artigo de revisão examina criticamente o método de Folin-Ciocalteu (F-C) como um procedimento analítico para quantificar compostos fenólicos na cañahua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen), um pseudocereal andino de crescente importância na engenharia industrial de alimentos funcionais. A análise é desenvolvida considerando os princípios químicos do reagente de Folin-Ciocalteu, seu mecanismo redox, sua sensibilidade a interferências e sua aplicabilidade específica em matrizes vegetais ricas em antioxidantes. Com base na literatura recente (2020–2025), os avanços e as limitações do método são identificados quando utilizado para determinar fenóis totais em pseudocereais, enfatizando a necessidade de padronizações que permitam a comparabilidade interlaboratorial e a validação em processos de produção em escala industrial.

O artigo aprofunda-se na natureza da cañahua como fonte de compostos bioativos, especialmente polifenóis com atividade antioxidante, e revisa como o método F-C tem permitido a caracterização de seu potencial nutracêutico. Esta revisão também

aborda a evolução histórica do método, seus pontos fortes como uma técnica acessível, rápida e amplamente reprodutível, e suas limitações, incluindo a suscetibilidade à interferência de proteínas, açúcares redutores e vitamina C. Esta avaliação permite compreender a confiabilidade do método em pesquisas que buscam valorizar alimentos funcionais derivados de pseudoce-reais andinos.

Os resultados da revisão mostram que, apesar de suas limitações, o método de Folin-Ciocalteu permanece uma ferramenta robusta para estimar fenóis totais na cañahua, especialmente quando aplicado sob condições controladas de extração, calibração e padronização. As conclusões destacam que os compostos fenólicos presentes na cañahua não apenas proporcionam benefícios antioxidantes significativos, mas também influenciam sua funcionalidade tecnológica durante a formulação e o processamento de alimentos nutracêuticos. Conseqüentemente, enfatiza-se a necessidade de estudos abrangentes que conectem produção, caracterização fitoquímica e avaliação da bioacessibilidade, a fim de consolidar a cañahua como um recurso estratégico na indústria de alimentos funcionais.

Palavras chave: Cañahua, Folin-Ciocalteu, fenóis totais, pseudo-cereal, antioxidantes.

Introducción

En el contexto actual de interés creciente por los alimentos funcionales y los cultivos de alto valor añadido, el pseudocereal andino cañahua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen) destaca como recurso emergente debido a su adaptabilidad al altiplano, su composición nutricional y su potencial fitoquímico.

Diversos estudios han identificado en la cañahua una concentración relevante de compuestos fenólicos que le confieren actividad antioxidante, lo cual abre oportunidades para su aprovechamiento industrial como ingrediente funcional (Peñarrieta et al., 2008). En este marco, resulta imprescindible disponer de métodos analíticos fiables y bien validados para la cuantificación de dichos compuestos fenólicos.

El método del reactivo Folin Ciocalteu assay se ha convertido en un estándar analítico para estimar la “cantidad total de compuestos fenólicos” en matrices vegetales y alimentarias

(Singleton, Orthofer & Lamuela-Raventós, 1999). No obstante, su aplicación exige una comprensión profunda de sus fundamentos analíticos, sus limitaciones intrínsecas como la reactividad frente a otros agentes reductores no fenólicos y su pertinencia para la matriz específica de la cañahua.

Este estudio revisará de forma integral el método Folin Ciocalteu, analizará la bibliografía relacionada con la especie cañahua, indagará en los retos metodológicos de su cuantificación en esta matriz y explorará las implicaciones industriales que pueden derivarse de su empleo eficaz en el control de calidad, en la valorización de subproductos y en el desarrollo de alimentos funcionales. Los alcances de esta revisión incluirán la estandarización metodológica, la validación interna y externa del método para cañahua, así como la identificación de brechas de conocimiento que condicionan su escalado industrial. Asimismo, se proyectará la traducción del conocimiento hacia la industria alimentaria andina y global, vislumbrando escenarios en los que la cuantificación precisa de fenólicos permita optimizar procesos, certificaciones nutricionales, etiquetado funcional y posicionamiento de cañahua como ingrediente diferenciado.

Mediante un enfoque de revisión y crítica, este trabajo permitirá consolidar un marco referencial para investigadores, productores e industriales interesados en la cañahua y en la medición de compuestos fenólicos, y contribuirá al fortalecimiento del nexo entre ciencia analítica y desarrollo agroalimentario, en particular en ambientes de altitud y en economías con culturas de granos andinos.

Metodología de revisión

La presente investigación se desarrolló bajo el enfoque cualitativo-documental, mediante una revisión teórica aplicada, orientada a sistematizar el conocimiento actual sobre el método Folin-Ciocalteu y su aplicabilidad en la cuantificación de compuestos fenólicos en cañahua (*Chenopodium pallidicaule*), desde la perspectiva de la ingeniería industrial en alimentos funcionales.

El estudio es de tipo no experimental, descriptivo-explicativo y de corte transversal. La técnica utilizada fue el análisis documental sistemático, basado en la revisión de artículos científicos indexados en bases de datos reconocidas como Scopus, Web of Science (WOS), SciELO, y Latindex, publicados entre los años 2020 y 2025.

Como instrumento metodológico se utilizó una matriz de análisis bibliográfico, la cual permitió organizar, comparar e interpretar los hallazgos teóricos y empíricos sobre el contenido fenólico en cañahua, el uso del método F-C y su proyección industrial.

Los criterios de inclusión consideraron investigaciones que aborden: (a) el análisis de compuestos fenólicos en cañahua o pseudocereales; (b) la utilización del método Folin-Ciocalteu; (c) aplicaciones en alimentos funcionales; y (d) implicancias para procesos industriales o control de calidad. Por otro lado, se excluyeron fuentes no académicas, artículos sin metodología verificable, investigaciones con muestras animales o clínicas, y aquellos que no incluyeran parámetros analíticos comparables.

Esta metodología permitió construir una visión crítica e integradora del estado del arte, identificando vacíos metodológicos y oportunidades de mejora desde un enfoque técnico-industrial.

Fundamentos Teóricos del Método Folin-Ciocalteu

La metodología Folin-Ciocalteu se ha establecido como una herramienta clave en la industria de alimentos, específicamente para medir el contenido de compuestos fenólicos en productos tales como el vino, aceites y extractos de plantas (Zhang et al., 2021). Además, ha resultado ser vital no solo para evaluar la calidad de los productos, sino también sus propiedades antioxidantes, que son esenciales para proteger contra el estrés oxidativo y degradación de los alimentos (Cádiz-Gurrea et al., 2020).

Las aplicaciones del método también se extienden a investigación e innovación en la ciencia y tecnología de alimentos, en la que se estudian las propiedades antioxidantes de productos naturales, para el desarrollo de productos funcionales (Kandyliari et al., 2023). Además, el interés por los compuestos fenólicos ha crecido en el ámbito de la salud pública, dado que hay pruebas que sugieren que su consumo puede tener efectos positivos y beneficiosas en enfermedades crónicas (Stabili et al., 2023). Sin embargo, dado que las matrices alimentarias son diversas y complejas, es vital continuar investigando en adaptaciones y mejoras del método para garantizar la exactitud y fiabilidad de los resultados obtenidos en la cuantificación de fenólicos (Domínguez-López et al., 2023).

El método Folin-Ciocalteu, fue desarrollado en la década de 1920 por Otto Folin y Vintila Ciocalteu, es una metodología analítica clave para la cuantificación de compuestos fenólicos en diversas matrices, como alimentos y extractos de plantas. Este método se basa en la capacidad de los fenoles para reducir el reactivo de Folin-Ciocalteu, un compuesto que genera un color azul en solución en presencia de estos compuestos.

La razón por la que el método Folin-Ciocalteu es ampliamente aplicado, no solo radica en su, fácil adaptabilidad y simplicidad. En un principio el método fue aplicado en la medición de

polifenoles en el vino, pero su uso se extendió a una variedad de productos naturales, alimenticios y agrícolas (Zhou et al., 2020). Empero, su constante evolución y optimización han asegurado su importancia en la evaluación de antioxidantes naturales en la industria de alimentos (Luaces et al., 2021).

El fundamento químico detrás del método Folin-Ciocalteu que involucra reacciones ox-red (oxidación-reducción) entre los fenoles presentes en la muestra y el reactivo de Folin-Ciocalteu, que contiene un catión molibdo-tungstato. Esta reacción lleva a la formación de un complejo azul que se mide mediante espectrofotometría UV-visible a una longitud de onda de aproximadamente 765 nm (Zhou et al., 2020). Los fenoles actúan como agentes reductores, transforman la forma oxidada del reactivo en una forma con mayor nivel de absorbancia, lo que permite una correlación directa entre la intensidad del color y la concentración de fenoles totales en la muestra.

En resumen, la metodología método Folin-Ciocalteu no solo ha sido importante en el desarrollo de técnicas analíticas, sino que sigue teniendo un rol fundamental en la investigación actual sobre la salud y alimentación, resaltando la importancia de compuestos fenólicos. Los avances en este campo podrían tener un impacto significativo en el desarrollo de alimentos nutraceuticos con importantes beneficios para la salud.

Aplicación industrial de Folin - Ciocalteu en cañahua y pseudocereales

Diversos estudios han empleado el método F-C en quinoa y cañahua, reportando concentraciones variables de fenoles totales. (Kim et al., 2023) y (Ortiz-Sempértegui et al., 2024) analizaron cultivares andinos con alta actividad antioxidante. No obstante, las condiciones de extracción, solventes y tiempos varían ampliamente, afectando la reproducibilidad de resultados y su comparabilidad interlaboratorios.

Desde una perspectiva industrial, el método F-C representa una herramienta práctica para la evaluación rápida del contenido fenólico total, particularmente útil en etapas de selección de materias primas, validación de lotes, y control de calidad durante el procesamiento. En la industria de alimentos funcionales, donde la bioactividad es un atributo valorado, contar con un método que proporcione un parámetro cuantificable, como el contenido de fenoles totales (mg GAE/g), permite establecer criterios de aceptación y monitoreo de calidad. Por ejemplo, en la fabricación de barras energéticas, harinas enriquecidas o snacks saludables con cañahua, el método F-C puede ser integrado como parte del

sistema de aseguramiento de calidad para garantizar un aporte constante de compuestos bioactivos.

Asimismo, en entornos de desarrollo e innovación de productos, este método permite realizar comparaciones entre variedades, tratamientos térmicos, métodos de extrusión y almacenamiento, observando el impacto sobre el contenido fenólico. En este sentido, la aplicación de F-C no solo tiene un rol en control, sino también en el diseño de procesos. La industria puede aplicar este método para optimizar condiciones de producción que maximicen la retención de fenoles (temperatura, humedad, tiempo de procesamiento), apoyando decisiones de ingeniería basadas en evidencia funcional.

No obstante, para su uso efectivo, es crucial desarrollar protocolos estandarizados y validados para la matriz cañahua. Esto incluye la elección del solvente de extracción (agua, metanol, etanol), tiempos de incubación, concentración del reactivo F-C, curva de calibración con ácido gálico y definición clara de unidades de medida. La validación de estos parámetros permitiría reducir la variabilidad entre lotes, facilitar la trazabilidad y generar confianza en mercados funcionales y nutracéuticos. También es relevante implementar controles cruzados con técnicas cromatográficas (HPLC) para verificar la exactitud del método F-C en contextos industriales.

Limitaciones metodológicas y desafíos industriales

Desde el punto de vista de la ingeniería de alimentos, las principales limitaciones del método F-C en contexto industrial incluyen:

1. Reacciones con compuestos no fenólicos.
2. Alta variabilidad según solvente y matriz.
3. Ausencia de validación bajo normas industriales (precisión, exactitud, linealidad).
4. Baja correlación con la funcionalidad nutracéutica real del producto procesado.

Potencial funcional de los compuestos fenólicos de la cañahua

La cañahua ha sido reconocida como pseudocereal andino con elevado valor nutricional y bioactivo. En el estudio de (Peñarrieta et al., 2008) se reportó que esta especie contenía entre 12,4 y 71,2 μmol equivalentes de ácido gálico por gramo en base seca (μmol GAE/g DS) de compuestos fenólicos totales, y flavonoides entre 2,2 y 11,4 μmol de equivalente catequina/g DS. Además, el análisis por HPLC permitió identificar ocho compuestos mayoritarios: catequina, catequina galoato, ácido vanílico, kaempferol,

ácido ferúlico, quercetina, resorcinol y 4 metilresorcinol. Tales resultados permiten sostener que la cañahua posee una carga fenólica significativa, lo cual abre posibilidades funcionales para la industria alimentaria, nutracéutica y de ingredientes funcionales.

Desde la perspectiva funcional, los compuestos fenólicos cumplen varios roles clave: capacidad antioxidante, acción antiinflamatoria, posibilidad de modulaciones metabólicas (inhibición de enzimas digestivas, efectos sobre la glicemia) y la contribución a la estabilidad del alimento frente a oxidación. Aunque en muchos casos los estudios se han centrado en la actividad *in vitro*, su traducción al sistema industrial requiere evaluar las matrices alimentarias, las interacciones con otros componentes, la bioaccesibilidad/bioactividad real y la viabilidad de escalado.

Un reciente estudio de (Dong Seok Kim et al., 2023) evaluó cañahua (kaniwa) y encontró que, además de la buena composición de ácidos grasos, presentó propiedades antioxidantes y antidiabéticas, y el desarrollo de una mousse amigable para personas mayores donde la harina de cañahua fue incorporada. Esto evidencia que los compuestos fenólicos de la cañahua tienen aplicaciones que trascienden el grano como tal, hacia formulaciones funcionales.

En resumen, la combinación elevada de fenólicos, la adaptabilidad agronómica de la cañahua en altiplano y su potencial como ingrediente transformado constituyen una base sólida para su aprovechamiento industrial.

Aplicaciones industriales y estrategias de valorización

Desde la óptica industrial, el uso de los compuestos fenólicos de la cañahua puede contemplarse en varios frentes:

Ingrediente funcional en alimentos

La inclusión de harina o extractos de cañahua en productos de panificación, barras energéticas, mezclas libres de gluten, preparados para nutrición especializada (para adultos mayores) representa una opción viable. Como referencia, la cañahua ha sido ya utilizada en extruidos y harinas, donde la fracción de salvado mostró elevada actividad fenólica. (Repo-Carrasco et. al., 2009)

Ingrediente para estabilización oxidativa

Los fenólicos pueden actuar como antioxidantes naturales para preservar lípidos, aromas, colores en alimentos o ingredientes funcionales. En este sentido, la identificación de moléculas como kaempferol, quercetina o resorcinoles en la cañahua abre la ventana para usos de tipo conservante natural, o como ingrediente antioxidante en fórmulas innovadoras.

Extracción y fraccionamiento para nutraceuticos y cosméticos

En la medida en que se logre optimizar la extracción de compuestos fenólicos de la cañahua, se puede plantear su uso en nutraceuticos, suplementos (siempre respetando marco normativo), e incluso cosméticos, como ha comenzado a evaluarse para el aceite de cañahua en formulaciones cosméticas. (Del Carpio et. al., 2023)

Aprovechamiento de sub productos

La industria de la cañahua puede generar subproductos (por ejemplo, brans, extruidos, harinas de descarte) ricos en fenólicos. Aprovechar estas corrientes secundarias para extraer fenoles o agregarlos a ingredientes funcionales representa una ventaja competitiva y de sostenibilidad. En el estudio de (Peñarrieta et al., 2008) el bran presentó concentraciones significativas.

Retos críticos para la industrialización

A pesar del elevado potencial, existen varios desafíos que deben considerarse críticamente:

Variabilidad agronómica y composición

La composición fenólica puede variar significativamente según variedad, altitud, condiciones de cultivo, procesamiento previo, color del grano, etc. (Moscoso Mujica et al., 2024) puntualizan que, aunque la cañahua muestra alto contenido de fenoles, las diferencias entre accesiones limitan la estandarización técnica. Esta variabilidad representa un riesgo para la industria que busca reproducibilidad y trazabilidad.

Eficiencia de extracción y forma funcional

El rendimiento y selectividad de la extracción de compuestos fenólicos afectan el costo beneficio industrial. La mayoría de los estudios aún se concentran en laboratorio. Hacen falta desarrollos tecnológicos que permitan extracción a escala, de forma ecológica y rentable, así como su integración en líneas de producción. Además, hay que asegurar que la forma funcional del fenol (ligado vs libre) sea apta para el uso industrial.

Bioaccesibilidad, estabilidad durante procesamiento y matriz alimentaria

La incorporación de compuestos fenólicos en alimentos funcionales no garantiza su acción biológica en el producto final. Los fenoles pueden degradarse, reaccionar con otros ingredientes, perderse durante la cocción o extrusión. En estudios de extruidos de cañahua, la funcionalidad del grano fue buena, pero no

se exploró extensamente la estabilidad de los fenoles durante el procesamiento. (Repo-Carrasco et. al., 2009) Esto exige que la industria evalúe la transferencia de actividad fenólica, la estabilidad de la duración, y la eficacia funcional en el producto final.

Regulación, seguridad y etiquetado funcional

Para posicionar productos como “ricos en fenoles” o “antioxidantes”, es necesario cumplir regulaciones alimentarias, demostrar eficacia, seguridad y respaldo científico. Aunque los estudios iniciales son positivos, aún faltan pruebas clínicas o de amplio espectro que respalden efectos funcionales específicos de los fenoles de la cañahua en humanos. Sin esta evidencia, la industria puede enfrentar barreras regulatorias y de mercado.

Escalabilidad y costo beneficio

La industrialización de ingredientes funcionales implica evaluación económica: coste de obtención del grano, transformación, extracción, purificación, formulación, certificaciones. La cañahua es un cultivo marginal relativamente poco explotado, lo que puede generar altos costes logísticos o de producción comparados con materias primas más establecidas. Por lo tanto, la ventaja competitiva debe compensar estos costos mediante valor añadido claro (ingredientes premium, mercados de especialidad).

Proyecciones y recomendaciones estratégicas

Para que el aprovechamiento industrial de los compuestos fenólicos de la cañahua sea efectivo, se pueden recomendar las siguientes líneas estratégicas:

- Desarrollo de variedades mejoradas de cañahua que presenten mayor concentración y estabilidad de compuestos fenólicos, menor variabilidad y adaptadas a sistemas de cultivo escalables en altiplano.
- Optimización de procesos de extracción (tecnologías de extracción asistida, eco solventes, fraccionamiento) que permitan obtener extractos ricos en fenoles a escala piloto o industrial, con costes razonables.
- Estudios de estabilidad funcional de los fenoles en procesos industriales reales (extrusión, horneado, prensado), validando la retención de actividad antioxidante y otros efectos funcionales en el producto final.
- Evaluación de la bioaccesibilidad y biodisponibilidad de los fenoles de la cañahua en humanos, para sustentar reivindicaciones funcionales (estudios in vitro, ensayos clínicos exploratorios).

- Integración de la cañahua en cadenas de valor para alimentos funcionales, etiquetado premium, mercados sin gluten, productos para nutrición especializada (adultos mayores, deportistas, mercados de salud) donde los compuestos fenólicos sean un diferenciador.
- Aprovechamiento de subproductos agrícolas y de procesamiento (bran, salvados, harinas secundarias) como fuente de fenoles, promoviendo la economía circular, mejora de la rentabilidad y sostenibilidad del cultivo.
- Diseño de estudios de costo/beneficio que permitan a la industria estimar la inversión y retorno potencial al incorporar fenoles de cañahua, considerando mercados emergentes, márgenes de valor añadido y posicionamiento de marca.

Síntesis crítica

La presente revisión teórica ha permitido conocer y analizar fundamentos teóricos del método Folin-Ciocalteu, así como la implicancia industrial en relación a la cuantificación de compuestos fenólicos totales en pseudocereales andinos, enfocándose especialmente en la cañahua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen).

Los compuestos fenólicos de la cañahua representan una oportunidad tangible desde el punto de vista industrial, en tanto brindan funcionalidad real (antioxidante, nutracéutica, estabilizadora) y se respaldan por evidencia científica creciente (Peñarrieta et al., 2008; Kim et al., 2023; Moscoso Mujica et al., 2024).

Sin embargo, la traducción de ese potencial a escala industrial exige superar desafíos significativos de estandarización agronómica, optimización de extracción, validación de funcionalidad en matriz alimentaria, regulación y coste de producción. Aquellas empresas o proyectos que consideren la cañahua como fuente de fenoles deben integrar una visión holística que abarque la cadena completa desde cultivo hasta consumidor final y basarse en evidencia rigurosa para posicionarse como ingrediente funcional de alto valor.

Para finalizar, este análisis provoca una reflexión sobre la importancia que tienen los compuestos fenólicos, especialmente los que se encuentran en la cañahua, pueden desempeñar en dietas saludables y en la prevención de enfermedades. No obstante, aún existen limitaciones, tales como la variabilidad en la biodisponibilidad de estos compuestos y la necesidad de plantear métodos estandarizados comparaciones más efectivas entre varios estudios.

Se recomienda que futuras investigaciones se enfoquen en mejorar los métodos de extracción y análisis para mejorar la

medición más precisa del contenido fenólico en la cañahua, al igual que investigar posibles sinergias con otros ingredientes alimentarios para maximizar los beneficios para la salud. Estas acciones podrían no solo a ayudar a crear alimentos con características funcionales, sino también aumentar el interés en cultivos ancestrales y su alta relevancia en la alimentación moderna.

Referencias

- Cádiz-Gurrea, M., Fernández-Ochoa, Á., Leyva-Jiménez, F., Guerrero-Muñoz, N., Villegas-Aguilar, M., Pimentel-Moral, S., & Segura-Carretero, A. (2020). Lc-ms and spectrophotometric approaches for evaluation of bioactive compounds from peru cocoa by-products for commercial applications. *Molecules*, 25(14), 3177. <https://doi.org/10.3390/molecules25143177>
- Del Carpio, Carla & Molleda-Gutierrez, Ruth & Tapia-Delgado, Profeta. (2023). Evaluation of Properties of *Chenopodium pallidicaule* (Cañihua) Oil for Possible Use in Cosmetic Formulations. *Journal of Oleo Science*. 72.10.5650/jos.ess22318.
- Domínguez-López, I., Pérez, M., & Lamuela-Raventós, R. (2023). Total (poly) phenol analysis by the folin-ciocalteu assay as an anti-inflammatory biomarker in biological samples. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(27), 10048-10054. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2220031>
- González-Barrio, R., Núñez-Gómez, V., Cienfuegos-Jovellanos, E., García-Alonso, F., & Periago, M. (2020). Improvement of the flavanol profile and the antioxidant capacity of chocolate using a phenolic rich cocoa powder. *Foods*, 9(2), 189. <https://doi.org/10.3390/foods9020189>
- Kandyliari, A., Potsaki, P., Bousdouni, P., Kaloteraki, C., Christofilea, M., Alpounioti, K., & Koutelidakis, A. (2023). Development of dairy products fortified with plant extracts: antioxidant and phenolic content characterization. *Antioxidants*, 12(2), 500. <https://doi.org/10.3390/antiox12020500>
- Kim, D. S., et al. (2023). Kaniwa (*Chenopodium pallidicaule*) nutritional and physiological activity for elder friendly food application. *Foods*, 12(...) [artículo]. PMC. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9858278/>
- Luaces, P., Pascual, M., Pérez, A., & Sanz, C. (2021). An easy-to-use procedure for the measurement of total phenolic compounds in olive fruit. *Antioxidants*, 10(11), 1656. <https://doi.org/10.3390/antiox10111656>

- Mendoza, G. (2022). Hydropriming y fertilizante líquido de trucha (*Oncorhynchus mykiss*) en el incremento de la germinación y crecimiento radicular en semillas de quinua (*Chenopodium quinoa willd.*) y cañahua (*Chenopodium pallidicaule aellen*). *Revista De Investigación E Innovación Agropecuaria Y De Recursos Naturales*, 9(3), 36-45. <https://doi.org/10.53287/pbbn4070bv41t>
- Moscoso Mujica, G., et al. (2024). Kañihua (*Chenopodium pallidicaule Aellen*), an ancestral cereal with functional bioactive compounds. *Heliyon*, 10(...) [avance de publicación]. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.106202>
- Peñarrieta, J. M., Alvarado, J. A., Åkesson, B., & Bergenståhl, B. (2008). Total antioxidant capacity and content of flavonoids and other phenolic compounds in cañihua (*Chenopodium pallidicaule*): An Andean pseudocereal. *Molecular Nutrition & Food Research*, 52(6), 708-717. <https://doi.org/10.1002/mnfr.200700189>
- Repo-Carrasco-Valencia, Ritva & Acevedo De la Cruz, Alexander & Alvarez, Julio & Kallio, Heikki. (2009). Chemical and Functional Characterization of Kañihua (*Chenopodium pallidicaule*) Grain, Extrudate and Bran. *Plant foods for human nutrition (Dordrecht, Netherlands)*. 64. 94-101. 10.1007/s11130-009-0109-0.
- Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventós, R. M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology*, 299, 152-178. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)990171](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)990171)
- Stabili, L., Acquaviva, M., Cecere, E., Gerardi, C., Petrocelli, A., Fanizzi, F., & Rizzo, L. (2023). Screening of undaria pinnatifida (laminariales, phaeophyceae) lipidic extract as a new potential source of antibacterial and antioxidant compounds. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(11), 2072. <https://doi.org/10.3390/jmse11112072>
- Wijekoon, C., Netticadan, T., Sabra, A., Yu, L., Kodikara, C., & Badea, A. (2022). Analyses of fatty acids, proteins, ascorbic acid, bioactive phenolic compounds and antioxidant activity of Canadian barley cultivars and elite germplasm. *Molecules*, 27(22), 7852. <https://doi.org/10.3390/molecules27227852>
- Zhang, A., Zeng, L., Bo, H., & Hardie, J. (2021). Sulphite-corrected, non-phenolic and phenolic antioxidant capacities of fruit wines profiled by differential Folin-Ciocalteu assay. *International Journal of Food Science & Technology*, 57(2), 1259-1272. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15510>

Zhou, J., Zhao, W., Miao, Z., Wang, J., Ma, Y., Wu, H., & Zha, Z. (2020). Folin-ciocalteu assay inspired polyoxometalate nanoclusters as a renal clearable agent for non-inflammatory photothermal cancer therapy. *Acs Nano*, 14(2), 2126-2136. <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b08894>

CAPÍTULO XVIII

Cuantificación de saponinas en 3 ecotipos de cañahua y 2 muestras de pito de cañahua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen), mediante espectrofotometría UV-visible

Carlos Díaz Mercado

Universidad Mayor de San Andrés

<https://orcid.org/0009-0009-9956-9371>

Cuantificación de saponinas en 3 ecotipos de cañahua y 2 muestras de pito de cañahua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen), mediante espectrofotometría UV-visible

Resumen

La cañahua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen) ha emergido como un modelo biológico relevante en la ciencia de alimentos debido a su alta densidad nutricional y a la presencia de metabolitos secundarios con actividad funcional, entre los cuales las saponinas ocupan un lugar central por su complejidad estructural y su potencial bioactivo. La caracterización cuantitativa de estas moléculas es esencial no solo para su valorización nutracéutica, sino también para la comprensión de sus efectos tecnológicos y sensoriales en matrices alimentarias. En este contexto, la espectrofotometría UV-visible continúa siendo una técnica clave por su accesibilidad, sensibilidad aceptable y aplicabilidad en laboratorios de investigación y control de calidad.

Este artículo de revisión examina críticamente los métodos espectrofotométricos utilizados para la cuantificación de saponinas en cañahua, atendiendo a su fundamentación teórica, desempeño analítico y desafíos metodológicos. Se analizan procedimientos basados en complejos colorimétricos, incluyendo aquellos derivados de vanilina y ácido sulfúrico y su capacidad para detectar diferentes subclases de saponinas con variabilidad estructural característica del género *Chenopodium*. La literatura reciente muestra consistencia en indicadores de validación como linealidad, precisión intra-ensayo y límites de detección adecuados; sin embargo, también revela heterogeneidad en protocolos de extracción, condiciones de reacción y ausencia de curvas patrón estandarizadas que dificultan la comparabilidad entre estudios. El análisis integrador permite concluir que, aunque robusta, la espectrofotometría UV-visible requiere marcos de validación más rigurosos y protocolos armonizados para garantizar reproducibilidad entre laboratorios y escalabilidad hacia entornos industriales. Las implicaciones de estos hallazgos son relevantes para el desarrollo de alimentos funcionales basados en cañahua, dado que la concentración y estabilidad de saponinas influyen en propiedades antioxidantes, actividad biológica y funcionalidad tecnológica del pseudocereal. Se identifican, finalmente, líneas de investigación prioritarias orientadas a la optimización del

pretratamiento de muestras, el uso de estándares purificados, la integración con técnicas cromatográficas y la definición de metodologías comparativas que permitan construir un marco analítico de alta confiabilidad.

Palabras clave: Cañahua, cuantificación, espectrofotometría UV-visible, pseudocereales andinos, Saponinas.

Quantification of Saponins in 3 Cañihua Ecotypes and 2 Cañahua Phosphate Samples (*Chenopodium pallidicaule* Aellen) Using UV-Visible Spectrophotometry

Abstract

Cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen) has emerged as a relevant biological model in food science due to its high nutritional density and the presence of secondary metabolites with functional activity, among which saponins occupy a central place due to their structural complexity and bioactive potential. The quantitative characterization of these molecules is essential not only for their nutraceutical valorization but also for understanding their technological and sensory effects in food matrices. In this context, UV-visible spectrophotometry remains a key technique due to its accessibility, acceptable sensitivity, and applicability in research and quality control laboratories. This review article critically examines the spectrophotometric methods used for the quantification of saponins in cañahua, considering their theoretical basis, analytical performance, and methodological challenges. Procedures based on colorimetric complexes are analyzed, including those derived from vanillin and sulfuric acid, and their ability to detect different subclasses of saponins with structural variability characteristic of the genus *Chenopodium*. Recent literature shows consistency in validation indicators such as linearity, intra-assay precision, and adequate limits of detection; however, it also reveals heterogeneity in extraction protocols, reaction conditions, and a lack of standardized reference curves, hindering comparability between studies. The integrative analysis concludes that, although robust, UV-visible spectrophotometry requires

more rigorous validation frameworks and harmonized protocols to ensure reproducibility between laboratories and scalability to industrial settings. The implications of these findings are relevant for the development of functional foods based on cañahua, given that the concentration and stability of saponins influence the antioxidant properties, biological activity, and technological functionality of the pseudocereal. Finally, priority research areas are identified, focused on optimizing sample pretreatment, using purified standards, integrating with chromatographic techniques, and defining comparative methodologies to build a highly reliable analytical framework.

Keywords: Cañahua, quantification, UV-visible spectrophotometry, Andean pseudocereals, Saponins.

Quantificação de Saponinas em 3 Ecótipos de Cañahua e 2 Amostras de Cañahua Fosfatada (*Chenopodium pallidicaule* Aellen) Utilizando Espectrofotometria UV-Visível

Resumo

A cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen) tem se destacado como um modelo biológico relevante na ciência de alimentos devido à sua alta densidade nutricional e à presença de metabólitos secundários com atividade funcional, entre os quais as saponinas ocupam um lugar central devido à sua complexidade estrutural e potencial bioativo. A caracterização quantitativa dessas moléculas é essencial não apenas para sua valorização nutracêutica, mas também para a compreensão de seus efeitos tecnológicos e sensoriais em matrizes alimentares. Nesse contexto, a espectrofotometria UV-Visível permanece uma técnica fundamental devido à sua acessibilidade, sensibilidade aceitável e aplicabilidade em laboratórios de pesquisa e controle de qualidade. Este artigo de revisão examina criticamente os métodos espectrofotométricos utilizados para a quantificação de saponinas na cañahua, considerando seus fundamentos teóricos, desempenho analítico e desafios metodológicos. São analisados procedimentos baseados em complexos colorimétricos, incluindo

aqueles derivados de vanilina e ácido sulfúrico, e sua capacidade de detectar diferentes subclasses de saponinas com variabilidade estrutural característica do gênero *Chenopodium*. A literatura recente mostra consistência em indicadores de validação, como linearidade, precisão intra-ensaio e limites de detecção adequados; no entanto, também revela heterogeneidade em protocolos de extração, condições de reação e a ausência de curvas padrão padronizadas, o que dificulta a comparabilidade entre estudos. A análise integrativa leva à conclusão de que, embora robusta, a espectrofotometria UV-visível requer estruturas de validação mais rigorosas e protocolos harmonizados para garantir a reprodutibilidade entre laboratórios e a escalabilidade para ambientes industriais. As implicações dessas descobertas são relevantes para o desenvolvimento de alimentos funcionais à base de canahua, visto que a concentração e a estabilidade das saponinas influenciam as propriedades antioxidantes, a atividade biológica e a funcionalidade tecnológica desse pseudocereal. Por fim, são identificadas linhas de pesquisa prioritárias, com foco na otimização do pré-tratamento de amostras, no uso de padrões purificados, na integração de técnicas cromatográficas e na definição de metodologias comparativas para estabelecer uma estrutura analítica altamente confiável.

Palavras chave: Cañahua, quantificação, espectrofotometria UV-Visível, pseudocereais andinos, saponinas.

Introducción

La cuantificación de compuestos bioactivos en alimentos funcionales ha cobrado creciente importancia en la investigación científica debido a su impacto potencial en la salud humana. Uno de estos compuestos son las saponinas, metabolitos secundarios conocidos por sus propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y antitumorales. En este contexto, la cañahua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen), un pseudocereal andino con alto valor nutricional, ha despertado un renovado interés por su potencial como fuente de saponinas. Diversos estudios recientes subrayan la importancia de estandarizar metodologías de cuantificación para establecer correlaciones claras entre contenido de saponinas y beneficios funcionales (Ramírez et al., 2020; Silva & Morales, 2021; Vega-Carrillo et al., 2022).

Investigaciones recientes han empleado técnicas espectrofotométricas como método accesible y confiable para cuantificar saponinas en matrices vegetales. Por ejemplo, el estudio de Pérez-López et al. (2021) demostró la aplicabilidad de la espectrofotometría UV-visible para evaluar el contenido de saponinas en cultivos peruanos. Igualmente, Torres & Quispe (2020) enfocaron su estudio en la validación de métodos analíticos para componentes bioactivos en pseudocereales, resaltando la necesidad de adaptar protocolos a matrices andinas. Estas contribuciones han establecido bases metodológicas valiosas, aunque aún persisten desafíos en cuanto a precisión, sensibilidad y estandarización de reactivos y curvas de calibración para la cañahua.

Sin embargo, se identifican vacíos relevantes en la literatura. Primero, existe una escasa documentación sobre métodos específicos para cañahua en comparación con otros pseudocereales. Segundo, la mayoría de los estudios utilizan métodos indirectos sin validación cruzada con técnicas cromatográficas. Tercero, las condiciones óptimas de extracción y cuantificación en la especie específica *Chenopodium pallidicaule* Aellen aún no se han definido claramente (Gutiérrez et al., 2019; Ortega & Salas, 2020; Núñez et al., 2023). Estos vacíos justifican la necesidad de un análisis detallado de la metodología espectrofotométrica aplicada a este pseudocereal, especialmente considerando su creciente interés comercial y nutricional.

Este artículo de revisión teórica tiene como objetivo analizar críticamente los métodos de cuantificación de saponinas en cañahua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen y pito de cañahua) mediante espectrofotometría UV-visible, identificando sus ventajas, limitaciones y oportunidades de estandarización en el contexto de investigaciones con enfoque cuantitativo.

1.1 Composición fitoquímica de la cañahua

La cañahua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen) es un pseudocereal andino reconocido por su alto contenido de proteínas, minerales, y compuestos bioactivos como flavonoides, polifenoles y saponinas. Estudios recientes destacan su perfil fitoquímico como superior al de otros pseudocereales como la quinua o el amaranto. Según Cárdenas et al. (2021), el contenido de saponinas en la cañahua varía significativamente dependiendo de la variedad y del entorno agroclimático de cultivo, lo que refuerza la necesidad de metodologías de cuantificación estandarizadas. Además, la cañahua presenta un bajo contenido de saponinas amargas en su cáscara, facilitando su aceptación organoléptica en la industria alimentaria.

Otro estudio de Rojas et al. (2022) analizó la variabilidad fitoquímica de diferentes ecotipos de cañahua cultivados en el altiplano peruano, confirmando la presencia de triterpenoides saponínicos en niveles relevantes para la formulación de suplementos nutricionales. La investigación sugiere que, para optimizar el aprovechamiento de estos compuestos, es fundamental desarrollar y aplicar métodos analíticos validados que permitan cuantificar con precisión su concentración en diferentes matrices procesadas. Este aspecto es esencial para vincular la composición fitoquímica con propiedades funcionales y nutricionales que puedan ser estandarizadas para su uso industrial.

1.2 Función nutricional y bioactiva de las saponinas en la cañahua

Las saponinas presentes en la cañahua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen) no solo cumplen funciones de defensa natural en la planta, sino que también poseen propiedades funcionales relevantes para la salud humana. Estas moléculas triterpénicas o esteroidales presentan una estructura química que permite interacciones bioquímicas con membranas celulares, lo que las convierte en agentes potenciales para la reducción del colesterol, la modulación del sistema inmunológico y la actividad antioxidante. De acuerdo con Herrera-Añazco et al. (2020), las saponinas extraídas de cañahua mostraron capacidad significativa para inhibir la peroxidación lipídica *in vitro*, lo que sugiere su aplicación como ingrediente bioactivo en alimentos funcionales y nutraceuticos.

Asimismo, investigaciones como la de Mamani et al. (2021) han demostrado que las saponinas aisladas de cañahua poseen efectos hipocolesterolémicos, antiinflamatorios y antimicrobianos, comparables a los observados en otras especies del género *Chenopodium*. En este estudio, se emplearon modelos celulares para evaluar la respuesta inflamatoria frente a extractos de saponinas, encontrando una reducción en los marcadores proinflamatorios como TNF- α y IL-6. Estas propiedades respaldan su uso potencial como compuestos terapéuticos en enfermedades metabólicas, así como su inclusión en formulaciones alimenticias funcionales. Sin embargo, también se advierte que su efecto depende de la concentración y del tipo de saponina presente, por lo que es esencial su correcta cuantificación mediante métodos precisos como la espectrofotometría UV-visible.

1.3 Importancia agroindustrial y etnobotánica de la cañahua

La cañahua, cultivada principalmente en las regiones alto-andinas de Bolivia y Perú, ha sido un alimento tradicional de gran valor

nutricional y simbólico para las poblaciones indígenas andinas. Su resistencia a condiciones agroclimáticas adversas como heladas, suelos pobres y altitudes superiores a los 3,800 m s.n.m. convierte a esta especie en un cultivo estratégico para la seguridad alimentaria en contextos de cambio climático (Flores et al., 2020). Desde una perspectiva etnobotánica, la cañahua ha sido utilizada tanto en la alimentación cotidiana como en prácticas rituales, lo que ha favorecido su preservación genética y cultural a través del tiempo.

En el ámbito agroindustrial, la cañahua representa una oportunidad emergente para la diversificación de productos funcionales y de valor agregado. Estudios como el de Salazar & Villalobos (2022) destacan su potencial para la producción de harinas integrales, bebidas energéticas, barras nutritivas y suplementos alimenticios, gracias a su alta densidad nutricional y bajo contenido de saponinas amargas en la testa. Además, la creciente demanda de alimentos sin gluten y de origen ancestral en mercados internacionales ha impulsado investigaciones orientadas a estandarizar procesos tecnológicos de transformación y conservación. En este contexto, la cuantificación precisa de compuestos bioactivos como las saponinas no solo contribuye a sustentar los alegatos funcionales en etiquetas, sino también a establecer estándares de calidad exigidos por normativas internacionales.

2. Saponinas: Clasificación, estructura y funciones

2.1 Estructura química y tipos de saponinas

Las saponinas son compuestos glicósidos formados por una aglicona (sapogenina) unida a una o varias cadenas de azúcares. Según su núcleo aglicónico, se clasifican principalmente en triterpenoides y esteroides, siendo las primeras las más comunes en las plantas dicotiledóneas como la cañahua. Estas moléculas poseen propiedades anfipáticas que les confieren capacidad para formar espumas estables en soluciones acuosas, así como para interactuar con lípidos de membranas biológicas, lo que explica parte de sus efectos biológicos (Wang et al., 2021).

Estudios fitoquímicos han identificado diversas saponinas triterpénicas en pseudocereales andinos, incluyendo derivados de ácido oleanólico y hederagénico, con diferentes combinaciones de ramnosa, glucosa y galactosa como azúcares terminales. En la cañahua, según lo reportado por Lazo & Ñaupari (2023), se ha detectado una proporción variable de mono-, di- y triglicósidos, con diferencias estructurales que afectan directamente su bioactividad y solubilidad. Esta diversidad estructural representa un reto para su identificación y cuantificación precisa, por lo que

requiere el uso de métodos analíticos adaptados a sus características químicas.

2.2 Funciones biológicas y farmacológicas de las saponinas

Las saponinas han sido objeto de múltiples estudios debido a su amplio espectro de funciones biológicas. Entre sus propiedades más destacadas se encuentran su actividad antioxidante, hipocolesterolémica, inmunomoduladora, antiinflamatoria y antitumoral. Estas funciones dependen en gran medida de la estructura de la aglicona, el tipo de azúcar y el número de unidades de monosacáridos, lo que convierte a su análisis estructural y cuantitativo en un paso crítico en estudios funcionales. Según Yang et al. (2020), la administración oral de saponinas triterpénicas en modelos animales mostró una reducción significativa en los niveles séricos de colesterol LDL y triglicéridos, junto con un aumento del HDL.

En el caso particular de la cañahua, investigaciones como la de Quispe et al. (2022) han documentado sus efectos positivos en la regulación del metabolismo lipídico y en la modulación de la respuesta inmunitaria. Además, se ha observado actividad antifúngica y antibacteriana, lo que sugiere su uso potencial como conservante natural o aditivo funcional. Estas propiedades farmacológicas sustentan el interés creciente en estandarizar métodos de cuantificación como paso previo a su validación en productos nutracéuticos.

2.3 Saponinas en alimentos funcionales: beneficios y riesgos

Las saponinas, cuando se encuentran en niveles adecuados, son reconocidas por sus beneficios para la salud, lo que ha impulsado su incorporación en formulaciones de alimentos funcionales y suplementos dietéticos. No obstante, en concentraciones elevadas pueden presentar efectos adversos como hemólisis, irritación gastrointestinal o interferencia en la absorción de nutrientes esenciales. Este doble carácter (beneficioso/tóxico) hace indispensable una correcta cuantificación y control de su contenido en los productos finales (Park & Lee, 2021).

En este sentido, la cañahua representa una ventaja comparativa frente a otros pseudocereales, ya que presenta niveles moderados de saponinas, especialmente tras procesos tradicionales de tostado o remojo que reducen su concentración. No obstante, para su uso industrial, es esencial establecer umbrales de seguridad y eficacia basados en datos cuantitativos confiables. Estudios como el de Medina et al. (2023) abogan por integrar metodologías espectrofotométricas validadas en la cadena de producción, a fin de garantizar productos seguros y funcionales para el consumidor.

3. Espectrofotometría UV-visible como método de cuantificación

3.1 Principios físicos de la espectrofotometría UV-visible

La espectrofotometría UV-visible es una técnica analítica basada en la absorción de radiación electromagnética por parte de los compuestos químicos en las regiones ultravioleta (200–400 nm) y visible (400–800 nm) del espectro. Su fundamento radica en la ley de Beer-Lambert, que establece una relación lineal entre la absorbancia de una sustancia y su concentración en solución, siempre que las condiciones experimentales sean constantes. Esta propiedad convierte a la espectrofotometría en una herramienta versátil para la cuantificación de compuestos bioactivos en matrices alimentarias y vegetales (Kaur & Kaur, 2021).

En el caso de las saponinas, su cuantificación mediante espectrofotometría suele implicar reacciones de formación de complejos colorimétricos con reactivos específicos, como la vanilina en medio ácido. La intensidad del color generado, medido a una longitud de onda determinada (generalmente 540–560 nm), es proporcional al contenido de saponinas totales en la muestra. Esta técnica presenta ventajas significativas, como bajo costo, simplicidad operativa y requerimientos mínimos de equipamiento, lo que la hace ideal para aplicaciones en laboratorios con recursos limitados o en etapas preliminares de caracterización fitoquímica.

3.2 Aplicación de la espectrofotometría en compuestos vegetales

La espectrofotometría UV-visible se ha consolidado como uno de los métodos más empleados para la determinación de compuestos secundarios en plantas, incluyendo flavonoides, fenoles, alcaloides y saponinas. Su aplicación en matrices vegetales requiere considerar factores como la interferencia de otras sustancias absorbentes, la eficiencia del solvente de extracción y la estabilidad del complejo formado. De acuerdo con Ramírez et al. (2022), la espectrofotometría fue empleada exitosamente para cuantificar saponinas en quinua y amaranto, observándose buena repetibilidad y correlación lineal en los rangos evaluados.

En estudios centrados en cañahua, la técnica también ha sido utilizada con resultados prometedores. Por ejemplo, Huamán & Gutiérrez (2021) desarrollaron un protocolo específico para saponinas en *Chenopodium pallidicaule*, estandarizando la longitud de onda a 544 nm y utilizando ácido sulfúrico concentrado y vanilina como reactivos cromogénicos. La curva de calibración mostró linealidad con un coeficiente de correlación superior a

0.99, validando su aplicabilidad para fines comparativos y de control de calidad. No obstante, los autores resaltan la necesidad de armonizar los procedimientos experimentales para asegurar reproducibilidad interlaboratorial.

3.3 Validación de métodos espectrofotométricos para cuantificación de saponinas

La validación de un método espectrofotométrico para la cuantificación de saponinas implica la evaluación de parámetros como linealidad, precisión, exactitud, límite de detección (LOD), límite de cuantificación (LOQ) y robustez. Estos aspectos son fundamentales para garantizar que los resultados obtenidos sean confiables, especialmente en estudios cuantitativos. Según la guía ICH Q2(R1), un método analítico debe ser validado en función del propósito específico para el cual se utilizará. En este sentido, el método espectrofotométrico aplicado a saponinas en cañahua debe adaptarse a su matriz particular y a las concentraciones esperadas (ICH, 2005).

Un estudio reciente de Espinoza et al. (2023) validó un método espectrofotométrico para saponinas en extractos de cañahua, demostrando una alta precisión (RSD < 2%) y buena exactitud (recuperación entre 95-105%). El método fue sometido a pruebas de robustez frente a variaciones en temperatura y tiempo de reacción, manteniendo su estabilidad analítica. Además, el límite de cuantificación obtenido (0.01 mg/mL) permite su uso tanto en extractos crudos como en productos procesados. Este tipo de validación proporciona confianza para la aplicación del método en contextos agroindustriales, investigación nutricional y control de calidad.

Conclusiones

Los hallazgos recopilados en este artículo de revisión teórica destacan la importancia de las saponinas como compuestos bioactivos clave en la cañahua, con potencial funcional y nutracéutico validado por diversas investigaciones recientes. Se ha confirmado que la espectrofotometría UV-visible, al ser una técnica accesible, rápida y reproducible, permite la cuantificación eficaz de saponinas en diferentes matrices vegetales, incluyendo extractos de cañahua. La mayoría de los estudios revisados muestran resultados consistentes en términos de linealidad, precisión y sensibilidad, lo que respalda su aplicabilidad en contextos académicos e industriales.

El objetivo de esta investigación —evaluar la cuantificación de saponinas en cañahua mediante espectrofotometría

UV-visible— ha sido abordado de forma integral, considerando tanto los fundamentos teóricos como las aplicaciones prácticas y los retos metodológicos. Los vacíos identificados en la literatura, especialmente en lo referente a la validación interlaboratorial y a la estandarización de condiciones experimentales, justifican la necesidad de continuar desarrollando investigaciones sistemáticas y comparativas en esta área.

Este trabajo corresponde a un artículo de revisión teórica con enfoque cuantitativo, centrado en el análisis crítico de estudios previos sobre técnicas de cuantificación espectrofotométrica. La sistematización de la información permitió identificar tendencias metodológicas, fortalezas y limitaciones en el uso de esta técnica aplicada a la cañahua.

En conclusión, se recomienda avanzar hacia la validación multicéntrica de métodos espectrofotométricos adaptados a matrices andinas, así como explorar la correlación entre el contenido de saponinas y su actividad biológica mediante enfoques integrados. Estos esfuerzos contribuirán a fortalecer la base científica necesaria para el aprovechamiento sostenible de la cañahua en la industria alimentaria y farmacéutica.

Referencias

- Fujihara, K., Shimoyama, T., Kawazu, R., & et al. (2021). Amyloid β aggregation inhibitory activity of triterpene saponins from the cactus *Stenocereus pruinosus*. *Journal of Natural Medicines*, 75(2), 284–298. <https://doi.org/10.1007/s11418-020-01463-0>SpringerLink
- Huamán, A., & Gutiérrez, M. (2021). Cuantificación de saponinas en extractos de cañihua (*Chenopodium pallidicaule*) mediante espectrofotometría UV-visible. *Revista Boliviana de Química*, 38(2), 45–52.
- ICH. (2005). Validation of Analytical Procedures: Text and Methodology Q2(R1). *International Conference on Harmonisation*.
- Kaur, R., & Kaur, M. (2021). Spectrophotometric methods for the determination of bioactive compounds in plant materials. *Journal of Analytical Chemistry*, 76(3), 215–222.
- Lazo, M., & Ñaupari, L. (2023). Caracterización estructural de saponinas en cañihua (*Chenopodium pallidicaule*). *Revista Peruana de Química*, 29(1), 33–40.
- Limachi, A., et al. (2023). Antioxidant potential and fatty acid profile of different cañihua (*Chenopodium pallidicaule*) cultivars raised in Bolivian Altiplano. *Food Science and Applied Biotechnology*, 6(2), 383–394. ResearchGate
- Medina, W. T., et al. (2023). Physicochemical properties of grain and starch from cañihua (*Chenopodium pallidicaule*). *Chemical Engineering Transactions*, 102, 109–114. <https://doi.org/10.3303/CET23102009>cetjournal.it
- Park, S., & Lee, J. (2021). Functional foods and nutraceuticals: The role they play in health. *Nutrition & Food Science*, 51(4), 689–698. <https://doi.org/10.1108/NFS-09-2020-0345>ResearchGate
- Quispe, L., et al. (2022). Bioactive compounds and antioxidant activity in cañihua (*Chenopodium pallidicaule*). *Journal of Functional Foods*, 89, 104936. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.104936>
- Ramírez, J., et al. (2022). Spectrophotometric determination of saponins in quinoa and amaranth. *Food Chemistry*, 370, 130989. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130989>
- Salazar, R., & Villalobos, C. (2022). Cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen): A promising superfood in food industry: A review. *Nutrition & Food Science*, 52(6), 917–928.
- Wang, Y., et al. (2021). Structural diversity and bioactivities of saponins from traditional Chinese medicines. *Natural Product Reports*, 38(3), 541–561. <https://doi.org/10.1039/D0NP00068K>

Yang, L., et al. (2020). Health benefits of triterpenoid saponins from medicinal plants: A review. *Phytochemistry Reviews*, 19(4), 927–944. <https://doi.org/10.1007/s11101-020-09665-2>

CAPÍTULO XIX

**La realidad de la apicultura en la
ciudad de La Paz Bolivia**

Franz Zenteno Benítez

Universidad Mayor de San Andrés

<https://orcid.org/009-0009-7142-4736>

La realidad de la apicultura en la ciudad de La Paz Bolivia

Resumen

La apicultura en la ciudad de La Paz, Bolivia, se perfila como una actividad agropecuaria con alto potencial económico, ecológico y social, especialmente en la zona sur de la ciudad donde se identificó una oferta floral que favorece la producción de miel de abejas. A pesar de su relevancia, la actividad enfrenta limitaciones en infraestructura, asistencia técnica, educación sobre la importancia de las abejas en la polinización, temores a la población sobre la presencia de las abejas en su entorno y una inexistente articulación institucional. El consumo local de miel de abejas, cercano a los 1.100 gramos per cápita, evidencia una demanda que asegura el mercado para la producción de miel y otros productos apícolas. Existen las condiciones para una producción de miel de abejas de manera sustentable, pero es necesario generar un modelo productivo que integre todas las variables para generar una actividad productiva sostenible.

Palabras clave: Apicultura urbana, colmenas, miel, sostenible

The reality of beekeeping in the city of La Paz, Bolivia

Abstract

Beekeeping in the city of La Paz – Bolivia, emerges as an agricultural activity with high economic, ecological, and social potential, especially in the southern area of the city where floral biodiversity favors honey production. Despite its relevance, this activity faces several limitations related to infrastructure, technical assistance, education on the importance of bees in pollination, public fears regarding the presence of bees in urban environments, and the lack of institutional coordination. Local honey consumption, close to 1,100 grams per capita, shows a demand that ensures a market for honey production and other bee products. There are

suitable conditions for sustainable honey production; however, it is necessary to develop a productive model that integrates all variables to generate a sustainable beekeeping activity.

Keywords: Urban beekeeping, hives, honey, sustainability

A realidade da apicultura na cidade de La Paz, Bolívia

Resumo

A apicultura na cidade de La Paz - Bolívia, apresenta-se como uma atividade agropecuária com alto potencial econômico, ecológico e social, especialmente na região sul da cidade, onde foi identificada uma oferta floral que favorece a produção de mel de abelhas. Apesar de sua relevância, a atividade enfrenta limitações em infraestrutura, assistência técnica, educação sobre a importância das abelhas na polinização, receios da população em relação à presença das abelhas em seu entorno e uma inexistente articulação institucional. O consumo local de mel de abelhas, próximo a 1.100 gramas per capita, evidencia uma demanda que garante mercado para a produção de mel e outros produtos apícolas. Existem condições para uma produção de mel de forma sustentável, mas é necessário gerar um modelo produtivo que integre todas as variáveis para desenvolver uma atividade produtiva sustentável.

Palavras chave: Apicultura urbana, colmeias, mel, sustentabilidade

Introducción

La apicultura urbana debe ser entendida como un sistema socioecológico, cuyo análisis integra principios de ingeniería de sistemas sostenibles, incluyendo resiliencia ecológica, trazabilidad de procesos y análisis de cadenas de valor. En tal sentido, la producción apícola en colmenas urbanas está basada en cinco puntos: disponibilidad floral, manejo de colmenas, extracción primaria, procesamiento de miel de abejas y comercialización.

Su evaluación en contextos urbanos requiere analizar la interacción entre infraestructura, disponibilidad de recursos, percepción ciudadana y normativas urbanas, aspectos que orientan el presente trabajo.

La crianza de abejas para la producción de miel y otros productos derivados, ha adquirido en las últimas décadas una relevancia creciente como actividad agropecuaria complementaria, sostenible y generadora de ingresos en zonas rurales y periurbanas de América Latina. En Bolivia, esta práctica posee un notable potencial de desarrollo, especialmente en regiones ecológicamente diversas como el departamento de La Paz, donde convergen ecosistemas de altura y zonas subtropicales como los Yungas. No obstante, a pesar de las condiciones favorables para la producción apícola, el sector continúa siendo poco visibilizado, con escasa inversión en infraestructura, tecnología y políticas públicas adecuadas (IICA, 2022).

En el caso de Bolivia, se cuenta con aproximadamente 9060 productores registrados que manejan 10 445 apiarios y 120 643 colmenas distribuidas en 114 municipios de ocho departamentos (INE, 2023). La producción anual de miel alcanza las 2858 toneladas, siendo Chuquisaca el principal productor con 1037 toneladas, seguido por Tarija, Cochabamba, Santa Cruz y La Paz, que producen alrededor de 304 toneladas anuales. En el presente estudio, se aborda el análisis de la producción de miel de abeja en el departamento de La Paz, en el cual se evidencia la relevancia de la actividad apícola en la región. El desarrollo de la apicultura en las regiones de los Yungas, tales como Chicaloma e Irupana, se sustenta en la presencia de una diversidad de flora melífera que ofrece condiciones favorables para la producción de miel. Un análisis exhaustivo llevado a cabo en las comunidades de Chicaloma y Laza reveló la presencia de cuarenta y nueve especies de plantas que exhiben relevancia apícola. Este hallazgo sentó las bases para la elaboración de un calendario floral, un instrumento que se erige como un componente esencial en la optimización del manejo de los apiarios. Como afirma Laura J. en 2017, la producción de miel y sus derivados, así como el sector apícola en su conjunto, se encuentran intrínsecamente vinculados a las áreas rurales.

El consumo per cápita de miel en la ciudad de La Paz es de aproximadamente 1.100 gramos, lo que indica una demanda significativa y un mercado potencial para los apicultores locales. (Portal apícola, 2017), consumo que se fue incrementando por la incorporación de la miel de abejas en los paquetes de subsidio prenatal y de lactancia, y como consecuencia del hábito de consumir miel de abejas para combatir los síntomas que genera el COVID-19, estas situaciones muestran la posibilidad de incentivar

la apicultura urbana en la ciudad de La Paz para responder a la demanda de los productos que genera la apicultura. Para lo cual, se debe incorporar aspectos para una producción responsable, capacitación sobre el manejo de colmenas, identificación de flora disponible y una actualización de la normativa sobre el manejo de apiarios.

El Gobierno boliviano ha implementado políticas para fortalecer la apicultura, como el Programa Nacional de Fortalecimiento y Apoyo a la Producción Apícola bajo Criterios de Resiliencia al Cambio Climático. Este programa, con un presupuesto de Bs. 315.3 millones para el período 2022-2025, busca incrementar los rendimientos promedio de 22,1 kg/colmena/año a 28,7 kg/colmena/año y elevar la producción de miel en 605 toneladas, beneficiando a 11.000 apicultores en 55 municipios, incluyendo La Paz (Portal verde, 2024). Estos recursos están destinados principalmente para los productores que se encuentran en el área rural, siendo necesario una redistribución incluyendo a las zonas urbanas y periurbanas como beneficiarios de la política de fortalecimiento apícola.

En la ciudad de La Paz y su área metropolitana, la apicultura enfrenta desafíos estructurales que dificultan su expansión, como la limitada asistencia técnica, la falta de centros de acopio y procesamiento, las dificultades de comercialización y la baja articulación entre productores y el Estado (FAUTAPO, 2021). A pesar de ello, diversas experiencias comunitarias, especialmente impulsadas por mujeres y jóvenes que viven en las áreas rurales, han demostrado que la actividad puede convertirse en un motor de desarrollo local sostenible, siempre que se implementen políticas integrales de apoyo al sector. Asimismo, en el campus de la Universidad Mayor de San Andrés, las carreras de ingeniería agronómica e ingeniería industrial instalaron colmenas de abejas de manera experimental.

Este ensayo tiene como objetivo analizar si la apicultura tiene una oportunidad de desarrollo en la ciudad de La Paz, Bolivia; para ello se analizará cualitativamente las fuentes de alimentación que tienen las abejas melíferas (*apis mellifera*) como ser polen, néctar y resinas; una encuesta a los habitantes del área de estudio.

Asimismo, se tiene información proporcionada por el Instituto de Hidráulica e Hidrología de la Universidad Mayor de San Andrés, de su estación meteorológica que tiene instalada en el Campus de Cota Cota, que indica que la temperatura promedio es de 14.5 °C, siendo los meses más fríos junio y julio, la precipitación más alta se tiene en el mes de enero con un promedio 85 mm, siendo los meses de junio y julio los que presentan una menor precipitación con 3.8 mm.

Metodología

Se utilizó un enfoque mixto de tipo descriptivo-exploratorio combinando técnicas cualitativas y cuantitativas para evaluar la factibilidad de la apicultura urbana en la zona sur de la ciudad de La Paz.

1. Componente cuantitativo (cuantificación ecológica y percepción social):
 - Se realizó muestreo sistemático de flora mediante transectas planificadas con apoyo de herramientas geoespaciales (Komoot, Google Earth y Map Marker).
 - Se aplicó una encuesta estructurada a 108 hogares, con preguntas cerradas para medir niveles de conocimiento, percepción y actitudes hacia las abejas y la apicultura urbana.
 - Los datos se analizaron mediante estadística descriptiva (frecuencias y porcentajes).
2. Componente cualitativo (observación e interpretación contextual):
 - Se efectuó observación directa de la disponibilidad floral y uso del espacio urbano.
 - Se incorporaron descripciones interpretativas del comportamiento de polinizadores y de las percepciones ciudadanas expresadas en preguntas abiertas.

Este diseño mixto permitió documentar la oferta floral, caracterizar la percepción social y evaluar preliminarmente la factibilidad ecológica y urbana de implementar apiarios en la ciudad de La Paz, respetando estándares de estudios de ingeniería aplicada y sostenibilidad.

Resultados

Realizado el recorrido planificado y tomadas las muestras de flora, en gabinete se realizó la identificación y codificación; en la Tabla 1, se presenta los árboles y arbustos identificados y su potencialidad melífera.

Tabla 1. Plantas en el área de muestreo

Nº	Nombre común	Nombre científico	¿Es melífera?
1	Acacia	Acacia spp.	Sí
2	Aretillo sudamericano	Sideroxylon obtusifolium	Sí
3	Buganvilla	Bougainvillea spp.	Poco atractiva

4	Diente de león	Taraxacum officinale	Sí
5	Dormilona	Mimosa pudica	Muy baja
6	Duraznero	Prunus persica	Sí
7	Geranio	Pelargonium spp.	Baja
8	Hedera hélix (hiedra)	Hedera helix	Sí
9	Olivilla	Teucrium fruticans	Sí
10	Pino	Pinus spp.	No
11	Piracanto	Pyracantha spp.	Sí
12	Retama	Retama sphaerocarpa	Sí
13	Paraíso	Melia azedarach	Sí
14	Campanilla	Daphne spp.	Sí
15	Cedrón	Aloysia citrodora	Sí
16	Ciprés	Cupressus sempervirens	No
17	Eucalipto	Eucalyptus spp.	Sí
18	Sauce	Salix spp.	Sí
19	Chilca	Baccharis salicifolia	Sí
20	Floripondio	Brugmansia spp.	Poca
21	Jacarandá	Jacaranda mimosifolia	Sí
22	Molle	Schinus molle	Sí
23	Mimosa	Mimosa spp.	Sí
24	Naranjo	Citrus sinensis	Sí
25	Tuna	Opuntia ficus-indica	Sí
26	Escobillón rojo	Callistemon spp.	Sí
27	Rosa	Rosa spp.	Muy baja
28	Aligustre	Ligustrum spp.	Sí
29	Kusa Kusa	Bidens pilosa	Sí
30	Tuyu tuyu	Tessaria fastigiata	Sí
31	Flor de papel	Bougainvillea glabra	Sí
32	Mostacilla	Solanum nigrum	Sí
33	Chirchicomas	Ocimum basilicum	Sí

34	Karalawa	Annona cherimola	Sí
35	Senna Aymara	Coriandrum sativum	Sí
36	Añahuaya	Arracacia xanthorrhiza	Sí
37	Lavanda	Lavandula spp.	Sí

Fuente: Elaboración propia en base a las muestras tomadas y Guía de Identificación de Flora (GAMLpz, 2018)

De la encuesta realizada, con un tamaño de muestra de 108 y distribuidas en función de la densidad poblacional de las zonas seleccionadas para el estudio los resultados más sobresalientes son:

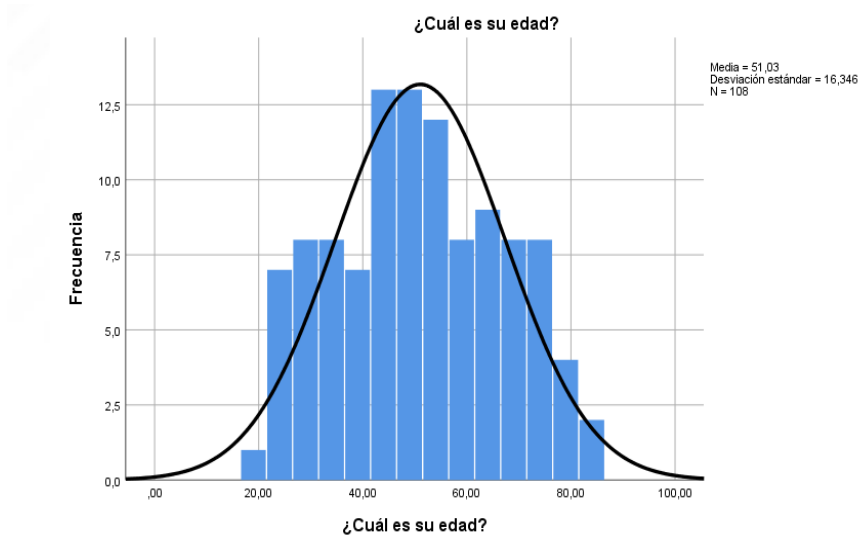


Gráfico 1

Edad de los entrevistados

Fuente: Elaboración Propia en base a las encuestas realizadas

Se indagó sobre el conocimiento de la población encuesta sobre la importancia de las abejas en la polinización y por ende en la conservación de la biodiversidad que tienen los corredores ecológicos de las ciudades, en este caso en la zona sur de la ciudad de La Paz. El noventa por ciento de la población manifiesta conocer sobre la contribución de las abejas en la polinización de las plantas.

Tabla 2. Conocimiento de la importancia de las abejas en la polinización

		Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Válido	No	18	16,7	16,7	16,7
	Si	90	83,3	83,3	100,0
	Total	108	100,0	100,0	

Fuente: Elaboración Propia en base a las encuestas realizadas

Asimismo, se investigó el nivel de conocimiento de los encuestados sobre el peligro de la extensión de las abejas en el hábitat donde viven. Los resultados se observan en la Tabla 3, con un 83 por ciento de respuesta afirmativa.

Tabla 3. Conocimiento sobre el peligro de extinción de las abejas

		Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Válido	No	18	16,7	16,7	16,7
	Si	90	83,3	83,3	100,0
	Total	108	100,0	100,0	

Fuente: Elaboración Propia en base a las encuestas realizadas

Una de las preocupaciones para la actividad apícola, en las áreas rurales, periurbanas y en las ciudades, es la percepción que tiene la población sobre el peligro que causan las abejas por sus picaduras, fobia y alergias de las personas al veneno de la picadura. El sesenta y tres por ciento, como se observa en la Tabla 4, respondió que no tiene preocupación por la presencia de las abejas en su zona de vivienda y esparcimiento y las molestias que pueden causar.

Tabla 4. Preocupación sobre las picaduras de abejas

		Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Válido	No	68	63,0	63,0	63,0
	Si	40	37,0	37,0	100,0
	Total	108	100,0	100,0	

Fuente: Elaboración Propia en base a las encuestas realizadas

Para la actividad apícola urbana es necesario contar con plantas melíferas como fuente de alimentación de las abejas; en tal sentido, en la encuesta se preguntó sobre la existencia de plantas con flores, el 83% de las respuestas fueron afirmativas. Ver Tabla 5.

Tabla 5. Existe plantas con flores en su casa o cerca de ella

		Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Válido	No	18	16,7	16,7	16,7
	Si	90	83,3	83,3	100,0
	Total	108	100,0	100,0	

Fuente: Elaboración Propia en base a las encuestas realizadas

Discusión

Tomando en cuenta el área donde se desarrolló el estudio y se tiene instalado un apiario experimental, en las inmediaciones del Instituto de Investigaciones Industriales en Cota Cota, se puede inferir que existen condiciones para un manejo sostenible de colmenas de abejas; se dispone de una oferta floral diversa como fuente de alimentación con árboles y arbustos nativos e introducidos; la temperatura y la precipitación pluvial son adecuadas, salvo en los meses de junio y julio es recomendable brindar una alimentación asistida y atender los bebederos con agua limpia.

También, la población que vive y desarrolla sus actividades de esparcimiento alrededor de las colmenas instaladas, en su mayoría reconocen la importancia de las abejas en el proceso de polinización y por ende en la conservación de la biodiversidad; sin embargo, no se puede dejar de lado los temores que tiene un porcentaje menor de las personas sobre la presencia de abejas, para ello es necesario implementar campañas de información y concientización sobre el rol de las abejas.

Revisada la normativa sobre la instalación de apiarios y su manejo, en el país y el Departamento de La Paz, tiene disposiciones que responden a las buenas prácticas de la apicultura, tomando en cuenta que la instalación de las colmenas será en el área rural; sin embargo, no existen recomendaciones y cuidados para la instalación en espacios urbanos.

Asimismo, para que la apicultura en espacios urbanos pueda

desarrollarse de manera sostenible es necesario considerar los siguientes aspectos:

- Formar emprendedores verdes con conocimientos sobre apicultura urbana.
- Establecer centros de procesamiento de miel de abejas, para garantizar la inocuidad de los productos que serán comercializados.
- La Alcaldía Municipal, a través de las reparticiones encargadas, deben ejecutar programas de reforestación con especies nativas con potencia melífero.
- Crear un vínculo con las universidades para desarrollar temas de investigación relacionados con la apicultura.
- Realizar campañas de educación sobre la importancia de las abejas en la conservación de la biodiversidad de las ciudades.
- Implementar laboratorios de control de calidad de la miel de abejas, para garantizar la calidad de los productos que llegan a los hogares de los clientes y consumidores.

El desarrollo de infraestructura apícola adecuada es un componente clave para profesionalizar la actividad apícola y convertirla en una fuente sostenible de ingresos, empleo y conservación ambiental. En la ciudad de La Paz existen condiciones climáticas y florales favorables para la apicultura. Sin embargo, uno de los principales cuellos de botella para el desarrollo del sector es la falta de infraestructura básica y especializada (IICA, 2022).

Implicaciones prácticas

En esta sección se propone una hoja de ruta para el desarrollo de infraestructura apícola en La Paz, considerando aspectos técnicos, económicos y sociales. Se identifican acciones que deben ser implementadas para que la ciudad de La Paz cuente con un sector apícola sostenible:

i. Centros de acopio y procesamiento de miel

Uno de los primeros pasos para fortalecer la infraestructura apícola es establecer centros de acopio y procesamiento de miel en puntos estratégicos de la ciudad de La Paz. Las actividades de estos puntos de recolección y procesamiento de miel de abejas son:

- Recepción y almacenamiento de la miel y subproductos de diversos apicultores de la región, garantizando la trazabilidad.
- Procesamiento de la miel para remover impurezas y asegurar la inocuidad del producto para su comercialización.
- Envasado y etiquetado respetando la normativa vigente en el país.

- Almacenamiento adecuado para todos los productos que se obtienen de la actividad apícola.

ii. Talleres y laboratorios

Otra pieza fundamental es la instalación de talleres comunitarios de manufactura apícola, donde se fabriquen insumos básicos como colmenas Langstroth, cuadros móviles, ahumadores y vestimenta de protección. Muchos apicultores en La Paz actualmente dependen de equipos importados o de fabricación artesanal, lo cual eleva los costos y reduce la eficiencia del manejo (Ayuda en Acción, 2022). Para evitar el conflicto de intereses sobre la propiedad de talleres es recomendable que dependan de la Alcaldía de la ciudad de La Paz o de la Universidad Mayor de San Andrés.

También, se propone la instalación de laboratorios móviles o fijos, con fines de:

- Análisis de la calidad fisicoquímica de la miel.
- Detección de enfermedades apícolas (garrapata).

Asimismo, trabajar con los laboratorios ya instalados en la ciudad de La Paz, que cuentan con pruebas y análisis ya certificados para determinar la composición de la miel de abejas, pruebas como análisis químicos, físicos y microbiológicos.

iii. Infraestructura de capacitación y asistencia técnica

La falta de formación especializada es uno de los mayores problemas que enfrenta el sector apícola. Por ello, debe ubicarse un centro de capacitación técnica apícola, equipado con:

- Aulas teóricas y colmenares demostrativos.
- Programas de capacitación continuos dirigidos a nuevos apicultores, mujeres, jóvenes y comunidades indígenas.

Estos centros también pueden funcionar como espacios de innovación tecnológica, para promover prácticas como la apicultura ecológica, la producción de cosméticos a base de cera, o el uso terapéutico de productos apícolas (Fundación FAUTAPO, 2021).

iv. Comercialización de productos apícolas

En un contexto donde el marketing directo es indispensable para una adecuada comercialización, es necesario desarrollar infraestructura tecnológica que facilite la venta de la miel y sus derivados. Las acciones recomendadas incluyen:

- Crear plataformas virtuales para la venta de miel paceña con fichas técnicas.
- Promover ferias apícolas en mercados urbanos de La Paz.

Estas estrategias permitirían aumentar la visibilidad del producto, proteger su calidad y mejorar los ingresos de los apicultores (Portal Verde, 2022).

v. Financiamiento

Para materializar estas propuestas se requiere financiamiento específico para toda la cadena de producción y comercialización del sector apícola. Algunas recomendaciones son:

- Implementar créditos destinados al sector apícola, que tenga condiciones blandas, a través del sistema financiero establecido en el país.
- Establecer fondos rotatorios destinados a los productores para reposición de equipos y mantenimiento de infraestructura.
- Canalizar recursos de la cooperación internacional mediante proyectos de emprendimiento apícola y cambio climático.

Conclusión

Los resultados obtenidos demuestran que la ciudad de La Paz cuenta con condiciones ecológicas, climáticas y sociales favorables para el desarrollo de la apicultura urbana. La diversidad de flora melífera identificada, la percepción positiva de la población y la creciente demanda de miel constituyen elementos clave para consolidar esta actividad. Sin embargo, la expansión sostenible de la apicultura urbana requiere fortalecer la infraestructura técnica, mejorar la capacitación especializada y establecer normativas específicas para espacios urbanos. El estudio aporta un diseño preliminar cuya justificación técnica será el objetivo de estudios posteriores.

Recomendaciones

Para evitar saltos argumentativos, se un diseño conceptual preliminar de factibilidad basada en criterios de ingeniería: (a) disponibilidad mínima de recursos florales durante 9 meses del año; (b) ausencia de restricciones socioespaciales severas según percepción ciudadana (63% sin temor); y (c) oferta-demanda favorable sustentada en un consumo per cápita de 1.1 kg/año. Bajo estos tres criterios, la propuesta de infraestructura se presenta como una proyección lógica de ingeniería aplicada, aunque su implementación requerirá estudios posteriores de costo-beneficio y viabilidad económica detallada.

Referencia

- Ayuda en Acción. (2023). *La apicultura como herramienta de desarrollo sostenible en Bolivia*. <https://ayudaenaccion.org>
- Baldock, K. C. R. (2020). Opportunities and threats for pollinator conservation in global towns and cities. *Current Opinion in Insect Science*, 38, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2020.01.006>
- Bolivia Emprende. (2021). *La apicultura: una oportunidad de desarrollo en Bolivia*. <https://boliviaemprende.com>

- Bolivia Emprende. (2023). *Capacitación y emprendimiento en apicultura boliviana*. <https://boliviaemprende.com>
- FAUTAPO. (2021). *Estudio de cadenas productivas: Apicultura en Bolivia*. Fundación FAUTAPO. <https://fautapo.org>
- GAMLP (2018). *Guía de Identificación de Flora de las Áreas Protegidas Municipales*.
- Goulson, D., Nicholls, E., Botías, C., & Rotheray, E. (2015). Bee declines driven by combined stress from parasites, pesticides, and lack of flowers. *Science*, 347(6229), 1255-957. <https://doi.org/10.1126/science.1255957>
- Hall, D. M., et al. (2017). The city as a refuge for insect pollinators. *Conservation Biology*, 31(1), 24–29. <https://doi.org/10.1111/cobi.12840>
- IICA. (2022). *Estudio del potencial apícola de Bolivia y estrategias de fortalecimiento institucional*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. <https://iica.int>
- Laura, J. (2017). *Estudio de la flora melífera en las comunidades de Chicaloma y Laza*. Universidad Mayor de San Andrés (UMSA). <https://umsa.bo>
- Lorenz, S., & Stark, K. (2022). Urban beekeeping and honey contamination risks. *Environmental Pollution*, 308, 119–683. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119683>
- Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras (MDRyT). (2023). *Informe técnico del Programa Apícola Nacional*. <https://agrobolivia.gob.bo>
- Portal Apícola. (2017). *Consumo per cápita de miel en Bolivia y oportunidades de mercado*. <https://portalapicola.org>
- Portal Verde. (2022). *La apicultura ecológica como alternativa sostenible en Bolivia*. <https://portalverde.org>
- Portal Verde. (2023). *Principales enfermedades apícolas y su manejo técnico*. <https://portalverde.org>
- Portal Verde. (2024). *Programa Nacional de Apicultura con resiliencia al cambio climático*. <https://portalverde.org>
- Soro, A., Kimbrell, T., & Sheehan, M. (2022). Urban beekeeping: ecological implications and policy considerations. *Urban Ecosystems*, 25, 657–672. <https://doi.org/10.1007/s11252-021-01170-4>
- Tribunal Agroambiental. (2006). *Análisis de la Ley 3525 sobre producción ecológica en Bolivia*. <https://tribunalagroambiental.bo>

CAPÍTULO XX

**Evaluación de la madurez técnica
y la gestión de la sostenibilidad
en los informes GRI de
Instituciones Financieras de
Desarrollo en Bolivia**

Zaida Albino Loroño

Universidad Mayor de San Andrés

<https://orcid.org/0009-0005-9534-8222>

Evaluación de la madurez técnica y la gestión de la sostenibilidad en los informes GRI de Instituciones Financieras de Desarrollo en Bolivia

Resumen

El presente estudio analiza la gestión de la sostenibilidad en las Instituciones Financieras de Desarrollo (IFD) de Bolivia desde la perspectiva de la ingeniería de la sostenibilidad y los estándares del Global Reporting Initiative (GRI). Se adopta un enfoque cualitativo-descriptivo y comparativo, orientado a evaluar la madurez técnica, la trazabilidad y la automatización de los procesos de reporte de sostenibilidad. El estudio se centra en tres instituciones representativas: FUBODE, Fundación Pro Mujer IFD y FINRURAL. Los resultados evidencian avances relevantes en la institucionalización de la sostenibilidad, aunque con diferencias significativas en la gestión técnica de los indicadores. FINRURAL presenta el mayor nivel de madurez técnica y digitalización, mientras que FUBODE y Pro Mujer IFD muestran progresos en la dimensión social y de género, pero con limitaciones en la automatización de datos.

El análisis demuestra que la sostenibilidad debe ser concebida no solo como un discurso institucional, sino como un sistema técnico verificable, basado en arquitecturas de datos, procesos ETL y mecanismos de control de calidad. La investigación contribuye al fortalecimiento de la transparencia, la trazabilidad y la rendición de cuentas de las IFD bolivianas, alineándolas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 5, 8, 9 y 13.

Palabras clave: Global Reporting Initiative; ingeniería de la sostenibilidad; materialidad; eficiencia de reporte; inclusión financiera; gobernanza de datos; trazabilidad técnica.

Assessment of technical maturity and sustainability management in the GRI reports of Development Finance Institutions in Bolivia

Abstract

This study analyzes sustainability management within Bolivian Development Financial Institutions (DFIs) through the lens of sustainability engineering and the Global Reporting Initiative (GRI) standards. A qualitative, descriptive, and comparative approach was adopted to assess the technical maturity, traceability, and automation of sustainability reporting processes. The research focuses on three representative institutions: FUBODE, Fundación Pro Mujer IFD, and FINRURAL.

Findings reveal significant progress in the institutionalization of sustainability, though with notable differences in technical data management. FINRURAL exhibits the highest level of technical maturity and digital integration, whereas FUBODE and Pro Mujer IFD show strong social and gender-related performance but limited automation capacity.

The study demonstrates that sustainability should be understood not merely as a narrative concept but as a verifiable technical system grounded in data architectures, ETL processes, and quality control mechanisms. This research contributes to strengthening transparency, traceability, and accountability among Bolivian DFIs, aligning their actions with Sustainable Development Goals (SDGs) 5, 8, 9, and 13.

Keywords: Global Reporting Initiative; sustainability engineering; materiality; reporting efficiency; financial inclusion; data governance; technical traceability.

Avaliação da maturidade técnica e da gestão da sustentabilidade nos relatórios GRI das Instituições Financeiras de Desenvolvimento na Bolívia

Resumo

Este estudo analisa a gestão da sustentabilidade em Instituições Financeiras de Desenvolvimento (IFDs) bolivianas sob a perspectiva da engenharia da sustentabilidade e das normas da Global Reporting Initiative (GRI). Adota-se uma abordagem qualitativa-descritiva e comparativa, visando avaliar a maturidade técnica, a rastreabilidade e a automação dos processos de reporte de sustentabilidade. O estudo concentra-se em três instituições representativas: FUBODE, Fundación Pro Mujer IFD e FINRURAL. Os resultados demonstram um progresso significativo na institucionalização da sustentabilidade, embora com diferenças consideráveis na gestão técnica dos indicadores. A FINRURAL apresenta o maior nível de maturidade técnica e digitalização, enquanto a FUBODE e a Pro Mujer IFD demonstram progresso nas dimensões social e de gênero, porém com limitações na automação de dados.

A análise demonstra que a sustentabilidade deve ser concebida não apenas como um discurso institucional, mas também como um sistema técnico verificável, baseado em arquiteturas de dados, processos ETL e mecanismos de control de qualidade. A pesquisa contribui para fortalecer a transparência, a rastreabilidade e a responsabilização dos IFDs bolivianos, alinhando-os aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 5, 8, 9 e 13.

Palavras chave: Global Reporting Initiative; engenharia da sustentabilidade; materialidade; eficiência de relatórios; inclusão financeira; governança de dados; rastreabilidade técnica.

Introducción

En las últimas décadas, la sostenibilidad se ha consolidado como un eje estratégico en las instituciones financieras, integrando dimensiones económicas, sociales y ambientales dentro de sus modelos de gestión (Global Reporting Initiative, 2023). En Bolivia, las Instituciones Financieras de Desarrollo (IFD) desempeñan un papel esencial en la inclusión financiera, especialmente en el apoyo a mujeres emprendedoras, grupos vulnerables y sectores productivos locales.

En este contexto, los informes de sostenibilidad elaborados bajo los estándares del Global Reporting Initiative (GRI) se constituyen como instrumentos fundamentales para la transparencia, la rendición de cuentas y la mejora continua. Sin embargo, su potencial como herramientas de gestión técnica y organizacional aún no ha sido plenamente aprovechado en el sistema financiero boliviano.

La literatura reciente sugiere que los informes de sostenibilidad deben concebirse como sistemas técnicos estructurados que integran trazabilidad, control de calidad y mecanismos de reproducibilidad (Ofstedal et al., 2021; Moreno-Monsalve et al., 2018). Desde esta óptica, la ingeniería de la sostenibilidad ofrece un marco metodológico para optimizar los procesos internos de captura, validación y análisis de datos, garantizando la consistencia y verificabilidad de la información reportada.

El caso boliviano resulta particularmente relevante debido al crecimiento de las IFD y su combinación de objetivos sociales y financieros. No obstante, persisten disparidades en la madurez técnica y digitalización de las instituciones: mientras FUBODE prioriza la eficiencia económica, Fundación Pro Mujer IFD se orienta hacia la equidad de género y el bienestar social, y FINRURAL presenta los mayores avances en automatización y gobernanza de datos.

El propósito de este estudio es evaluar la gestión de la materialidad y la eficiencia técnica de los procesos de reporte en los informes de sostenibilidad 2023 de las IFD bolivianas, aplicando los principios de la ingeniería de la sostenibilidad y los estándares GRI. La investigación busca demostrar que la integración de un enfoque técnico en la sostenibilidad no solo mejora la transparencia y la rendición de cuentas, sino que fortalece la toma de decisiones estratégicas basadas en evidencia.

La sostenibilidad ha evolucionado de ser un principio normativo o ético a constituirse en un sistema técnico de gestión dentro de las organizaciones. En el ámbito financiero, esta transformación

se traduce en la necesidad de estructurar mecanismos verificables que integren eficiencia económica, responsabilidad social y respeto ambiental (Global Reporting Initiative, 2023).

Las Instituciones Financieras de Desarrollo (IFD), en particular, desempeñan un rol estratégico en la reducción de brechas de desigualdad y en la promoción del desarrollo sostenible. Su misión no se limita a la rentabilidad, sino que incluye la generación de impacto social positivo, especialmente a través del acceso financiero de mujeres emprendedoras, microempresarios y sectores vulnerables (Bezboruah & Pillai, 2013).

En este marco, los estándares del Global Reporting Initiative (GRI) se consolidan como una herramienta internacional para la gestión, evaluación y comunicación de la sostenibilidad. Desde su creación en 1997, el GRI ha establecido un marco de referencia que permite a las organizaciones reportar de manera transparente sus impactos económicos, sociales y ambientales (Global Reporting Initiative, 2023).

Los estándares GRI se estructuran en tres niveles principales: Estándares universales (GRI 1, GRI 2, GRI 3), que definen los principios y requisitos generales del reporte; estándares temáticos, que abordan aspectos específicos como desempeño económico (GRI 201), energía (GRI 302), agua (GRI 303), empleo (GRI 401) o privacidad del cliente (GRI 418) y los estándares sectoriales, diseñados para sectores particulares, entre ellos el financiero, energético y de servicios sociales.

En el sector financiero, los reportes GRI adquieren especial relevancia, ya que permiten visibilizar dimensiones intangibles como la inclusión, la equidad, la educación financiera y la gobernanza. Así, el GRI no solo cumple una función comunicacional, sino también ingenieril, al estructurar sistemas de información que requieren procedimientos técnicos de control, trazabilidad y auditoría (Alfonso & Castrillón, 2014).

La ingeniería de la sostenibilidad se define como una disciplina interdisciplinaria que aplica principios de ingeniería de procesos, análisis de datos y gestión ambiental al diseño de sistemas sostenibles (Oftedal et al., 2021). A diferencia de los enfoques tradicionales de responsabilidad social, esta perspectiva enfatiza la eficiencia técnica, la automatización y el control de calidad de los procesos que sustentan los informes de sostenibilidad.

De acuerdo con Moreno-Monsalve et al. (2018), la ingeniería de la sostenibilidad debe concebirse como un marco operativo, orientado a garantizar la integridad de los datos, la interoperabilidad de los sistemas de información y la validación continua de indicadores. En este sentido, un informe GRI no es solo un documento narrativo, sino el resultado de un sistema técnico

de captura, transformación y análisis de datos, sustentado en mecanismos de gobernanza digital.

Los principios operativos de la ingeniería de la sostenibilidad se agrupan en cinco dimensiones esenciales:

- Trazabilidad de la información: capacidad de rastrear los datos desde su origen hasta su presentación final.
- Automatización de procesos: uso de tecnologías que reduzcan errores humanos y aumenten la eficiencia.
- Gobernanza de datos: establecimiento de roles, políticas y normas para garantizar la calidad y seguridad de la información.
- Control de calidad: aplicación de auditorías internas o externas y revisiones sistemáticas.
- Reproducibilidad: posibilidad de replicar los resultados bajo las mismas condiciones metodológicas.

Cuando estos principios se aplican al GRI, la sostenibilidad adquiere una dimensión verificable y medible, transformándose en un sistema de ingeniería institucional. Cada indicador reportado debe estar vinculado a una fuente primaria de datos y a un proceso documentado de cálculo, lo que fortalece la fiabilidad y consistencia de la información.

El principio de materialidad, definido en el estándar GRI 3 (2021), establece que las organizaciones deben identificar y priorizar los temas que reflejan sus impactos significativos y las expectativas de sus grupos de interés. En la práctica, esto implica desarrollar procesos de consulta, análisis de riesgos y evaluación técnica que permitan jerarquizar los temas más relevantes. Sin embargo, en muchas instituciones financieras latinoamericanas, la materialidad se aborda de forma declarativa o narrativa, sin respaldo metodológico cuantitativo (Berlage & Jasrotia, 2015). Ello limita la verificación técnica y la comparación entre organizaciones.

Desde la ingeniería de la sostenibilidad, la materialidad se concibe como un proceso técnico de evaluación de impacto, que involucra la frecuencia del riesgo, la magnitud del efecto y la capacidad institucional para gestionarlo (Alfonso & Castrillón, 2014). De este modo, la gestión de la materialidad se convierte en un sistema dinámico y adaptable, soportado en bases de datos, algoritmos de priorización y tableros de control.

La noción de madurez técnica permite medir el grado de desarrollo de los sistemas de información y la capacidad de una organización para gestionar sus procesos de sostenibilidad. Según Moreno-Monsalve et al. (2018), los modelos de madurez se estructuran en cuatro niveles: inicial, con procesos manuales y sin trazabilidad, desarrollado, con mecanismos formales, pero

no automatizados; integrado, con sistemas digitales interconectados; finalmente optimizado, con arquitecturas automatizadas y análisis predictivo. Las instituciones con niveles de madurez más altos presentan reportes más consistentes, reproducibles y confiables (Ofstedal et al., 2021). En cambio, aquellas con estructuras manuales enfrentan mayores riesgos de error, pérdida de información y baja transparencia.

La gobernanza de datos, por su parte, constituye el conjunto de políticas y roles que garantizan la calidad, seguridad y trazabilidad de la información institucional. Desde la ingeniería de la sostenibilidad, esta gobernanza se implementa a través de procesos ETL (Extract, Transform, Load), control de versiones y validaciones automatizadas, asegurando la integridad técnica de los indicadores reportados (Moreno-Monsalve et al., 2018).

El enfoque de género constituye una dimensión estructural de la sostenibilidad financiera, diversos estudios demuestran que la inclusión económica de las mujeres tiene efectos positivos sobre la equidad, la educación y el bienestar de los hogares (Akter & Ahmad, 2020; Bosu, 2023). En Bolivia, la Fundación Pro Mujer IFD ha liderado la integración de indicadores de género y educación financiera en sus reportes de sostenibilidad, representando un modelo de gestión socialmente responsable (Fundación Pro Mujer IFD, 2023). Sin embargo, aún persisten brechas en la estandarización y digitalización de estos indicadores.

La ingeniería de la sostenibilidad puede contribuir al cierre de estas brechas mediante la implementación de sistemas de monitoreo digital, con métricas desagregadas por sexo, edad y región, que permitan analizar el impacto en tiempo real. Estas innovaciones, apoyadas por herramientas de business intelligence y gobernanza digital, fortalecen la capacidad técnica de las instituciones y mejoran la calidad de la rendición de cuentas (Dr. Umesh Balu Gadekar, 2023).

En conjunto, la literatura revisada permite establecer tres pilares conceptuales que orientan la presente investigación: el GRI como herramienta metodológica de gestión y comunicación de la sostenibilidad; la ingeniería de la sostenibilidad como marco técnico para optimizar los procesos de captura, análisis y verificación de datos y la materialidad como vínculo operativo entre los impactos institucionales y las expectativas de los grupos de interés.

La integración de estos tres enfoques posibilita una sostenibilidad técnica, medible y verificable, donde los informes dejan de ser meros instrumentos de comunicación para convertirse en sistemas de gestión estructurados, auditables y orientados a la mejora continua.

Metodología

El presente estudio adopta un enfoque cualitativo-descriptivo y comparativo, orientado al análisis técnico e interpretativo de los informes de sostenibilidad 2023 elaborados por las Instituciones Financieras de Desarrollo (IFD) de Bolivia. Este enfoque permite comprender la naturaleza de los procesos de reporte y evaluar su nivel de madurez técnica, trazabilidad y eficiencia de gestión, aspectos fundamentales en la ingeniería de la sostenibilidad (Hernández, Fernández & Baptista, 2022).

El diseño metodológico se estructura en torno al análisis documental comparativo, centrado en tres instituciones representativas del sistema financiero boliviano: FUBODE, que orienta su gestión a la eficiencia económica y sostenibilidad microfinanciera; Fundación Pro Mujer IFD, especializada en inclusión financiera con enfoque de género y FINRURAL, red que agrupa a las IFD bolivianas, con avances en digitalización, gobernanza de datos y sostenibilidad. La selección de estas instituciones responde a su liderazgo dentro del sector y a la disponibilidad pública de sus informes bajo los estándares del Global Reporting Initiative (GRI), lo que permite aplicar una metodología comparativa homogénea.

El estudio se apoya en fuentes primarias —los informes GRI 2023 de las tres IFD— y en fuentes secundarias, que incluyen literatura científica, guías metodológicas y normas técnicas sobre ingeniería de la sostenibilidad, madurez tecnológica y gobernanza de datos (Global Reporting Initiative, 2023; Oftedal et al., 2021; Moreno-Monsalve et al., 2018).

La delimitación temporal abarca el año 2023, correspondiente al último periodo con reportes GRI consolidados en Bolivia. La delimitación espacial se circunscribe al sistema financiero de desarrollo boliviano, que se caracteriza por su orientación social y por la inclusión de mujeres emprendedoras como grupo prioritario.

El procedimiento metodológico se desarrolla en cuatro fases sucesivas, inspiradas en los principios de la ingeniería de procesos y trazabilidad técnica, con el propósito de garantizar rigor analítico y reproducibilidad de resultados:

Fase 1. Identificación de temas materiales

Se extrajeron los temas materiales declarados por cada institución según el estándar GRI 3 (2021). Esta fase incluyó la verificación de la correspondencia entre los temas reportados y los indicadores específicos de desempeño económico (GRI 201), ambiental (GRI 303) y social (GRI 401, 413, 418).

Fase 2. Categorización y priorización de indicadores

Los indicadores fueron agrupados bajo las tres dimensiones clásicas de la sostenibilidad —económica, social y ambiental— y evaluados en cuanto a su grado de cuantificación, trazabilidad y actualización. Este proceso permitió observar la coherencia técnica y metodológica de los informes, así como el nivel de sistematización de la información (Global Reporting Initiative, 2023).

Fase 3. Evaluación de madurez técnica

Se aplicó una rúbrica de madurez técnica diseñada para medir la eficiencia, trazabilidad y calidad de los procesos de reporte, estructurada en cinco dimensiones evaluativas: trazabilidad: capacidad de rastrear los datos reportados hasta su fuente original; automatización: nivel de digitalización y uso de herramientas tecnológicas en la gestión de indicadores; gobernanza de datos: existencia de roles, políticas y protocolos definidos para la administración de la información; control de calidad: mecanismos de revisión, validación y auditoría técnica y reproducibilidad: posibilidad de replicar los resultados bajo las mismas condiciones y procedimientos (Moreno-Monsalve et al., 2018; Oftedal et al., 2021).

Cada dimensión se valoró en una escala de 0 a 3 puntos, donde 0 representa la ausencia del criterio y 3 indica un desarrollo avanzado. El resultado global se expresó mediante un Índice de Madurez Técnica (IMT), calculado como la media aritmética de las cinco dimensiones.

Fase 4. Triangulación y validación

Los resultados se contrastaron con literatura académica y buenas prácticas internacionales en sostenibilidad e ingeniería de datos (Berlage & Jasrotia, 2015; Alfonso & Castrillón, 2014). Se aplicó un proceso de triangulación analítica y revisión cruzada entre investigadores, a fin de minimizar sesgos de interpretación y reforzar la consistencia interna del estudio. Este proceso sigue las recomendaciones del GRI 1 (2021) sobre transparencia metodológica y verificabilidad de la información.

El análisis comparativo entre las tres instituciones se estructuró según seis criterios de evaluación técnica, derivados tanto de los estándares GRI como de los principios de ingeniería de procesos (Moreno-Monsalve et al., 2018): estructura del reporte: grado de alineación con los estándares GRI 1, 2 y 3, y coherencia entre los temas materiales y los indicadores; gestión de datos: mecanismos de recolección, digitalización y control de calidad aplicados en la construcción del informe; automatización: uso de herramientas tecnológicas para consolidar y analizar indicadores (bases de

datos, hojas automatizadas, tableros digitales); gobernanza y responsabilidad técnica: existencia de unidades o comités encargados de la validación de datos; transparencia y verificabilidad: trazabilidad de indicadores y auditorías externas; finalmente la integración estratégica: alineación de los resultados reportados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) más relevantes (5, 8, 9 y 13) (United Nations, 2022).

Cada criterio se evaluó cualitativa y cuantitativamente mediante una escala de 0 (bajo cumplimiento) a 3 (alto cumplimiento), lo que permitió identificar no solo el desempeño narrativo, sino también la solidez técnica de cada sistema de reporte.

El procesamiento de los datos siguió una lógica de ingeniería de datos basada en tres niveles: extracción y clasificación: los indicadores fueron extraídos de los informes y clasificados según su dimensión de sostenibilidad (económica, social o ambiental); transformación y normalización: se verificó la consistencia temporal y semántica de los indicadores, corrigiendo duplicidades o errores de medición mediante procesos ETL (Extract, Transform, Load) y carga y análisis técnico: los indicadores estandarizados se analizaron a través de la rúbrica de madurez técnica y se documentaron en una base estructurada para asegurar reproducibilidad y transparencia.

Pese al rigor metodológico, se identifican algunas limitaciones como la disponibilidad de información técnica: no todos los informes incluyen evidencia sobre los procesos internos de validación; heterogeneidad documental: las diferencias en formato y nivel de detalle dificultan la estandarización total de las variables; ausencia de auditorías externas: la mayoría de las IFD carece de certificaciones independientes en sostenibilidad y el enfoque temporal restringido: el estudio se limita al análisis de los informes 2023, sin incluir una evolución longitudinal. No obstante, estas limitaciones no afectan la validez general del estudio, dado que la triangulación metodológica y la aplicación de criterios técnicos rigurosos aseguran la coherencia analítica y la fiabilidad de los resultados (Hernández et al., 2022).

El análisis se realizó únicamente sobre información pública disponible en línea, sin incluir datos personales o sensibles. La investigación se desarrolló conforme a los principios de ética académica y transparencia establecidos por la American Psychological Association (APA, 2020) y las directrices metodológicas del Global Reporting Initiative (2023).

Resultados

Los resultados del análisis comparativo entre las Instituciones Financieras de Desarrollo (IFD) —FUBODE, Fundación Pro Mujer IFD y FINRURAL— revelan avances significativos en la institucionalización de la sostenibilidad, aunque persisten diferencias notables en los niveles de madurez técnica, trazabilidad y automatización de los procesos de reporte.

• Temas materiales y nivel técnico de desarrollo

Los temas materiales identificados en los informes GRI 2023 se agrupan principalmente en las tres dimensiones tradicionales de la sostenibilidad: económica, social y ambiental. No obstante, cada institución prioriza de forma diferente estos temas, reflejando sus enfoques estratégicos particulares.

Tabla 1. Temas materiales y nivel de desarrollo técnico de las IFD (2023)

Dimensión	Tema material (GRI)	FUBODE	Pro Mujer IFD	FINRURAL	Nivel técnico promedio (0-3)
Económica	Desempeño económico (GRI 201)	2	2	3	2.3
Económica / Social	Inclusión financiera y educación (GRI 203)	2	3	3	2.7
Social	Empleo y formación (GRI 401/404)	2	3	2	2.3
Social	Igualdad y diversidad (GRI 405)	1	3	2	2.0
Ambiental	Uso de agua y energía (GRI 302/303)	1	2	3	2.0
Social	Privacidad y seguridad de datos (GRI 418)	1	2	3	2.0
Social / Económica	Desarrollo local (GRI 413)	2	3	3	2.7

Fuente: Elaboración propia con base en los informes GRI 2023 de FUBODE, Fundación Pro Mujer IFD y FINRURAL.

Los resultados muestran una tendencia convergente en la selección de los temas materiales —como desempeño económico, inclusión financiera y desarrollo local—, pero una divergencia técnica en el grado de digitalización y automatización de los procesos de reporte.

FUBODE evidencia un enfoque pragmático centrado en la sostenibilidad económica, mientras que Fundación Pro Mujer IFD prioriza la sostenibilidad social y de género. Por su parte, FINRURAL muestra un equilibrio técnico más avanzado, integrando gobernanza, sostenibilidad ambiental y herramientas digitales de análisis.

Para comprender la priorización de los temas materiales, se reconstruyeron las matrices de materialidad de cada institución, considerando dos variables: importancia externa: relevancia del tema para los grupos de interés y relevancia interna: impacto del tema en la gestión institucional. Estas matrices reflejan no solo las prioridades estratégicas, sino también el nivel técnico alcanzado en la gestión de cada indicador.

Tabla 2: Matriz de Materialidad – FUBODE (2023)

Tema material	Importancia externa (1-5)	Relevancia interna (1-5)	Nivel técnico (0-3)
Desempeño económico	5	5	3
Inclusión financiera	4	4	2
Empleo y desarrollo humano	3	4	2
Igualdad de género	3	3	1
Eficiencia energética	2	2	1
Privacidad de datos	3	3	1

Fuente: Elaboración propia con base en los informes GRI 2023 de FUBODE.

FUBODE concentra su estrategia de sostenibilidad en el desempeño económico y la inclusión financiera, con indicadores principalmente cuantitativos. Sin embargo, los temas sociales y ambientales aún presentan baja trazabilidad y una digitalización incipiente, lo que refleja un sistema de gestión de datos manual y dependiente de procesos operativos básicos.

Tabla 3: Matriz de Materialidad – Fundación Pro Mujer IFD (2023)

Tema material	Importancia externa (1-5)	Relevancia interna (1-5)	Nivel técnico (0-3)
Inclusión y educación financiera	5	5	3
Igualdad de género	5	5	3
Bienestar y empleo	4	4	2

Protección de datos	3	4	2
Impacto ambiental	3	3	2
Desarrollo local	5	4	3

Fuente: Elaboración propia con base en los informes GRI 2023 de Fundación Pro Mujer IFD.

Fundación Pro Mujer IFD presenta una clara orientación social y de género, con alta prioridad en la educación financiera, la equidad y el bienestar de las mujeres. Su sistema de reporte alcanza un nivel medio de automatización, con procesos parcialmente digitalizados y mecanismos de validación interna. No obstante, los indicadores ambientales mantienen un desarrollo limitado, lo que sugiere la necesidad de fortalecer la integración tecnológica para mejorar la eficiencia en el control de calidad de los datos.

Tabla 4: Matriz de Materialidad – FINRURAL (2023)

Tema material	Importancia externa (1-5)	Relevancia interna (1-5)	Nivel técnico (0-3)
Desempeño económico	5	5	3
Inclusión financiera	5	4	3
Gobernanza y transparencia	5	5	3
Gestión ambiental	4	4	2
Seguridad y privacidad	4	4	3
Desarrollo local	5	5	3

Fuente: Elaboración propia con base en los informes GRI 2023 de FINRURAL.

FINRURAL demuestra el mayor grado de madurez técnica entre las tres instituciones, alcanzando un nivel alto en automatización, trazabilidad y gobernanza de datos. Su modelo de gestión incorpora procesos ETL (Extract, Transform, Load), tableros digitales y control automatizado de indicadores, lo que permite consolidar la información de sostenibilidad con mayor consistencia técnica. El enfoque de FINRURAL combina la sostenibilidad económica, social y de gobernanza con una arquitectura digital avanzada, lo que la posiciona como referente en la gestión técnica de sostenibilidad en el sector financiero boliviano.

Análisis transversal y madurez técnica

El Índice de Madurez Técnica (IMT) sintetiza el desempeño global de las instituciones en las cinco dimensiones evaluadas.

Tabla 5. Índice de madurez técnica por institución (escala 0-3)

Dimensión técnica	FUBODE	Pro Mujer IFD	FINRURAL	Promedio general
Trazabilidad	2	2.5	3	2.5
Automatización	1	2	3	2
Gobernanza de datos	1	2.5	3	2.2
Control de calidad	2	2.5	3	2.5
Reproducibilidad	1.5	2	3	2.2
IMT Total	1.5	2.3	3	2.3

Fuente: Elaboración propia con base en la rúbrica de madurez técnica (2024).

El análisis del IMT confirma tres niveles diferenciados:

- FINRURAL (IMT = 3.0): nivel avanzado, con procesos automatizados, auditorías externas y gobernanza consolidada.
- Fundación Pro Mujer IFD (IMT = 2.3): nivel intermedio, con fortalezas en equidad de género y educación financiera, pero con automatización parcial.
- FUBODE (IMT = 1.5): nivel incipiente, dependiente de procedimientos manuales y limitada estandarización.

Estos resultados demuestran que la sostenibilidad en el sistema financiero boliviano ha avanzado conceptualmente, pero requiere fortalecer su madurez técnica para garantizar la trazabilidad y comparabilidad de los indicadores (Moreno-Monsalve et al., 2018).

El análisis transversal evidencia que, si bien las tres instituciones comparten una estructura temática común basada en los estándares GRI, su nivel de desarrollo técnico varía según el grado de digitalización y gobernanza de datos. Desde la perspectiva de la ingeniería de la sostenibilidad, la convergencia conceptual no garantiza la eficiencia técnica. Solo mediante sistemas automatizados, interoperables y auditables es posible consolidar una sostenibilidad medible y reproducible (Ofstedal et al., 2021). FINRURAL lidera este proceso, mientras que Fundación Pro Mujer IFD y FUBODE deben avanzar hacia arquitecturas de datos integradas que fortalezcan la consistencia técnica y la transparencia institucional.

Discusión

El análisis de los informes de sostenibilidad 2023 de las tres Instituciones Financieras de Desarrollo (IFD) de Bolivia —FUBODE, Fundación Pro Mujer IFD y FINRURAL— revela una tendencia hacia la institucionalización de la sostenibilidad, aunque con niveles desiguales de madurez técnica. Este hallazgo confirma que la

sostenibilidad en el ámbito financiero boliviano ha avanzado más en su dimensión declarativa que en su consolidación como sistema técnico de gestión, coincidiendo con lo planteado por Moreno-Monsalve et al. (2018) y Oftedal et al. (2021).

Los resultados muestran que FINRURAL presenta un modelo más avanzado, caracterizado por la integración de procesos automatizados, sistemas de gobernanza de datos y herramientas ETL (Extract, Transform, Load), lo que le permite alcanzar una trazabilidad alta y un control de calidad riguroso. Este nivel de madurez técnica refleja la aplicación efectiva de principios de ingeniería de la sostenibilidad, donde la eficiencia operativa y la integridad de los datos se constituyen en pilares fundamentales del sistema.

Por el contrario, FUBODE y Fundación Pro Mujer IFD mantienen procesos más dependientes de registros manuales y validaciones humanas. Aunque ambas instituciones han demostrado compromiso con la sostenibilidad social, su infraestructura técnica y digital sigue en desarrollo. La falta de automatización y gobernanza integral de datos limita la reproducibilidad y la capacidad de auditoría externa de los informes, aspectos esenciales para la fiabilidad de los sistemas de sostenibilidad (Global Reporting Initiative, 2023).

Desde la perspectiva de la ingeniería aplicada, los hallazgos demuestran que el avance en sostenibilidad no depende únicamente de la voluntad institucional o del cumplimiento de estándares GRI, sino de la capacidad de integrar sistemas de información, herramientas analíticas y flujos de datos estandarizados. En términos ingenieriles, la sostenibilidad debe concebirse como una arquitectura técnica compuesta por procesos interconectados, gobernanza de datos y auditoría permanente.

Estos resultados confirman también una correlación positiva entre la madurez técnica y la relevancia de los temas materiales. Las instituciones que priorizan temas de alto impacto —como inclusión financiera, gobernanza y desarrollo local— tienden a presentar mayores niveles de automatización y control, evidenciando la relación entre prioridad estratégica y desarrollo técnico (Oftedal et al., 2021).

Asimismo, el análisis de materialidad muestra que las tres instituciones convergen en los ejes de desempeño económico, inclusión financiera y desarrollo local, lo que sugiere un alineamiento con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 5, 8, 9 y 13 (United Nations, 2022). Sin embargo, esta alineación conceptual no siempre se traduce en una gestión técnica eficaz, ya que las brechas de digitalización impiden el seguimiento sistemático de los impactos sociales y ambientales.

El estudio evidencia que la trazabilidad y la automatización son las dimensiones con mayor variación entre las IFD. FINRURAL, con un índice de madurez técnica (IMT) de 3.0, implementa mecanismos de verificación digital y tableros de control en tiempo real; Fundación Pro Mujer IFD alcanza un IMT de 2.3, con trazabilidad media; y FUBODE, con 1.5, mantiene un sistema predominantemente manual. Esta diferencia refleja que la sostenibilidad, cuando se gestiona desde la ingeniería, depende directamente del grado de digitalización y del diseño del sistema de datos (Moreno-Monsalve et al., 2018).

La evidencia también sugiere que las IFD bolivianas atraviesan un proceso de transición desde modelos narrativos hacia modelos técnicos, donde la sostenibilidad se convierte en una función estructural de gobernanza institucional. Esta transformación implica integrar la sostenibilidad en la arquitectura tecnológica, en los procedimientos operativos y en los flujos de toma de decisiones.

Aportes desde la ingeniería de la sostenibilidad

La presente investigación demuestra que aplicar los principios de la ingeniería de la sostenibilidad al análisis de los informes GRI permite pasar de un enfoque comunicacional a un enfoque sistémico y verificable, donde los indicadores se gestionan como variables técnicas de desempeño.

Los principales aportes identificados son los siguientes:

1. Integración técnica de la sostenibilidad: El uso de modelos de madurez técnica permite evaluar objetivamente el desempeño institucional, incorporando criterios de trazabilidad, automatización y reproducibilidad, lo que mejora la calidad de los informes GRI.
2. Optimización de la gestión de datos: La adopción de procesos ETL y tableros automatizados reduce los errores humanos y acorta los tiempos de consolidación de información, fortaleciendo la transparencia.
3. Gobernanza digital: La ingeniería de la sostenibilidad aporta marcos operativos que garantizan la integridad y seguridad de los datos, condición esencial para la credibilidad de los informes.
4. Enfoque de género basado en evidencia: La inclusión de indicadores técnicos desagregados por sexo y región permite medir de manera precisa los avances en equidad e inclusión, superando los enfoques meramente declarativos (Bosu, 2023; Akter & Ahmad, 2020).
5. Estandarización sectorial: La ingeniería aplicada facilita la creación de modelos de reporte replicables entre

instituciones, lo que contribuye a la comparabilidad y a la consolidación de una cultura técnica de sostenibilidad en el sistema financiero boliviano.

Estos aportes permiten reafirmar que la sostenibilidad, desde un enfoque ingenieril, no es un concepto abstracto, sino un sistema técnico medible y auditado, capaz de mejorar la eficiencia organizacional y la rendición de cuentas.

Recomendaciones

Con base en los resultados y el análisis teórico, se formulan las siguientes recomendaciones:

1. Implementar sistemas de reporte automatizado: Las IFD deberían adoptar plataformas digitales interconectadas que permitan consolidar indicadores GRI de forma automática, reduciendo errores humanos y tiempos de procesamiento.
2. Establecer comités de gobernanza de datos: Crear equipos multidisciplinarios responsables del control técnico y la validación de los datos de sostenibilidad, con competencias en ingeniería, sistemas y gestión social.
3. Adoptar metodologías de ingeniería de procesos: Integrar metodologías de mejora continua (Lean, Six Sigma) aplicadas a la sostenibilidad para optimizar los flujos de información y minimizar desperdicios operativos.
4. Desarrollar indicadores desagregados por género y territorio: Los sistemas de medición deben incluir variables sociales diferenciadas, permitiendo evaluar el impacto real de la inclusión financiera en mujeres y comunidades rurales.
5. Fortalecer la trazabilidad documental y las auditorías externas: Incorporar revisiones técnicas independientes que certifiquen la consistencia de los reportes, reforzando la credibilidad institucional.
6. Estandarizar la comunicación técnica de la sostenibilidad: Utilizar plantillas GRI integradas con bases de datos institucionales, permitiendo actualizaciones automáticas y coherencia entre periodos.

Conclusiones

El estudio concluye que las Instituciones Financieras de Desarrollo (IFD) de Bolivia han logrado consolidar avances significativos en la incorporación de la sostenibilidad en sus estrategias institucionales, especialmente en los ámbitos económico y social. Sin embargo, el análisis técnico evidencia una brecha de madurez tecnológica que limita la trazabilidad y la comparabilidad de los informes.

La ingeniería de la sostenibilidad se presenta como un marco esencial para superar estas limitaciones, al ofrecer herramientas para el diseño, control y validación de sistemas de datos sostenibles. Integrar esta perspectiva en las IFD implica no solo cumplir con los estándares GRI, sino construir arquitecturas institucionales robustas, con procesos automatizados y gobernanza digital efectiva.

En síntesis, los hallazgos sugieren que:

- La sostenibilidad debe gestionarse como un sistema técnico de ingeniería, no solo como un compromiso ético o social.
- La madurez técnica es el indicador determinante de la eficiencia y credibilidad de los informes GRI.
- La digitalización de la información y la interoperabilidad de los sistemas son factores críticos para la trazabilidad y la transparencia.
- La incorporación del enfoque de género debe sustentarse en indicadores verificables y sistemas de monitoreo automatizado.
- Las políticas de gobernanza de datos son indispensables para asegurar la calidad, integridad y seguridad de la información institucional.

Por tanto, la consolidación de una sostenibilidad verificable en las IFD bolivianas requiere avanzar hacia un modelo técnico integral que unifique sistemas de información, estándares GRI y principios de ingeniería de la sostenibilidad. Solo así será posible garantizar una gestión institucional que combine la eficiencia operativa con el impacto social y ambiental sostenible.

Referencias

- Akter, S., & Ahmad, S. (2020). Women's financial inclusion and economic empowerment: A systematic review of literature. *Journal of International Development*, 32(8), 1345–1362. <https://doi.org/10.1002/jid.3495>
- Alfonso, M., & Castrillón, J. (2014). La gestión de la sostenibilidad corporativa: Retos y oportunidades en la implementación de los estándares GRI. *Revista de Contabilidad y Negocios*, 9(17), 31–44. <https://doi.org/10.18800/contabilidad.201401.003>
- American Psychological Association. (2020). *Publication manual of the American Psychological Association* (7th ed.). APA Publishing.
- Berlage, L., & Jasrotia, P. (2015). Materiality in sustainability reporting: A review and conceptual framework. *Journal of Business Ethics*, 132(3), 583–597. <https://doi.org/10.1007/s10551-014-2315-6>

- Bezboruah, K. C., & Pillai, V. (2013). Empowering women micro-entrepreneurs: A study of microfinance institutions in India. *Journal of Developmental Entrepreneurship*, 18(4), 1350025. <https://doi.org/10.1142/S1084946713500253>
- Bosu, S. (2023). Gender mainstreaming and digital inclusion in sustainable microfinance. *International Journal of Gender Studies in Developing Societies*, 7(2), 89-107. <https://doi.org/10.1504/IJGSDS.2023.129845>
- Gadekar, U.B. (2023). Role of digital engineering and AI in sustainable finance systems. *Engineering Management Review*, 51(1), 44-59. <https://doi.org/10.1109/EMR.2023.324511>
- Fundación Pro Mujer IFD. (2023). *Informe de sostenibilidad 2023*. La Paz, Bolivia: Fundación Pro Mujer IFD. Recuperado de <https://promujer.org/>
- Global Reporting Initiative. (2023). *GRI Standards 2021: Consolidated set of sustainability reporting standards*. GRI. <https://doi.org/10.47985/GRI.2021.STD>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2022). *Metodología de la investigación* (7ª ed.). McGraw-Hill.
- Moreno-Monsalve, N., Álvarez, D., & De la Peña, M. (2018). Ingeniería de la sostenibilidad: fundamentos, principios y aplicaciones. *Ingeniería y Universidad*, 22(2), 223-245. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iyu22-2.ind5>
- Oftedal, E., Jensen, J. A., & Falck, R. (2021). Data governance and sustainability engineering: Framework for quality assurance in sustainability reporting systems. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128157. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128157>
- United Nations. (2022). *The Sustainable Development Goals Report 2022*. United Nations Department of Economic and Social Affairs. <https://doi.org/10.18356/9789210015963>
- FINRURAL. (2023). *Informe de sostenibilidad y responsabilidad social 2023*. La Paz, Bolivia: Red FINRURAL. Recuperado de <https://finrural.bo/>
- FUBODE IFD. (2023). *Reporte de sostenibilidad 2023*. Cochabamba, Bolivia: Fundación FUBODE. Recuperado de <https://fubode.org.bo/>

CAPÍTULO XXI

**Aportes de gases de efecto
invernadero en el sector
productivo de Bolivia:
Oportunidades y desafíos para su
reducción**

Tania Terán Mita

Universidad Mayor de San Andrés

<https://orcid.org/0000-0003-4301-670X>

Aportes de gases de efecto invernadero en el sector productivo de Bolivia: Oportunidades y desafíos para su reducción

Resumen

El cambio climático es una amenaza ambiental y socioeconómica global de relevancia importante, impulsada principalmente por las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) cuyo reforzamiento es causado por las actividades humanas. Las industrias extractivas, como la minería, la extracción de petróleo y la perforación de gas natural, han impulsado la industrialización y el crecimiento económico en Bolivia y a nivel mundial; sin embargo, sus actividades se han asociado con una importante degradación ambiental. Por tanto, para establecer el impacto climático de las actividades humanas es importante la cuantificación de las emisiones de GEI, y así desarrollar estrategias efectivas de mitigación. En este contexto, el este trabajo realiza el análisis comparativo de las emisiones GEI en los sectores hidrocarburos, industria manufacturera y minería en Bolivia, proyectando las mismas hacia el año 2030, además identifica desafíos estructurales y oportunidades tecnológicas, regulatorias y económicas para la mitigación. Los resultados reflejan que los sectores hidrocarburos, industria manufacturera y minería son contribuyentes relevantes a las emisiones nacionales de GEI contribuyendo a la preponderancia del Sector Energía, aunque es recomendable considerar en las proyecciones, la posible transición a energías renovables en el país. El potencial de reducción en el horizonte 2026–2030 es posible, aunque las mayores oportunidades se presentan en el sector hidrocarburos por reducción de fugas y flaring; la manufactura y minería presentan oportunidades importantes mediante eficiencia y electrificación.

Palabras clave: Emisiones, GEI, Hidrocarburos, Industria Manufacturera, Minería.

Greenhouse gas emissions in Bolivia's productive sector: opportunities and challenges for reduction

Abstract

Climate change is a significant global environmental and socio-economic threat, driven primarily by greenhouse gas (GHG) emissions, the intensification of which is caused by human activities. Extractive industries, such as mining, oil extraction, and natural gas drilling, have fueled industrialization and economic growth in Bolivia and worldwide; however, their activities have been associated with significant environmental degradation. Therefore, quantifying GHG emissions is crucial to establishing the climate impact of human activities and developing effective mitigation strategies. In this context, this study presents a comparative analysis of GHG emissions in the hydrocarbon, manufacturing, and mining sectors in Bolivia, projecting them to 2030. It also identifies structural challenges and technological, regulatory, and economic opportunities for mitigation. The results reflect that the hydrocarbon, manufacturing and mining sectors are significant contributors to national GHG emissions, contributing to the predominance of the Energy Sector, although it is advisable to consider the possible transition to renewable energies in the country in the projections. The potential for reduction in the 2026–2030 horizon is possible, although the greatest opportunities are in the hydrocarbons sector through reduction of leaks and flaring; manufacturing and mining present important opportunities through efficiency and electrification.

Keywords: Emissions, GHG, Hydrocarbons, Manufacturing Industry, Mining.

Contribuições dos gases de efeito estufa no setor produtivo da Bolívia: oportunidades e desafios para a sua redução

Resumo

As mudanças climáticas representam uma ameaça ambiental e socioeconômica global significativa, impulsionada principalmente pelas emissões de gases de efeito estufa (GEE), cuja intensificação é causada pelas atividades humanas. Indústrias extrativas, como mineração, extração de petróleo e perfuração de gás natural, têm impulsionado a industrialização e o crescimento econômico na Bolívia e em todo o mundo; no entanto, suas atividades têm sido associadas a uma significativa degradação ambiental. Portanto, quantificar as emissões de GEE é crucial para estabelecer o impacto climático das atividades humanas e desenvolver estratégias eficazes de mitigação. Nesse contexto, este estudo apresenta uma análise comparativa das emissões de GEE nos setores de hidrocarbonetos, manufatura e mineração na Bolívia, projetando-as para 2030. Também identifica desafios estruturais e oportunidades tecnológicas, regulatórias e econômicas para mitigação. Os resultados refletem que os setores de hidrocarbonetos, manufatura e mineração contribuem significativamente para as emissões nacionais de GEE, contribuindo para a predominância do setor energético, embora seja aconselhável considerar a possível transição para energias renováveis no país nas projeções. O potencial de redução no período de 2026 a 2030 é possível, embora as maiores oportunidades estejam no setor de hidrocarbonetos por meio da redução de vazamentos e queima de gás. Os setores de manufatura e mineração apresentam oportunidades significativas por meio da eficiência e da eletrificação.

Palavras chave: Emissões, GEE, Hidrocarbonetos, Indústria de Transformação, Mineração.

Introducción

El cambio climático, cuya principal causa es el aumento de gases de efecto invernadero (GEI) debido a la actividad humana, representa la amenaza mundial más grave con repercusiones medioambientales y socioeconómicas significativas. Las industrias extractivas, como la minería, la extracción de petróleo y la perforación de gas natural, han impulsado la industrialización y el crecimiento económico a nivel mundial; sin embargo, sus actividades se han asociado desde hace mucho tiempo con una importante degradación ambiental (Rozan, 2024). De hecho, los gases de efecto invernadero (GEI) son gases atmosféricos que impulsan el cambio climático global, ya que absorben y retienen la radiación infrarroja, contribuyendo al calentamiento global (United Nations Environment Programme, 2023).

En este sentido, para establecer el impacto climático de las actividades humanas es importante la cuantificación de las emisiones de GEI que están constituidos fundamentalmente por el Dióxido de Carbono - CO₂, Metano - CH₄, Óxido Nitroso N₂O, Hidrofluorocarbonos - HFCs, Per-fluoro-carbonos - PFCs, Hexafluoruro de azufre- SF₆), y así desarrollar estrategias efectivas de mitigación. El CO₂ ingresa a la atmósfera a través de la quema de combustibles fósiles (carbón, gas natural y petróleo), residuos sólidos, árboles y otros materiales biológicos; y también como resultado de ciertas reacciones químicas (p. ej. en fabricación de cemento), el CH₄ se emite durante la producción y el transporte de carbón, gas natural y petróleo. También se generan emisiones de CH₄ en prácticas ganaderas y otras prácticas agrícolas y a raíz de la descomposición de residuos orgánicos, el N₂O se emite durante actividades agrícolas e industriales, en la combustión de combustibles fósiles y residuos sólidos y también en el tratamiento de aguas residuales; finalmente los gases fluorados (hidrofluorocarbonos y perfluorocarbonos), son sintéticos y potentes que se emiten en diversos procesos industriales, y como gases refrigerantes estos gases habitualmente se emiten en pequeñas cantidades pero, como son potentes, también se los llama gases de Alto Potencial de Calentamiento Global (o “Gases de GWP alto”). (EPA, 2025)

Para medir los GEI en toneladas de CO₂ equivalente (tCO₂-eq) según el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), se multiplica la cantidad de cada gas por su Potencial de Calentamiento Global (PCG) para un período de tiempo determinado (normalmente 100 años - GWP100) y se suman los resultados; de hecho, las directrices del IPCC

proporcionan las metodologías y los factores de emisión necesarios para estos cálculos (IPCC, 2021). Las categorías según el IPCC (2006) son: i) energía, ii) procesos industriales (IPPU por sus siglas en inglés), iii) agricultura, iv) uso de la tierra y cambio en el uso de la tierra y silvicultura (LULUCF por sus siglas en inglés) y v) residuos.

En la categoría Energía, según el IPCC se incluye la producción de electricidad y las actividades relacionadas con combustibles fósiles como la producción de gas natural y petróleo, así como la quema de combustibles para la generación de energía en sectores como la industria, la minería, el transporte y los hogares; esto abarca una amplia gama de procesos, desde la extracción y procesamiento de combustibles hasta la distribución y el consumo final de energía (IPCC, 2023). Así mismo, la categoría de procesos industriales del IPCC incluye emisiones de actividades industriales como la producción de cemento, amoníaco, hierro y acero, y la química; también abarca el uso de productos que liberan GEI, como en la producción de electrónica, y el uso de solventes; estas emisiones pueden ser resultado de la combustión de combustibles, reacciones químicas, y la liberación de gases fluorados (HFCs, PFCs, SF₆). Finalmente, la categoría de minería, se incluye bajo la subcategoría de “emisiones fugitivas”, si y solo si, las emisiones de gases de efecto invernadero (principalmente CH₄ y CO₂) y que se liberan durante la extracción de carbón y otras actividades de minería. Incluye emisiones de minas subterráneas abandonadas, gas liberado durante la extracción (arranque del carbón, grietas), así como emisiones asociadas con la quema de CH₄ en antorchas o su conversión a CO₂.

Bolivia, como país en desarrollo y con una matriz económica basada en recursos naturales, enfrenta retos significativos para transitar hacia una economía baja en carbono sin comprometer su crecimiento económico (Fundación Milenio, 2025). Los sectores hidrocarburos, industria manufacturera y minería desempeñan un rol clave en la estructura productiva nacional, aportando una proporción significativa del Producto Interno Bruto (PIB) y constituyéndose como pilares fundamentales del desarrollo económico y social (MPD, 2021). Sin embargo, estos sectores son también responsables de una parte relevante de las emisiones nacionales de GEI, en este sentido, Bolivia como país miembro de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre cambio Climático (CMNUCC), ha elaborado su Inventario de emisiones de GEI de Bolivia, publicada en enero del 2025. Aunque a nivel global, la minería contribuye entre un 4% y un 7% de las emisiones de GEI relacionadas con el uso de energía (Kopke, 2024), mientras que en países latinoamericanos, este porcentaje puede

ser significativamente mayor, incluso, esta cifra aumenta hasta el 28% de las emisiones mundiales si se consideran las emisiones indirectas, como la combustión de carbón (Delevingne, Glazener, Grégoir, & Henderson, 2020).

Según el Informe de Transparencia Bienal de Bolivia publicada por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático el 2025, las emisiones totales del país aumentaron de 83.708,2 ktCO₂-eq en 2010 a 99.427,3 ktCO₂-eq en 2022 (MMAyA, APMT, CMNUCC, 2024). Este incremento refleja tanto la expansión económica como el avance industrial y energético del país, de hecho, el sector energía, que está dominado por la producción y uso de hidrocarburos, representó el 23,38% del total de emisiones en 2022. Por su parte, el sector industrial y de procesos (IPPU por sus siglas en inglés) contribuyó con el 3,15%, destacando la producción de cemento y el uso de gases refrigerantes como los principales emisores (MMAyA, APMT, CMNUCC, 2024). Y, aunque el sector de la minería representa un sector clave para el desarrollo económico del país, este sector presenta una alta dependencia de fuentes de energía no renovables, particularmente el diésel (Economía, El Deber, 2024), por lo que su nivel de aporte de GEI no es despreciable.

En este contexto, el presente trabajo realiza el análisis comparativo de las emisiones GEI en los sectores hidrocarburos, industria manufacturera y minería en Bolivia, proyectando las mismas hacia el año 2030, además identifica desafíos estructurales y oportunidades tecnológicas, regulatorias y económicas para la mitigación.

Materiales y métodos

Revisión sistemática

Las fuentes principales para la revisión sistemática de la información incluyeron: i) documentos nacionales oficiales (Informe de Transparencia Bienal de Bolivia, 2024; Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional NDC 3.0), ii) inventarios nacionales de GEI disponibles, iii) bases académicas (Scopus, Web of Science, Google Scholar), iv) documentos técnicos multilaterales (IPCC AR6 WG3, OLADE) y v) reportes sectoriales nacionales. Los criterios de inclusión de la información fueron principalmente publicaciones en el período 2010 - 2025, documentos oficiales, informes técnicos oficiales con datos cuantitativos por sector en tCO₂eq, no se consideraron documentos sin metodología reproducible o con datos no verificables.

Metodología de análisis y proyección

Se emplearon los siguientes pasos analíticos: a) normalización: todas las emisiones se homogenizaron a tCO₂-eq o su equivalente en ktCO₂-eq equivalentes, usando equivalencias de 100 años (GWP100) del IPCC AR5/AR6, b) análisis comparativo: cálculo de intensidades sectoriales (tCO₂-eq / PIB sectorial).

Para el caso de las proyecciones 2026–2030, se plantearon dos escenarios: a) escenario referencia (BAU): proyección con crecimiento de actividad económico-sectorial, promedio histórico reciente y sin nuevas medidas estructurales de mitigación adicionales a las ya anunciadas en la NDC 3.0; b) escenario mitigación (NDC implementada + medidas sectoriales): aplicación de medidas prioritarias identificadas (reducción de emisiones fugitivas en hidrocarburos, eficiencia energética y cambio de combustibles en manufactura, electrificación y control de combustión en minería). Las proyecciones se realizaron mediante modelos sencillos de proyección lineal y multiplicadores de reducción.

Desarrollo

Revisión sistemática de la literatura del contexto

El Informe de Transparencia Bienal de Bolivia (2024), consigna el Inventario de GEI de Bolivia en período 2010 – 2022, cuyo resumen se muestra en la Tabla 1 y cuyos resultados muestra que el CO₂ es el principal GEI, con una contribución del 70% en el 2010 y 69% en el 2022; seguido del CH₄, con 25% el 2010 y 28% en el 2022, y finalmente se encuentra el N₂O que representa el 2% tanto en el 2010 como en el 2022. Asimismo, las contribuciones del HFCs a los totales equivalentes alcanzan a 3% el 2010 y 1% 2022, ocupando incluso el tercer puesto en importancia en las emisiones nacionales y el SF₆ es el gas que ha contribuido en menor cantidad siendo el 0,2% en el 2010 y 0,04% el 2022.

Tabla 1. Resumen general del inventario de emisiones de GEI de Bolivia del año 2010 y 2022 en ktCO₂-eq

Sector	GEI	Potencial de Calentamiento Global	2010	2022
Energía	CO ₂	1	14.867,60	20.060,90
	CH ₄	28	915,20	933,20
	N ₂ O	265	35,10	66,70
Procesos	CO ₂	1	1.448,30	2.694,20
Industriales	SF ₆	23500	16,450	37,70
	HCF-134a	1300	2.525,50	506,10

	HFC-125	3170	-	-
	HFC-143a	4800	-	-
Agrícola	CH ₄	28	15.905,20	21.410,90
	N ₂ O	265	669,50	1.188,10
UTCUTS	CO ₂	1	41.964,00	46.346,90
	CH ₄	28	1.889,00	2.531,90
	N ₂ O	265	669,50	508,30
Residuos	CH ₄	28	2.507,30	2.974,40
	N ₂ O	265	47,50	168,00
Total			83.708,20	99.427,30

Nota. Tomado del Informe de Transparencia Bienal de Bolivia (p. 21), por MMAyA, APMT, CMNUCC, 2024.

Sector Hidrocarburos

Según este Informe, las emisiones de GEI del sector Energía proyectado al 2022, por tipo de GEI, contabilizaron 15.986,04 ktCO₂, 2,33 ktCH₄ y 0,25 ktN₂O, haciendo un total de 20.060,9 ktCO₂-eq generados por CO₂, 933,2 ktCO₂-eq generados por CH₄ y 66,7 ktCO₂-eq generados por N₂O; haciendo un total de 21.060,8 ktCO₂-eq, tal como muestra la Tabla 1.

Específicamente en el sector hidrocarburos, las emisiones se componen principalmente de: a) emisiones por combustión (estaciones de compresión, plantas de procesamiento, transporte), b) emisiones de CO₂ por venteo y quema (flaring) y c) emisiones fugitivas de CH₄ (pérdidas en producción, procesamiento y redes de distribución). Respecto a las emisiones por combustión en las estaciones de compresión y plantas de procesamiento, al igual que las emisiones por venteo y quema, son indeterminados en el Inventario Nacional de GEI de Bolivia (2010-2022); sin embargo, es importante mencionar que la quema de gas natural en campos de explotación y procesamiento es considerada como la última alternativa realizada, conforme a lo establecido en el Reglamento de Normas Técnicas y de Seguridad para las Actividades de Exploración y Explotación de Hidrocarburos, 1997 (Bolivia, 1997); el Reglamento Ambiental para el Sector Hidrocarburos, 1996 (Bolivia, 1996); y el Reglamento para la Quema de Gas Natural, 1999 (Bolivia, 1999); por lo que dicha actividad, se ha reducido considerablemente, aumentando la recuperación, el tratamiento, reinyección y reciclado de gas natural y separación de licuables.

La Tabla 2, muestra las emisiones fugitivas del CH₄, CO₂, N₂O, y las emisiones de los gases precursores del ozono y el SO₂ del 2022

Tabla 2. Emisiones fugitivas: emisiones de GEI por actividad (ktCO₂-eq)

Categoría	1990	1994	1998	2000	2002	2004	2006	2008
CO ₂	79,951	2.459,678	1.035,940	603,050	605,290	592,200	539,830	533,420
CH ₄	35,565	85,168	44,600	31,890	35,800	31,000	31,000	31,000
N ₂ O	-	0,028	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
CO	0,115	0,134	0,160	0,140	0,120	0,150	0,170	0,180
NOX	0,072	0,084	0,100	0,090	0,080	0,100	0,110	0,120
COVDM	0,764	0,891	1,040	0,940	0,830	1,040	1,170	1,240
SO ₂	1,153	1,344	1,570	1,420	1,250	1,560	1,750	1,860
Sector	2010	2012	2014	2016	2018	2020	2022	
CO ₂	583,920	613,790	654,600	632,610	611,910	599,530	561,150	
CH ₄	31,000	31,000	31,000	31,000	31,000	31,840	31,000	
N ₂ O	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	
CO	0,170	0,200	0,240	0,220	0,200	0,160	0,140	
NOX	0,110	0,130	0,160	0,150	0,130	0,110	0,090	
COVDM	1,150	1,380	1,690	1,520	1,360	1,110	0,980	
SO ₂	1,730	2,060	2,530	2,280	2,040	1,670	1,470	

Nota. Tomado del Informe de Transparencia Bienal de Bolivia (p. 81), por MMAyA, APMT, CMNUCC, 2024.

Los datos de la Tabla 2, muestra que las emisiones fugitivas han sido principalmente debidas al CO₂ con 95%, seguidas del CH₄ con el 5%. Si se compara las emisiones fugitivas respecto a las emisiones del sector energía, este representa aproximadamente el 3%. Al respecto, estudios (IEA, 2023) muestran que las medidas de detección y reparación de fugas (LDAR), el reemplazo de equipos y la electrificación de bombas son determinantes para reducir las emisiones de CH₄, ya que abordan las fugas de equipos como válvulas y bombas, y reemplazan tecnología obsoleta por alternativas más eficientes, como la electrificación en lugar de motores a combustible. Implementar programas LDAR es fundamental para identificar y reparar fugas en tiempo real, lo que minimiza la liberación de metano y otros compuestos orgánicos volátiles (COV) (OLADE, 2025).

Sector Industria Manufacturera

Respecto a la Industria Manufacturera, el Informe de Transparencia Bienal de Bolivia (2024), consigna el Inventario de GEI de Bolivia en período 2010 - 2022, cuyo resumen se muestra en la Tabla 3 y cuyos datos muestra un total de 3.238,03 ktCO₂-eq, siendo las categorías que aportan con datos de emisión, la industria de los minerales, industria química, uso de productos sustitutos de las SAO (sustancias agotadoras/destructoras del ozono) y manufactura y utilización de otros productos.

La industria de los minerales incluye las subcategorías relevantes en Bolivia como la producción de cemento, producción de cal (ambos esenciales en procesos industriales y de construcción); la producción de vidrio (que contribuye a las emisiones mediante el consumo energético en su fusión); y la producción de carbonato de sodio (utilizado en la industria química y de vidrio). La industria química considera la producción de amoníaco (esencial para fertilizantes y químicos), la producción de ácido nítrico y ácido sulfúrico (utilizados en diferentes procesos industriales); además de la producción de acetileno (de uso en soldaduras y procesos industriales). La categoría de productos no energéticos de combustibles y uso de solventes (no mostrado en la tabla 3), incluyen las emisiones COVDM derivadas de la utilización de productos que contienen hidrocarburos y solventes, sin ser empleados como combustibles, es decir, abarca la producción de asfalto y el asfaltado y pavimentado en superficie de carreteras (relevante para la infraestructura vial); y la venta de lubricantes y productos de solventes, que, aunque en menores cantidades, generan emisiones.

La categoría de uso de Productos Sustitutos de las SAO (sustancias agotadoras del ozono) se enfoca en productos que sustituyen a sustancias previamente utilizadas y que afectan el ozono, por lo que el inventario incluye la refrigeración y aire acondicionado (HFC-134a), dado el crecimiento del uso de estos equipos en los sectores doméstico e industrial; se incluyen además el uso de extintores que emplean sustitutos de SAO, con potenciales emisiones de HFCs. En la categoría manufactura y uso de otros productos se considera el uso de hexafluoruro de azufre (SF₆), utilizado principalmente en equipos eléctricos como aislante (y con alto PCG), pero no se orienta a la producción de este material dado de que Bolivia no cuenta con una producción a gran escala. Finalmente el inventario de GEI considera otros tipos de industria como la de producción de papel, cerveza, vino y azúcar, además de la producción de singanis y vinos, además de la producción de carne (vacuna, aves y porcino) y de café tostado representan otras fuentes importantes en el país, al igual que la producción de cereales para el desayuno, productos que requieren procesos de alta energía y contribuyen al inventario de GEI (que son actividades productivas importantes en Bolivia y que generan COVDM, no incluidas en la Tabla 3).

Las categorías restantes de acuerdo a la metodología del IPCC, del 2006, no se encuentran incluidas debido a que en Bolivia actualmente no se tiene ése tipo de producción (aunque en algunos casos, tiene la proyección de su producción, p.ej. la producción de hierro).

Tabla 3. Emisiones por GEI, categoría y subcategoría (ktCO₂-eq) para 2022 – Sector IPPU

Categoría de fuente de GEI	CO ₂ ktCO ₂ -eq	HFC ktCO ₂ -eq	SF ₆ ktCO ₂ -eq	NO ktCO ₂ -eq	CO ktCO ₂ -eq	COVDM ktCO ₂ -eq	SO ₂ ktCO ₂ -eq	Total ktCO ₂ -eq
Procesos Industriales y uso de productos	2.694,23			0,15	0,56	27,44	75,93	3.238,03
Industria de los minerales	2.338,88							2.338,88
Producción de cemento	2.289,40							2.289,40
Producción de cal	43,21							43,21
Producción de vidrio	2,84							2,84
Otros usos de carbonatos en los procesos (Carbonato de Sodio)	3,44							3,44
Industria química	355,34							355,34
Producción de amoníaco	355,34							355,34
Uso de productos sustitutos de las SAO		506,08						506,08
Refrigeración y aire acondicionado		506,08						506,08
Manufactura y utilización de otros productos			37,72					37,72
Equipos eléctricos			37,72					37,72

Nota. Tomado del Informe de Transparencia Bienal de Bolivia (pgs. 87, 88), por MMAyA, APMT, CMNUCC, 2024.

De los datos presentados en la Tabla 3, destaca el aporte de la producción de cemento (2.289,40 ktCO₂-eq), el mismo que representa el 98% de la categoría de la industria de los minerales y más del 70% del Sector IPPU, aspecto que es asociado fundamentalmente a la emisión CO₂ (PNUD, 2019). La refrigeración y aire acondicionado (en la categoría uso de productos sustitutos de las SAO), representa más del 15% del Sector IPPU; mientras que la producción de amoníaco (en la industria química) significa aproximadamente el 11% de este Sector.

Asimismo, es importante considerar que el sector de la

industria manufacturera también tiene una implicancia relativa en el Sector Energía, toda vez que este sector puede generar emisiones producto de la combustión de hidrocarburos en sus procesos productivos, tal como lo muestra la Tabla 4, donde conjuntamente el sector de la construcción, emitió en la gestión 2022, una cantidad equivalente a 2.124,83 ktCO₂-eq, representando más del 10% de las emisiones del Sector Energía.

Tabla 4. Emisiones totales por subcategorías (ktCO₂-eq) - Sector Energía

Sector	1990	1994	1998	2000	2002	2004	2006	2008
1.A.1. Industrias de la energía	711,71	746,24	930,41	960,4	1.122,43	1.262,39	1.385,42	2.551,14
1.A.2. Industrias manufactureras y de la construcción	455	870,52	1.131,40	872,6	1.507,74	1.624,75	1.880,17	2.065,97
1.A.3. Transporte	2.057,55	2.459,10	3.779,62	3.268,04	4.040,09	4.274,58	4.575,44	5.265,49
1.A.4. Otros sectores	711,71	746,24	930,41	960,4	1.122,43	1.262,39	2.389,42	2.551,14
1.B. Emisiones fugitivas	791,55	4.580,43	1.894,26	1.035,90	125,25	112,11	142,4	197,93
Total	5.072,22	10.023,35	9.349,94	7.730,94	8.603,30	9.146,54	10.623,78	12.046,00
Sector	2010	2012	2014	2016	2018	2020	2022	
1.A.1. Industrias de la energía	4.014,07	4.453,26	5.314,00	6.224,18	6.143,97	4.538,41	4.828,14	
1.A.2. Industrias manufactureras y de la construcción	1.520,73	1.905,62	2.192,26	2.221,23	2.083,00	1.848,20	2.124,83	
1.A.3. Transporte	6.312,56	7.292,65	8.721,41	9.308,52	10.327,42	5.692,96	10.146,04	
1.A.4. Otros sectores	1.495,80	1.633,21	1.801,77	1.932,84	2.087,07	2.237,09	2.717,34	

1.B.								
Emisiones fugitivas	653,39	521,29	462,2	446,33	405,35	227,92	243,64	
Total	13.996,55	15.812,03	18.491,59	20.143,11	21.046,77	14.544,30	20.060,00	

Nota. Tomado del Informe de Transparencia Bienal de Bolivia (p. 65), por MMAyA, APMT, CMNUCC, 2024.

Sector Minería

Respecto al Sector de la Minería, las emisiones previsibles están orientadas al consumo de combustibles para el funcionamiento de maquinaria, procesos de chancado y molienda, calefacción y generación de electricidad, entre otros. Las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de la minería se originan principalmente por el alto consumo de combustibles (diésel, gasolina) en los procesos de extracción, transporte, procesamiento, refinación y/o concentración de minerales (Ausenco, 2021). Estas emisiones varían ampliamente según el tipo de mineral, la tecnología utilizada, la escala de operación y las prácticas ambientales implementadas.

Si bien se han realizado esfuerzos en la cuantificación de emisiones de GEI en el sector de la minería, a través de los informes oficiales a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), aún existen brechas de información significativas, entre ellas destacan la falta de mediciones directas de emisiones fugitivas y de procesos metalúrgicos, la subestimación del consumo energético en minería artesanal y pequeña escala, y la ausencia de balances energéticos específicos por mina o distrito (MMAyA, APMT, CMNUCC, 2024). Por esta razón, el Informe de Transparencia Bienal de Bolivia (2024), no especifica datos específicos de las emisiones generadas por el sector minero.

Sólo a manera referencial, es importante mencionar que actualmente la minería aurífera en Bolivia ha cobrado absoluto protagonismo en esta última década, este sector tiene como actor principal al sector cooperativista que domina la producción de oro, desplazando al sector privado que se constituía en el actor principal hasta finales de la pasada década en la explotación de este mineral. Aproximadamente el 85% de toda la minería es manejada por las cooperativas; y respecto a la minería de oro, hasta el 2022 se estimó la existencia de alrededor de 1,700 cooperativas mineras de oro en el país, quienes actualmente producen el 99% del oro del país, lográndose una producción de alrededor de 46 t de oro en 2021 (planetGOLD, 2025). Aunque las cooperativas son consideradas como agrupaciones de personas que se asocian para realizar minería en pequeña y mediana escala, la

realidad es que actualmente este modelo se ha mecanizado y ha impulsado operaciones a gran escala (Mogabay, 2024). Esta mecanización y la consecuente incorporación de equipos, maquinaria, vehículos, entre otros, ha generado una demanda de fuentes de energía como energía eléctrica, combustibles derivados de hidrocarburos y agua. En este sentido, una de las fuentes de energía imprescindible en este sector es el combustible (diesel y/o gasolina).

Investigaciones realizadas durante el año 2024 por la Revista La Brava, muestran que la demanda de diesel estimada en la región norte del Departamento de La Paz (Guanay, Tipuani, Mapiri y Teoponte) para operaciones en cauces de ríos oscila entre 45.000,0 y 50.000,0 L por mes y por cooperativa (incluso en casos de mayor escala se requieren al menos 120.000,0 L mensuales); mientras que las operaciones mineras en plataforma requieren un aproximado de 25.000,0 L de diesel por mes y por cooperativa (Mogabay, 2024). Un estudio de las emisiones de mercurio y CO₂ de la minería artesanal de oro en la selva amazónica brasileña (Fritz, Peregovich, da Silva Tenório, da Silva Alves, & Schmidt, 2024), muestra una tendencia en la que la intensidad energética por kg de oro fino ($\text{kg diésel kg}^{-1} \text{Au}$) de cada tipo de minería en orden ascendente es: minería de depósitos primarios subterráneos ($2.230,0 \text{ kg diésel kg}^{-1} \text{Au}$), minería de depósitos secundarios en tierra con excavadoras ($4.410,0 \text{ kg diésel kg}^{-1} \text{Au}$), minería de depósitos secundarios en lechos de ríos con dragas ($6.410,0 \text{ kg diésel kg}^{-1} \text{Au}$) y minería de depósitos secundarios en tierra sin excavadoras ($7.340,0 \text{ kg diésel kg}^{-1} \text{Au}$). Este estudio también señala que la mina de oro a gran escala (LSGM), ubicada en la misma región, consume menos combustible ($3.820,0 \text{ kg de diésel kg}^{-1} \text{Au}$) que la minería de depósitos secundarios en tierra con excavadoras. Con los datos precedentes, y considerando un consumo mínimo y máximo de 25.000,0 L y 120.000,0 L de diesel por mes y por cooperativa, se estima una emisión aproximada de GEI de 1.345,38 ktCO₂-eq como mínimo, y 6.457,82 ktCO₂-eq como máximo, representando estas cifras el 7% y el 32% del Sector Energías, respectivamente.

Discusión

Los resultados muestran que el sector energético (incluyendo hidrocarburos) mantiene un peso significativo en la matriz de emisiones presentado en la Tabla 5; de hecho, en este sector las emisiones fugitivas (debidas al CO₂ con 95%, seguidas del CH₄ con el 5%) representan aproximadamente el 3%. La industria manufacturera aporta aproximadamente la mitad de lo que aporta

el Sector Energía, destacando en esta categoría el aporte de la producción de cemento (2.289,40 ktCO₂-eq), el mismo que representa el 98% de la categoría de la industria de los minerales y más del 70% del Sector IPPU (por causa del CO₂), mientras que la minería permanece subestimada debido a vacíos de datos estadísticos, peso a ello, realizando una aproximación de las emisiones del sector de la minería (mediante la relación de las emisiones del sector minería y las emisiones totales del país X 100), se tiene un porcentaje del 18%, porcentaje que permite estimar unas emisiones de 509,73 ktCO₂-eq; sin embargo, una estimación somera del aporte de GEI solamente del sector minero cooperativista aurífero del país, permite establecer que se emite entre 1.345,38 ktCO₂-eq como mínimo, y 6.457,82 ktCO₂-eq como máximo; por lo cual el aporte real de GEI del sector minero es mucho más alto de lo establecido en la Tabla 5, lo que resalta la necesidad de mejorar el sistema MRV nacional (sistema de Monitoreo, Reporte y Verificación de las emisiones de GEI a nivel nacional).

Tabla 5. misiones totales por subcategorías (ktCO₂-eq)

Sector	Emisiones 2022
(ktCO ₂ -eq)	
Hidrocarburos (energía + fugitivas)	4.828,14
Industria manufacturera (combustión)	2.124,83
Procesos industriales (IPPU)	3.238,03
Minería (estimación técnica 18% categoría otros sectores)	509,73

Nota. Tomado del Informe de Transparencia Bienal de Bolivia, por MMAyA, APMT, CMNUCC, 2024. En el caso de la minería, se hizo una estimación con base en emisiones del sector y del país.

Proyección de emisiones GEI bajo escenarios BAU y de mitigación (2026-2030)

La Tabla 6 presenta las proyecciones de emisiones de GEI para Bolivia bajo dos escenarios: a) línea base “Business-As-Usual” (BAU), y b) un escenario con implementación progresiva de medidas de mitigación (de acuerdo a los lineamientos establecidos en NDC 3.0). Las estimaciones se basan en la serie histórica oficial del Inventario Nacional de GEI (2010 -2022) y aplican tasas de crecimiento sectorial coherentes con el comportamiento estructural de la economía boliviana, siguiendo las directrices metodológicas del IPCC (2006) para proyecciones de emisiones.

Tabla 6. Supuestos de crecimiento sectorial (BAU)

Sector	Supuestos macro	Justificación
Energía	Crecimiento anual -1.3-1.5%	Expansión eléctrica + dependencia gas; PIB sector energía Bolivia tendencias BTR
Industria Manufacturera	Crecimiento anual -1.0%	Industrialización selectiva (cemento, química básica)
IPPU	Crecimiento estructural constante	Expansión moderada en cemento, cal y químico
Emisiones Fugitivas	Disminución leve (~-0.8% anual)	Reducción natural por declive de producción gas + mejor medición
Minería	Crecimiento anual -1.2%	Desarrollo minería metálica/evaporítica + uso intensivo diésel

Nota. Elaboración con base en datos del PIB y supuestos justificados.

El escenario BAU extrapola las tendencias observadas en intensidad energética, actividad productiva sectorial y producción hidrocarburífera, asumiendo continuidad tecnológica y sin políticas adicionales, tal como muestra la Tabla 6. El escenario de mitigación incorpora medidas priorizadas en la Contribución Nacional Determinada (NDC 3.0), incluyendo electrificación parcial, mejoras en eficiencia energética industrial, programas LDAR en hidrocarburos, sustitución progresiva de combustibles fósiles y optimización en procesos industriales y minero-metalúrgicos, como muestra la Tabla 7.

Tabla 7. Supuestos de reducción de emisiones (+ mitigación)

Sector	Supuestos macro	Justificación
Energía	4% vs BAU	Cogeneración en industria hidrocarburos, electrificación parcial, eficiencia térmica
Industria Manufacturera	-2.5% vs BAU	Sustitución parcial de combustibles + eficiencia térmica y motriz
IPPU	-3.2% vs BAU	Tecnologías menos emisivas en cemento y química; capturas incipientes
Emisiones Fugitivas	-60% vs BAU	LDAR agresivo + sellado de válvulas/tanques + reducción venteo y quema
Minería	-7.5% vs BAU	Sustitución progresiva de diésel por electricidad, optimización motriz, recuperación térmica

Nota. Las tasas son modestas acordes a una implementación gradual (2026-2030) y con capacidades institucionales nacionales.

Los resultados mostrados en la Tabla 8, evidencian reducciones

acumuladas relevantes en 2030 respecto al BAU, destacando el impacto de las medidas en el sector energético y en las emisiones fugitivas del gas natural. La diferencia absoluta y relativa entre ambos escenarios revela el potencial técnico de las intervenciones priorizadas, manteniendo valores viables dentro de los rangos documentados para economías emergentes y marcos de planificación climática en la región andina.

Tabla 8. Proyecciones 2026–2030: escenarios BAU vs Mitigación

Sector	2026 (BAU) ktCO ₂ eq	2030 (BAU) ktCO ₂ eq	2026 (+ mitigación) ktCO ₂ eq	2030 (+ mitigación) ktCO ₂ eq
Energía	5.226,12	5.656,91	4.877,71	4.525,53
Manufactura	2.211,11	2.300,89	2.100,55	1.955,76
IPPU	3.238,03	3.238,03	3.130,1	2.914,23
Fugitivas	124,05	119,16	99,24	47,66
Minería	541,02	574,23	495,93	430,67

Nota: Los porcentajes aplicados a 2030 en el escenario de mitigación son plausibles y basados en medidas priorizadas en la NDC 3.0 (LDAR, electrificación, eficiencia, cogeneración).

Potencial de mitigación 2026–2030

Con base en lo expuesto, a continuación se mencionan los elementos/acciones potenciales relativos para cada sector en el horizonte 5 años:

- Hidrocarburos: potencial de reducción significativo (10–30% de emisiones del subsector), esto se lograría con la implementación de LDAR, electrificación de compresores y reducción de flaring, siempre que exista inversión y regulación.
- Industria manufacturera: potencial medio (5–20%) mediante eficiencia energética, recuperación de calor y cambios de combustible; estas acciones presentarán variabilidad alta, según subsector.
- Minería: potencial medio (5–25%) con electrificación parcial de operaciones mineras que actualmente dependen de combustibles (diesel), eficiencia en procesos y mejoras energéticas.

Las implicaciones para las acciones y/o proyectos de ingeniería orientados a mitigación de GEI en Bolivia, es importante considerar lo siguiente:

- Priorizar intervenciones con retorno técnico-económico claro (p.ej., reemplazo de calderas, motores eléctricos para

bombas, sensores LDAR) y diseñar líneas de financiamiento mixto.

- Incorporar actividades de MRV desde la etapa de diseño, con métricas trazables (reducción tCO₂-eq verificada por tercer partido) para acceder a mecanismos de resultados.
- Promover pilotos tecnológicos en minería y plantas industriales para demostrar viabilidad técnica y social antes de una escalada nacional.

Conclusiones y recomendaciones

Los sectores hidrocarburos, industria manufacturera y minería son contribuyentes absolutamente relevantes a las emisiones nacionales de GEI, contribuyendo a la preponderancia del Sector Energía. El Inventario Nacional de GEI (2024) y la NDC 3.0 proveen la base documental para análisis, pero requieren desagregación adicional y mediciones directas (especialmente de CH₄). El potencial de reducción en el horizonte 2026-2030 es posible, aunque las mayores oportunidades se presentan en el sector hidrocarburos por reducción de fugas y flaring; la manufactura y minería presentan oportunidades importantes mediante eficiencia y electrificación. La principal barrera identificada es la falta de disponibilidad y calidad de datos, de hecho, no se cuenta con series temporales desagregadas por subsectores y falta de mediciones directas, especialmente de emisiones fugitivas de CH₄; asimismo, otras limitantes son la capacidad institucional, la disponibilidad de financiamiento y un marco regulatorio coherente.

Asimismo, es importante recomendar lo siguiente:

- Fortalecer MRV a través de inversión en sistemas de medición directa (sensores, campañas satelitales), capacitación y actualización de factores de emisión.
- Es recomendable considerar en las proyecciones la posible transición a energías renovables en el país, para estimar con mayor objetividad el potencial de mitigación.
- Establecer regulaciones, políticas e incentivos claras para la reducción de flaring y fugas; incentivos fiscales para eficiencia energética y electrificación, acompañada por esquemas de financiamiento y capacitación técnica.
- Implementar proyectos demostrativos/pilotos como ser LDAR en campos gasíferos; electrificación parcial en una operación minera; eficiencia energética en una planta manufacturera, para emprender su escalabilidad.

- Combinar recursos nacionales, cooperación internacional y mecanismos de mercado de carbono para cerrar brechas de inversión.
- Coordinación intersectorial que articule energía, minería, industria y ambiente para seguimiento de la implementación NDC.

Referencias

- Ausenco. (10 de Septiembre de 2021). Ausenco. Obtenido de <https://ausenco.com/es/>
- Bolivia. (19 de julio de 1996). Decreto Supremo N° 24335 de fecha 19 de Julio de 1996. Obtenido de <https://www.lexivox.org/norms/BO-DS-24335.html>
- Bolivia. (2 de julio de 1997). Decreto Supremo N° 24689. Obtenido de <https://n9.cl/evlza>.
- Bolivia. (19 de noviembre de 1999). *Reglamento para la quema de gas natural*. Obtenido de <https://www.lexivox.org/norms/BO-RE-DS25589.html>
- Delevingne, L., Glazener, W., Grégoir, L., & Henderson, K. (2020). *Climate risk and decarbonization: Whatever your mining CEO needs to know*. (G. E. Services, Ed.) McKinsey & Company, 1-11.
- Economía, El Deber. (22 de agosto de 2024). *La digitalización puede reducir el consumo de diésel en la minería*. El Deber, págs. 1-3.
- EPA. (12 de Mayo de 2025). *Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos*. Obtenido de <https://n9.cl/zpwbfb>
- Fritz, B., Peregovich, B., da Silva Tenório, L., da Silva Alves, A. C., & Schmidt, M. (2024). *Mercury and CO2 emissions from artisanal gold mining in Brazilian Amazon rainforest*. *Nature Sustainability*, 7, 15-22.
- Fundación Milenio. (2025). *Desarrollo Sostenible: Hacia una economía de Bolivia resiliente y ambientalmente responsable*. La Paz: Economía de Bolivia.
- Gaceta Oficial del Estado Plurinacional de Bolivia. (12 de abril de 2023). Gaceta Oficial del Estado Plurinacional de Bolivia. Obtenido de <http://www.gacetaoficialdebolivia.gob.bo/>
- IEA. (2020). *World Energy Outlook*. Agencia Internacional de Energía.
- IEA. (2023). *World Energy Outlook* . (I. E. Agency, Ed.) Recuperado el 2025, de <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023?language=es>
- INE. (2023). *Anuario Estadístico de Bolivia 2022*. La Paz: Instituto Nacional de Estadística.

- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC. (2023). Cambio climático 2023: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático. Ginebra: IPCC.
- Kopke, C. (7 de Marzo de 2024). Stantec. Obtenido de <https://www.stantec.com/>
- Magrin, G. e. (2014). *Cambio climático en América Latina: impactos y escenarios*. . IPCC Fifth Assessment Report, WGII.
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (2021). *Informe Nacional sobre el Estado del Medio Ambiente en Bolivia*. La Paz: MMAyA.
- MMAyA. (2020). *Tercer Informe Bienal de Actualización de Bolivia a la CMNUCC*. La Paz: Ministerio de Medio Ambiente y Agua.
- MMAyA, APMT, CMNUCC. (2024). *Informe de Transparencia Bienal 2024 (ITB)*. ITB1. La Paz: Ministerio de Medio Ambiente y Agua, Autoridad Plurinacional de la Madre Tierra, Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático.
- MMAyA, APMT, CMNUCC. (2024). *Informe de Transparencia Bienal 2024 (ITB)*. ITB1. La Paz: Ministerio de Medio Ambiente y Agua, Autoridad Plurinacional de la Madre Tierra, Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático.
- Mogabay. (2 de diciembre de 2024). *El millonario desvió del diésel a la minería del oro en la Amazonía boliviana*. Obtenido de <https://es.mongabay.com/>
- MPD. (2021). Plan de Desarrollo Económico Social 2021 - 2025. La Paz: Ministerio de Planificación del Desarrollo. Obtenido de plan de desarrollo económico social.
- National Geographic. (27 de Noviembre de 2023). National Geographic - Medio Ambiente. Obtenido de <https://n9.cl/qd0bv>
- OLADE. (06 de 10 de 2025). Gas natural de bajas en emisiones en América Latina y el Caribe. Obtenido de <https://n9.cl/nzcx>
- Ovidiu Csillik, G. P. (2020). Aboveground carbon emissions from gold mining in the Peruvian Amazon. *Environmental Research Letters*, 15(1), 15.
- Pascó-Font, A., Poveda, A., & Rojas, G. (2019). *Minería y sostenibilidad en América Latina*. Fondo Editorial PUCP.
- planetGOLD. (26 de Mayo de 2025). planetGOLD Bolivia. Obtenido de <https://www.planetgold.org/es/bolivia>
- PNUD. (2019). *Transición energética y cambio climático en Bolivia*. La Paz: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo .
- Robson Lage, F., Arroyo Ortiza, C. E., Margarida da Silva, J., & Curi, A. (2023). En la industria minera como fuente de energía renovable. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 8(2), 3-12.

- Rozan, A. (2024). *Environmental Impact of Extractive Industries: Production, Pollution, and Protest Across Global History*. *The Journal of International Social Research*, 17(114), 1-4.
- United Nations Environment Programme. (2023). *Emissions Gap Report 2023: Broken Record – Temperatures hit new highs, yet world fails to cut emissions (again)*. Nairobi: United Nations Environment Programme.
- WWF. (2022). *Oro y mercurio en la Amazonía boliviana: impactos ambientales y sociales*. La Paz. La Paz : World Wildlife Fund for Nature.

CAPÍTULO XXII

Optimización de redes eléctricas de distribución primaria mediante generación distribuida

Rómulo Encinas Laguna

Universidad Mayor de San Andrés

<https://orcid.org/0009-0002-5293-9995>

Optimización de redes eléctricas de distribución primaria mediante generación distribuida

Resumen

El artículo desarrolla un método para la optimización de redes eléctricas de distribución utilizando generación distribuida con paneles solares fotovoltaicos, mediante simulaciones de flujos de potencia a través de un método de simulación por barrido de nodos por comparación, que trabaja sobre la red de distribución primaria trifásica. El estudio y análisis se llevó adelante en una red real radial que tiene una longitud aproximada de 115,6 [km] de red trifásica, ubicada en el área rural del altiplano boliviano a una altitud próxima a los 4000 metros sobre el nivel del mar, asimismo las condiciones son favorables para la generación de electricidad mediante módulos o paneles solares fotovoltaicos debido a que presenta una irradiancia solar elevada. El estudio permitió determinar que la generación distribuida sea ubicada entre el 90% de distancia desde la subestación y cola de línea, para minimizar las pérdidas de potencia, reducir la compra de energía al Mercado Eléctrico Mayorista (MEM), mejorar en el perfil de tensión eléctrica, todas estas mejoras se traducen en la reducción de costos de operación, con un impacto positivo en la huella de carbono, la reducción de los gases de efecto invernadero y el cambio gradual de la matriz energética relacionada al sector eléctrico nacional.

Palabras clave: Generación distribuida, redes eléctricas de distribución, reducción de pérdidas, perfil de tensión, huella de carbono.

Optimization of primary electrical distribution networks through distributed generation

Abstract

This article develops a method for the optimization of electric distribution networks by incorporating distributed generation using photovoltaic (PV) solar panels. The approach is based on power flow simulations performed through a comparative node-sweeping simulation method applied to the three-phase primary distribution network. The study and analysis were conducted on a real radial network with an approximate length of 115.6 km of three-phase lines, located in a rural area of the Bolivian Altiplano at an altitude close to 4,000 meters above sea level. The region exhibits favorable conditions for electricity generation through photovoltaic modules due to its high solar irradiance levels. The study determined that distributed generation should be installed between 90% of the distance from the substation toward the end of the feeder in order to minimize power losses, reduce energy purchases from the Wholesale Electricity Market (MEM), and improve the voltage profile. All these improvements result in reduced operational costs, a positive impact on the carbon footprint, a decrease in greenhouse gas emissions, and a gradual transition of the national electric energy matrix.

Keywords: Distributed Generation, Electrical distribution networks, Loss reduction, Voltage profile, Carbon footprint

Otimização de redes eléctricas de distribuição primária por meio de geração distribuída

Resumo

O artigo desenvolve um método para a otimização de redes eléctricas de distribuição utilizando geração distribuída com painéis solares fotovoltaicos, por meio de simulações de fluxo de potência realizadas através de um método de simulação por varredura de nós comparativa aplicado à rede de distribuição primária trifásica. O estudo e a análise foram realizados em uma rede radial real, com aproximadamente 115,6 km de extensão de rede trifásica, localizada na região rural do altiplano boliviano a uma altitude próxima de 4.000 metros acima do nível do mar. A região apresenta condições favoráveis para a geração de energia eléctrica por módulos fotovoltaicos devido ao elevado índice de irradiância solar. O estudo permitiu determinar que a geração distribuída deve ser instalada entre 90% da distância desde a subestação até a extremidade da linha, a fim de minimizar as perdas de potência, reduzir a compra de energia no Mercado Eléctrico Atacadista (MEM) e melhorar o perfil de tensão. Todas essas melhorias se traduzem em redução dos custos operacionais, impacto positivo na pegada de carbono, diminuição das emissões de gases de efeito estufa e mudança gradual na matriz energética relacionada ao setor eléctrico nacional.

Palavras chave: Geração Distribuída, Redes eléctricas de distribuição, Redução de perdas, Perfil de tensão, Pegada de carbono

Introducción

La creciente demanda de energía eléctrica y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), ha llevado a la comunidad científica a la búsqueda de soluciones sostenibles en la generación y distribución de electricidad (OLADE, 2013). Las redes eléctricas de distribución convencionales y tradicionales presentan problemas significativos como las pérdidas técnicas, caídas de tensión, capacidad limitada de los elementos de la red y la reducida confiabilidad que presentan las redes eléctricas de distribución (Aguila T. et al., 2022).

La generación distribuida (GD) mediante energías renovables (ER) particularmente la solar y la eólica se presentan como una solución viable para optimizar las redes eléctricas de distribución, su implementación contribuye a la diversificación de la matriz energética, la reducción de la huella de carbono y al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Naciones Unidas, 2018). La integración de GD puede presentar impactos positivos llamados beneficios de apoyo al sistema, dentro de los que se pueden encontrar mejoras en los perfiles de tensión, reducción de pérdidas de energía en la red (debido al transporte) y descongestión de las líneas (Grisales L., Restrepo C., & Jaramillo F., 2017).

El presente trabajo de investigación se enfoca en la optimización de la red eléctrica de distribución mediante la integración de la generación distribuida, que es un área que está evolucionando y por lo tanto requiere de mayor atención e investigación. Se pretende contribuir en el desarrollo del modelo mediante la propuesta de un método planteado y utilizado para efectuar las simulaciones para optimizar las redes mediante la GD.

Las redes de distribución forman una parte muy importante de los sistemas de potencia porque toda la potencia que se genera se tiene que distribuir entre los usuarios y estos se encuentran dispersos en grandes territorios (Juárez C., 1995).

Los sistemas de distribución tienen como función suministrar a los consumidores la energía eléctrica producida en las plantas generadoras y transmitida por el sistema de transmisión hasta la subestación de distribución (Viqueira L. J., 2010). Un sistema de distribución de energía eléctrica es el conjunto de elementos encargados de conducir la energía desde una subestación de potencia hasta el usuario, básicamente, la distribución de energía eléctrica comprende las líneas primarias de distribución, los transformadores de distribución, las líneas secundarias de distribución, y las acometidas y medidores (Yebra J., 2009).

Aproximadamente dos tercios partes de una inversión total del sistema de potencia, están dedicados a la parte de distribución (gigante invisible), lo que implica necesariamente un trabajo cuidadoso en el planeamiento, diseño, construcción y en la operación del sistema de distribución lo que requiere manejar una información voluminosa y tomar numerosas decisiones, lo cual es una tarea compleja, pero de gran trascendencia, es donde se producen los porcentajes más grandes de pérdidas de energía en todas sus manifestaciones debido al gran volumen de elementos que lo conforman y a los bajos niveles de tensión que se manejan (Espinoza y Lara, 2000).

En este sentido, la Generación Distribuida surge como una alternativa importante para la prestación del servicio de energía eléctrica, ya que aumenta la confiabilidad y seguridad en el suministro a corto, mediano y largo plazo (Martínez & Llosas, 2022). De esta manera, en algunos países se considera que la generación distribuida comprende ampliamente a centrales de pequeña, mediana o gran escala.

El Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) define a la generación distribuida como las “Instalaciones de generación eléctrica conectadas al sistema eléctrico mediante un punto de conexión común: Un subconjunto de fuentes distribuidas”, mientras que la Conseil International des Grands Réseaux Électriques (CIGRE), complementa “No es usualmente planificada; No es despachada de forma centralizada; y su capacidad es inferior a 50 o 100 MW” (Ramos E., 2020).

Las principales formas de energías renovables son la biomasa, hidráulica, eólica y solar que provienen, de forma directa o indirecta, de la energía del sol. El 30% es reflejada por la atmósfera terrestre, el 70% atraviesa la atmósfera experimentando cambios en sus características, lo que da lugar a las distintas fuentes renovables de energía cuyas formas de captación y aprovechamiento son diferentes, pero todas están influenciadas por el sol (Schallenberg J. et al., 2008). Las fuentes de energía primaria son combustibles no convertidos u originales. Las fuentes de energía primaria en Bolivia incluyen gas natural, petróleo, biomasa, hidroenergía, viento y radiación solar. Las fuentes de energía primaria pueden ser minadas, cosechadas, extraídas, o aprovechadas directamente (Fundación Solón, 2023).

Materiales y métodos

Con referencia a la metodología y procedimiento desarrollado, lo primero que tenemos que trabajar es el diagnóstico de la red de distribución, para esto nos enfocaremos en las bases de datos y los parámetros eléctricos que se constituyen en datos característicos, la demanda de energía, las potencias, las tensiones eléctricas en cada nodo o barra, el ángulo de cada tensión eléctrica, los valores de la intensidad de corriente eléctrica, las pérdidas de potencia y otros parámetros eléctricos.

Análisis de Flujos de Carga

El análisis de flujo de cargas tiene por objeto analizar el desempeño en régimen permanente del sistema de distribución bajo diversas condiciones de funcionamiento. La herramienta de análisis puede aplicarse en la red de distribución.

El objetivo principal de los simuladores de flujos de carga es encontrar: la amplitud de la tensión eléctrica y el ángulo de fase en cada barra o nodo, así también la potencia que fluye a través cada nodo, línea, transformador y otros elementos de la red.

Las funcionalidades del análisis de flujo de potencia mediante el software especializado incluyen algoritmos de resolución para las redes equilibradas y desequilibradas, para nuestro caso analizaremos redes desequilibradas.

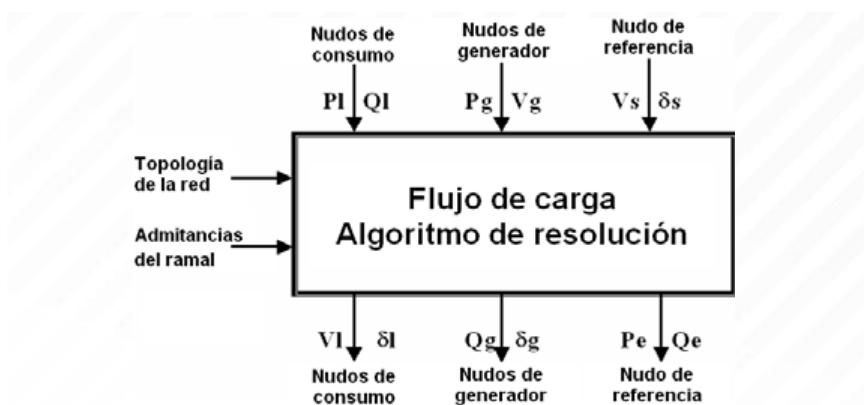


Figura 1. Diagrama flujo de carga
Nota fuente: (CYME International T&D Inc., 2011).

Método de simulación

El método de simulación por barrido de nodos es el siguiente:

1. Realizar el diagnóstico de la red primaria de distribución.
2. Calcular la demanda máxima. Las pérdidas de potencia y los perfiles de tensión eléctrica.

3. Identificar la red troncal trifásica de la red radial primaria
4. Instalar los módulos fotovoltaicos (FV), uno a la vez, en cada nodo de la red troncal.
5. Realizar las simulaciones de flujos de potencia con la instalación de los módulos FV en nodos de la red trifásica.
6. Calcular la reducción de pérdidas de potencia e identificar que sea la máxima, verificando que los perfiles de tensión estén dentro los límites establecidos.
7. Ubicar estratégicamente los módulos solares fotovoltaicos en la red troncal de la red de distribución primaria, que cumplan las condiciones establecidas y las restricciones.

Bases de Datos

Una de las tareas más complejas, es el armado de las bases de datos de redes eléctricas, de equipos eléctricos y de la carga. Estas bases de datos se estructuran y trabajarán en formato texto ASCII, para utilizar en el software especializado de flujos de carga (CYME International T&D Inc., 2012).

Base de datos Red

Contiene información que describe, para cada una de las redes, la conectividad de los tramos, la conectividad de los conductores, características y el tipo de las líneas monofásicas (desequilibradas) o trifásicas (equilibradas), aéreas o subterráneas, los espaciamientos de la línea (Cooperativa Rural de Electrificación, 2020), longitud de la red, parámetros eléctricos como impedancias, admitancias, reactancias, susceptancia, temperatura de trabajo, frecuencia del sistema y otros. Las redes conservadas en la base de datos representan en principio la situación real de la red en un momento dado (generalmente el momento presente). Las copias de estas redes sirven de punto inicial para un estudio (CYME International T&D Inc., 2012).

Base de datos de equipos

Contiene información que describe, para cada una de las redes las propiedades de cada equipo individual, Transformadores monofásicos o trifásicos, condensadores, reactancias shunt, reguladores de voltaje, además de equipos de maniobra como ser: interruptores, seccionadores, fusibles, sistemas fotovoltaicos y fuentes equivalentes.

Base de datos de cargas

Para realizar el diagnóstico de las redes eléctricas de distribución, es necesario realizar el relevamiento de las características de líneas eléctricas, su topología y la capacidad de las instalaciones

eléctricas, también es importante tener las características de las cargas en los centros de transformación para la construcción de la base de datos cargas teniendo en cuenta la demanda de la potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, factor de potencia, cargas identificadas por fase, para realizar las simulaciones sobre las redes primarias en 24,9 kV.

En la siguiente tabla se presenta los datos técnicos la capacidad del conductor a la salida de la subestación, las mediciones de potencia en cabecera de la red primaria de distribución, su configuración y longitud de las líneas eléctricas.

Tabla 1. Parámetros de la subestación y la red primaria

Subestación	Red	Capacidad	Carga		Estado de carga	CDT [unidad]	Líneas en [km]			
		[kVA]	[kW]	[fp]			1f	2f	3f	Total
69/24,9 kV	Líneas en [km]	9186,0	2575,7	99%	28,04%	412	227,4	0,0	115,6	342,0

En el anterior cuadro se muestran las características de la línea aérea de media tensión promedio representativa predominantemente monofásicas (1F) y trifásicas (3F), dónde se puede observar que la red primaria trifásica tiene una longitud de 115,60 km y tiene 412 centros de transformación (CDT).

Una vez realizado los relevamientos y la elaboración de la base de datos de los equipos, de líneas y cargas se realiza las simulaciones mediante software especializado de flujos de potencia de las redes primarias en 24,9 kV, para este fin es necesario contar con mediciones de potencia activa y reactiva en la cabecera de la red primaria de distribución.

La simulación de flujos de potencia se realiza mediante el método de Newton Raphson que es la metodología utilizada para obtener resultados en redes eléctricas de distribución que tienen la característica de ser redes radiales.

A continuación, se muestran los resultados de los flujos de carga de las redes eléctricas primarias de distribución como son las líneas y transformadores.

Tabla 2. Diagnóstico de la red - Demanda total y pérdidas

Subestación	Red	Potencia demandada		Pérdidas			
		[kVA]	[kW]	Conductores	Transformadores [kW]	Total	
						[kW]	[%]
69/24,9	A1	2775,7	2571,8	297,17	94,64	391,82	15,24

Los resultados de flujos de potencia corresponden al comportamiento de la red eléctrica para demanda máxima, donde se puede observar que los valores de ocurrencia de la carga total o demanda máxima en la cabecera de la red primaria es de 2571,8 kW con una pérdida de 391,82 kW que representa el 15,24%. además, las pérdidas en líneas son predominantemente mayores a las pérdidas en los transformadores.

El objetivo es reducir las pérdidas técnicas en las redes primarias de distribución mediante la generación distribuida con la instalación de módulos solares fotovoltaicos, asimismo se pretende mejorar el perfil de tensión eléctrica para mejorar la calidad de energía entregada a todos los consumidores finales. El impacto ambiental esperado es reducir las emisiones de CO₂ desplazando parte de los generadores menos eficientes como son las centrales termoeléctricas.

Es importante mencionar que las simulaciones mediante flujos de carga muestran resultados muy próximos a los valores reales de las instalaciones eléctricas de distribución siendo una metodología de cálculo muy confiable debido a la robustez de los modelos matemáticos utilizados.

Resultados y discusiones

Existen diferentes técnicas de optimización de las redes eléctricas de distribución, por ejemplo: la reconfiguración de redes primarias o alimentadores que tienen la posibilidad de efectuar transferencias de carga entre ellos, equilibrio de cargas por fases por modificación de las características de las redes eléctricas de monofásicas a trifásicas, elevación de los niveles de tensión, instalación de bancos de condensadores, todas las alternativas mencionadas son las más utilizadas para la optimización de redes de distribución con la finalidad de reducir pérdidas técnicas, mejorar la capacidad de utilización de las instalaciones, obtener una mayor confiabilidad y mejorar el perfil de tensiones a lo largo de las redes eléctricas de distribución, asimismo se plantea la optimización de la redes eléctricas de distribución mediante

la instalación de módulos o paneles solares fotovoltaicos en las redes de distribución.

Resultados de pérdidas de potencia y perfiles de tensión

La optimización de las redes eléctricas de distribución mediante GD para mejorar la eficiencia energética a lo largo de la red tiene como objetivo de reducir las pérdidas técnicas y mejorar los perfiles de la tensión eléctrica a través de la ubicación óptima de módulos solar fotovoltaicos.

A continuación, se muestran los valores de las pérdidas de potencia en kW y en porcentaje además de la tensión eléctrica en cola de línea de la red primaria, considerando que los módulos solares fotovoltaicos fueron instalados a 0% (en la subestación), a 25%, 55% 90% 95% y a 100% (final de línea) empezando desde la salida de la subestación de la red en estudio:

Tabla 3. Pérdidas de la red y tensión en cola de línea para diferentes ubicaciones de GD

Red	Distancia			Pérdidas		Tensión	
	[%]	[kVA]	[kW]	[kVAr]	[kW]	[%]	[%]
A1	0	2775,68	99,85	142,26	391,80	15,23	91,63
	25	2513,52	99,82	151,24	399,60	15,93	91,71
	55	2499,61	99,88	123,21	378,58	15,16	92,03
	90	2503,30	99,88	123,09	378,79	15,15	92,20
	95	2500,46	99,89	115,25	372,91	14,93	92,30
	100	2503,36	99,88	122,81	378,60	15,14	92,25

En la tabla anterior se puede observar que las pérdidas de potencia son menores cuando se instalan los módulos solares fotovoltaicos entre el 90% y el 100% de distancia de la red primaria, es decir cerca de cola de línea, el rango de pérdidas tiene poca variación. Cuando los módulos solares fotovoltaicos se instalan en la subestación o cerca de ella las pérdidas son mayores.

La optimización de la red de distribución tiene un impacto positivo en la reducción de pérdidas técnicas, a medida que la instalación y puesta en servicio de la GD esté próximo a cola de línea.

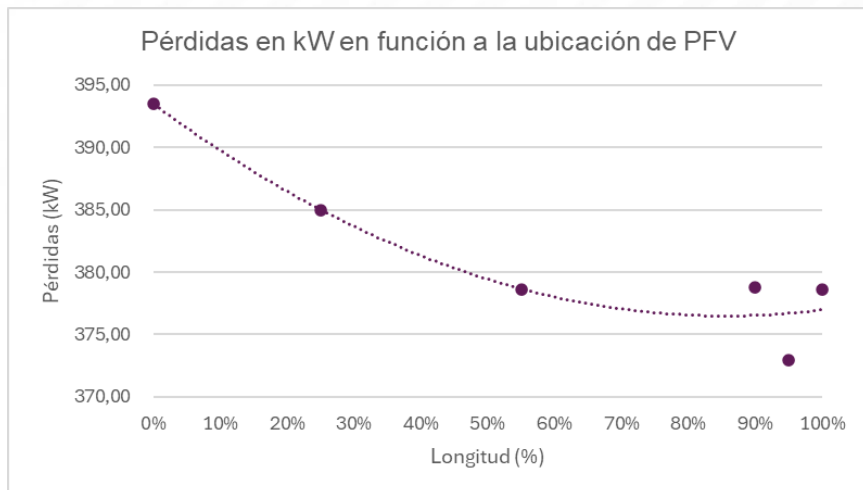


Figura 2. Pérdidas en la red primaria de distribución en función a la distancia de instalación de la GD.
Nota fuente: Elaboración propia.

Otro beneficio que tiene la instalación de los módulos solares fotovoltaicos es la mejora de los valores de tensión eléctrica en el último nodo de la red troncal. En el siguiente gráfico se muestran los valores de la tensión eléctrica en porcentaje con referencia a la tensión nominal de media tensión y en función a la ubicación de la GD en diferentes nodos de la red de distribución, donde se puede observar que la GD instalada en cola de línea (a una distancia de 100% de la longitud desde la subestación) es la más conveniente, porque la tensión se elevaría ligeramente en un 0,7% que corresponde a una tensión de 155,9 V en los niveles de media tensión.

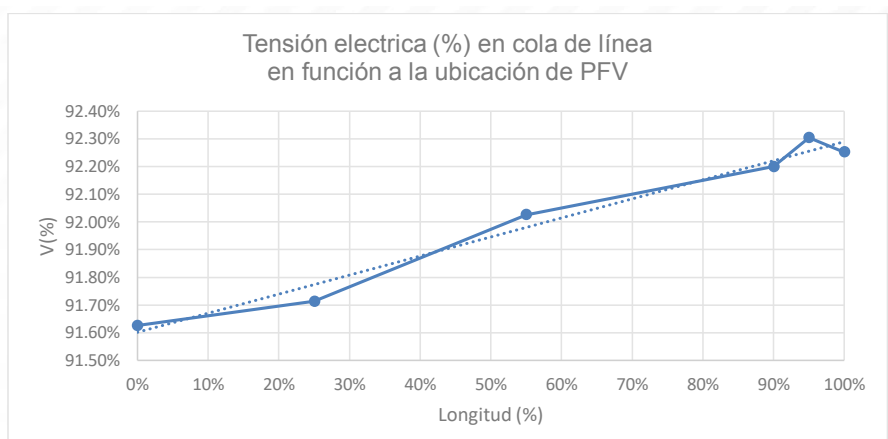


Figura 3. Tensión eléctrica en porcentaje calculado en cola de línea para diferentes ubicaciones de GD.
Nota fuente: Elaboración propia.

A continuación, se observan los resultados obtenidos de la optimización de la red eléctrica de distribución, donde se tiene una reducción de las pérdidas de potencia de 20,84 kW debido a la instalación de un sistema fotovoltaico de 75 kW de potencia pico, instalado próximo a cola de línea:

Tabla 4. Pérdidas y reducción de pérdidas en la red de distribución primaria

Red	Potencia demandada		Pérdidas				Reducción de pérdidas
	Conductores		Transformadores		Total		
	[kVA]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[%]	[kW]
A1	2497,76	2495,23	275,41	95,56	370,95	14,87	20,84

Cálculo del ahorro económico

Con la instalación de Módulos Solares Fotovoltaicos en la red primaria de distribución se tiene una reducción de pérdidas de potencia de 20,84 kW. Considerando un precio de 65,21 Bs/kW-mes que corresponde a los valores promedio de los nodos de inyección involucrados en el área de la red (Autoridad de Electricidad y Tecnología Nuclear, 2023), tenemos un ahorro de 1.358,98 Bs/mes por reducción de pérdidas de potencia, que representa un ahorro anual de 16.307,72 Bs.

Las pérdidas de energía calculadas con un factor de carga de 0,65 son de 65.462,40 kWh/año a un precio de 0,325 Bs/kWh representa un ahorro de 21.275,28 Bs anuales por reducción de la energía perdida.

Asimismo, la distribuidora local de energía eléctrica dejaría de demandar una potencia activa de 55,73 kW por la instalación de módulos solares fotovoltaicos en la red primaria, a un precio de 65,21 Bs/kW-mes (Autoridad de Electricidad y Tecnología Nuclear, 2023), representa un ahorro de 43.609,84 Bs/año por reducción de la demanda.

La energía generada mediante los módulos solares fotovoltaicos y no comprada por la distribuidora local es de 174.926,35 kWh a un precio de 0,325 Bs/kWh representa un ahorro de 56.851,06 Bs/año por la reducción de compra de energía.

Cálculo de indicadores financieros

Se realizó el análisis financiero para la instalación de los Módulos solar fotovoltaicos con una potencia de 75 [kWp], donde se calculó el flujo de caja para los 25 años de vida útil del sistema fotovoltaico, asimismo se considerando el reemplazo del inversor en el año 15.

Tabla 5. Flujo de caja - Generación distribuida - Sistema fotovoltaico

Descripción	Año 0	Año 5	Año 10	Año 15	Año 20	Año 25
Paneles	291.900,00					
Inversor	75.186,36			75.186,36		
Estructuras	53.072,73					
Instalación	17.690,91					
Accesorios y otros	1.459,50					
Total	439.309,50			75.186,36		
Ingresos		78.130,28	78.135,28	78.140,28	78.145,28	78.150,28
Flujo de caja	-439.309,50	78.130,28	78.135,28	2.953,92	78.145,28	78.150,28

Las inversiones realizadas durante la vida útil del proyecto, se tomando en cuenta la inversión inicial, los ingresos a valores actualizados y la tasa de interés o recuperación reconocida por el ente regulador (10,4%). Se calcula el valor actual neto (VAN) la tasa interna de retorno (TIR) y el tiempo de recuperación de la inversión efectuada. A continuación, se muestran los indicadores financieros:

Tabla 6. Indicadores financieros

Valor actual neto (VAN)	Tasa interna de retorno (TIR)	Tiempo de recuperación
[Bs]	[%]	[años]
231.604,47	17,17	9

La inversión se puede recuperar durante el noveno año de iniciada la inversión, a partir del décimo año se obtienen ingresos netos.

Cálculo de la Huella de carbono

Para calcular las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) debemos tomar en cuenta el factor de emisión, que es la cantidad de CO₂ emitida por cada kWh generado. Este factor depende de la combinación de las fuentes de energía utilizadas en la generación de electricidad en una región específica. En Bolivia la matriz energética primaria del sector eléctrico del Sistema Interconectado Nacional (SIN) corresponden a las centrales termoeléctricas que tienen como energía primaria el gas natural con un factor de emisión de 0,54 kg CO₂/kWh (Fundación Solón, 2023).

Con la reducción de pérdidas de energía de 65.462,40 kWh/año multiplicada por el factor de emisión de 0,54 kg CO₂/kWh, tenemos que las emisiones evitadas son igual a 35.349,70 kg CO₂.

De la misma manera la energía no comprada de 174.926,35 kWh/año multiplicada por el factor de emisión de 0,54 kg CO₂/kWh, tenemos que las emisiones evitadas son igual a 94.460,23 kg CO₂.

Con la propuesta de instalación de los módulos solares fotovoltaicos en varias redes eléctricas de distribución por reducción de pérdidas y por evitar la compra de energía al MEM es de 123.809,93 kg CO₂ esta reducción de la huella de carbono tiene un gran impacto en el medio ambiente para promover prácticas sostenibles.

Conclusiones

El trabajo de investigación muestra una metodología práctica y sencilla para la ubicación óptima de generación distribuida enfocado en módulos solares fotovoltaicos para la reducción de pérdidas técnicas y mejoras en el perfil de tensión en puntos críticos como son los nodos en cola de línea, así mismo nos permite aprovechar la energía solar mediante la generación a pequeña escala teniendo como fuente esta energía renovable y limpia. Los beneficios son evidentes para la empresa distribuidora de energía eléctrica y así también para el consumidor final.

El método planteado reduce el tiempo de análisis y recursos utilizados, se logra reducir pérdidas de potencia y energía, se evita la compra de energía en el Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) utilizadas para suministrar electricidad en las redes eléctricas de distribución, mejora el perfil de tensión eléctrica. Situación que contribuye a obtener beneficios económicos a partir del noveno año a partir de la implementación de la generación distribuida, con un impacto importante que impacta en la reducción de la huella de carbono, la reducción de los gases de efecto invernadero. Asimismo, esta tendencia se torna creciente en el tiempo que promueve prácticas sostenibles. Sin embargo, se debe tener límites en el porcentaje de participación en la generación de energía eléctrica, para mantener la estabilidad y la continuidad del servicio. Por último, la generación distribuida permite cambiar la matriz energética desplazando a los generadores menos eficientes, como los generadores que tienen como fuente primaria en base a combustibles fósiles.

El presente estudio determina en forma práctica la potencia de los módulos solares fotovoltaicos, no optimiza su tamaño, porque se pretende estandarizar una determinada potencia para utilizar en redes de distribución primarias con diferentes características

topológicas que incluyen la longitud, formas constructivas, demanda, hábitos y costumbres de los consumidores conectados al sistema de eléctrico de distribución.

Referencias

- Aguila, T. A., González, D., Gutiérrez, G., & Ortiz, L. (2022). Ubicación y dimensionamiento óptimo de Generación Distribuida en redes de distribución usando PSO. *I+D Tecnológico*, 18(1), 50-68. <https://doi.org/10.33412/idt.v18.1.3219>
- Autoridad de Electricidad y Tecnología Nuclear. (2023). Anuario Estadístico AETN 2023.
- Cooperativa Rural de Electrificación. (2020). *Manual de estructuras de redes aéreas de distribución de energía eléctrica MT 10.5 kV - 14.4/24.9 kV BT 220 - 380 V*.
- CYME International T&D Inc. (2011). Análisis básicos de CYMDIST - Guía del Usuario.
- CYME International T&D Inc. (2012). Manual de Referencia.
- CYME International T&D Inc. (2012). Manual de Referencia de los equipos.
- Espinoza L. R. (2000). *Sistemas de Distribución Eléctrica*. Facultad de Ingeniería - UNAM.
- Fundación Solón. (2023, febrero 23). La matriz energética en Bolivia. <https://fundacionsolon.org/2023/02/23/la-matriz-energetica-en-bolivia/>.
- Grisales L., Restrepo C., & Jaramillo F. (2017). Ubicación y dimensionamiento de generación distribuida: una revisión. *Ciencia e Ingeniería Neograndina*. 157-176. <http://dx.doi.org/10.18359/rcin.2344>
- Juárez, C. J. (1995). *Sistemas de distribución de energía eléctrica*. Universidad Autónoma Metropolitana.
- Martínez, J., & Llosas, Y. (2022). Técnicas para la ubicación óptima de generación distribuida en redes de distribución de energía eléctrica. *Revista Científica Dominio de las Ciencias*, 8(1), 503-520.
- Naciones Unidas. (2018). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe. www.issuu.com/publicacionescepal/stacks
- OLADE. (2013). La sostenibilidad de la eficiencia energética.
- Ramos, E. (2020). La generación distribuida: El camino hacia la producción descentralizada de electricidad y pautas para su reglamentación. En Forseti.

- Schallenberg J., Piernavieja, G., Carlos, I., Rodríguez, H., Unamunzaga, P., Ramón, F., Déniz, G., Torres, M. D., Cabrera Pérez, D., Martel, G., Javier, R., Fariña, P., & Ortin, V. S. (2008). Energías renovables y eficiencia energética. Instituto Tecnológico de Canarias S.A. www.renovae.org,
- Viqueira L. J. (2010). Redes Eléctricas: Vol. Tomo I. U. A. de M. Facultad de Ingeniería.
- Yebra J. (2009). *Sistemas Eléctricos de Distribución*. Reverte S.A.

CAPÍTULO XXIII

**Más allá de la voluntad: Cómo
la Responsabilidad Social se
convierte en cimiento de la
ventaja competitiva de YPF**

Ramiro Flores Rodríguez

Universidad Mayor de San Andrés

<https://orcid.org/0000-0001-5336-6469>

Más allá de la voluntad: Cómo la Responsabilidad Social se convierte en cimiento de la ventaja competitiva de YPFB

Resumen

El estudio analiza el papel estructural de la Responsabilidad Social (RS) como factor determinante de la sostenibilidad y la ventaja competitiva en una empresa estatal del sector hidrocarburos, considerando su función mediadora entre los sistemas de gestión y el desempeño organizacional. Mediante un enfoque cuantitativo correlacional-explicativo basado en modelamiento de ecuaciones estructurales (PLS-SEM) aplicado a una muestra de 100 directivos, se identificaron asociaciones estadísticamente significativas entre la institucionalización de la RS y los resultados económico, social y ambiental. Los hallazgos sugieren que la RS, cuando se integra en la arquitectura estratégica y de gobernanza, trasciende el cumplimiento normativo y se convierte en un activo intangible generador de legitimidad y resiliencia. A nivel teórico, la investigación aporta evidencia sobre la RS como mecanismo de alineación entre los objetivos corporativos y los compromisos de sostenibilidad, reforzando su rol como recurso estratégico en empresas públicas. En el plano práctico, proporciona orientaciones para fortalecer la gestión responsable y la creación de valor compartido en contextos institucionales complejos. Se reconocen limitaciones derivadas del diseño correlacional y del tamaño muestral, por lo que se recomienda ampliar el análisis mediante estudios longitudinales y comparativos en el ámbito latinoamericano. En conjunto, los resultados confirman que la RS constituye un componente esencial para consolidar la gobernanza sostenible y la legitimidad competitiva de las empresas estatales en entornos energéticos en transformación.

Palabras clave: Responsabilidad Social; Sostenibilidad Corporativa; Ventaja Competitiva; Gobernanza; Empresas Estatales.

Beyond Voluntarism: How Social Responsibility becomes the foundation of competitive advantage at YPFB

Abstract

This study examines the structural role of Corporate Social Responsibility (CSR) as a determinant of sustainability and competitive advantage in a state-owned enterprise within the hydrocarbons sector, focusing on its mediating function between management systems and organizational performance. Using a quantitative, correlational-explanatory approach based on Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM) applied to a sample of 100 executives, the results reveal statistically significant associations between the institutionalization of CSR and economic, social, and environmental outcomes. The findings indicate that CSR, when embedded in strategic and governance frameworks, transcends regulatory compliance and becomes an intangible asset that fosters legitimacy and resilience. Theoretically, the research provides evidence of CSR as a mechanism for aligning corporate objectives with sustainability commitments, reinforcing its role as a strategic resource in public enterprises. Practically, it offers guidance for strengthening responsible management and shared value creation in complex institutional contexts. The study acknowledges limitations related to its correlational design and sample size, suggesting the need for longitudinal and comparative analyses across Latin American contexts. Overall, the results confirm that CSR constitutes a key component for consolidating sustainable governance and competitive legitimacy in state-owned enterprises operating within evolving energy systems.

Keywords: Corporate Social Responsibility; corporate sustainability; competitive advantage; governance; state-owned enterprises

Além da Voluntariedade: Como a Responsabilidade Social se torna o alicerce da Vantagem Competitiva na YPFB

Resumo

O estudo analisa o papel estrutural da Responsabilidade Social (RS) como fator determinante da sustentabilidade e da vantagem competitiva em uma empresa estatal do setor de hidrocarbonetos, considerando sua função mediadora entre os sistemas de gestão e o desempenho organizacional. Por meio de uma abordagem quantitativa correlacional-explicativa baseada em modelagem de equações estruturais (PLS-SEM) aplicada a uma amostra de 100 diretores de níveis médio e alto com experiência no setor, foram identificadas associações estatisticamente significativas entre a institucionalização da RS e os resultados econômicos, sociais e ambientais. Os achados sugerem que a RS, quando integrada à arquitetura estratégica e de governança, transcende o cumprimento normativo, tornando-se um ativo intangível gerador de legitimidade e resiliência. No plano teórico, a pesquisa fornece evidências sobre a RS como mecanismo de alinhamento entre os objetivos corporativos e os compromissos de sustentabilidade, reforçando seu papel como recurso estratégico em empresas públicas. No plano prático, oferece orientações para fortalecer a gestão responsável e a criação de valor compartilhado em contextos institucionais complexos. Reconhecem-se limitações derivadas do desenho correlacional e do tamanho da amostra, recomendando-se ampliar a análise por meio de estudos longitudinais e comparativos na América Latina. Em conjunto, os resultados confirmam que a RS constitui um componente essencial para consolidar a governança sustentável e a legitimidade competitiva das empresas estatais em ambientes energéticos em transformação.

Palavras chave: Responsabilidade Social; sustentabilidade corporativa; vantagem competitiva; governança; empresas estatais

Introducción

La industria de hidrocarburos constituye no sólo un eje estructural de la economía boliviana sino también un espacio privilegiado para institucionalizar la sostenibilidad más allá del voluntarismo. Este estudio se inscribe en el debate contemporáneo de la ingeniería industrial y de la gestión de operaciones, al indagar cómo la Responsabilidad Social (RS) puede articularse como vector estructurante de estrategia, gobernanza y procesos en empresas estatales. Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos (YPFB) emerge como un caso particularmente relevante dada su centralidad sistémica, su exposición a presiones sociales y regulatorias, y su inserción en un entorno institucional complejo.

Desde esta perspectiva, conceptualizamos la RS como un sistema de capacidades organizacionales y prácticas corporativas estructuradas en torno a seis dimensiones: sistemas de gestión previo, motivaciones internas, implementación operativa, integración de la RS en los procesos, formulación estratégica y performance económico social y ambiental. Este entramado configura una arquitectura que, al instrumentalizarse, se traduce en una estrategia corporativa orientada a la sostenibilidad y proyecta efectos diferenciados sobre dichas dimensiones del desempeño. En la literatura especializada se documentan efectos positivos, neutros o no lineales de la RS sobre el desempeño empresarial, mediadas por mecanismos como reputación, eficiencia operativa, gestión de riesgos, legitimidad y acceso a mercados (Aguinis & Glavas, 2012). La adopción de estándares Ambientales, Sociales y de Gobernanza (ESG) y de sistemas integrados de gestión en sectores extractivos ha sido relacionada con mejoras contingentes en dimensiones múltiples del desempeño, condicionadas por el entorno institucional (García-Sánchez, 2020). En empresas estatales, los retos de la gobernanza pública y los mandatos múltiples imprimen trayectorias específicas en las cuales la RS opera como palanca de legitimidad y simultáneamente como mecanismo de disciplina operativa.

Metodológicamente, los modelos de ecuaciones estructurales se han consolidado como herramientas idóneas para estimar relaciones latentes complejas y captar efectos mediadores e indirectos (Hair et al., 2019). Con todo, persisten vacíos teóricos y empíricos que limitan el avance del conocimiento aplicado: por un lado, la brecha contextual, dado que la evidencia rigurosa para Bolivia y, en particular, para una empresa estatal con el perfil institucional de YPFB, sigue siendo escasa; por otro, la brecha de integración causal, porque se conoce poco sobre la secuenciación mediante la cual las capacidades y prácticas de

RS configuran una estrategia sostenible robusta que impacte de manera diferenciada en los ejes del desempeño; y, finalmente, la brecha metodológica y de medición, reflejada en la ausencia de instrumentos adaptados y validados para el contexto boliviano, así como en la falta de estimaciones que incorporen mediaciones organizacionales relevantes. Abordar estas lagunas resulta imperativo no solo para el progreso académico, sino también para fortalecer la eficiencia operativa, y consolidar la licencia social que permita operar y alinear la actuación corporativa con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

De esa reflexión emerge la pregunta central que guía este estudio: ¿en qué medida y a través de qué mecanismos, las capacidades y prácticas de RS, entendidas como sistemas de gestión previo, motivaciones institucionales, procesos de implementación e integración estratégica, configuran una arquitectura de sostenibilidad que se consolida como estrategia organizacional e incide de manera diferenciada en los desempeños económico, social y ambiental de YPFB? La contribución teórica reside en la propuesta y testeo de un modelo estructural que integra estas dimensiones y explicita rutas causales directas e indirectas entre capacidades, prácticas, estrategia y resultados. La contribución práctica consiste en señalar palancas estratégicas priorizables para transitar de iniciativas dispersas hacia una arquitectura de sostenibilidad institucionalizada, incorporada a la toma de decisiones y los sistemas de control de gestión en una empresa estatal del sector energético.

El objetivo del estudio consiste en estimar estas relaciones mediante PLS-SEM, como un instrumento adaptado al contexto boliviano y aplicado a una muestra de mandos medios y superiores en YPFB. Los hallazgos evidencian que la implementación media la relación entre los sistemas de gestión previa y la integración estratégica de la RS, y que la integración impulsa una estrategia organizacional que se asocia positivamente al desempeño económico, social y ambiental. Si bien la varianza explicada de los desempeños es moderada, las trayectorias del modelo estructural son coherentes con la teoría y sugieren la existencia de variables omitidas o mecanismos no capturados. Por su parte, el modelo de medida alcanza niveles satisfactorios de confiabilidad y de validez convergente y discriminante, lo que refuerza la solidez metodológica del estudio.

La estructura del texto responde a una lógica de rigor y decisión. Primero se desarrolla el marco teórico que articula capacidades organizacionales, prácticas de RS, estrategia y desempeño multidimensional, junto con las hipótesis derivadas. Luego se contextualiza a YPFB y se expone el diseño metodológico, incluidos

los constructos, la adaptación del instrumento y los criterios de validez y confiabilidad, así como la especificación del modelo PLS-SEM. A continuación, se presentan los resultados del modelo de medida y del modelo estructural, con énfasis en coeficientes de trayectoria, efectos indirectos y niveles de significancia. La discusión analiza implicaciones sobre gobernanza corporativa, priorización de iniciativas de RS, estrategia comercial y relacionamiento con comunidades. Finalmente, se analizan las limitaciones del estudio y se delimitan los alcances de su validez externa. Del mismo modo, se proponen líneas futuras de investigación orientadas al perfeccionamiento de los instrumentos de medición y a la inclusión de variables contextuales externas propias del sector energético.

Revisión Literaria

Para comprender la evolución de la RS, es esencial revisar sus orígenes y su desarrollo a lo largo de las décadas. El concepto de RS surge en los años 50 con Howard R. Bowen, quien en su obra "Social Responsibilities of the Businessman", define la RS como las obligaciones de los empresarios para adoptar políticas y decisiones que se alineen con los valores y objetivos sociales (Bowen, 1953). Esta definición marca un hito, al reconocer que las empresas impactan directamente en la sociedad y, por tanto, no operan de manera aislada.

Durante la década de los 60, el concepto de RS se expandió. Investigadores como (Davis, 1960; Davis & Blomstrom, 1966; Frederick, 1960; Ringo & McGuire, 1964; Walton, 1967) enfatizaron que la RS abarca más que las simples obligaciones económicas de las empresas, destacando la importancia de la relación entre la empresa y la sociedad. Se promovió así un enfoque holístico que integraba los intereses sociales dentro de las estrategias empresariales, reconociendo que el bienestar socioeconómico debía ser parte de la misión empresarial.

En los años 70, el enfoque sobre la RS se definió con mayor claridad. Autores como Davis (1973), Eells & Walton (1974), Manne & Wallich (1972) y Sethi (1975), destacaron que la RS va más allá del simple cumplimiento legal, sugiriendo que debe ser voluntaria y orientada hacia el bienestar social. Durante este periodo, se introdujeron varios modelos que permitieron comprender la RS de manera estructurada, como es el caso de los tres círculos concéntricos, que diferenciaban entre responsabilidades económicas, sociales y ambientales. Asimismo, Carroll (1979) aportó un marco de referencia clave al introducir los conceptos de responsabilidad económica, legal, ética y discrecional, lo que permitió

a las empresas abordar la RS desde distintas dimensiones. Esta década consolidó la idea de que la RS no debía limitarse a cumplir con la normativa, sino que debía orientarse voluntariamente hacia el bienestar social.

Los años 80 introdujeron nuevas perspectivas sobre la RS, destacándose la “Teoría de los Stakeholders” de Freeman (1984). Esta teoría propuso que las empresas no solo deben enfocarse en satisfacer a los accionistas, sino también en atender las expectativas de todos los grupos involucrados o afectados por sus actividades. Esta visión amplió considerablemente el concepto de RS, al resaltar la importancia de la interacción entre la empresa y sus múltiples actores, redefiniendo así el papel de las organizaciones dentro de la sociedad.

En los años 90, el concepto de RS se armonizó con otras perspectivas, consolidándose con el enfoque de los stakeholders de Freeman (1994) y posteriores desarrollos. Aunque este periodo no produjo una redefinición radical del concepto, permitió integrar las definiciones previas con nuevas tendencias y enfoques estratégicos.

A partir del 2000, la RS evolucionó hacia un activo intangible esencial para las organizaciones (Bernal Conesa, Briones Peñalver, et al., 2016; Martin, 2005; Méndez-Picazo, 2005; Perez, 2015; Rendueles Mata, 2010; Surroca et al., 2010; Truñó & Rialp, 2008; Villagra et al., 2015). Se consolidó la idea de que los valores intangibles, como la reputación y la confianza social, son cruciales para el éxito empresarial. Investigaciones como las de Villafañe (2005) y posteriormente las de Gaio et al. (2025), subrayaron la importancia de la comunicación empresarial y la gestión de estos intangibles, transformando la RS en un factor clave para el éxito a largo plazo de las organizaciones. En este periodo, la RS dejó de ser una simple tendencia y pasó a ser una necesidad estratégica para las empresas.

Recientemente, el enfoque ESG ha surgido como una evolución natural del concepto de RS. Este marco se ha consolidado como un pilar esencial para que las empresas garanticen su sostenibilidad a largo plazo, al integrar de manera sistemática criterios ambientales, sociales y de gobernanza en su gestión. Este enfoque no solo fortalece la transparencia y la rendición de cuentas, sino que también facilita a inversionistas y reguladores una evaluación clara del impacto social y ambiental de las organizaciones. Asimismo, los Indicadores Clave de Desempeño (KPIs) asociados al ESG permiten medir y monitorear los avances corporativos en estos ámbitos, promoviendo la alineación con los ODS y otros marcos internacionales, lo cual asegura una integración coherente y holística de la sostenibilidad empresarial.

Aunque a menudo se confunde ESG con simples estrategias ambientales, el concepto va mucho más allá, incorporando aspectos sociales, como la igualdad salarial y la sostenibilidad en la cadena de suministro, y criterios de gobernanza, como la gestión de riesgos y la ética empresarial. Mientras que la RS tradicionalmente se ha centrado en el compromiso voluntario de las empresas para mejorar su impacto social, el ESG representa un enfoque estructurado y cuantificable que institucionaliza la sostenibilidad dentro de la estrategia corporativa, garantizando un impacto positivo y medible a largo plazo. Recientes estudios muestran la evolución regulatoria y la profundización en mecanismos de control y transparencia (Chávez Plasencia et al., 2025).

En definitiva, la integración de los principios de RS y ESG se ha convertido en una necesidad estratégica. Al adoptar estructuras claras de supervisión, políticas definidas y una participación activa de los stakeholders, las empresas pueden no solo cumplir con sus responsabilidades éticas y sociales, sino también fortalecer su competitividad en un entorno cada vez más exigente en términos de sostenibilidad.

A partir de esta revisión literaria, se derivan tres hipótesis clave para este estudio. La primera postula que la implementación de prácticas de RS en YPFB impacta positivamente en su rendimiento económico. La segunda sostiene que la integración de criterios ESG fortalece la percepción pública y, en consecuencia, la reputación corporativa de la empresa. La tercera hipótesis propone que dicha adopción de RS, cuando está mediada por una gobernanza interna sólida, actúa como un factor moderador clave para la sostenibilidad a largo plazo.

Estas hipótesis reflejan la evolución de la RS hacia un modelo integral y estratégico, donde la sostenibilidad y el desempeño empresarial se retroalimentan. Para analizar estas interacciones y su incidencia en la competitividad de YPFB, el estudio articulará de manera secuencial un marco teórico, las hipótesis planteadas y una metodología que permita contrastarlas empíricamente. Esta coherencia interna garantiza un análisis riguroso y una comprensión clara del proceso que va de la teoría a la verificación.

En este sentido, la principal contribución teórica de esta investigación es extender la Resource-Based View (RBV) al conceptualizar la RS integrada no como un recurso aislado, sino como una capacidad de orquestación con características VRIO (valiosa, rara, inigualable y organizada). Esta capacidad, socialmente compleja y dependiente de la trayectoria anterior de la empresa, permite recombinar recursos y rutinas, activar mecanismos de aislamiento y, en contextos de alto escrutinio público, facilitar la apropiación de rentas ricardianas.

Esta conceptualización se operativiza a través de las siguientes proposiciones:

- Proposición 1. La integración de la RS como capacidad de orquestación incrementa la inimitabilidad de las combinaciones de recursos, sentando las bases para una ventaja competitiva sostenida.
- Proposición 2. Una estructura de gobernanza robusta y mecanismos de apropiabilidad internos potencian el impacto de esta capacidad sobre el desempeño organizacional.
- Proposición 3. La ventaja surge de un mecanismo causal específico (**trayectoria SG → IMRS → INTRS → EST**), el cual explica cómo la acumulación de recursos se transforma en estrategia efectiva mediante la orquestación, sin la cual los sistemas por sí solos no generan ventaja.

Materiales y Métodos

El presente estudio adopta un enfoque cuantitativo con un diseño correlacional-descriptivo, cuyo objetivo es analizar la relación entre la implementación de prácticas de RS y el desempeño organizacional en YPF. Para ello, se emplearon Modelos de Ecuaciones Estructurales mediante PLS-SEM, con el propósito de examinar las interacciones entre las dimensiones de la RS y su impacto en el rendimiento económico, social y ambiental de la organización. El uso de esta herramienta permite evaluar simultáneamente relaciones causales complejas entre constructos teóricos, proporcionando una base sólida para interpretar el efecto de la RS en el desempeño organizacional. Por lo tanto, este enfoque supera las limitaciones de los métodos univariantes tradicionales y ofrece una evaluación robusta de las relaciones causales entre los constructos teóricos y sus indicadores empíricos.

Se seleccionó intencionalmente una muestra de 100 participantes, compuesta por mandos medios y superiores, incluidos directores, gerentes y supervisores, todos con responsabilidades directas o indirectas en la implementación de políticas organizacionales en el sector hidrocarburos. Esta selección estratégica buscó asegurar la participación de individuos con conocimiento del sector energético, así como de prácticas de RS y su integración en las operaciones empresariales, garantizando percepciones informadas y relevantes. El tamaño de la muestra se alinea con las recomendaciones metodológicas establecidas en investigaciones previas sobre modelos estructurales, lo cual garantiza la validez estadística del análisis PLS-SEM (Barba-Sánchez & Atienza-Sahuquillo, 2016; Felipe et al., 2017; Hair et al., 2024; Hernández-Perlines et al., 2016; Hoyle, 1995; Reinartz et al., 2009; Wong, 2013).

Las variables independientes corresponden a la implementación de prácticas de RS, evaluadas mediante un cuestionario con escala tipo Likert, elaborado a partir de estudios empíricos previos (Battaglia et al., 2014; Bernal Conesa, 2016). Las variables dependientes, por su parte, se relacionan con los ámbitos de institucionalidad y gobernanza empresarial. Cada constructo fue operacionalizado a través de indicadores reflectivos, con el propósito de analizar el impacto global de la RS en el desempeño corporativo y en el entorno social de YPFB (véase Apéndice A).

Modelo de Análisis

La RS maximiza la contribución de las organizaciones al desarrollo sostenible al priorizar el bienestar de las personas y la eficiencia en los procesos productivos. Este enfoque integral abarca tres dimensiones fundamentales: económica, social y medioambiental, posicionando a la RS como un principio universal para cualquier tipo de organización. Véase Figura 1.

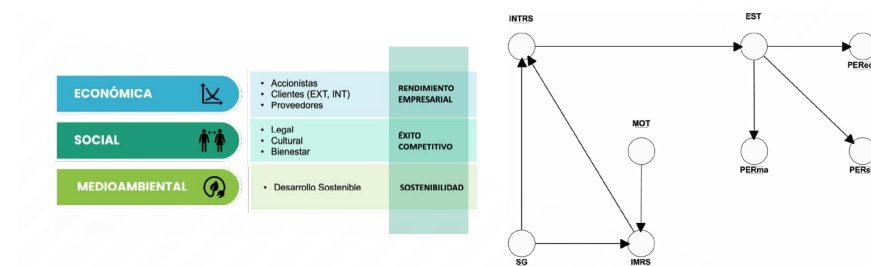


Figura 1. Dimensiones de Responsabilidad Social vs Modelo de Análisis Estructural

Fuente: Elaboración propia

La dimensión económica de la RS exige que la organización opere de manera responsable, generando valor para accionistas, clientes y trabajadores, consolidando su rendimiento empresarial. Este principio se materializa mediante la promoción de empleos dignos, salarios equitativos, beneficios sociales y oportunidades de desarrollo profesional, contribuyendo al crecimiento económico inclusivo y al bienestar colectivo (Battaglia et al., 2014; Zheng et al., 2024).

La dimensión social refuerza el compromiso corporativo con prácticas éticas que respeten leyes, derechos humanos y patrimonio cultural. Este principio fomenta la igualdad de oportunidades y la inversión en el desarrollo de las comunidades locales fortaleciendo el éxito competitivo. Este enfoque asegura que la empresa contribuya al bienestar social y fortalezca sus relaciones

con los grupos de interés mediante una gestión responsable y transparente (Bernal Conesa, 2016; Freeman, 1984; Kusmendar et al., 2025).

Por su parte, la dimensión medioambiental subraya el compromiso organizacional con la preservación del entorno mediante la adopción de prácticas que reduzcan el impacto ecológico. Entre ellas destacan la disminución de emisiones, el uso eficiente de recursos naturales y la implementación de tecnologías limpias. Este enfoque promueve la sostenibilidad ambiental como componente inseparable del desempeño económico, coherente con los principios de valor compartido que impulsan una economía verde e inclusiva (Gutierrez-Ayala, 2022; Porter & Kramer, 2006; Wijaya et al., 2025).

En consecuencia, la integración estratégica de la RS en el núcleo operativo de las empresas constituye un factor determinante para promover un desarrollo sostenible y crear ventajas competitivas en contextos globales caracterizados por alta volatilidad, incertidumbre, complejidad y ambigüedad (entorno VUCA+H). Incorporar la RS de manera efectiva refuerza el compromiso ético y social de las organizaciones, estimula la innovación y favorece la diferenciación competitiva, generando éxito sostenido a largo plazo. Por lo tanto, este enfoque integral, que articula la RS con la estrategia corporativa, fortalece la reputación institucional y habilita la adopción de modelos de negocio sostenible y resilientes (Bernal Conesa, 2016), como lo confirman análisis recientes (Kusmendar et al., 2025; Wijaya et al., 2025)

Asimismo, la sinergia entre la RS y los procesos empresariales impulsa prácticas innovadoras orientadas a optimizar el desempeño económico, la competitividad y la sostenibilidad organizacional. La implementación de acciones concretas de RS favorece su institucionalización en empresas estratégicas, como YPFB, promoviendo una cultura corporativa basada en la ética y la responsabilidad. Este proceso no solo fortalece el desempeño financiero, sino que también genera valor compartido y sostenido para los grupos de interés, asegurando impactos positivos en las dimensiones social y ambiental (Battaglia et al., 2014; Siddiqui et al., 2025).

En síntesis, una comprensión clara de la RS permitiría a YPFB gestionar sus operaciones de forma colaborativa y estratégica, alineando sus capacidades institucionales con sus objetivos de sostenibilidad. En consecuencia, este enfoque garantizaría la consolidación de prácticas responsables que beneficien tanto a la empresa como a la sociedad. En este sentido, el modelo de análisis estructural se fundamenta en la relación y distribución de los constructos o variables latentes, configurando el marco analítico que orienta el presente estudio.

Metodología

Para abordar la complejidad inherente al estudio de sistemas multifacéticos, el análisis se sustenta en modelos de ecuaciones estructurales de segunda generación, adecuados para cuantificar y contrastar las interacciones entre constructos teóricos y variables observables. La especificación metodológica se estructura en dos componentes interdependientes. En primer lugar, los modelos de medición evalúan la capacidad de los indicadores para representar sus constructos latentes y permiten depurar la validez y confiabilidad de las escalas utilizadas. En segundo lugar, los modelos estructurales estiman las relaciones causales entre constructos y analizan de manera simultánea los efectos directos e indirectos dentro de la arquitectura causal propuesta. Esta secuencia analítica garantiza que las inferencias sobre las trayectorias se basen en medidas psicométricamente sólidas y que la interpretación teórica permanezca coherente con el marco conceptual del estudio.

En coherencia con esta especificación, el tamaño muestral y el procedimiento de selección se justifican de manera integrada. Con $N = 100$, y considerando que el enfoque PLS-SEM tolera tamaños moderados manteniendo una potencia estadística adecuada en modelos de complejidad media, el estudio se ubica dentro de los umbrales recomendados por la literatura y cumple la regla de las diez veces al superar el mayor número de predictores que inciden sobre una variable endógena (Hair et al., 2017; Hoyle, 1995; Reinartz et al., 2009).

La muestra se obtuvo mediante muestreo intencional dirigido a personal directivo de nivel medio y superior, delimitado por un marco compuesto por cargos con responsabilidad decisoria en áreas operativas y corporativas vinculadas a la RS. Se incluyeron posiciones de jefatura, gerencia y dirección, mientras que se excluyeron aquellas de carácter operativo sin atribuciones decisorias. La captación se realizó a través de canales directos e institucionales hasta completar 100 observaciones válidas, asegurando la pertinencia de la información respecto de los objetivos analíticos del estudio. Posteriormente, los hallazgos cuantitativos se complementaron mediante la realización de grupos focales en talleres prospectivos, orientados a profundizar en la interpretación de los resultados y generar escenarios estratégicos que apoyen el diseño de políticas públicas.

Si bien el tamaño muestral moderado y la naturaleza no probabilística del procedimiento limitan la generalización de los hallazgos, estas condiciones se reconocen como restricciones del diseño y su validación se sugiere en estudios futuros con

muestras amplias y esquemas probabilísticos de selección. No obstante, los resultados obtenidos proporcionan información estratégica suficiente para generar escenarios prospectivos robustos, lo que permite fundamentar la formulación de políticas públicas coherentes y efectivas, especialmente en el contexto de una empresa estatal con relevancia estratégica para el desarrollo económico y social del país.

En este sentido, la metodología PLS-SEM aplicada permite evaluar simultáneamente múltiples relaciones de dependencia complejas, lo que mejora significativamente la precisión y la confiabilidad de los resultados. El uso de la herramienta SmartPLS enriqueció el análisis al evaluar los coeficientes de trayectoria (path coefficients), determinar los niveles de significancia (R^2) y evaluar la redundancia cruzada (Q^2) (Battaglia et al., 2014; Bernal Conesa, De Nieves Nieto, et al., 2016; Sharma et al., 2023; Turyakira et al., 2014). Con base en este instrumento, se identificaron indicadores clave que reflejan las dimensiones críticas de RS y su impacto en el desempeño económico y social de YPFB.

En el ámbito de institucionalidad y gobernanza, es fundamental que YPFB consolide prácticas sostenibles y transparentes en el sector energético. Esto subraya la importancia de establecer estructuras de gobernanza robustas que garanticen la transparencia, la rendición de cuentas y el cumplimiento normativo. Un marco de gobernanza sólido no solo refuerza la confianza de los "stakeholders", sino que también mejora la eficiencia operativa y asegura la sostenibilidad a largo plazo. Para YPFB, esto implica desarrollar políticas claras, optimizar los procesos internos y fomentar una cultura organizacional basada en la ética y la RS. La integración de estos principios mejorará la reputación e imagen de la empresa, construyendo activos intangibles, reduciendo riesgos y contribuyendo significativamente al bienestar del país.

En suma, se definieron ocho componentes clave como atributos estratégicos: SG, MOT, IMRS, EST, INTRS, PEReco, PERso y PERma, cada uno compuesto por ítems específicos evaluados por un grupo focal. A partir de esta estructura, se desarrolló un diagrama de contraste siguiendo los lineamientos del modelo de análisis estructural planteado. Los ocho constructos se representan como variables latentes, cada una con tres indicadores clave reflectivos, dando como resultado un total de veinticuatro atributos estratégicos. La Tabla 1 describe los indicadores claves considerados, así como las fuentes de referencia correspondientes.

Tabla 1. Indicadores clave reflectivos

Sistema de gestión previo (SG)		
SG2	Dificultades de implementación	(Asif et al., 2011; Bernardo et al., 2012a;
SG5	Requisitos de sistemas de gestión	Del Mar Alonso-Almeida et al., 2014; Gilbert &
SG6	Sinergias entre sistemas	Rasche, 2008; Koerber, 2009)
Motivaciones sobre la RS (MOT)		
MOTI6	Construcción de sinergias	(Cetindamar & Husoy, 2007;
MOTE1	Cumplimiento leyes y políticas gubernamentales	Gallardo-Vázquez & Isabel Sánchez-Hernández, 2014; Law & Gunasekaran, 2012;
MOTE7	Fomento al desarrollo sostenible	Prajogo et al., 2012; Tien-Shang Lee, 2012; Turyakira et al., 2014)
Implementación de medidas de RS (IMRS)		
IMRS2	Ventajas de un sistema de gestión normalizado	(Asif et al., 2011; Bernardo et al., 2012b; De Castro Sanz, 2005)
IMRS3	Conocimiento de los procesos de auditoría interna y externa	
IMRS5	Sinergias entre los sistemas de gestión	
Estrategia basada en RS (EST)		
EST11	Valor en procesos de negocio	(Asif et al., 2011; Battaglia et al., 2014)
EST15	Objetivos sociales y medioambientales	
EST22	Acciones de mejora y/o preventivas, área de RS	
Integración de RS (INTRS)		
INTRS2	Procedimientos documentados compartidos	(Asif et al., 2010, 2011, 2013; Battaglia et al., 2014; Bernardo et al., 2012b)
INTRS4	Manual de gestión unificado	
INTRS5	Personal compartido	
Performance Económico (PEReco)		

PEReco3	Mejora de la imagen de la empresa	(Gallardo-Vázquez & Isabel Sánchez-Hernández, 2014; Herrera Madueño et al., 2013)
PEReco7	Aumento de la rentabilidad económica	
PEReco11	Obtención de ventajas competitivas	
Performance Social (PERso)		
PERso10	Mejora de la imagen externa de la organización	(Battaglia et al., 2014; Gallardo-Vázquez & Isabel Sánchez-Hernández, 2014; Herrera Madueño et al., 2013; Marín Rives & Bañón Rubio, 2008; Turyakira et al., 2014)
PERso11	Mejora de la imagen interna de la organización	
PERso13	Demostración de liderazgo en la comunidad	
Performance Medioambiental (PERma)		
PERma5	Reducción de impactos ambientales	(Lee et al., 2012; Tien-Shang Lee, 2012; Turyakira et al., 2014)
PERma6	Reducción de sanciones medioambientales	
PERma7	Incremento de la eficiencia energética	

Desde la lógica RBV, SG y MOT funcionan como stocks estratégicos y condiciones de apropiabilidad. IMRS representa la capacidad de implementación que activa y reconfigura activos operativos; INTRS opera como capacidad de orquestación, integrando rutinas en procesos núcleo. EST expresa la estrategia basada en recursos emergente de esa articulación. PEReco, PERso y PERma reflejan cuasi-rentas económicas, relacionales y ecoeficientes derivadas de combinaciones VRIO.

Validación del Modelo y Resultados

La validación del modelo reflectivo se articula en un itinerario metodológico coherente que integra, de forma complementaria, consistencia interna, validez convergente y validez discriminante. La consistencia interna se estimó mediante alfa de Cronbach y fiabilidad compuesta (IFC), ponderando el carácter conservador del primero con la mayor sensibilidad del segundo. La validez convergente se evaluó a través de la varianza media extraída (AVE), con el objetivo de asegurar que cada constructo capturase

una proporción suficiente de la varianza de sus indicadores. La validez discriminante se contrastó con el criterio de Fornell y Larcker, la inspección de cargas cruzadas y la razón heterotrait monotrait (HTMT), con el fin de garantizar que los constructos mantuviesen identidad empírica diferenciada y ausencia de solapamientos indebidos en el nivel de medición.

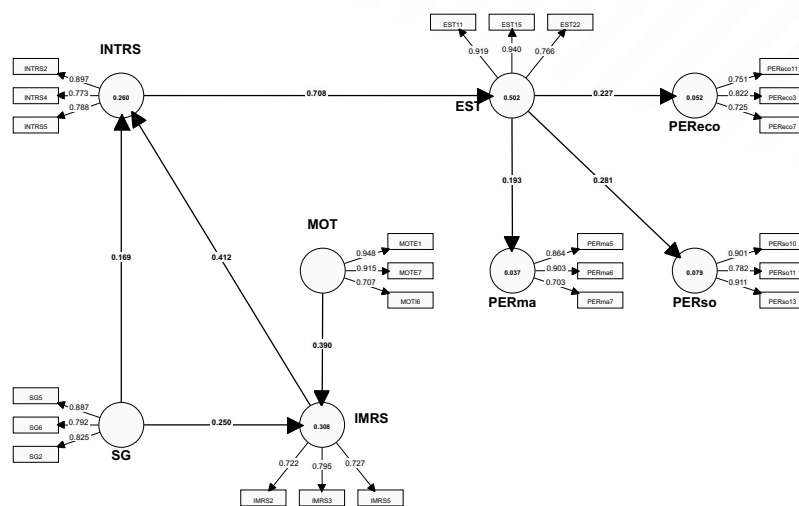


Figura 2. Diagrama de contraste de los atributos estratégicos
Fuente: Elaboración propia

Los resultados del análisis PLS-SEM revelan que todos los indicadores presentan cargas externas superiores a 0.70. Esto garantiza que más del cincuenta por ciento de la varianza de cada uno se explica por su constructo latente correspondiente, lo que respalda la solidez de la arquitectura del modelo de medida propuesto para la gestión de la RS en YPF. De este modo, los resultados aportan evidencia sólida sobre la adecuación del modelo (ver Figura 2).

Considerando que el coeficiente alfa de Cronbach constituye una estimación preliminar de la consistencia interna de los constructos (Castro & Roldán, 2013; F. Hair Jr et al., 2014), su empleo en contextos de modelado de ecuaciones estructurales en PLS-SEM exige una lectura complementaria a partir de la fiabilidad compuesta. Desde esta perspectiva metodológica, los resultados permiten afirmar que los constructos EST, MOT y PERSo exhiben una consistencia interna sólida, evidenciada en coeficientes superiores a 0.80, lo cual no solo confirma su estabilidad métrica, sino que también refuerza su fiabilidad convergente de acuerdo con los estándares establecidos (Bernal Conesa, Briones Peñalver, et al., 2016; Herrera Madueño et al., 2016) (véase Tabla

2). En contraste, los valores observados para los constructos IMRS (0.607) y PEReco (0.655), si bien se sitúan por debajo del umbral convencional de 0.70, resultan admisibles dentro de procesos de validación temprana o de adaptación de escalas, especialmente cuando se privilegia la validez de contenido por sobre la consistencia estadística (Nunnally & Bernstein, 1994). La decisión de conservar dichos constructos se sustenta en criterios técnicos sólidos: todos los indicadores individuales superan cargas externas de 0.70, y sus valores de AVE se mantienen por encima de 0.50, cumpliendo con los requisitos de validez convergente prescritos por la literatura metodológica especializada. Por lo tanto, esta elección permite atenuar el sesgo conservador inherente al coeficiente de alfa, al tiempo que garantiza la integridad conceptual del constructo, conforme a los planteamientos canónicos de Carmines & Zeller (1979) y Fornell & Larcker (1981).

Tabla 2. Consistencia Interna vs. Validez Convergente

Indicador		Carga Factorial	CONSISTENCIA INTERNA		VALIDEZ CONVERGENTE	
			Alfa de Cronbach	Fiabilidad Compuesta	Fiabilidad del Indicador	AVE
EST	EST11	0.919	0.856	0.909	0.909	0.771
	EST15	0.940				
	EST22	0.766				
IMRS	IMRS2	0.722	0.607	0.793	0.793	0.561
	IMRS3	0.795				
	IMRS5	0.727				
INTRS	INTRS2	0.897	0.758	0.861	0.861	0.675
	INTRS4	0.773				
	INTRS5	0.788				
MOT	MOTE1	0.948	0.829	0.896	0.896	0.745
	MOTE7	0.915				
	MOTI6	0.707				
PEReco	PEReco3	0.822	0.655	0.810	0.810	0.588
	PEReco7	0.725				
	PEReco11	0.751				
PERma	PERma5	0.864	0.765	0.866	0.866	0.686
	PERma6	0.903				
	PERma7	0.703				
PERso	PERso10	0.901	0.832	0.900	0.900	0.751
	PERso11	0.782				
	PERso13	0.911				

SG	SG2	0.825	0.784	0.874	0.874	0.698
	SG5	0.887				
	SG6	0.792				

Para completar la evaluación del modelo de medición, se analizó la validez discriminante aplicando el criterio de Fornell-Larcker, la inspección de cargas cruzadas y el índice HTMT. Según el criterio de Fornell-Larcker, un constructo posee validez discriminante cuando la raíz cuadrada de su AVE es superior a sus correlaciones con los demás constructos. En este estudio, todos los constructos cumplen integralmente con este requisito, lo que afirma su identidad empírica distintiva dentro del marco conceptual propuesto (ver Tabla 3).

Tabla 3. Criterio Fornell-Larcker

	EST	IMRS	INTRS	MOT	PEReco	PERma	PERso	SG
EST	0.878							
IMRS	0.298	0.749						
INTRS	0.708	0.486	0.821					
MOT	0.224	0.511	0.442	0.863				
PEReco	0.227	0.549	0.409	0.499	0.767			
PERma	0.193	0.237	0.339	0.380	0.667	0.828		
PERso	0.281	0.734	0.426	0.466	0.599	0.288	0.867	
SG	0.250	0.438	0.350	0.484	0.545	0.487	0.289	0.835

El segundo criterio de validez discriminante se verifica mediante el análisis de las cargas cruzadas de los indicadores. Este método, considerado menos restrictivo que el criterio de Fornell-Larcker (Henseler et al., 2009), establece que las cargas de cada indicador en su constructo deben ser superiores a las cargas cruzadas en otros constructos (Barclay et al., 1995). Los resultados obtenidos mediante PLS-SEM cumplen a cabalidad con esta condición (ver Tabla 4).

Tabla 4. Criterio de cargas cruzadas

Variable	EST	IMRS	INTRS	MOT	PEReco	PERma	PERso	SG
EST11	0.919	0.336	0.745	0.269	0.287	0.273	0.303	0.291
EST15	0.940	0.245	0.651	0.151	0.120	0.113	0.220	0.184
EST22	0.766	0.159	0.381	0.140	0.163	0.067	0.192	0.150

IMRS2	0.226	0.722	0.305	0.436	0.429	0.139	0.443	0.295
IMRS3	0.233	0.795	0.409	0.393	0.456	0.231	0.799	0.310
IMRS5	0.209	0.727	0.375	0.320	0.346	0.158	0.388	0.382
INTRS2	0.701	0.454	0.897	0.418	0.407	0.327	0.443	0.250
INTRS4	0.419	0.431	0.773	0.402	0.385	0.332	0.342	0.521
INTRS5	0.602	0.308	0.788	0.262	0.205	0.171	0.245	0.110
MOTE1	0.249	0.532	0.422	0.948	0.470	0.317	0.442	0.485
MOTE7	0.129	0.463	0.353	0.915	0.410	0.231	0.420	0.402
MOTI6	0.216	0.275	0.391	0.707	0.436	0.548	0.339	0.360
PEReco3	0.197	0.511	0.312	0.415	0.822	0.307	0.570	0.261
PEReco7	0.130	0.516	0.266	0.449	0.725	0.280	0.472	0.573
PEReco11	0.184	0.265	0.355	0.308	0.751	0.903	0.339	0.484
PERma5	0.149	0.170	0.238	0.279	0.504	0.864	0.199	0.401
PERma6	0.184	0.265	0.355	0.308	0.751	0.903	0.339	0.484
PERma7	0.143	0.139	0.234	0.364	0.353	0.703	0.152	0.306
PERso10	0.223	0.734	0.424	0.478	0.497	0.304	0.901	0.297
PERso11	0.225	0.605	0.347	0.416	0.731	0.328	0.782	0.287
PERso13	0.275	0.584	0.344	0.335	0.364	0.141	0.911	0.184
SG2	0.216	0.349	0.223	0.295	0.351	0.270	0.182	0.825
SG5	0.154	0.479	0.275	0.557	0.516	0.356	0.311	0.887
SG6	0.275	0.244	0.384	0.320	0.483	0.608	0.214	0.792

En complemento a los criterios clásicos de Fornell-Larcker y del análisis de cargas cruzadas, se incorporó un tercer procedimiento para evaluar la validez discriminante: la razón HTMT, propuesta por Henseler, Ringle, et al. (2016), reconocida por su mayor sensibilidad estadística frente a los enfoques tradicionales. Esta métrica parte del supuesto de que las correlaciones entre indicadores de un mismo constructo (monotrait-heteromethod) deben superar sistemáticamente a las correlaciones entre indicadores de constructos distintos (heterotrait-heteromethod). Cuando dicha condición se cumple, se considera empíricamente confirmada la validez discriminante entre los constructos del modelo.

Para verificar esta condición, se aplicó la técnica de bootstrapping, utilizando 5000 submuestras aleatorias, con el método de intervalo de confianza del percentil bootstrap y un contraste unicaudal (one-tailed test), en concordancia con lo recomendado por Hair et al. (2011). Esta configuración metodológica resulta adecuada cuando las hipótesis formuladas son direccionales y permite estimar de manera precisa los errores estándar, los estadísticos t de Student y los valores p asociados. El objetivo

fue verificar que las razones HTMT fuesen significativamente inferiores a 1 y que se situasen bajo umbrales aceptados en la literatura.

Los resultados obtenidos, presentados en la Tabla 5, muestran que todos los valores HTMT se sitúan por debajo del umbral crítico de 0.90, ratificando la validez discriminante del modelo de medida. En particular, se observa que la razón HTMT entre los constructos PEReco y PERma alcanza un valor de 0.889. Si bien este valor supera el umbral conservador de 0.85, permanece dentro del rango aceptable de 0.90 propuesto para contextos exploratorios o constructos teóricamente relacionados (Henseler, Hubona, et al., 2016). Esta proximidad es conceptualmente coherente, dado que ambas dimensiones conforman pilares interdependientes de la sostenibilidad corporativa, lo cual explica la intensidad de su correlación sin comprometer la validez discriminante general del modelo.

Tabla 5. Matriz de ratio HTMT

Variable	EST	IMRS	INTRS	MOT	PEReco	PERma	PERso	SG
EST								
IMRS	0.389							
INTRS	0.823	0.712						
MOT	0.257	0.693	0.567					
PEReco	0.281	0.886	0.569	0.699				
PERma	0.211	0.338	0.446	0.541	0.889			
PERso	0.318	0.031	0.532	0.568	0.831	0.363		
SG	0.296	0.621	0.468	0.578	0.785	0.628	0.356	

Con la fiabilidad y validez del modelo de medida establecidas, se procedió a la evaluación del modelo estructural. La bondad de ajuste se analizó a través del estadístico t-Student, los coeficientes de trayectoria (Path Coefficients β), el valor R de los constructos dependientes, la prueba Stone-Geisser (Q) para validar la capacidad predictiva del modelo (Roldán & Sánchez-Franco, 2012), y el f de Cohen, para evaluar el impacto de constructos exógenos omitidos sobre constructos endógenos (F. Hair Jr et al., 2014). En primera instancia, se considerarán aceptables aquellos coeficientes de trayectoria (β) que resulten significativos según la distribución t-Student de una cola con (n-1) grados de libertad (Roldán & Sánchez-Franco, 2012).

De acuerdo con Hair et al. (2011), el procedimiento de bootstrapping permitió estimar los estadísticos t-Student y sus

desviaciones estándar, con los que se evaluó la significancia de los coeficientes de trayectoria, en línea con el enfoque de Castro & Roldán (2013), tal como se reporta en la Tabla 6. En el conjunto del modelo, las estimaciones β resultan estadísticamente significativas y orientadas en la dirección prevista por las hipótesis. En particular, las trayectorias EST \rightarrow PER_{ma} y SG \rightarrow INTRS presentan $t = 1.830$ y $t = 1.733$, respectivamente; aunque estos valores se sitúan por debajo del umbral heurístico de 2 asociado a pruebas bilaterales, ambas relaciones son significativas bajo contraste unicaudal con $\alpha = 0.05$, al superar el punto crítico de 1.645 y exhibir valores p de 0.034 y 0.042. La magnitud de los efectos estandarizados, $\beta = 0.193$ y $\beta = 0.169$, corresponde a impactos positivos de tamaño pequeño, conceptualmente plausibles y coherentes con el patrón global de estimaciones del modelo. Esta interpretación se robustece con intervalos de confianza bootstrap que no incluyen el cero y con la ausencia de colinealidad relevante, lo que refuerza la validez inferencial de dichas asociaciones en el marco de hipótesis direccionales preespecificadas.

Tabla 6. Estadísticos y contraste de hipótesis

Relación	Path Coeff.	Media	STDEV	t-Student	p-Value
EST \rightarrow PER _{eco}	0.227**	0.263	0.088	2.571	0.005**
EST \rightarrow PER _{ma}	0.193**	0.219	0.106	1.830	0.034*
EST \rightarrow PER _{so}	0.281**	0.294	0.091	3.085	0.001***
IMRS \rightarrow INTRS	0.412***	0.421	0.080	5.155	0.000***
INTRS \rightarrow EST	0.708***	0.715	0.042	16.669	0.000***
MOT \rightarrow IMRS	0.390***	0.397	0.085	4.571	0.000***
SG \rightarrow IMRS	0.250**	0.261	0.084	2.968	0.002***
SG \rightarrow INTRS	0.169**	0.162	0.098	1.733	0.042*

Nota: $t(0.05,4999) = 1.645$; $t(0.01,4999) = 2.327$; $t(0.001,4999) = 3.092$
 * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$

En segunda instancia, se analiza la varianza explicada para evaluar la bondad del modelo planteado, determinada a partir de la solidez de cada relación estructural mediante el valor de R² de los constructos dependientes. Según Falk & Miller (1992), estos

valores deben ser superiores a 0.1, lo que garantiza una capacidad predictiva suficiente, dado que R² representa la proporción de varianza de un constructo explicada por el modelo (Serrano-Cinca et al., 2007). Conforme a Chin (1998) y Falk & Miller (1992), un valor de R superior a 0.19 indica una capacidad explicativa débil, superior a 0.33 es moderada, y superior a 0.67 se considera sustancial. En el modelo propuesto, los valores de R para las variables endógenas directas INTRS, IMRS y ESR son 0.260, 0.308 y 0.502, respectivamente, lo que evidencia una capacidad predictiva débil a moderada. Estos resultados también sugieren un margen razonable para optimizar la especificación mediante la incorporación de variables explicativas adicionales o efectos de orden superior, siempre que la teoría lo justifique (ver Tabla 7).

Tabla 7. Medidas Predictivas

Variable	AVE	R ²	Q ²	f ²
EST	0.771	0.502	0.068	-
IMRS	0.561	0.308	0.254	-
INTRS	0.675	0.260	0.168	-
MOT	0.745	-	-	0.168
PEReco	0.588	0.052	0.066	-
PERma	0.686	0.037	0.046	-
PERso	0.751	0.079	0.053	-
SG	0.698	-	-	0.069

El test de Stone-Geisser (Q²) mide la relevancia predictiva de los constructos dependientes utilizando la técnica de "Blindfolding". Un valor de Q² mayor que 0 indica relevancia predictiva (F. Hair Jr et al., 2014). En nuestro análisis, todos los valores de Q² son positivos, lo que confirma que el modelo tiene relevancia predictiva. Asimismo, el valor de f² evalúa el tamaño del efecto de un constructo omitido en uno endógeno, donde f² de 0.02, 0.15 y 0.35 indica efectos pequeños, medianos y grandes, respectivamente. El constructo MOT, con un f² de 0.168, muestra un efecto significativo, mientras que SG con un valor de 0.069 tiene un efecto menor, sugiriendo una menor contribución de esta variable.

En conjunto, los valores de AVE adecuados garantizan convergencia a nivel de medición, mientras que R² y Q² reflejan una capacidad predictiva heterogénea entre dimensiones. PEReco, PERma y PERso presentan niveles modestos de predicción, lo que sugiere la conveniencia de explorar variables mediadoras o moderadoras adicionales que capten matices de los resultados

económicos, ambientales y sociales. Los efectos totales y específicos reportados en la Tabla 8, exhiben valores p significativos, lo que consolida la validez empírica del entramado relacional e identifica las rutas de mayor impacto marginal.

Tabla 8. Efectos Totales

Relación	Muestra	Media	STDEV	t-Student	p-Value
EST→ PEReco	0.227	0.263	0.088	2.571	0.005**
EST → PERma	0.193	0.219	0.106	1.830	0.034*
EST → PERso	0.281	0.294	0.091	3.085	0.001***
IMRS → EST	0.292	0.301	0.060	4.863	0.000***
IMRS → INTRS	0.412	0.421	0.080	5.155	0.000***
IMRS → PEReco	0.066	0.080	0.032	2.046	0.020*
IMRS → PERma	0.056	0.065	0.034	1.652	0.049*
IMRS → PERso	0.082	0.091	0.038	2.157	0.016*
INTRS → EST	0.708	0.715	0.042	16.669	0.000***
INTRS → PEReco	0.161	0.189	0.066	2.434	0.007**
INTRS → PERma	0.137	0.157	0.077	1.770	0.038*
INTRS → PERso	0.199	0.211	0.068	2.930	0.002**
MOT → EST	0.114	0.120	0.036	3.120	0.001***
MOT → IMRS	0.390	0.397	0.085	4.571	0.000***
MOT→ INTRS	0.161	0.168	0.051	3.166	0.001***
MOT→ PEReco	0.026	0.031	0.014	1.834	0.033*
MOT→ PERma	0.022	0.026	0.015	1.468	0.071ps

MOT→ PER _{so}	0.032	0.036	0.017	1.895	0.029*
SG → EST	0.193	0.195	0.068	2.847	0.002*
SG → IMRS	0.250	0.261	0.084	2.968	0.002*
SG → INTRS	0.272	0.272	0.092	2.951	0.002*
SG → PER _{eco}	0.044	0.053	0.028	1.581	0.057ps
SG → PER _{ma}	0.037	0.045	0.028	1.326	0.092ps
SG → PER _{so}	0.054	0.059	0.029	1.842	0.033*

Nota: $t(0.05,4999) = 1.645$; $t(0.01,4999) = 2.327$; $t(0.001,4999) = 3.092$

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$; ps (poco significativo)

El análisis revela que la implementación de medidas de RS actúa como mediador clave entre los sistemas de gestión previos (SG) y la integración de la RS (IMRS). Para evaluar este efecto mediador, se abordaron tres preguntas fundamentales en línea a F. Hair Jr et al. (2014). En primer lugar, el efecto directo entre SG e INTRS es significativo (0.251, $p < 0.001$) cuando se excluye la variable mediadora. Posteriormente, al incluir la implementación de RS en el análisis, el efecto indirecto resultó significativo (0.242, $p < 0.01$), sugiriendo que una parte sustancial del efecto total se explica por la mediación de la RS. El análisis de la varianza explicada (VAF) determinó que el 37.8% del efecto total es mediado, confirmando el papel esencial de la implementación de RS en esta relación.

La transición de un análisis estructural a un enfoque prospectivo implica un avance significativo en la identificación de tendencias y la formulación de estrategias proactivas. Este cambio resulta fundamental para anticipar dinámicas futuras y diseñar estrategias preventivas efectivas. Por tanto, el uso de PLS-SEM permite dilucidar las relaciones causales y las interacciones entre variables con precisión, lo que establece una base robusta para desarrollar escenarios futuros y promover un enfoque estratégico e innovador.

De ahí que este enfoque prospectivo no solo fortalece la interpretación de los datos actuales, sino que también permite la aplicación del conocimiento adquirido para anticipar escenarios futuros y formular estrategias adaptativas. De este modo, el análisis estructural se convierte en el fundamento para explorar cómo las tendencias emergentes podrían evolucionar en diferentes contextos, permitiendo la creación de un marco conceptual y operativo innovador que promueva la participación activa de

actores clave, constituyendo así el núcleo estratégico de esta investigación.

El ajuste global del modelo, medido mediante el índice de “Goodness of Fit” (GoF), arrojó un valor de 0.375, lo cual indica una calidad aceptable del modelo pese a ciertas limitaciones. Los resultados confirman que los sistemas de gestión previos influyen positivamente en la implementación y la integración de RS, contribuyendo a una estrategia de gestión orientada a mejorar el rendimiento económico, el éxito competitivo y la sostenibilidad ambiental. A pesar de algunas discrepancias con estudios anteriores, este trabajo contribuye al conocimiento empírico de la integración de RS en organizaciones estratégicas como YPFB, destacando su relevancia como herramienta fundamental para la toma de decisiones empresariales.

En síntesis, las hipótesis se confirman en gran medida con los resultados obtenidos, destacando la relevancia de la RS y de los criterios ESG como factores clave para mejorar el rendimiento económico, la reputación corporativa y la sostenibilidad a largo plazo de YPFB. En consecuencia los resultados obtenidos respaldan la necesidad de adoptar una estrategia integral de RS, que incluya un enfoque sólido en la gobernanza y la sostenibilidad, para asegurar un crecimiento equilibrado y competitivo.

Discusión

Los resultados obtenidos mediante el análisis PLS-SEM evidencian que la integración de prácticas de RS ejerce un impacto positivo y significativo sobre el desempeño económico, social y ambiental de YPFB. La relación observada entre los sistemas de gestión preexistentes y la implementación de la RS subraya la relevancia de contar con una estructura de gobernanza sólida que facilite la incorporación efectiva de dichas prácticas. Los valores de R y los coeficientes de trayectoria confirman que la RS contribuye directamente al fortalecimiento del desempeño empresarial, mejorando la percepción de los grupos de interés y fomentando la generación de valor compartido. Estos resultados consolidan la premisa de que la RS debe asumirse como un componente estratégico esencial para las empresas que buscan competitividad y sostenibilidad en un entorno global cada vez más exigente.

Desde la lógica RBV, las relaciones estructurales $SG \rightarrow IMRS$, $IMRS \rightarrow INTRS$ e $INTRS \rightarrow EST$ configuran un proceso secuencial donde los stocks estratégicos se transforman en capacidades dinámicas de orquestación. La asociación positiva entre EST y los desempeños PEReco, PERso y PERma evidencian que la RS, cuando es estratégicamente orquestada, genera rendimientos diferenciales protegidos por condiciones de ambigüedad causal

y complejidad social, lo cual eleva los costos de imitación y fortalece la sostenibilidad competitiva.

No obstante, la capacidad predictiva adecuada reflejada en los valores de Q y el análisis de la varianza explicada por el efecto mediador del constructo MOT revelan que el compromiso organizacional con la RS depende tanto de la estructura de gobernanza como de la articulación de incentivos internos y externos. Los hallazgos sugieren que el desarrollo de una cultura corporativa auténtica orientada a la sostenibilidad constituye un factor determinante para transformar la RS en resultados tangibles. Asimismo, los resultados confirman que la integración estratégica de la RS potencia la competitividad y la sostenibilidad ambiental, aunque se identifican discrepancias con estudios previos que apuntan a la influencia de factores contextuales no contemplados en este modelo. Estas diferencias abren una línea de investigación futura orientada a examinar con mayor profundidad los posibles condicionantes estructurales, como el marco regulatorio o las particularidades del sector de hidrocarburos en Bolivia.

En este contexto, los hallazgos cuantitativos proporcionaron la base empírica para desarrollar talleres prospectivos y grupos focales orientados a validar y enriquecer la interpretación de los resultados. Esta fase facilitó una lectura sistémica de los factores críticos que afectan la sostenibilidad corporativa y permitió construir de forma participativa escenarios de política pública. A partir de este proceso, emergen estrategias dirigidas a fortalecer la gobernanza institucional y consolidar la sostenibilidad empresarial dentro de una transición energética responsable, asegurando la coherencia entre las recomendaciones y los objetivos estratégicos y sociales de YPFB. En entornos estatales, la apropiabilidad de valor se ve mediada por mandatos múltiples y marcos de transparencia, lo que establece condiciones de frontera para la RBV. La ventaja competitiva emerge cuando la RS se incorpora como rutina núcleo mediante decisiones institucionalizadas, métricas internas y aprendizaje colaborativo, reduciendo la sustituibilidad de los activos y generando un diferencial competitivo basado en su integración operativa en estructuras públicas con alto compromiso institucional.

Conclusiones

El presente estudio, demuestra que la RS trasciende el voluntarismo filantrópico y se erige como un sistema estructural de gestión y gobernanza capaz de sustentar la competitividad institucional de una empresa estatal estratégica. Los resultados del modelo PLS-SEM evidencian asociaciones estadísticamente significativas entre las dimensiones de la RS y los desempeños

económico, social y ambiental de YPFB, revelando que su implementación media la relación entre los sistemas de gestión previos y la integración estratégica. Estos hallazgos sugieren que la RS opera como mecanismo articulador de eficiencia, legitimidad y sostenibilidad, componentes esenciales de la ventaja competitiva en el sector energético boliviano (Aguinis & Glavas, 2012; F. Hair Jr et al., 2014).

En el plano teórico, la investigación aporta evidencia que refuerza la noción de la RS como un activo intangible dinámico, cuyo valor radica en su capacidad para integrar estructuras de gobernanza, procesos operativos y cultura organizacional. De acuerdo con la postura canónica de Porter & Kramer (2006) y trabajos recientes de D'Souza et al. (2024), Gionfriddo & Piccaluga (2025) y Menghwar & Daood (2021), la creación de valor compartido exige una alineación estratégica entre rentabilidad, innovación social y desempeño ambiental; los resultados de este estudio confirman parcialmente este postulado al mostrar que la RS, cuando se internaliza en la estructura decisional, potencia el desempeño organizacional sin requerir concesiones entre eficiencia y sostenibilidad. Sin embargo, el carácter correlacional del diseño impide afirmar una causalidad directa entre RS y desempeño, por lo que los hallazgos deben interpretarse como correlaciones estructurales plausibles y no como efectos confirmados.

Desde la perspectiva práctica, los resultados demuestran que YPFB posee los fundamentos necesarios para transformar la RS en una fuente sostenida de ventaja competitiva, siempre que logre institucionalizarla dentro de su arquitectura de gestión y de sus mecanismos de control estratégico. La evidencia muestra que las empresas con gobernanza sólida y sistemas integrados de gestión tienden a implementar prácticas de RS consistentes, lo que se traduce en mejoras reputacionales, eficiencia operativa y mayor aceptación social (Battaglia et al., 2014; Garcia-Sanchez, 2020). Aun así, persisten brechas internas, particularmente en la cultura organizacional y en la alineación de incentivos, que obstaculizan la consolidación de un compromiso sostenible genuino.

El estudio permite concluir que la RS, al integrarse a los procesos estratégicos y no limitarse a la comunicación o cumplimiento normativo, funciona como un dispositivo de gobernanza híbrido que equilibra objetivos económicos con imperativos sociales y ambientales. En consecuencia, la ventaja competitiva de YPFB no debería entenderse como resultado de la rentabilidad inmediata, sino como producto de su capacidad institucional para sostener legitimidad social, eficiencia y resiliencia ambiental a largo plazo. En términos RBV, evidenciamos que la integración de la RS como capacidad institucional relacional, socialmente

compleja y dependiente de trayectoria, opera como mecanismo de aislamiento que habilita la apropiación de beneficios diferenciales apropiables y sostiene la ventaja bajo escrutinio público y mandatos múltiples en empresas estatales.

No obstante, estas conclusiones deben asumirse dentro de los límites del diseño empleado. Se reconocen tres restricciones principales: (a) la naturaleza correlacional-descriptiva del estudio, que impide inferir causalidad; (b) el tamaño y tipo de muestra (N = 100, no probabilística), que restringe la generalización; y (c) la singularidad institucional de YPF, cuyo carácter estatal introduce particularidades no extrapolables a corporaciones privadas o multinacionales (Falk & Miller, 1992; Hoyle, 1995). Tales limitaciones, lejos de debilitar los resultados, orientan el desarrollo de futuras investigaciones empíricas.

A partir de esta base, se delinearán tres prioridades para la agenda investigativa:

- Estudios longitudinales que evalúen la direccionalidad temporal entre la institucionalización de la RS, la legitimidad organizacional y el desempeño competitivo, permitiendo captar dinámicas de madurez organizacional.
- Análisis comparativos interregionales con otras empresas estatales del sector energético en América Latina, orientados a identificar mejores prácticas, desafíos comunes y patrones regulatorios que condicionan la efectividad de la RS (Turyakira et al., 2014).
- Modelos RS/ESG ampliados, que incorporen variables moderadoras como políticas públicas, fluctuaciones del mercado internacional, transición hacia energías renovables, digitalización y expectativas sociales emergentes (Asif et al., 2010; Bernal Conesa, De Nieves Nieto, et al., 2016; Felipe et al., 2017; Zheng et al., 2024). La inclusión de estas variables permitirá diseñar estrategias adaptativas y resilientes, mejorando la capacidad de YPF para responder a entornos reguladores en constante transformación.

En síntesis, la adopción de la RS se consolida como un componente esencial del éxito a largo plazo de YPF. No solo fortalece su rentabilidad y reputación, sino que la posiciona como referente regional en sostenibilidad y gobernanza pública del sector hidrocarburos, en coherencia con los ODS y con las crecientes demandas globales de responsabilidad corporativa. El desafío pendiente consiste en traducir la voluntad institucional en estructura organizacional, garantizando que la RS deje de ser un discurso y se convierta en un principio operativo capaz de generar beneficios tangibles y sostenibles para todos los grupos de interés.

Declaraciones

De ética

Este manuscrito empleó herramientas de inteligencia artificial (IA) únicamente para mejorar la expresión y la coherencia textual; todas las decisiones analíticas y teóricas son responsabilidad exclusiva del autor. El uso de IA cumplió con los principios éticos del Comité de Ética de Publicaciones (COPE), bajo supervisión humana y con total preservación de la integridad académica.

De Financiación, Conflicto de Intereses y Disponibilidad de Materiales

Este estudio se realizó sin el apoyo de financiación específica de agencias de los sectores público, comercial o sin fines de lucro. El autor manifiesta la ausencia de conflictos de interés conocidos en relación con el contenido de esta investigación. Con el fin de garantizar la transparencia del estudio, el diseño del cuestionario utilizado en este estudio está disponible a través del siguiente enlace: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.27215499.v3>

Referencias

- Aguinis, H., & Glavas, A. (2012). What We Know and Don't Know About Corporate Social Responsibility: A Review and Research Agenda. *Journal of Management*, 38(4), 932-968. <https://doi.org/10.1177/0149206311436079>
- Asif, M., Fisscher, O. A. M., de Bruijn, E. J., & Pagell, M. (2010). Integration of management systems: A methodology for operational excellence and strategic flexibility. *Operations Management Research*, 3(3-4), 146-160. <https://doi.org/10.1007/s12063-010-0037-z>
- Asif, M., Searcy, C., Zutshi, A., & Ahmad, N. (2011). An integrated management systems approach to corporate sustainability. *European Business Review*, 23(4), 353-367. <https://doi.org/10.1108/09555341111145744>
- Asif, M., Searcy, C., Zutshi, A., & Fisscher, O. A. M. (2013). An integrated management systems approach to corporate social responsibility. *Journal of Cleaner Production*, 56, 7-17. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.10.034>
- Barba-Sánchez, V., & Atienza-Sahuquillo, C. (2016). Environmental Proactivity and Environmental and Economic Performance: Evidence from the Winery Sector. *Sustainability*, 8(10), 1014-1019. <https://doi.org/10.3390/su8101014>
- Barclay, D., Higgins, C., & Thompson, R. (1995). *The partial least squares (PLS) approach modelling: Personal computer adoption and use as illustration*. In Urs E. Gattiker (Ed.), *Technology Studies. Special issue, Research Methodology* (Vol. 2, Issue 2, pp. 285-309).
- Battaglia, M., Testa, F., Bianchi, L., Iraldo, F., & Frey, M. (2014). Corporate social responsibility and competitiveness within SMEs of the fashion industry: Evidence from Italy and France. *Sustainability (Switzerland)*, 6(2), 872-893. <https://doi.org/10.3390/su6020872>
- Bernal Conesa, J. A. (2016). Responsabilidad social corporativa: análisis de los modelos normalizados y creación de un nuevo modelo integrado de organización empresarial en empresas de ámbito tecnológico [Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cartagena]. In Universidad Politécnica de Cartagena. <https://doi.org/10.31428/10317/5799>
- Bernal Conesa, J. A., Briones Peñalver, A. J., & De Nieves Nieto, C. (2016). RSC y empresas tecnológicas: Un estudio sobre las motivaciones de implantación e integración en empresas españolas. *Tourism & Management Studies*, 12(2), 154-164. <https://doi.org/10.18089/tms.2016.12217>

- Bernal Conesa, J. A., De Nieves Nieto, C., & Briones Peñalver, A. J. (2016). Aplicación de un modelo de ecuaciones estructurales para analizar los sistemas de gestión en la integración de la RSC y su influencia en la estrategia y el performance de las empresas tecnológicas. *Revista de Métodos Cuantitativos Para La Economía y La Empresa*, 21(21), 77-102. <https://doi.org/10.46661/revmetodoscuanteconempresa.2254>
- Bernardo, M., Casadesus, M., Karapetrovic, S., & Heras, I. (2012a). Do integration difficulties influence management system integration levels? *Journal of Cleaner Production*, 21(1), 23-33. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.09.008>
- Bernardo, M., Casadesus, M., Karapetrovic, S., & Heras, I. (2012b). Integration of standardized management systems: Does the implementation order matter? *International Journal of Operations and Production Management*, 32(3), 291-307. <https://doi.org/10.1108/01443571211212583>
- Bowen, H. (1953). *Social responsibilities of the businessman*; In Harper (1st ed.). Harper.
- Carmines, E., & Zeller, R. (1979). *Reliability and Validity Assessment* (Quantitative Applications in the Social Sciences). In Sage University Paper (1st ed.).
- Carroll, A. (1979). A Three-Dimensional Conceptual Model of Corporate Performance. *The Academy of Management Review*, 4, 497-505. <https://n9.cl/76t36>
- Castro, I., & Roldán, J. L. (2013). A mediation model between dimensions of social capital. *International Business Review*, 22(6), 1034-1050. <https://doi.org/10.1016/j.ibusrev.2013.02.004>
- Cetindamar, D., & Husoy, K. (2007). Corporate social responsibility practices and environmentally responsible behavior: The case of the United Nations global compact. *Journal of Business Ethics*, 76(2), 163-176. <https://doi.org/10.1007/s10551-006-9265-4>
- Chávez Plasencia, R. A., Miraval Márquez, J. S., & Rivera Muñoz, J. L. (2025). Responsabilidad social corporativa en Perú 2023-2025: Ética y acción colectiva. *Impulso, Revista de Administración*, 5(11), 347-360. <https://doi.org/10.59659/impulso.v5i11.148>
- Chin, W. (1998). The partial least square approach to structural equation modelling. In G. Marcoulides (Ed.), *Modern Methods for Business* (pp. 295-369). Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- Davis, K. (1960). Can Business Afford to Ignore Social Responsibilities? *California Management Review*, 2(3), 70-76. <https://doi.org/10.2307/41166246>
- Davis, K. (1973). The Case for and Against Business Assumption of Social Responsibilities. *Academy of Management Journal*, 16(2), 312-322. <https://doi.org/10.2307/255331>

- Davis, K., & Blomstrom, R. (1966). *Business and Its Environment*. In McGrawHill. McGrawHill.
- De Castro Sanz, M. (2005). La Responsabilidad Social de las Empresas , o un nuevo concepto de empresa Marcos de Castro Sanz. *CIRIEC-España, Revista de Economía Pública, Social y Cooperativa*, 53, 29-51. <http://www.redalyc.org/pdf/174/17405304.pdf>
- Del Mar Alonso-Almeida, M., Llach, J., & Marimon, F. (2014). A closer look at the “Global Reporting Initiative” sustainability reporting as a tool to implement environmental and social policies: A worldwide sector analysis. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 21(6), 318-335. <https://doi.org/10.1002/csr.1318>
- D’Souza, C., Sullivan-Mort, G., Nguyen, Q., Nanere, M., & Alex Maritz. (2024). CSR investments and innovation - Aligning and creating shared value. *Journal of Cleaner Production*, 481, 144189. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144189>
- Eells, R., & Walton, C. (1974). Conceptual foundations of business. In Irwin.
- F. Hair Jr, J., Sarstedt, M., Hopkins, L., & G. Kuppelwieser, V. (2014). Partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM). *European Business Review*, 26(2), 106-121. <https://doi.org/10.1108/EBR-10-2013-0128>
- Falk, R. F., & Miller, N. B. (1992). *A Primer for Soft Modeling*. In The University of Akron Press.
- Felipe, C., Roldán, J., & Leal-Rodríguez, A. (2017). Impact of Organizational Culture Values on Organizational Agility. *Sustainability*, 9(12), 2354. <https://doi.org/10.3390/su9122354>
- Fornell, C., & Larcker, D. F. (1981). Evaluating Structural Equation Models with Unobservable Variables and Measurement. *Journal of Marketing Research*, 18(1), 39. <https://doi.org/10.2307/3151312>
- Frederick, W. C. (1960). The Growing Concern over Business Responsibility. *California Management Review*, 2(4), 54-61. <https://doi.org/10.2307/41165405>
- Freeman, R. E. (1984). *Strategic Management: A Stakeholder Approach*. In Pitman Series in Business and Public Policy (1st ed.).
- Freeman, R. E. (1994). The Politics of Stakeholder Theory: Some Future Directions. *Business Ethics Quarterly*, 4(4), 409-421. <https://doi.org/10.2307/3857340>
- Gaio, A. P. C., de Lima, A. P. M., Meiriño, M. J., Pérez, D. V., Meza, L. A., & Binsztok, J. (2025). Models, Guidelines and Frameworks for Sustainable Management: A Bibliometric Analysis From the Perspective of Interdisciplinarity. *Business Strategy and the Environment*, 34(6), 6735-6753. <https://doi.org/10.1002/bse.4317>

- Gallardo-Vázquez, D., & Isabel Sánchez-Hernández, M. (2014). Structural analysis of the strategic orientation to environmental protection in SMEs. *BRQ Business Research Quarterly*, 17(2), 115-128. <https://doi.org/10.1016/j.brq.2013.12.001>
- García-Sánchez, I. (2020). Corporate Social Reporting and Assurance: The State of the Art. *SSRN Electronic Journal*, 29, 1-27. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3588470>
- Gilbert, D. U., & Rasche, A. (2008). Opportunities and problems of standardized ethics initiatives - A stakeholder theory perspective. *Journal of Business Ethics*, 82(3), 755-773. <https://doi.org/10.1007/s10551-007-9591-1>
- Gionfriddo, G., & Piccaluga, A. M. C. (2025). Creating shared value through open innovation: Insights from the case of Enel industrial plants. *Business Ethics, the Environment & Responsibility*, 34(1), 137-154. <https://doi.org/10.1111/beer.12611>
- Gutiérrez-Ayala, J. (2022). Responsabilidad social empresarial: un análisis desde la sostenibilidad. *Inquietud Empresarial*, 22(2), I-IV. <https://doi.org/10.19053/01211048.15340>
- Hair, J. F., Hult, G. T., Ringle, C. M., Sarstedt, M., Castillo Apraiz, J., Cepeda Carrión, G., & Luis, R. J. (2017). Manual de Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM). In *OmniaScience Scholar* (Ed.), SAGE.
- Hair, J. F., Ringle, C. M., & Sarstedt, M. (2011). PLS-SEM: Indeed a Silver Bullet. *Journal of Marketing Theory and Practice*, 19(2), 139-152. <https://doi.org/10.2753/MTP1069-6679190202>
- Hair, J. F., Risher, J. J., Sarstedt, M., & Ringle, C. M. (2019). When to use and how to report the results of PLS-SEM. *European Business Review*, 31(1), 2-24. <https://doi.org/10.1108/EBR-11-2018-0203>
- Hair, J. F., Sarstedt, M., Ringle, C. M., Sharma, P. N., & Liengard, B. D. (2024). Going beyond the untold facts in PLS-SEM and moving forward. *European Journal of Marketing*, 58(13), 81-106. <https://doi.org/10.1108/EJM-08-2023-0645>
- Henseler, J., Hubona, G., & Ray, P. A. (2016). Using PLS path modeling in new technology research: updated guidelines. *Industrial Management & Data Systems*, 116(1), 2-20. <https://doi.org/10.1108/IMDS-09-2015-0382>
- Henseler, J., Ringle, C. M., & Sarstedt, M. (2016). Testing measurement invariance of composites using partial least squares. *International Marketing Review*, 33(3), 405-431. <https://doi.org/10.1108/IMR-09-2014-0304>
- Henseler, J., Ringle, C. M., & Sinkovics, R. R. (2009). The use of partial least squares path modeling in international marketing. *Advances in International Marketing*, 20(2009), 277-319. [https://doi.org/10.1108/S1474-7979\(2009\)0000020014](https://doi.org/10.1108/S1474-7979(2009)0000020014)

- Hernández-Perlines, F., Moreno-García, J., & Yañez-Araque, B. (2016). The mediating role of competitive strategy in international entrepreneurial orientation. *Journal of Business Research*, 69(11), 5383–5389. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2016.04.142>
- Herrera Madueño, J., Larrán Jorge, M., Martínez Conesa, I., & Martínez-Martínez, D. (2016). Relationship between corporate social responsibility and competitive performance in Spanish SMEs: Empirical evidence from a stakeholders' perspective. *BRQ Business Research Quarterly*, 19(1), 55–72. <https://doi.org/10.1016/j.brq.2015.06.002>
- Herrera Madueño, J., Larrán Jorge, M., & Martínez-Martínez, D. (2013). Relationship between social responsibility and performance in small and medium enterprises: Literature review. *Cuadernos de Gestión*, 13(2), 39–65. <https://doi.org/10.5295/cdg.120360jh>
- Hoyle, R. H. (1995). *The Structural Equation Modeling Approach: Basic Concepts and Fundamental Issues*. In Ed. Hoyle, R.H (Ed.), Sage Publications. SAGE Publications.
- Koerber, C. P. (2009). Corporate responsibility standards: Current implications and future possibilities for peace through commerce. *Journal of Business Ethics*, 89(SUPPL. 4), 461–480. <https://doi.org/10.1007/s10551-010-0397-1>
- Kusmendar, Asih, A. M. S., & Normasari, N. M. E. (2025). Exploring sustainable pathways: A systematic literature review of three pillars of sustainability applications. *Sustainable Futures*, 10, 100970. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.100970>
- Law, K. M. Y., & Gunasekaran, A. (2012). Sustainability development in high-tech manufacturing firms in Hong Kong: Motivators and readiness. *International Journal of Production Economics*, 137(1), 116–125. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.01.022>
- Lee, S. M., Kim, S. T., & Choi, D. (2012). Green supply chain management and organizational performance. *Industrial Management & Data Systems*, 112(8), 1148–1180. <https://doi.org/10.1108/02635571211264609>
- Manne, H. G., & Wallich, H. C. (1972). The modern corporation and social responsibility. In Rational Debate Series. American Enterprise Institute for Public Policy Research. <https://n9.cl/lh22z>
- Marín Rives, L., & Bañón Rubio, A. (2008). Moda o factor competitivo? Un estudio empírico de responsabilidad social corporativa en Pyme. *Tribuna de Economía ICE*, 842(May), 177–193. <https://n9.cl/l48x1>
- Martin, I. (2005). Los intangibles en el proceso de dirección estratégica. In *La comunicación de la responsabilidad social corporativa* (pp. 75–104). Universidad Pontificia Comillas. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=8686>

- Méndez-Picazo, M. T. (2005). Ética y responsabilidad social corporativa. *Ética y Economía*, 8(23), 141-150. <https://n9.cl/g81vd>
- Menghwar, P. S., & Daood, A. (2021). Creating shared value: A systematic review, synthesis and integrative perspective. *International Journal of Management Reviews*, 23(4), 466-485. <https://doi.org/10.1111/ijmr.12252>
- Nunnally, J. C., & Bernstein, I. H. (1994). *Psychometric Theory*. In McGraw-Hill.
- Perez, M. (2015). *Gestión de Reputación Corporativa en empresas mexicanas: realidades, perspectivas y oportunidades*. In Llorente & Cuenca (Ed.), Llorente & Cuenca. Tecnológico de Monterrey. <https://n9.cl/00nt56>
- Porter, M., & Kramer, M. (2006). *Strategy and Society: The Link Between Competitive Advantage and Corporate Social Responsibility*. Harvard Business Review. <https://n9.cl/432nl>
- Prajogo, D., Tang, A. K. Y., & Lai, K. H. (2012). Do firms get what they want from ISO 14001 adoption?: An Australian perspective. *Journal of Cleaner Production*, 33, 117-126. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.04.019>
- Reinartz, W., Haenlein, M., & Henseler, J. (2009). An empirical comparison of the efficacy of covariance-based and variance-based SEM. *International Journal of Research in Marketing*, 26(4), 332-344. <https://doi.org/10.1016/j.ijresmar.2009.08.001>
- Rendueles Mata, M. (2010). Mercadeo social, responsabilidad social y balance social: conceptos a desarrollar por instituciones universitarias. *Telos (Maracaibo)*, 12(1), 29-42. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3351005>
- Ringo, M. K., & McGuire, J. W. (1964). Business and Society. *Technology and Culture*, 5(3), 478-480. <https://doi.org/10.2307/3101288>
- Roldán, J. L., & Sánchez-Franco, M. J. (2012). Variance-Based Structural Equation Modeling. In & M. R. (Eds.) M. Mora, O. Gelman, A. Steenkamp (Ed.), *Research Methodologies, Innovations and Philosophies in Software Systems Engineering and Information Systems* (pp. 193-221). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-0179-6.ch010>
- Serrano-Cinca, C., Fuertes-Callén, Y., & Gutiérrez-Nieto, B. (2007). Online reporting by banks: A structural modelling approach. *Online Information Review*, 31(3), 310-332. <https://doi.org/10.1108/14684520710764096>
- Sethi, S. P. (1975). Dimensions of Corporate Social Performance: An Analytical Framework. *California Management Review*, 17(3), 58-64. <https://doi.org/10.2307/41162149>

- Sharma, P. N., Liengard, B. D., Hair, J. F., Sarstedt, M., & Ringle, C. M. (2023). Predictive model assessment and selection in composite-based modeling using PLS-SEM: extensions and guidelines for using CVPAT. *European Journal of Marketing*, 57(6), 1662–1677. <https://doi.org/10.1108/EJM-08-2020-0636>
- Siddiqui, F., Salleh, R., & Shamim, A. (2025). Advancing SDGs through environmental sustainability performance: The role of employee sustainable consumption behaviors in Malaysia's energy sector. *Sustainable Futures*, 10, 101446. <https://doi.org/10.1016/J.SFTR.2025.101446>
- Surroca, J., Tribó, J. A., & Waddock, S. (2010). Corporate responsibility and financial performance: The role of intangible resources. *Strategic Management Journal*, 31(5), 463–490. <https://doi.org/10.1002/smj.820>
- Tien³Shang Lee, L. (2012). The pivotal roles of corporate environment responsibility. *Industrial Management & Data Systems*, 112(3), 466–483. <https://doi.org/10.1108/02635571211210077>
- Truño, J., & Rialp, J. (2008). La responsabilidad social corporativa: gestión empresarial de un activo intangible. *Revista de Contabilidad y Dirección*, 7, 163–184. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3127478>
- Turyakira, P., Venter, E., & Smith, E. (2014). The impact of corporate social responsibility factors on the competitiveness of small and medium-sized enterprises. *South African Journal of Economic and Management Sciences*, 17(2), 157–172. <https://doi.org/10.4102/sajems.v17i2.443>
- Villafañe, J. (2005). La gestión de los intangibles empresariales. *Comunicação e Sociedade*, 8, 101–113. [https://doi.org/10.17231/comsoc.8\(2005\).1185](https://doi.org/10.17231/comsoc.8(2005).1185)
- Villagra, N., López, B., & Monfort, A. (2015). La gestión de intangibles y la marca corporativa: ¿ha cambiado algo en la relación entre las empresas y la sociedad? *Revista Latina de Comunicación Social*, 70, 793–812. <https://doi.org/10.4185/RLCS-2015-1072>
- Walton, C. (1967). Corporate social responsibilities. In Wadsworth Pub. Co. Wadsworth Pub. Co.
- Wijaya, I., Rahardjo, K., Abdillah, Y., & Riza, M. F. (2025). Sustainability performance in business: a systematic review of leadership, culture, capability and digital marketing contributions. *Cogent Business & Management*, 12(1), 2543049. <https://doi.org/10.1080/23311975.2025.2543049>
- Wong, K. (2013). Partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM) techniques using SmartPLS. *Marketing Bulletin*, 24, 1–32. <http://www.researchgate.net/publication/268449353>

Zheng, L., Lai, X., Lu, Y., & Dong, Y. (2024). The Relationship Between Corporate Social Responsibility and Co-Benefit Business Model Innovation. *Sage Open*, 14(4). <https://doi.org/10.1177/21582440241304936>

CAPÍTULO XXIV

**Aplicación móvil específica
para el estudio de accidentes
“in-itinere” Caso de Estudio: La
Paz, Bolivia**

Mario Zenteno Benítez

Universidad Mayor de San Andrés

<https://orcid.org/0000-0002-8897-5675>

Aplicación móvil específica para el estudio de accidentes “in-itinere” Caso de Estudio: La Paz, Bolivia

Resumen

La investigación tiene como objetivo diseñar una aplicación (App) que proporcione al trabajador una herramienta tecnológica que le permita identificar su ruta de desplazamiento, desde su domicilio hasta el lugar de trabajo y viceversa, con el propósito de prevenir los accidentes laborales denominados “in itinere”. El estudio se fundamenta en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por las Naciones Unidas para el año 2030, así como en las disposiciones de la Decisión N.º 121 de la Organización Internacional del Trabajo (OIT) y la jurisprudencia internacional relacionada, que promueven la visibilización de este tipo de accidentes. En este marco, la propuesta busca implementar una aplicación que permita el estudio, detección y gestión de los accidentes “in itinere”, fortaleciendo de este modo los mecanismos de prevención y la conciencia sobre este fenómeno en el ámbito de la seguridad y salud ocupacional.

Palabras clave: Accidente in itinere, Aplicación móvil, seguridad ocupacional, accidentes, daños, jurisprudencia

Development of a Specific Mobile Application for the Study of “In Itinere” Occupational Accidents: The Case of La Paz, Bolivia

Abstract

The research aims to design an App that provides workers with a technological tool to identify their commuting route—from home to the workplace and back—in order to prevent occupational accidents known as “in itinere.” The study is based on the premise of complying with the Sustainable Development Goals (SDGs) established by the United Nations for 2030, as well as the

guidelines set forth in ILO Decision No. 121 and relevant international jurisprudence, which promote the visibility of this type of accident. Within this framework, the proposal seeks to implement an App that enables the study, detection, and management of “in itinere” accidents, thereby strengthening prevention mechanisms and awareness of this phenomenon in the field of occupational safety and health.

Keywords: In itinere accident, mobile application, occupational safety, accidents, damages, jurisprudence

Desenvolvimento de um aplicativo móvel específico para o estudo dos acidentes “in itinere”: o caso de La Paz, Bolívia

Resumo

A pesquisa tem como objetivo desenvolver um aplicativo (App) que forneça ao trabalhador uma ferramenta tecnológica capaz de identificar sua rota de deslocamento — do domicílio até o local de trabalho e vice-versa — com o propósito de prevenir os acidentes de trabalho denominados “in itinere”. O estudo baseia-se no cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pelas Nações Unidas para o ano de 2030, bem como nas disposições da Decisão nº 121 da Organização Internacional do Trabalho (OIT) e na jurisprudência internacional relacionada, que promovem a visibilidade desse tipo de acidente. Nesse contexto, a proposta busca implementar um aplicativo que possibilite o estudo, a detecção e a gestão dos acidentes “in itinere”, fortalecendo assim os mecanismos de prevenção e a conscientização sobre esse fenômeno no âmbito da segurança e saúde ocupacional.

Palavras chave: Acidente in itinere, aplicativo móvel, segurança ocupacional, acidentes, danos, jurisprudência

Introducción

En el año 2015 las Naciones Unidas, se traza un horizonte de 15 años para proteger al planeta, mediante acciones de seguridad ciudadana, protección al medio ambiente, siendo denominados Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), se aprobaron 17 ODS, con el fin de “equilibrar la sostenibilidad social, económica y ambiental”(Undp, 2015), destacándose el Objetivo 8: Trabajo Decente y Crecimiento Económico: “Proteger los derechos laborales y promover un entorno de trabajo seguro y sin riesgos para todos los trabajadores, incluidos los trabajadores migrantes, en particular las mujeres migrantes y las personas con empleos precarios”(Undp, 2015).

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), también conocidos como Objetivos Globales, fueron adoptados por las Naciones Unidas en 2015 como un llamamiento universal para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que para el 2030 todas las personas disfruten de paz y prosperidad.

Dentro de este contexto las Naciones Unidas en su ODS 3: Salud y Bienestar, señala “Se vincula con la prevención de accidentes viales en el marco de la seguridad vial y salud pública”(Undp, 2015), los accidentes laborales in itinere son redactados de forma indirecta, ya que su razón de ser es de los derechos humanos.

Al tener como premisa los derechos de los trabajadores, de contar con un trabajo seguro, implica también la estabilidad emocional de la Familia del trabajador, cuando sale de su casa y regresa a la misma sin lesión alguna en el hecho hipotético, puesto que los exámenes laborales cambian día a día, al entregar un esfuerzo físico o cognitivo a cambio de un salario, generalmente en el país no se ha socializado positivamente los accidentes que sufren los trabajadores en el trayecto de su casa a su lugar de trabajo, denominados accidentes laborales “in itinere” o en el trayecto.

El accidente laboral “in itinere” está conceptualizado en el diccionario de la Real Académica Española (RAE) y otros textos académicos del Derecho Laboral, Seguridad Social, como también de la Higiene Industrial, Seguridad Industrial y Salud Ocupacional y la Seguridad Social; como se aprecia en el Diagrama No. 1, sin embargo, Taquichiri Y., menciona, que es necesario:

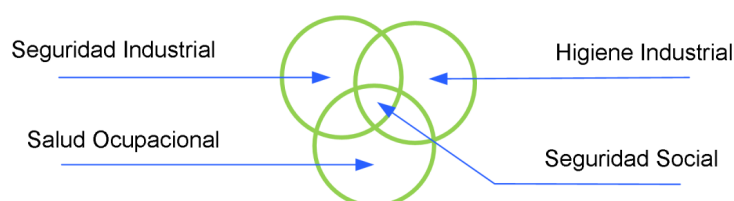


Diagrama no. 1

Simbiosis de la seguridad

FUENTE: Elaboración Propia

“[...] recurrir al derecho comparado, la legislación chilena señala que se trata de un hecho súbito y violento ocurrido en el lugar donde el trabajador realiza su tarea y por causa de la misma o en el trayecto entre el domicilio del trabajador y el lugar de trabajo o viceversa (in itinere) se produce un accidente, cubierto totalmente por el sistema de seguridad social obligatorio, siempre que no hubiere alterado dicho trayecto por causas ajenas al trabajo”.(Taquichiri, 2025)

Materiales y metodos

La presente investigación, se centra en accidentes laborales in itinere que ocurren en la ciudad de La Paz – Bolivia y que no son reportados, como problema central y que no son visibilizados como tales, por lo que el problema es mucho más serio de lo que supone un trabajador que sufre éste tipo accidentes, con un desconocimiento en los aspectos técnico – legal, como la prevención, atención oportuna, más aún las prestaciones de la cobertura por parte de la Seguridad Social a Corto Plazo (ASUSS, Resolución Administrativa 064/2018)(ASUSS), 2018) y Largo Plazo (Ley 065/2010 Ley de Pensiones)(FINANCIEROS, 2010), la misma que se interponen a la normativa del Seguridad Obligatorio de Accidentes de Tránsito (SOAT)(BOLIVIA, 1998) emitido mediante D.S. No, 27295, de fecha 20 de diciembre de 2003.

Se inicia con una investigación exploratoria la Organización Internacional del Trabajo (OIT), ya en el año 1964, estable en su Conferencia General el “C121 - Convenio sobre las prestaciones en caso de accidentes del trabajo y enfermedades profesionales, 1964 [Cuadro I modificado en 1980] (núm. 121)”(OIT, 1964), referido a a las prestaciones en caso de accidentes del trabajo y enfermedades profesionales, estableciendo:

Artículo 7

Todo Miembro deberá prescribir una definición del accidente del trabajo, incluyendo las condiciones bajo las cuales un

accidente sufrido en el trayecto al o del trabajo es considerado como un accidente del trabajo, y debe precisar los términos de dicha definición en las memorias sobre la aplicación de este Convenio que habrá de presentar en cumplimiento del artículo 22 de la Constitución de la Organización Internacional del Trabajo.(OIT, 1964)

En tal sentido, la Comunidad Andina de Naciones (CAN), constituidos por Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia, en su marco regulatorio dado en la "Decisión No. 584: Instrumento Andino de Seguridad y Salud en el Trabajo. Secretaría General de la CAN"(CAN, 2004), va delineando a lo referente a los accidentes laborales "in itinere"; se aprecia que todos los países toman en cuenta éste tipo de accidentes, los que particularmente el Bolivia, se los menciona el el Glosario de la Ley de Pensiones 065/10, y en las definiciones de Resolución Administrativa 064/18, emitida por la autoridad de la seguridad a Corto plazo (ASUSS), en cambio Colombia, como Ecuador abordan en su legislación, como se aprecia en el Cuadro No 1

Cuadro no. 1

Tratamiento del accidente in itinere en países de la can

País	¿Reconoce el accidente in itinere?	Base legal principal
Colombia	Sí (explícito)	Decreto 1295/1994, Sent. C-858/06
Ecuador	Sí (jurisprudencia)	IESS, Código de Trabajo
Perú	No expresamente, salvo casos extremos	Ley 29783, DS 005-2012-TR
Bolivia	Sí (parcialmente)	Ley 065/2010, RA ASSUS 064/18

Fuente: Elaboración propia en base a:

Resolución Administrativa No. 064/2018: Categorización de accidentes de trabajo y enfermedades profesionales. Autoridad de Supervisión de la Seguridad Social de Corto Plazo.(ASUSS), 2018)

Comunidad Andina: Decisión No. 584: Instrumento Andino de Seguridad y Salud en el Trabajo. Secretaría General de la CAN.(CAN, 2004)

Corte Constitucional de Colombia: Sentencia C-858/06: Reconocimiento del accidente in itinere como accidente laboral. Bogotá: Corte Constitucional.

Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social (IESS). (s.f.). Cobertura del Seguro General de Riesgos del Trabajo. (Congreso, 2001)

Ministerio de Economía y Finanzas Públicas: Ley No. 065: Ley de Pensiones. Gaceta Oficial del Estado Plurinacional de Bolivia.(FINANCIEROS, 2010)

Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo del Perú: Ley No. 29783: Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo. (REPÚBLICA, 2011)

Ministerio de Trabajo de Colombia: Decreto 1295 de 1994: Organización de la Seguridad Social en Riesgos Profesionales. Bogotá: Diario Oficial.(Ministerio de Trabajo y Seguridad Social, 1994)

Si bien, en el país, no se visibiliza, los accidentes laborales “in itinere”, por el vacío normativo entre el D.L. 16998 “Ley General de Higiene y Seguridad Ocupacional y Bienestar” de fecha 2 de agosto de 1979, y la actual normativa de la seguridad social, no permite que el trabajador cuente con normas que le protejan de éste tipo de accidentes, por lo cual de acuerdo a la Jurisprudencia que existe, en otros países, para la presente investigación, se toma como ejemplo a la República Argentina, país fundador del Mercado Común del Sur (MERCOSUR), donde la tecnología, como el Google Maps, se utiliza como “prueba” de un accidente laboral “in itinere”.

En la Web del Diadio/Judicail de fecha 06 de julio de 2020, con el título de “Google Maps para accidentes en ruta” señala:

La Cámara del Trabajo recurrió a la aplicación Google Maps para verificar si en un juicio por accidente de trabajo hubo desvío del trayecto habitual: En la causa “Quintana Leonardo Maximiliano c/ Chocorisimo SA s/despido”, la Sala X de la Cámara Nacional de Apelaciones del Trabajo confirmó la sentencia de primera instancia, que había condenado a la sociedad demandada, ante la ausencia de cobertura, a responder por el pago de las prestaciones dinerarias de la Ley 24.557 por el accidente in itinere sufrido por el trabajador. [...] “Cabe concluir que la colisión por la sufrida en la intersección de Dorrego con Castillo se produjo en uno de los trayectos posibles entre ambas direcciones, conforme puede ser consultado en el Google Maps” [...] Para llegar a la conclusión, los magistrados recurrieron a la tecnología, utilizando la aplicación Google Maps para constatar el recorrido del demandante: “teniendo en cuenta que el trabajador se domicilia en la calle... y que el establecimiento donde laboraba se encuentra situado en la calle..., cabe

concluir que la colisión por el sufrida en la intersección de Dorrego con Castillo se en uno de los trayectos posibles entre ambas direcciones, conforme puede ser consultado en el Google Maps”.

“Frente a ello, dado que ningún elemento probatorio indica la recurrente que autorice a una conclusión distinta de la apuntada, la decisión de la jueza “a quo” resulta ajustada a derecho y las circunstancias fácticas probadas, de modo que debe mantenerse” concluyó la resolución.(JUDICIAL, 2025)

En tal sentido que la presente investigación titula “Aplicación móvil específica para el estudio de accidentes in-itinere caso: La Paz Bolivia”, se requiere de contar con el reporte las actas y formularios del recorrido de los trabajadores, con el fin de tener una base de datos, para generar políticas, normas, permitiendo la geo localización de los accidentes, lo que permitiría conocer las causas del mismo, lo que derivaría en la generación de notificaciones de manera automatizada mediante la App a las aseguradores de corto y largo plazo, Dirección Nacional de Tránsito, Seguros y Reaseguros Personales UNIVIDA S.A. que administra el SOAT, por lo que se justifica la investigación; el objetivo, orientado a diseñar una aplicación App, que permita el registro, monitoreo y registro de los accidentes laborales in itinere en el ciudad de La Paz – Bolivia, orientado a la Seguridad Social.

De acuerdo a la definición de los accidentes “in itinere”, “Accidente sufrido por el trabajador durante el desplazamiento hacia o desde el lugar de trabajo y que se reputa accidente laboral a efectos legales” (RAE, 2021), se requiere diseñar una aplicación App, es necesario identificar el punto de inicio de que sería desde el domicilio del trabajador y el otro punto el lugar de trabajo y viceversa; realizando un recorrido de manera cotidiana, y que no exista desvió en su trayecto, tomando en cuenta el registro del tiempo en que ocurrió el accidente, reporte a la empresa, con el fin de salvaguardar la seguridad del trabajador.

Para el diseño de aplicaciones en teléfonos móviles, se utilizó el entorno de desarrollo de software para móviles Appinventor, que en su web señala “AppInventor.org es un sitio para aprender a programar aplicaciones móviles con App Inventor del MIT.”(Wolber David, 2017), que a la vez se utilizó la herramienta de software libre OpenstreetMap para el mapa y navegación de las coordenadas, la misma que describe “OpenStreetMap es la única base de datos cartográfica gratuita del mundo, lo que significa que tiene un alcance colosal”.(Fairhurst, 2020); en cambio para el gestor de la base de datos se utiliza Firebase, y los códigos de registro, sesión, panel de control, en JavaScript y html para



los registros y seguimiento, como se presenta en el Grafico No 1:

Gráfico no 1

Esquema para el diseño de aplicaciones en teléfonos móviles
FUENTE: Elaboración en base a las actividades que realiza la aplicación.

Se aplicó un enfoque mixto jurídico - técnico. En el componente legal se realizó un análisis comparado de la normativa boliviana frente a la OIT y la CAN, evidenciando la ausencia del principio in itinere en la Ley 065 y la RA 064/18. Para el componente geoespacial, se registró el recorrido del transporte público N° 2 en la Zona Sur de La Paz, obteniendo 274 puntos validados en OpenStreetMap y Google Earth.

Para el componente computacional se utilizó el modelo incremental-adaptativo para desarrollar la aplicación móvil en MIT App Inventor, integrando GPS, Firebase y visualización web. Para validar trayectos se aplicó la Regla Falsa, interpolando posiciones esperadas y comparándolas con el recorrido real. Finalmente, se realizaron pruebas de usabilidad con usuarios de la Zona Sur mediante protocolo SUS, que se presenta en el siguiente acápite.

Desarrollo

Los lenguajes de programación utilizados son JavaScript y HTML, ya que son los lenguajes que permiten integración con Firebase y pueden reconocer para las consultas en tiempo real, la biblioteca

para el visor de las gráficas está basada en programación Python, la cual ha permitido realizar las consultas necesarias para graficar los indicadores y su comportamiento.

El funcionamiento para nuevos usuarios es el siguiente:

La fase de registro, el usuario coloca su nombre de usuario y contraseña, las coordenadas del lugar del hogar y las coordenadas de su lugar trabajo, con los marcadores rojo y azul respectivamente.

La fase de seguimiento proporciona un recorrido de las rutas más importantes, tomando como referencia el Microbús (transporte público) No. 2, el cual presta servicio a las zonas con más amplio recorrido en la ciudad de La Paz, realiza un total de 2 horas por ciclo de viaje, en el caso de la aplicación se proporciona con la numeración 1 (uno), siendo el marcador para la simulación de rutas.

La segunda fase se muestra la pantalla de sesión el cual presenta los marcadores de tramo de hogar y trabajo, en conjunto con la ubicación actual, también el recorrido de los microbuses de la línea No. 2 y “A” que transitan en la ciudad de La Paz.

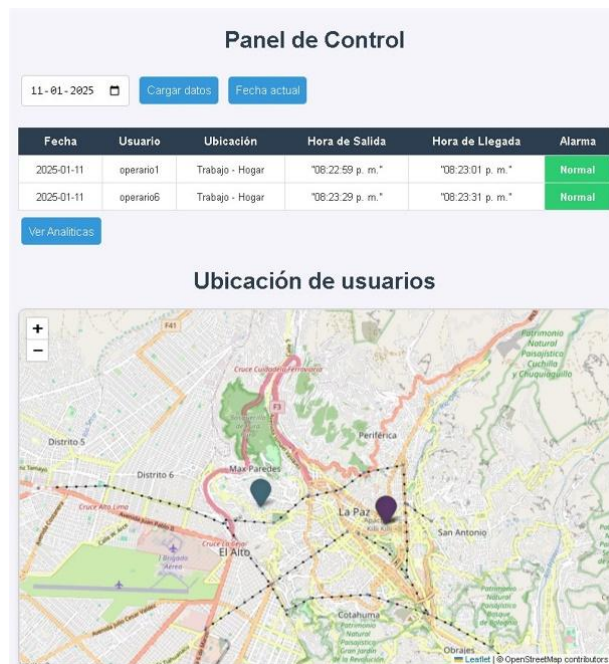
Al “registrar salida” el sistema lo recibe y se indica cuando una persona ha salido en dirección a su zona de trabajo o desde su zona de trabajo hasta su hogar, el usuario debe seleccionar en la pestaña de “registrar salida” de nuevo para marcar la llegada.

Si se detecta un accidente, se procede a describir el tipo de accidente, la aplicación móvil detecta la posición y coordenadas del lugar del accidente, la imagen se dirige a la nube en línea, para que lo pueda ver la administración de la empresa constructora, así mismo se puede compartir directamente el mensaje de forma directa a correo o aplicaciones de mensajería instantánea.

Por otro lado, la comunicación del servidor es directa por medio del código en JavaScript que registra y recopila a los usuarios y sus localizaciones, posteriormente con el código que tienen se utiliza la segunda base de datos donde se tiene los tiempos de entrada y de salida de su hogar hacia su trabajo y viceversa, también se muestra un panel de control referente a los datos de cada usuario y cuando sufrió un accidente este se notificara con una señal.

La página web tiene 2 páginas una de panel de control y sus graficas de control para el panel, la que se muestra en el Gráfico No. 2 la primera página muestra la tabla de usuarios los cuales se conectaron ese día para registrar la salida y llegada a su destino, con su indicador de color verde o rojo dependiendo de la existencia de un registro de accidente.

Debajo de la tabla se muestra el mapa con los usuarios que utilizan la aplicación y su movimiento en tiempo real con sus



rutas respectivas, el mapa se puede configurar la vista de los marcadores y del mapa en general, donde se visualiza sus coordenadas en tiempo real.

Gráfico no 2

Panel de control: tabla y mapa de usuarios.

Fuente: Elaboración propia en base a los requerimientos del programa (Zenteno Benitez, 2024) <https://acortar.link/I7QTWj> .

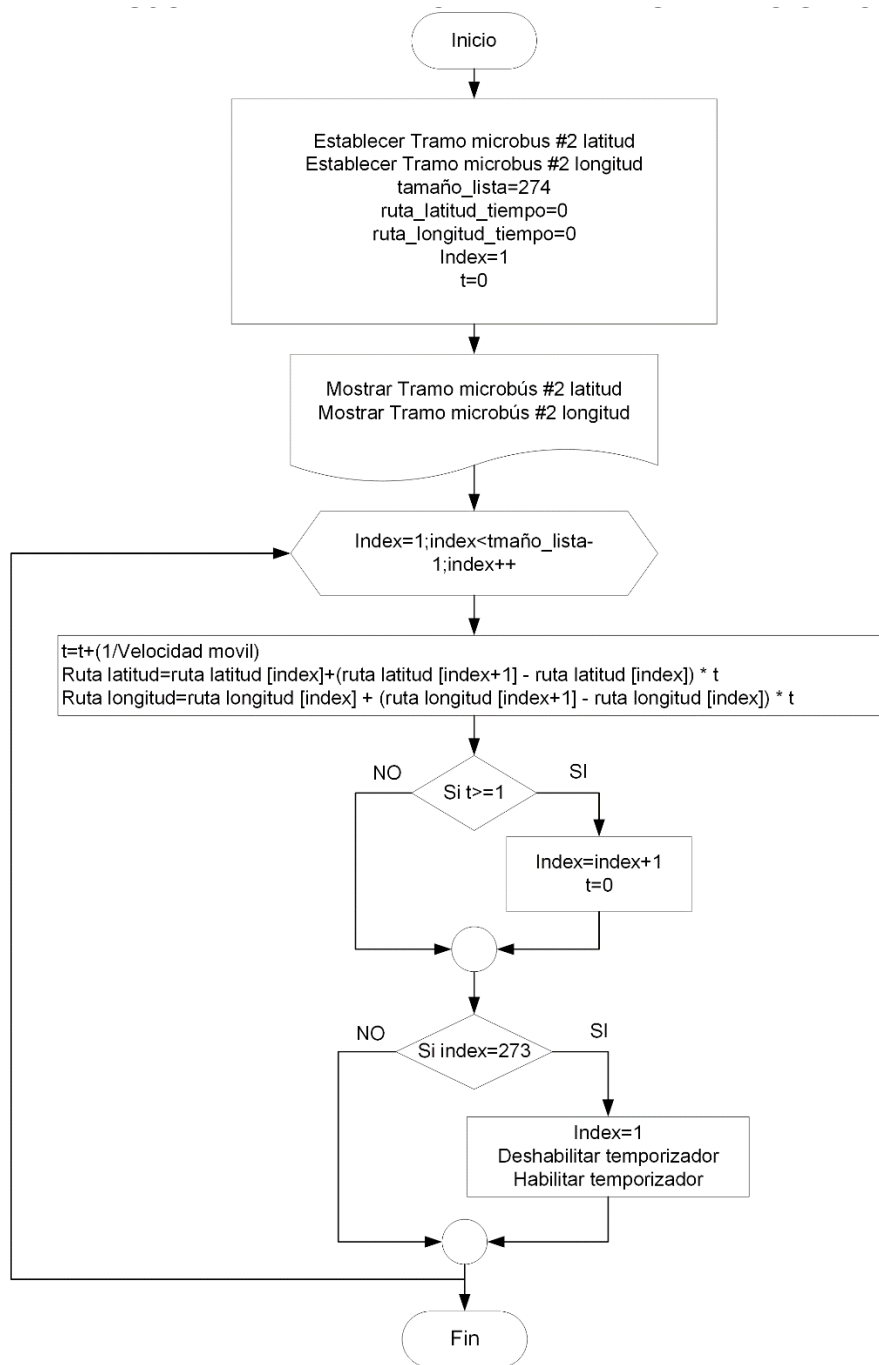
Algoritmo de la aplicación

La aplicación como se indica en el Gráfico No. 1, debe ingresar por teclado su usuario y contraseña, si los datos llenados cumplen con un usuario y contraseña alojados en la base de datos, ingresa a la pantalla de sesión, sino el usuario debe registrar su nombre de usuario y contraseña, posteriormente debe introducir en el buscador los marcadores de inicio y fin de la ruta.

Luego del llenado en la pantalla de registro se solicitan los datos se realiza una solicitud de él orden de los botones y pestañas de selección, las coordenadas para localizar las rutas de inicio y fin, el cual se denomina en la aplicación como la pestaña de “Hogar - Trabajo” o “Trabajo - Hogar”.

Posteriormente, el usuario para registrar la salida debe presionar el botón “Registrar Salida” o “Registrar Llegada” dependiendo de la solicitud de los botones, al presionarlo se registra en la base de datos la hora de salida o de llegada tanto en panel de control, como en la base de datos.

Si ocurre un accidente el usuario debe seleccionar en la lista de números de emergencia que la aplicación tiene, luego presionar el botón de “Registrar accidente” inicia una pantalla para describir el



evento, tomar una fotografía del evento y obtiene una descripción preliminar del accidente el cual el usuario puede decidir entre reportar el accidente directamente o compartir el mensaje. En los

Gráficos No. 3 y No. 4, se muestra la secuencia seguir:

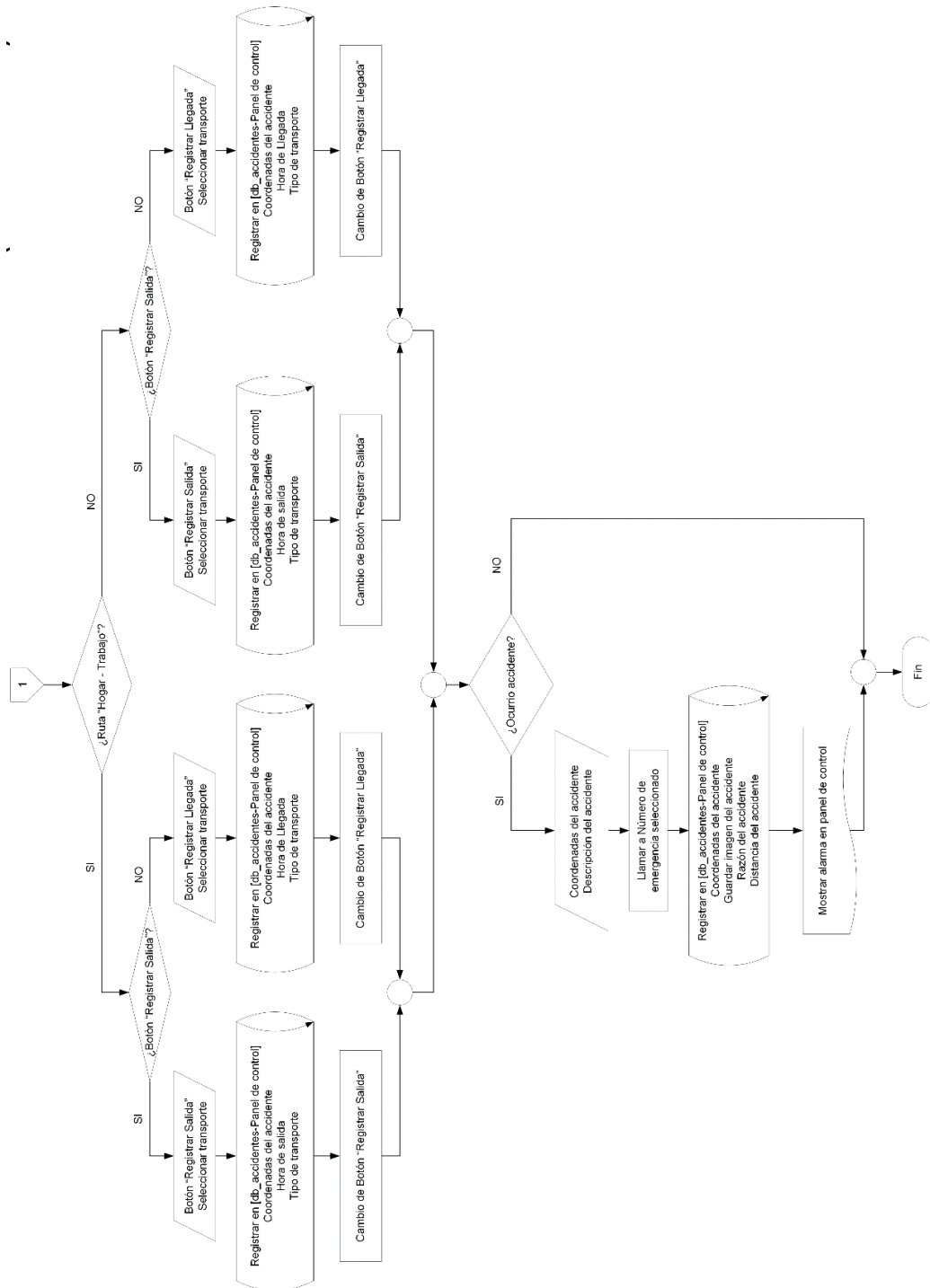


Gráfico no 3

Diagrama de flujo de la aplicación: pantallas de registro y sesión.
Fuente: Elaboración en base a los requerimientos del programa.

Gráfico no 4

Diagrama de flujo de la aplicación: pantallas de registro y sesión (continuación).

Fuente: Elaboración en base a los requerimientos del programa. Algoritmo de simulación del Microbús No 2

Pressman señala al respecto “El algoritmo es un conjunto de operaciones que están específicamente diseñadas para que una maquina las pueda entender, es de forma secuencial, un algoritmo puede ser secuencial repetitivo e iterativo”(Pressman, 2010. Pág.29).

En la pantalla de sesión la cual establecen con los datos cargados de las coordenadas y al inicio las rutas del tramo del Microbús, la lista de ruta de tramo en el Microbús No. 2, es de 274 coordenadas el cual inician con la ruta en tiempo 0 y el contador de listas “index” en 1 y de contero de ruta de coordenada hacia otra en 0.

Posteriormente se tiene el monitoreo mientras el contador se ejecuta con las siguientes relaciones para las acciones repetitivas, el cual se va sumando a medida del tiempo

Mientras que a posición se utiliza el método de falsa posición, donde los ejes son la latitud y longitud. Cómo lo señala Chapra&Canale en el su libro “Métodos numéricos para ingeniería”, la intersección de esta línea con el eje de las x representa una mejor aproximación de la raíz. El hecho de que se reemplace la curva por una línea recta da una “falsa posición” de la raíz; de aquí el nombre de método de la falsa posición, o en latín, regula falsi. También se le conoce como método de interpolación lineal. “(Chapra & Canale, 2015).

Realizando las funciones geográficas en el tiempo y la ubica-

$$t = t + \left(\frac{1}{\text{Velocidad del movil}} \right)$$

$$\text{Latitud} = \text{Lista}_{lat}(\text{index}) + [\text{Lista}_{lat}(\text{index} + 1) - \text{Lista}_{lat}(\text{index})] * t$$

$$\text{Longitud} = \text{Lista}_{long}(\text{index}) + [\text{Lista}_{long}(\text{index} + 1) - \text{Lista}_{long}(\text{index})] * t$$

Donde:

t = tiempo de tramo.

Lista_{lat} = Lista de latitudes.

Lista_{long} = Lista de longitudes.

index = número de índice de la lista de las coordenadas.

ción y con el fin de obtener una ruta simulada dentro del plano del mapa de la página de OpenStreetMap, se obtiene las siguientes ecuaciones recursivas con una lista de coordenadas de latitud y longitud de 274 coordenadas que están dispuestas por la ruta del Microbús No. 2.

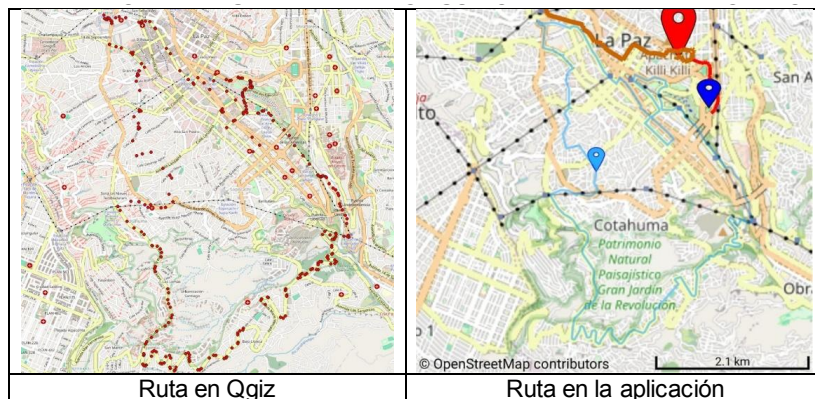
Posteriormente, si el valor de t es mayor o igual a 1, indica que

ya se termina de realizar el tramo entre el índice actual y el inicio del siguiente por lo cual se incremente el valor del índice en 1 y el valor de t se reinicia, cuando index alcanza al valor de 273, reinicia el valor del índice a 1, deshabilita la función temporizador y la vuelve a activar para reiniciarlo.

Resultados

Limitaciones de las rutas simuladas

El algoritmo se desarrolló en app Inventor el cual se muestra la programación para la aplicación en celulares, la cual se aplica la regresión lineal en puntos en el plano en función del tiempo, el cual expresa que, en el intervalo de cada segundo se mueve a una velocidad de 35 km/hr, el cual se identifica como el movi-



miento promedio utilizado en la ciudad de La Paz.

Por lo tanto, la ruta simulada representada por los puntos rojos mostradas en el Grafico No. 5 para la aproximación, en la aplicación la ruta esta de color celeste con un marcador del mismo color.

Gráfico no 5

La paz - bolivia: ruta del microbús no 2 en la aplicación móvil

Fuente: Elaboración propia en base de las capturas de coordenadas de la ruta del microbús No 2 en La Paz, 2024.

Graficas del panel de control

El panel de control tiene una pestaña de graficas que pueden ser filtradas y extraídas, para un análisis más riguroso, puede filtrarse por fechas, Ruta, el tipo de transporte utilizado para llegar al sitio de destino.



Dentro de la página se muestra cuatro pestañas para poder filtrar datos y obtener estadísticas según corresponda si es el usuario, la ruta, el vehículo utilizado y la fecha, mostradas en el Grafico No. 6

Gráfico no 6

Panel de control: ocurrencia de accidente.

Fuente: Elaboración propia en base a los requerimientos del programa (Zenteno Benitez, 2024).

En la grafica No. 6, se observa la gráfica principal de Llegadas Totales y Alarmas registradas en el tiempo esta puede filtrarse a conveniencia si se requiere ver las alarmas, números de operarios en las fechas que registraron. Además de se tiene el índice de

$$I_{A/VEI} = \frac{\text{Número de accidentes por año} * 1.000.000}{V}$$

Donde: $V = TPD * (365)^1$.

accidentabilidad con respecto al número de vehículos que entran a una intersección, el cual indica en el texto de ingeniería de tránsito "Es el número de accidentes por un millón de vehículos que entran a la intersección en un año."(Mayor & Cárdenas, 2018), la cual respeta la siguiente ecuación:

En la programación de la página web se tiene funciones de manejo de ubicación al cargar y actualizar la página, llama de ubicaciones, personalización de marcadores, la carga de los datos en la tabla, rutas calculadas y muestra de los marcadores hogar

y del lugar de trabajo, para tener un el transito promedio diario se utiliza un valor de 200.000 vehículos por sector estudiado como indica la bibliografía de ingeniería de tránsito (Mayor & Cárdenas, 2018).

El sistema registró exitosamente los trayectos hogar-trabajo, identificó desvíos superiores a 80 metros y generó evidencia digital mediante coordenadas, timestamp y captura fotográfica. La base de datos en Firebase almacenó correctamente todos los eventos, mientras que el panel web visualizó el desplazamiento real versus el simulado. La aplicación permitió reconstruir incidentes simulados con precisión y demostró su utilidad como herramienta probatoria. Además, el análisis comparativo CAN - Bolivia confirmó que Bolivia es el único país de la región que no reconoce explícitamente el accidente in itinere, reforzando la pertinencia del sistema

Discusión

Las políticas de accidentes, así mismo como cualquier implementación de políticas tienen repercusión sistémica, desde los hábitos que se generan al plantear una política concreta, hasta el análisis de sistemas complejos el cual “Debemos agregar ciertas características a los ambiente anteriormente definidos o micro-mundos, para, para apoyar al decisor en la toma de decisiones, formulación de las estrategias hasta apoyarlo en generar políticas específicas.”(Mayenberger, 1998).

Los accidentes “in itinere” tienen un comportamiento complejo el cual se desarrolla mediante el comportamiento poblacional, siendo la mortalidad, accidentabilidad, condición de carreteras, políticas de seguridad vial, y costo total de accidentes.

$$\begin{aligned}\frac{dA(t)}{dt} &= \alpha_1 C(t) + \alpha_2 - \alpha_3 + \alpha_4 M(t) - \alpha_5 P(t) + \alpha_6 I_{A/VEI}(t) \\ \frac{dM(t)}{dt} &= \beta_1 A(t) - \beta_2 P(t) + \beta_3 C(t) \\ \frac{dC(t)}{dt} &= -\gamma_1 A(t) + \gamma_2 P(t) \\ \frac{dP(t)}{dt} &= \delta_1 - \delta_2 \\ \frac{dCo(t)}{dt} &= A(t) + M(t) - P(t) \\ I_{A/VEI}(t) &= \frac{A(t) * 1.000.000}{200.000 * 365}\end{aligned}$$

Para un análisis de como las nuevas políticas que afecten de forma directa o indirecta al costo total de accidentes realizando un análisis de influencias, se tiene la necesidad de modelar los comportamientos mediante el sistema de ecuaciones diferenciales.

Donde:

$A(t)$: Tasa de accidentes en el tiempo t .

$M(t)$: Tasa de mortalidad en el tiempo t .

$C(t)$: Condición de las carreteras en el tiempo t .

$P(t)$: Políticas de seguridad vial asociadas a accidentes in itinere.

$Co(t)$: Costo total relacionado con los accidentes.

$I_{(A/VEI)}(t)$: Índice de accidentabilidad con respecto al número de vehículos que entran a una intersección.

α : Coeficientes que representan los factores que afectan a la tasa de accidentes.

β : Coeficientes que afectan la mortalidad.

γ : Coeficientes que describen la condición de las carreteras.

δ : Coeficientes de las políticas de seguridad.

Los resultados evidencian que la combinación de tecnologías móviles, análisis geoespacial y métodos matemáticos puede resolver el vacío probatorio asociado al accidente “in itinere” en Bolivia. La aplicación móvil brinda trazabilidad verificable, lo que permitiría sustentar reclamos ante ASUSS o instancias judiciales.

La falta de reconocimiento del “in itinere” coloca a Bolivia en una situación desventajosa respecto a la CAN y contradice el estándar protector del Convenio 121. Al integrar tecnología, evidencia digital y análisis legal, el sistema constituye un modelo innovador y transferible que puede mejorar la investigación y prevención de siniestros laborales en el territorio.

Conclusiones

Se busca visibilizar los accidentes laborales “in itinere”, tomado en cuenta la Decisión No. 121 de la OIT, la Decisión No. 584: Instrumento Andino de Seguridad y Salud en el Trabajo. Secretaría General de la CAN, la Ley No. 065: Ley de Pensiones, la Resolución Administrativa No. 064/2018: Categorización de accidentes de trabajo y enfermedades profesionales. Autoridad de Supervisión de la Seguridad Social de Corto Plazo, que mediante el diseño de una APP, permita identificar las rutas de recorrido que realiza el trabajador desde su domicilio a su fuente de trabajo y viceversa.

En tal sentido, el modelo diseñado, se muestra que la aplicación de una App y sin contar con normativa en el país, busca la

identificación y reducción de los accidentes laborales “in itinere”, inculcando una cultura de prevención con la aplicación de la tecnología, donde se podría incorporar más indicadores que para la seguridad en el trabajo sobre el tráfico vial. Sin embargo, las condiciones de las carreteras no son afectadas por las influencias dentro del modelo.

Por medio de la simulación se indica que en 3 años se deben generar nuevas políticas para controlar los accidentes, poder determinarlos y clasificarlos, según los datos de accidentes de tránsito registrados, según departamento y clase de accidentes indica que existieron 20.594 accidentes en el periodo de 2022 (INE, 2022), una clasificación de estos accidentes de forma global podría mostrarse un impacto significativo, logrando generar más indicadores de accidentabilidad y demostrar una reducción de costos más alta, ya que el modelo indica que se tiene una relación directamente proporcional con los accidentes y las políticas generadas.

Referencias

- (ASUSS), A. de de supervisión de la seguridad social a corto plazo. (2018). 15-Resolucion-Administrativa-ASUSS-N°-064-2018 in itinere.pdf (pp. 1-40). <https://n9.cl/0eajj>
- BOLIVIA, A. G. O. DE. (1998). Texto unico de la poliza de soat.pdf (p. 11). https://www.aps.gob.bo/files/webdocs/DS/Otros/TEXTO_UNICO_DE_LA_POLIZA_DE_SOAT.pdf
- CAN. (2004). DECISIÓN 584 Instrumento Andino de Seguridad y Salud en el Trabajo. OEA, 2. <http://www.sice.oas.org/trade/junac/decisiones/dec584s.asp>
- Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2015). *Métodos numéricos para ingenieros* (7th ed.). McGRAW-HILL.
- Congreso. (2001). Ley De Seguridad Social. In Registro Oficial -Órgano de Gobierno -Ecuador (Vol. 1, p. 91). <https://n9.cl/39rxc>
- Fairhurst, R. (2020). Providing data to OpenStreetMap. Oxfordshire County Council and Buckinghamshire Council. Guide, 1-23. <https://n9.cl/2f7cr>
- FINANCIEROS, V. D. P. Y. S. (2010). Ley de pensiones no. 065. Minisrerio de economía y finanzas públicas. <https://www.bcb.gob.bo/webdocs/MesaDePartes/files/Ley-065-Pensiones.pdf>
- INE. (2022). Bolivia: accidentes de tránsito registrados, según departamento y clase de accidentes, 2008 - 2022.
- JUDICIAL, D. (2025). Google Maps para accidentes en ruta. Laboral/Tecnología, 1667-8486. <https://www.diariojudicial.com/>

- [news-86830-google-maps-para-accidentes-in-itinere](#)
- Mayenberger, C. S. (1998). Modelación de la dinámica de ecosistemas.
- Mayor, R. R. C., & Cárdenas, J. G. (2018). Ingeniería de tránsito Fundamentos y Aplicaciones. <http://www.alfaomega.com.co>
- Ministerio de Trabajo y Seguridad Social. (1994). Decreto 1295 Organización y Administración del Sistema General de Riesgos Profesionales. Ministerio de Trabajo y Seguridad Social, 1994(junio 22), 39. http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/decreto_1295_1994.html
- OIT. (1964). C121 - Convenio sobre las prestaciones en caso de accidentes del trabajo y enfermedades profesionales, 1964 [Cuadro I modificado en 1980] (núm. 121). *Organización Internacional Del Trabajo*, 1, 8. <https://n9.cl/4a02h9>
- Pressman, R. S. (2010). Ingeniería del software un enfoque práctico (McGRAW-HILL (ed.); 7th ed.). McGRAW-HILL. <https://n9.cl/6ippc>
- RAE, R. A. E. (2021). Diccionario de la lengua española. https://dle.rae.es/in_itinere
- REPÚBLICA, C. D. LA. (2011). Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo N° 29783. Normas Legales. In El peruano (p. 13). https://web.ins.gob.pe/sites/default/files/Archivos/Ley_29783_SEGURIDAD_SALUD_EN_EL_TRABAJO.pdf
- Taquichiri, F. I. (2025). Accidente in itinere. OPINION, Diario de Circulación Nacional. <https://n9.cl/k0x14>
- Undp. (2015). Qué son los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Undp.
- Zenteno Benitez, M. F. (2024). Panel de control - accidentes "in itinere." <https://acortar.link/I7QTWj>

CAPÍTULO XXV

Modelo de economía circular del agua aplicado a la localidad de Viacha

Jorge Vásquez Peñaranda

Universidad Mayor de San Andrés

<https://orcid.org/0009-0008-9944-5718>

Modelo de economía circular del agua aplicado a la localidad de Viacha

Resumen

El presente estudio desarrolla un modelo de economía circular del agua aplicado a la localidad de Viacha en el Altiplano Andino de Bolivia, integrando el marco conceptual DPSIR y la metodología Eco-Canvas, con el fin de fortalecer la sostenibilidad hídrica, mediante la recirculación del agua tratada y la valorización de subproductos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Se realizaron análisis documentales, diagnóstico ambiental de la planta mediante indicadores fisicoquímicos, entrevistas estructuradas a actores clave e interpretación de datos técnico-operativos. Los resultados indican que el 85% de las aguas residuales se descargan sin tratamiento adecuado hacia el río Pallina, aportando más de 8.000 toneladas por año de carga orgánica. Se determinó que la reutilización del agua tratada permitiría una reducción mínima del 30% en la descarga de contaminantes y que el uso energético del biogás podría cubrir entre el 35% y 40% de la demanda eléctrica de la PTAR. El modelo propuesto demuestra viabilidad técnica y social, destacando la necesidad de fortalecer la gobernanza participativa de la comunidad y los mecanismos de coordinación interinstitucional para su implementación exitosa.

Palabras clave: Economía circular, gestión del agua, sostenibilidad, gobernanza participativa

Circular water economy model applied to the Viacha locality

Abstract

This study develops a circular economy model for water applied to the town of Viacha in the Andean Altiplano of Bolivia, integrating the DPSIR conceptual framework and the Eco-Canvas methodology to strengthen water sustainability through the recirculation of treated water and the valorization of byproducts generated at the wastewater treatment plant (WWTP). Document analysis, an environmental assessment of the plant using physicochemical indicators, structured interviews with key stakeholders, and interpretation of technical and operational data were conducted. The results indicate that 85% of the wastewater is discharged without adequate treatment into the Pallina River, contributing more than 8,000 tons of organic load per year. It was determined that reusing treated water would allow for a minimum 30% reduction in pollutant discharge and that the energy use of biogas could cover between 35% and 40% of the WWTP's electricity demand. The proposed model demonstrates technical and social viability, highlighting the need to strengthen participatory community governance and inter-institutional coordination mechanisms for its successful implementation.

Keywords: Circular economy, water management, sustainability, participatory governance

Modelo de economía circular para água aplicado à cidade de Viacha

Resumo

Este estudo desenvolve um modelo de economia circular para a água, aplicado à cidade de Viacha, no Altiplano Andino da Bolívia, integrando o modelo conceitual DPSIR e a metodologia Eco-Canvas para fortalecer a sustentabilidade hídrica por meio da recirculação da água tratada e da valorização dos subprodutos gerados na estação de tratamento de esgoto (ETE). Foram realizadas análises documentais, uma avaliação ambiental da estação utilizando indicadores físico-químicos, entrevistas estruturadas com atores-chave e interpretação de dados técnicos e operacionais. Os resultados indicam que 85% do esgoto é lançado sem tratamento adequado no rio Pallina, contribuindo com mais de 8.000 toneladas de carga orgânica por ano. Constatou-se que a reutilização da água tratada permitiria uma redução mínima de 30% no lançamento de poluentes e que o uso energético do biogás poderia suprir entre 35% e 40% da demanda de eletricidade da ETE. O modelo proposto demonstra viabilidade técnica e social, destacando a necessidade de fortalecer a governança comunitária participativa e os mecanismos de coordenação interinstitucional para sua implementação bem-sucedida.

Palavras chave: Economia circular, gestão da água, sustentabilidade, governança participativa

Introducción

La gestión sostenible del agua constituye un pilar fundamental del desarrollo ambiental global, en concordancia con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) N.º 6, que promueve el acceso universal al agua potable y saneamiento seguro. En Bolivia persisten desafíos significativos para alcanzar este objetivo, especialmente en zonas urbanas con rápido crecimiento donde la expansión industrial supera la capacidad de las infraestructuras de tratamiento.

La ciudad de Viacha, ubicada en el altiplano central boliviano e integrada en la dinámica metropolitana La Paz–El Alto, ejerce presión creciente sobre la cuenca del río Katari, que desemboca en la bahía de Cohana del Lago Titicaca, un ecosistema altamente sensible. Estudios previos han evidenciado que la contaminación orgánica e industrial derivada de descargas residuales sin tratamiento constituye una amenaza directa a los servicios ecosistémicos, la biodiversidad y la salud pública (Archundia y otros, 2018).

Desde la Ingeniería Industrial, el enfoque de economía circular del agua se interpreta como un proceso de optimización de recursos, reducción de pérdidas y mejora continua, aplicando principios de eficiencia energética, gestión de calidad y aprovechamiento de residuos para maximizar la sostenibilidad del ciclo hídrico urbano-industrial.

El modelo económico tradicional de gestión hídrica, basado en el paradigma lineal de extraer–usar–descargar, resulta insostenible en contextos de creciente demanda y degradación ambiental. En contraposición, la economía circular del agua busca ****cerrar el ciclo**** mediante la reutilización, recuperación energética y valorización de subproductos como lodos y biogás (González Villarreal y otros, 2020).

Para estructurar la propuesta, se adoptan los enfoques ****DPSIR**** (Driving forces, Pressure, State, Impact, Response) y ****Eco-Canvas****, permitiendo integrar las dimensiones ecológicas, sociales y económicas en un modelo holístico de gestión del agua. Asimismo, se aplicó la herramienta ****MACTOR**** para analizar las relaciones de poder, influencia y dependencia entre actores locales.

Hipótesis de investigación:

La aplicación integrada de DPSIR y Eco-Canvas permite diseñar un sistema de gestión hídrica circular para Viacha, social y técnicamente viable, contribuyendo a la reducción de la contaminación y sostenibilidad del recurso.

El valor de la investigación tiene connotaciones académicas y prácticas:

- i. Académico: adaptación de metodologías reconocidas a contexto sudamericano
- ii. Práctico: propuesta con beneficios económicos, sanitarios y ambientales reales

Materiales y métodos

Se adoptó una metodología mixta que combina análisis documental, diagnóstico ambiental mediante indicadores y recopilación de información institucional y social. El procedimiento se estructuró en cuatro etapas: análisis documental, diagnóstico ambiental (DPSIR), diseño del modelo (Eco-Canvas) y análisis de actores (MACTOR).

El procedimiento general de investigación se estructuró en cuatro etapas principales:

i) Análisis documental:

Se revisaron fuentes nacionales e internacionales, normativa boliviana y auditorías ambientales (Contraloría General del Estado, 2014) Este análisis permitió identificar debilidades en saneamiento y brechas de información relevantes para el diseño del modelo.

- Normativa boliviana sobre calidad de aguas y vertimientos
- Informes institucionales del MMAyA y del GAM Viacha
- Auditorías ambientales de la Contraloría General del Estado (2014)
- Artículos científicos sobre contaminación en la cuenca Katari

ii) Diagnóstico ambiental mediante DPSIR:

El modelo DPSIR (Driving forces – Pressure – State – Impact – Response) se utilizó para caracterizar la situación hídrica de Viacha con un enfoque sistémico:

- Diagnóstico ambiental DPSIR: Se caracterizó la situación hídrica local
- Fuerzas motrices: Crecimiento industrial y urbanización
- Presiones: Vertimientos sin tratamiento, déficit en el alcantarillado
- Estado: Alta carga orgánica en río Pallina
- Impactos: Riesgo sanitario, deterioro ecosistémico
- Respuestas: limitada capacidad de la PTAR, débil fiscalización ambiental

El análisis fue alimentado con datos técnico-operativos de la PTAR y observación de campo.

iii) Indicadores técnicos evaluados:

Se recopilaron y analizaron parámetros fisicoquímicos de agua:

- DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno)
- DQO (Demanda Química de Oxígeno)
- Sólidos Suspendidos Totales
- conductividad
- metales pesados (en casos puntuales)
- caudales de ingreso y salida de la PTAR

Se estimó el potencial energético del biogás mediante relaciones estequiométricas estándar.

iv) Trabajo social e institucional:

Se realizaron 12 entrevistas estructuradas a actores clave:

- técnicos del Gobierno Autónomo Municipal de Viacha
- operadores y supervisores de la PTAR
- representantes de organizaciones vecinales
- pequeños productores agrícolas

El objetivo: evaluar aceptación social del reúso de agua y percepción de la contaminación.

v) Diseño del modelo circular mediante EcoCanvas

Se propuso un sistema basado en:

- recirculación de agua tratada para riego agrícola y áreas verdes
- valorización de lodos como fertilizante o compost
- Aprovechamiento del biogás para autoconsumo eléctrico de la PTAR

Tabla 1. Estructuración del modelo económico

ELEMENTO	CONTENIDO
propuesta de valor:	agua segura + reducción de costos + energía renovable
actores clave:	PTAR, municipio, agricultores
costos principales:	operación PTAR, mantenimiento, infraestructura
ingresos potenciales:	venta de compost, ahorro energético

Nota. Generada a partir del análisis económico - social

vi) Análisis de actores (MACTOR)

Se aplicó el método MACTOR (Método, Actores, Objetivos, Resultados de Fuerza), evaluó la influencia, dependencia y alianzas entre actores institucionales y sociales, identificando barreras y oportunidades de gobernanza compartida.

La propuesta que plantea el Plan director de la Cuenca Katari:

se enfoca en una modalidad de participación y autogestión (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, MMAyA, 2021)

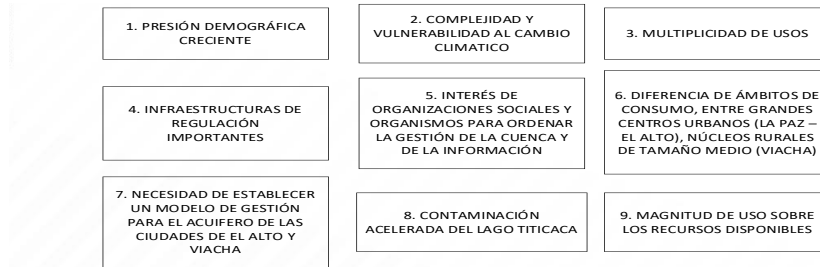


Figura 1.

Modelo de participación y autogestión
Nota. Generado del análisis socioambiental

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos mediante el diagnóstico del sistema hídrico de Viacha y el análisis institucional permiten identificar oportunidades claras para implementar un modelo de economía circular del agua con beneficios ambientales, económicos y sociales.

i) Resultados técnico - ambientales: el análisis de datos de la PTAR y estudios ambientales previos permitió determinar que:

- aproximadamente el 85% de las aguas residuales generadas se descargan sin tratamiento adecuado
- más de 8.000 toneladas por año de DBO son vertidas al río Pallina
- existen deficiencias en la cobertura del sistema de alcantarillado
- los valores de DQO superan los límites permisibles establecidos por normativa boliviana

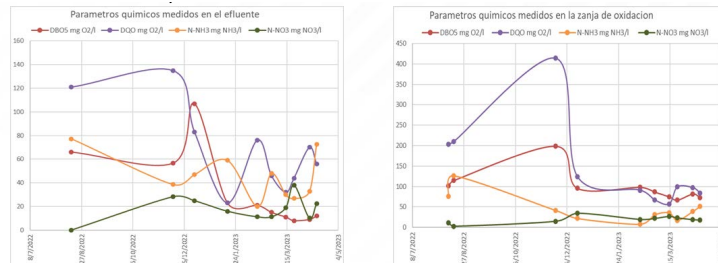


Figura 2.

Parámetros fisicoquímicos de la PTAR de Viacha
Nota. Obtenidas in situ durante la gestión 2022-2023

Estos resultados confirman una presión crítica sobre el río, generando efectos acumulativos que se extienden hasta la cuenca Katari y posteriormente al Lago Titicaca.

La reutilización del agua tratada podría generar beneficios directos en:

Tabla 2. Estimación de los impactos en la comunidad

BENEFICIO	ESTIMACIÓN
áreas verdes irrigables:	70-100 ha
reducción de descargas orgánicas:	≥ 30%
disminución de costos de agua potable para riego:	20-35%
aprovechamiento energético de biogás:	120-150 m ³ /día

Nota. Obtenidos a partir del impacto de la implementación de mejoras

Esto permitiría cubrir entre 35% y 40% del consumo eléctrico de la PTAR, reducir costos operativos y emisiones de gases de efecto invernadero lo que se alinea con políticas nacionales de transición energética limpia.

ii) Resultados socio - institucionales: el análisis MACTOR evidenció que:

- la influencia en decisiones se concentra en el Gobierno Municipal y operadores de la PTAR
- la participación ciudadana es limitada
- existen barreras culturales para aceptar el reúso del agua
- la fiscalización ambiental no es estricta con el sector industrial

En las entrevistas se evidenció que: “el agua tratada no se ve limpia, entonces no la usáramos para alimentos”, palabras de un representante vecinal.

Esto indica desconfianza social, atribuida más a falta de información que a problemas reales de salud pública.

iii) Discusión integrada del modelo DPSIR-EcoCanvas: la articulación de resultados técnicos con el análisis institucional demuestra que:

- los impactos ambientales derivados de vertimientos sin tratamiento pueden disminuirse con el reúso del agua tratada
- el modelo de negocio circular es rentable y sostenible
- la aceptación social depende de educación ambiental
- se requiere fortalecer la gobernanza participativa del agua

Para el estudio las personas que son parte de la comunidad de Viacha, son el factor más importante para el análisis, ya que ellas generan los mayores impactos sobre el ambiente más allá de los fenómenos climáticos que también fueron provocados por la actividad antrópica, el análisis con la herramienta MACTOR permitió definir las redes de vinculación entre actores, lo que permitió realizar el análisis sobre la gobernanza en Viacha.

Tabla 3. Caracterización de los actores con mayor influencia sobre el agua, en la localidad de Viacha

Tipo de actores	Institución	Siglas	Funciones
Actores gubernamentales y no gubernamentales	Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego	VRHR	gestión de acciones específicas para recursos hidráulicos y riego
	Gobierno Autónomo departamental de La Paz (Gobernación)	GADLP	ejecución de proyectos de inversión pública a nivel departamental
	Gobierno Autónomo Municipal de Viacha	GAMV	ejecución de proyectos de inversión pública a nivel municipal
	Industria, minería, pymes y artesanos	IMPA	productivas
	Planta de tratamiento de aguas residuales	PTAR	tratamiento de las aguas residuales
Actores sociales	Pobladores de la comunidad	HAB	población del municipio
	población del municipio		actividades de gestión del desarrollo
Actores externos	Investigadores	Academia (Universidades)	apoyar a la comunidad con conocimientos científicos

Nota. Diseñada a partir de encuestas y entrevistas

La integración del modelo DPSIR con el enfoque de economía circular, proporciona un marco teórico consistente, para abordar los desafíos ambientales y promover la sostenibilidad. Este

enfoque holístico asegura que se consideren todos los aspectos relevantes, desde las fuerzas impulsoras hasta las respuestas, permitiendo una gestión más eficiente y sostenible de los recursos hídricos.

La efectividad de las respuestas depende de la corresponsabilidad entre ciudadanía e instituciones públicas. Mientras las autoridades locales deben fortalecer la fiscalización y gestión del saneamiento, la población tiene un papel central en reducir vertimientos domésticos y promover prácticas sostenibles.

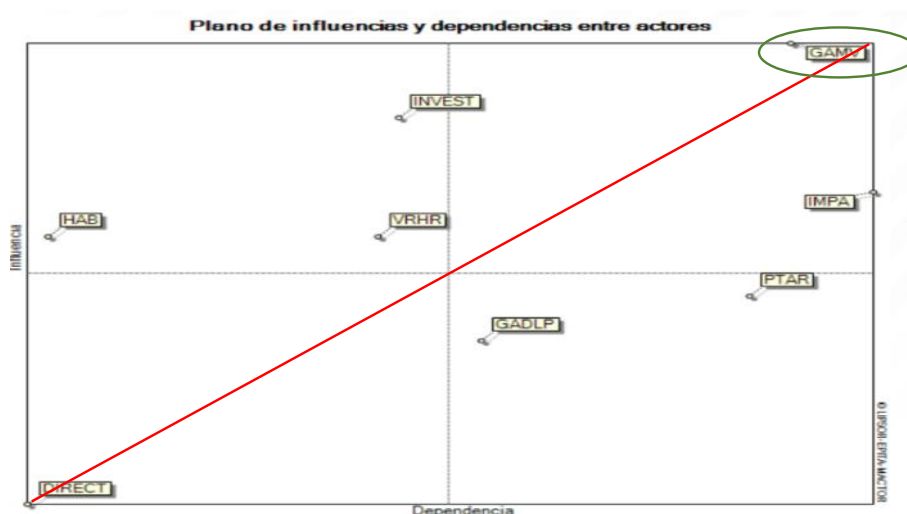


Figura 3.

Plano de influencias y dependencias entre actores

Nota. El actor con mayor influencia y dependencia es el Gobierno Autónomo Municipal de Viacha (GAMV)

iv) Comparación internacional:

Tabla 4. Datos comparativos con países de Latinoamérica y Europa

PAÍS	% REÚSO DE AGUA TRATADA	RESULTADO
Chile	42%	Alto aprovechamiento agrícola
México	30%	Expansión de reúso urbano
España	25%	Legislación fortalecida
Viacha - Bolivia (potencial)	30-40%	Conforme a este estudio

Nota. Información de CEDLA

El potencial de la PTAR de Viacha la posiciona dentro de los estándares latinoamericanos.

Conclusiones

El modelo propuesto demuestra potencial para reducir la contaminación del río Pallina, generar beneficios económicos y fortalecer la gobernanza participativa. La integración DPSIR-EcoCanvas ofrece una herramienta replicable en otras cuencas andinas. La economía circular del agua en Viacha es técnica y económicamente viable, aunque requiere un cambio institucional y socio-cultural progresivo.

La sostenibilidad hídrica dependerá de la corresponsabilidad entre autoridades y ciudadanía. Las instituciones deben fortalecer la fiscalización y gestión de saneamiento, mientras que la población tiene un papel clave en la reducción de vertimientos domésticos y la adopción de prácticas sostenibles.

Limitaciones y perspectivas futuras

La investigación presentó limitaciones asociadas principalmente a:

- disponibilidad restringida de datos fisicoquímicos continuos de la PTAR
- información técnica parcial proporcionada por autoridades locales
- ausencia de estudios recientes de condiciones de infiltración y permeabilidad del suelo
- limitado acceso a reportes sobre descargas industriales clandestinas

Asimismo, la evaluación económica se realizó con estimaciones conservadoras, por falta de datos oficiales de costos energéticos y rendimientos específicos de lodos en la PTAR.

Perspectivas futuras de trabajo

Se recomienda:

- implementar programas piloto de reúso de agua tratada en áreas agrícolas periurbanas
- ampliar infraestructura de biodigestión y almacenamiento de biogás
- crear sistemas de monitoreo continuo del caudal y calidad del agua
- promover educación ambiental y participación comunitaria
- desarrollar análisis económicos detallados e incentivos municipales
- incorporar modelamiento hidrodinámico de la cuenca

Síntesis de hallazgos clave

- el 85 % del agua residual se vierte sin tratamiento

- el modelo DPSIR- EcoCanvas permite reducir un 30% las descargas de contaminantes
- el biogás generado cubrirá entre el 35 - 40 % de la demanda energética de la PTAR
- la aceptación social depende de una gobernanza participativa
- la viabilidad económica está condicionada por los costos energéticos totales

La economía circular del agua representa una estrategia sostenible para la gestión hídrica de Viacha, contribuyendo directamente al cumplimiento del ODS 6 y al fortalecimiento de la resiliencia ambiental de la cuenca Katari.

Los impactos que deben ser evaluados son:

a) la calidad de vida y bienestar: al reducir la contaminación del agua, se mejora el entorno general y se crea un ambiente más limpio y saludable para vivir. Esto tiene un impacto positivo en el bienestar y la calidad de vida de los residentes.

b) salud pública: el tratamiento adecuado de las aguas residuales mejora la calidad del agua y reduce la exposición a enfermedades transmitidas por el agua, lo que beneficia directamente la salud de la población, esto es especialmente importante en áreas rurales donde el acceso a servicios de salud puede ser limitado, este impacto se dará en la calidad del aire, mejorando el bienestar de toda la comunidad.

c) desarrollo económico: la planta de tratamiento de aguas residuales, puede impulsar el desarrollo económico de la región al atraer inversiones y nuevas empresas que soliciten instalarse en el municipio, creando oportunidades de empleo durante la operación de la planta.

d) involucramiento de toda la comunidad: la PTAR puede generar iniciativas para involucrar a toda la comunidad en la toma de decisiones y viceversa, de donde pueden derivar programas de educación y sensibilización sobre la importancia del tratamiento de las aguas residuales.

e) Educación y concientización: Aumento de la conciencia pública sobre la importancia de la gestión de aguas residuales y los beneficios de la reutilización del agua.

Referencias

- Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo, AECID. (2021). *Metodologías para la estimación de costos de tratamiento de aguas residuales en la planificación*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). <https://doi.org/https://cpage.mpr.gob.es/>
- Alves Felca, A., Mambeli Barros, R., Tiago Filho, G., Silva dos Santos, I., & Martuscelli Ribeiro, E. (2018). Análisis del biogás producido por la digestión anaeróbica de lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales del Sur de Minas Gerais, Brasil como fuente potencial de energía. *Sustainable Cities and Society*, 68. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.04.035>
- Archundia, D., Boithias, .., Duwig, C., Morel, M., Flores, G., & Martins, J. (2018). Environmental fate and ecotoxicological risk of the antibiotic sulfamethoxazole across the Katari catchment (Bolivian Altiplano). *Science of The Total Environment*, 622-623(0048-9697), 1046-1055. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.026>
- Contraloría General del Estado, E. P. (2014). *Informe de auditoría sobre el desempeño ambiental respecto de la contaminación hídrica en la cuenca del río Katari y la bahía de Cohana*. La Paz, Bolivia. Informe de Auditoría Ambiental.
- Gobierno Autónomo Municipal de Viacha, GAMV. (2017). Plan Territorial de Desarrollo Integral.
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua, MMAyA. (2021). *Plan Director de la Cuenca Katari y su Estrategia de Recuperación Integral de la cuenca y del lago menor del Titicaca*. La Paz, Bolivia.
- Molina, L. (2017). Contaminación de la Bahía de Cohana, Lago Titicaca (Bolivia): desafíos y oportunidades para promover su recuperación. *Ecología en Bolivia*, 2(1605-2528), 65 - 76.
- Ontiveros Mollinedo, M. (2014). *La economía del cambio climático en Bolivia: Impactos en los recursos hídricos*. Banco Interamericano de Desarrollo; CEPAL; Naciones Unidas.
- Ruiz, S. G. I. (2008). Retos y perspectivas de la gobernanza del agua y gestión integral de recursos hídricos en Bolivia. *European Review of Latin American and Caribbean Studies* 85(0924-0608), 41 - 59. <https://doi.org/10.18352/erlacs.9644>
- Saravia Matus, S., Gil Sevilla, M., Fernández, D., Montañez, A., Blanco, E., Nranjo, L., . . . Sarmanto, N. (2022). Recursos Naturales y Desarrollo - CEPAL. Oportunidades de la economía circular en el tratamiento de aguas residuales en América Latina y el Caribe. Santiago, Chile: CEPAL, Naciones Unidas. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/48491>