



FACULTAD DE CIENCIAS Y
TECNOLOGÍA
IICyT INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN



CIENCIA Y TECNOLOGÍA

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN - FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA - UMSS

Vol.17 Núm.1
2025



Cochabamba - Bolivia

Universidad Mayor de San Simón
Facultad de Ciencias y Tecnología
Instituto de Investigación

Revista Ciencia y Tecnología, Vol. 17 Núm. 1, 2025
de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Mayor
de San Simón.

La Revista Ciencia y Tecnología es una publicación que busca incentivar el diálogo entre la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Mayor de San Simón y los sectores de la sociedad involucrados en aspectos de desarrollo científico y tecnológico.

Diseño de portada

M.Sc. Aidee Vargas Colque
Lic. Daniela Andrea Mareño Rocha
Univ. Harold Caleb Gonzales Lopez
Univ. Marcelo Rene Rodriguez Ramirez

Unidad de Limnología y Recursos Acuáticos
Portada: M.Sc. Dylían Castellón, exdirectora (ULRA), junto a personal de investigación durante la colecta de muestras en el río Ichilo, (izq.). La especie *Serrasalmus castellone*, descrita en homenaje a su destacada trayectoria científica, (der.).
Contraportada: Personal y equipos de trabajo

Contactos

📍 Calle Sucre frente Parque de la Torre
☎ 4231765
📠 591-4541781
✉ cyt@fcyt.umss.edu.bo
📘 Revista Ciencia y Tecnología - UMSS
🌐 cienciaytecnologia.umss.edu.bo

Los artículos de la presente revista son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Queda prohibida cualquier forma de reproducción distribución, comunicación pública y transformación de esta obra que no cuente previamente con autorización de los titulares de propiedad intelectual.

Revista
**CIENCIA Y
TECNOLOGÍA**

Vol. 17 Núm. 1

Difundiendo conocimiento con excelencia





CONSEJO DIRECTIVO

Julio Marcelo Torrejón Rocabado, Decano, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.

Javier Caballero Flores, Director Académico, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.

EDITOR RESPONSABLE

Aidee Vargas Colque, Docente, Unidad de Difusión, Instituto de Investigación, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.

EDITOR ASOCIADO

Joaquín Humberto Aquino Rocha, Docente investigador, Laboratorio de Resistencia de Materiales, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.

APOYO EDITORIAL

Daniela Andrea Mareño Rocha, Diseño y Diagramación.

Marcelo Rene Rodríguez Ramírez, Diseño y Diagramación.

COMITÉ EDITORIAL

Danny Cesar Rejas Alurralde, Docente investigador, Unidad de Limnología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.

Andrés Saul Gonzales Amaya, Director, Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.

Evelyn Cardozo Rocabado, Docente investigador, Centro Universitario de Investigación en Energía, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.

Carla Eloisa Fernández Espinoza, Docente investigador, Unidad de Limnología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.

Jerry Luis Solis Valdivia, Docente investigador, Centro de Biotecnología, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.

Juan Carlos Terrazas Vargas, Docente investigador, Departamento de Física, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.

Cinthia Carola Rojas Arnez, Docente investigador, Centro de Alimentos y Productos Naturales, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.

Rimer Mauricio Zurita Orellana, Docente, Departamento de Matemáticas, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.

Ingrid Vicky Trigo Rocha, Docente investigador, Centro Agroindustrial, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.

Eduardo J. Zambrana Montan, Docente, Departamento de Química y Alimentos, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.

Carla Gabriela Oporto Pereyra, Docente investigador, Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.



PARES REVISORES

Danny Cesar Rejas Alurralde, *Docente investigador, Unidad de Limnología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.*

Victor Hugo Miranda Challapa, *Docente investigador, Laboratorio de Pavimentos y Asfaltos, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.*

Carla Eloisa Fernández Espinoza, *Docente investigador, Unidad de Limnología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.*

Jahel Sarvia Ledezma Perez, *Docente investigador, Laboratorio de Pavimentos y Asfaltos, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.*

Luis Fernando Pérez Mercado, *Docente investigador, Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.*

Joaquín Humberto Aquino Rocha, *Docente investigador, Laboratorio de Resistencia de Materiales, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.*

Jaime Ayllon Acosta, *Jefe, Departamento de Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.*

Vanesa Castro Alba, *Docente investigador, Centro de Alimentos y Productos Naturales, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.*

Yony Montoya Burgos, *Director, Carrera de Ingeniería de Sistemas, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.*

Cinthia Carola Rojas Arnez, *Docente investigador, Centro de Alimentos y Productos Naturales, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.*

María Raquel Antezana Gómez, *Docente investigador, Centro de Alimentos y Productos Naturales, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.*

Henry Antezana Fernández, *Docente investigador, Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.*

Luis Mauricio Salinas Pereira, *Docente, Departamento de Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.*

Jhonny Villarroel Schneider, *Docente investigador, Centro Universitario de Investigación en Energía, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.*

Juanito Nogales, *Docente, Departamento de Electricidad, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.*

Vladimir Costas Jauregui, *Docente, Departamento de Informática, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.*

Richard López Fulguera, *Docente, Jala University, Honolulu, USA.*

Nahúm Gamalier Cayo Chileno, *Universidade Federal de Rio de Janeiro, Brasil*



Nota editorial

La Revista Ciencia y Tecnología, publicación de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Mayor de San Simón, presenta el Volumen 17 Número 1, consolidando su compromiso con la difusión del conocimiento científico y tecnológico en acceso abierto.

En esta edición se presentan aportes relevantes en distintas áreas. En la sección de artículos científicos se incluyen los trabajos: Efecto del humo de sílice en las propiedades frescas, físicas y mecánicas del hormigón laterítico, Guía práctica para la identificación de las pirañas de Bolivia (Characiformes: Serrasalminae) e Influencia de la incorporación de polvo de caucho reciclado en el desempeño de mezclas asfálticas por vía húmeda. La sección de artículos de revisión incorpora el estudio Sílice como recubridor de nanopartículas de oro para mejorar la biocompatibilidad. Por su parte, en artículos de divulgación se presenta: Aplicación del índice de calidad del agua (ICA) en el río “Fin de Arroyo” influenciado por una industria en Shinahota (Cochabamba, Bolivia).

Asimismo, este número incluye un espacio de reconocimiento titulado: El legado de una mujer en la educación de biólogos y ecólogos acuáticos de Bolivia: Dylán T. Castellón Reinaga (1954–2021), destacando su importante contribución a la formación científica en el país.

Agradecemos a autores, revisores, editores y colaboradores que hicieron posible esta publicación, aportando con su experiencia y dedicación al crecimiento de la comunidad científica.

Aidee Vargas Colque

Editora Responsable

Revista Ciencia y Tecnología
Facultad de Ciencias y Tecnología.



Contenido

Artículos científicos

Efecto del humo de sílice en las propiedades frescas, físicas y mecánicas del hormigón laterítico

Effect of silica fume on the fresh, physical and mechanical properties of lateritic concrete

Luis Daniel Flores Villanueva, Dianed Vasquez Aguilar, Magda Olivares Ferrufino, Romina Mendez Torrez, Joaquín Humberto Aquino Rocha 15 – 30

Guía práctica para la identificación de las pirañas de Bolivia (*Characiformes: Serrasalminidae*)

Practical identification guide to the piranhas of Bolivia (Characiformes: Serrasalminidae)

Fernando M. Carvajal-Vallejos, Selva Valeria. Montellano Abasto..... 31 - 53

Influencia de la incorporación de polvo de caucho reciclado en el desempeño de mezclas asfálticas por vía húmeda

Influence of recycled rubber powder incorporation on the performance of asphalt mixtures using the wet process

Filemón Mejía Blanco, Jahel Sarvia Ledezma Pérez, Víctor Hugo Miranda Challapa, Joaquín Humberto Aquino Rocha..... 54 - 65

Artículos de revisión

Sílice como recubridor de nanopartículas de oro para mejorar la biocompatibilidad

Silica as a coating for gold nanoparticles to improve biocompatibility

Gabriela Reyes Moreno, José Omar Arzabe Maure 69 - 80

Artículos de divulgación

Aplicación del índice de calidad del agua (ICA) en el río “Fin de Arroyo” influenciado por una industria en Shinahota (Cochabamba, Bolivia)

Application of the Water Quality Index (WQI) in the river “Fin de Arroyo” influenced by an industry in Shinahota (Cochabamba – Bolivia)

Mirtha Judith Rivero Lujan1, José Paul Zubieta Zubieta, Fernando N. Carvajal-Vallejos 83 - 92

Reconocimientos

El legado de una mujer en la educación de biólogos y ecólogos acuáticos de Bolivia: Dylán T. Castellón Reinaga (1954 - 2021)

Fernando N. Carvajal-Vallejo..... 95 - 96





Artículos

Científicos



Efecto del humo de sílice en las propiedades frescas, físicas y mecánicas del hormigón laterítico

Effect of silica fume on the fresh, physical and mechanical properties of lateritic concrete

Luis Daniel Flores Villanueva¹, Dianed Vasquez Aguilar², Magda Olivares Ferrufino³, Romina Mendez Torrez⁴ y Joaquin Humberto Aquino Rocha^{5,*}

*Correo de correspondencia: j.aquino@umss.edu.bo

Resumen

El objetivo de la presente investigación es evaluar el uso del humo de sílice (HS) en las propiedades en estado fresco y endurecido del hormigón laterítico. La metodología se basó en la producción de hormigón con 2.5 %, 5.0 % y 7.5 % de HS en reemplazo del cemento Portland, además de emplear 100 % de agregado grueso laterítico. Se utilizó el cono de Abrams para evaluar la condición fresca (asentamiento). A los 7 y 28 días de curado, se evaluaron la resistencia a la compresión, las propiedades físicas (absorción, densidad e índice de vacíos) y la velocidad del pulso ultrasónico (VPU). Los resultados indican que la resistencia a la compresión aumenta cuando el contenido de HS incrementa, principalmente a 7.5 % de sustitución, pero la trabajabilidad del hormigón disminuye. Por otro lado, se observó una disminución en la absorción de agua y aumento en la densidad, lo que sugiere un hormigón más compacto. Por otro lado, la VPU indica una mayor homogeneidad interna en las mezclas con HS, confirmando los resultados mecánicos y físicos. La sustitución entre 5.0 % y 7.5 % del cemento Portland por HS mejora el desempeño del hormigón laterítico, presentando una alternativa técnicamente viable y sostenible, especialmente adecuada para construcciones en zonas tropicales, donde se tiene presencia de material laterítico.

Palabras clave: asentamiento, propiedades mecánicas, propiedades físicas, velocidad de pulso ultrasónico.

Abstract

The objective of this study is to evaluate the use of silica fume (SF) on the fresh and hardened properties of lateritic concrete. The methodology involved producing concrete mixes with 2.5%, 5.0%, and 7.5% SF as a partial replacement for Portland cement, using 100% lateritic coarse aggregate. The slump test (Abrams cone) was employed to assess the fresh-state condition. After 7 and 28 days of curing, compressive strength, physical properties (water absorption, density, and void index), and ultrasonic pulse velocity (UPV) were evaluated. The results show that compressive strength increases with the SF content, particularly at 7.5% replacement, although the workability of the concrete decreases. In contrast, a reduction in water absorption and an increase in density were observed, indicating a more compact concrete. Furthermore, the UPV results reveal greater internal homogeneity in SF-containing mixes, supporting the mechanical and physical findings. Replacing 5.0%–7.5% of Portland cement with SF enhances the performance of lateritic concrete, offering a technically viable and sustainable alternative, especially suitable for construction in tropical regions where lateritic materials are abundant.

Keywords: slump, mechanical properties, physical properties, ultrasonic pulse velocity.

¹ Laboratorio de Resistencia de Materiales, Departamento de Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0005-6965-4154>

² Laboratorio de Resistencia de Materiales, Departamento de Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0000-0144-1084>

³ Laboratorio de Resistencia de Materiales, Departamento de Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0002-2879-0748>

⁴ Laboratorio de Resistencia de Materiales, Departamento de Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0000-0003-0963-1362>

⁵ Laboratorio de Resistencia de Materiales, Departamento de Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0000-0002-3383-6379>

1. Introducción

El hormigón es uno de los materiales más empleados en la industria de la construcción civil, debido a su versatilidad, durabilidad y resistencia. Sin embargo, la producción del hormigón requiere un consumo significativo de energía y recursos naturales (Ukpata et al., 2024; Manan et al., 2025). Por un lado, el cemento Portland, uno de los principales constituyentes del hormigón, genera grandes cantidades dióxido de carbono (CO_2) durante su producción, se estima una emisión 842 kg de CO_2 por tonelada de clinker (Environment, 2018). Además, este proceso requiere un uso intensivo de materias primas no renovables, temperaturas altas y un alto consumo de energía (Rocha et al., 2022). Por otro lado, para producir hormigón se necesita una gran cantidad de agregados naturales, como la grava y la arena. La extracción excesiva de estos materiales produce efectos negativos en el medio ambiente, como la contaminación de fuentes hídricas, la degradación del suelo y la modificación de los ecosistemas locales (Watari et al., 2023; Vijerathne et al., 2024).

En respuesta a los impactos ambientales del hormigón convencional, numerosos estudios han explorado alternativas para sustituir, total o parcialmente, sus materiales constituyentes. En el caso del cemento Portland, una de las líneas de investigación más destacadas ha sido el uso de materiales cementantes suplementarios (*Supplementary Cementitious Materials*, SCMs), como la ceniza volante, la escoria de alto horno y el humo de sílice (HS), además de otros subproductos industriales y agroindustriales (Juenger et al., 2019; Snellings et al., 2023). Entre estos materiales, el HS ha recibido especial atención por sus propiedades físicas y químicas, que pueden mejorar considerablemente el desempeño del hormigón (Alhajiri & Akhtar, 2023; Hamada et al., 2023). Este subproducto, generado en la fabricación de silicio metálico y ferroaleaciones, se utiliza como adición mineral, ayudando a incrementar tanto la resistencia como la durabilidad del hormigón. Sus partículas ultrafinas permiten rellenar los vacíos entre los granos de cemento, compactando la microestructura y reduciendo la permeabilidad (Liu et al., 2025). Además, el HS reacciona de forma puzolánica con el hidróxido de calcio (CH) liberado durante la hidratación del cemento, produciendo geles adicionales de silicato de calcio hidratado (C–S–H). Esta reacción contribuye a una matriz más densa, mejora la cohesión del material y refuerza su resistencia frente a medios agresivos, como ambientes con cloruros o sulfatos (Meng et al., 2025).

Al mismo tiempo, también se han explorado alternativas para reemplazar parcial o totalmente los agregados convencionales en el hormigón. Entre estas, los residuos de construcción y demolición (RCD) han sido ampliamente estudiados como posibles sustitutos (Reis et al., 2021; Faniño et al., 2023). Sin embargo, en los últimos años ha ganado relevancia el uso de agregados de origen laterítico, especialmente en regiones tropicales donde este tipo de material es abundante (Yaragal et al., 2019; Cruz et al., 2022). El aprovechamiento de los agregados lateríticos no solo permite valorizar un recurso local, sino que también puede contribuir a disminuir el impacto ambiental asociado al transporte de materiales y a la explotación de las canteras tradicionales (Ferrufino et al., 2022). Estos agregados se caracterizan por tener una estructura porosa, baja densidad relativa y un alto contenido de óxidos de hierro y aluminio, lo que puede influir directamente en las propiedades físicas y mecánicas del hormigón (Naik & Marathe, 2025). Aunque presentan ciertas desventajas frente a los agregados silíceos o graníticos, como mayor absorción de agua y menor resistencia al desgaste, su amplia disponibilidad, bajo costo y buena compatibilidad con matrices cementicias los convierten en una opción viable para el desarrollo de materiales sostenibles en zonas tropicales (Muthusamy et al., 2015; Raja & Vijayan, 2020).

El uso tanto de HS como de agregados lateríticos ha demostrado ser una alternativa factible, desde el punto de vista técnico y ambiental, para la producción de hormigones más sostenibles (Yaragal et al., 2019; Alhajiri & Akhtar, 2023). No obstante, son pocos estudios los que han explorado la combinación de ambos materiales en una misma mezcla. La mayoría de las investigaciones sobre hormigón con agregados lateríticos utilizan exclusivamente

cemento Portland, sin considerar la incorporación de SCMs, que podrían contribuir a reducir el impacto ambiental (Knight et al., 2023). En este contexto, el presente trabajo tiene por objetivo evaluar la influencia del HS en las propiedades en estado fresco y endurecido del hormigón elaborado con agregados lateríticos, siguiendo las tendencias actuales de sostenibilidad en la construcción civil (Corrales et al., 2025). Para esto, se diseñaron mezclas en las que el cemento fue parcialmente reemplazado por HS en proporciones de hasta 7.5 %, empleando agregados gruesos de origen laterítico. Se analizaron propiedades en estado fresco mediante el ensayo de asentamiento, así como la resistencia a la compresión a 7 y 28 días. También se midieron características físicas como la absorción de agua, la densidad y el porcentaje de vacíos. Además, se aplicó el ensayo de velocidad de pulso ultrasónico (VPU), como indicador adicional de la calidad y homogeneidad interna del material. Este estudio propone la combinación de HS y agregados lateríticos, ofreciendo una alternativa constructiva más sostenible, especialmente adaptada a contextos tropicales donde estos materiales están disponibles.

2. Material y métodos

Materiales

Se empleó un cemento Portland tipo IP, modificado con puzolana, conforme a la norma ASTM C595 (ASTM, 2021a). Este cemento es comercializado en la ciudad de Cochabamba, Bolivia. En la Tabla 1 se presentan las características químicas, físicas y mecánicas del cemento utilizado.

Tabla 1

Características del cemento utilizado

	Característica	Unidad	NB-011	Cemento IP
Química	CaO	%		52.49
	SiO ₂	%		34.79
	Al ₂ O ₃	%		6.30
	Fe ₂ O ₃	%		3.12
	MgO	%	≤6	4.75
	K ₂ O	%		1.11
	Na ₂ O	%		0.25
	SO ₃	%	≤4	2.55
	Pérdida por calcinación	%	<7	2.38
	RI	%	≤35	15.82
Física y Mecánica	Superficie específica	cm ² /g	≥2800	4710
	Residuo T325	%		8.30
	Densidad real	g/cm ³		2.85
	Densidad aparente	g/cm ³		1.03
	Tiempo de fraguado inicial	Hr	≥0.75	2.84
	Tiempo de fraguado final	Hr	≤7	5.02
	Expansión Le Chatelier	mm	≤8	0.44
	Resistencia a la compresión (3 días)	MPa	≥10	22.69
	Resistencia a la compresión (7 días)	MPa	>17	29.82
	Resistencia a la compresión (28 días)	MPa	≥30	38.20

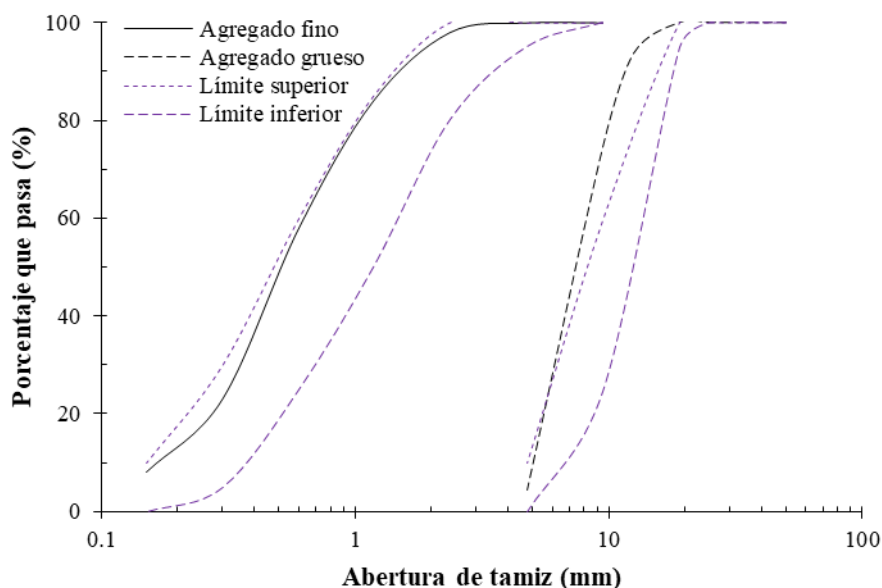
Fuente: Proporcionado por el fabricante.

El HS utilizado en esta investigación fue adquirido comercialmente en la ciudad de Cochabamba, Bolivia, como un aditivo mineral en polvo basado en la tecnología de microsílíce. Según la información proporcionada por el fabricante, el material cumple con la norma ASTM C1240 (ASTM, 2020) y está constituido por partículas finas y

altamente reactivas de dióxido de sílice (SiO_2), aproximadamente de $0.1 \mu\text{m}$. Además, no contiene cloruros ni otras sustancias perjudiciales para el hormigón. La densidad del material se encuentra en el rango de 2.10 a 2.25 kg/dm^3 . El agregado grueso laterítico fue extraído a aproximadamente 15 kilómetros al sur de la ciudad de Riberalta, Bolivia, específicamente a dos kilómetros hacia el este de la carretera que va hacia Rurrenabaque. El proceso de extracción del agregado laterítico fue realizado siguiendo los lineamientos de la ASTM D75 (ASTM, 2019). La norma ASTM C136 (ASTM, 2015) fue utilizada para realizar el análisis granulométrico de la grava y la arena (Figura 1). Se determinaron tanto el peso específico como la absorción de los agregados gruesos y finos conforme a las normas ASTM C127 (ASTM, 2024) y ASTM C128 (ASTM, 2022), respectivamente. El agregado grueso laterítico presentó un peso específico de 2.60 g/cm^3 y una absorción de 6.13% , mientras que la arena presentó un peso específico de 2.56 g/cm^3 y una absorción de 1.72% .

Figura 1

Curva granulométrica para el agregado grueso y fino



Definición de mezclas

A fin de evaluar el impacto de la aplicación de HS en el hormigón laterítico, se reemplazó parcialmente el cemento Portland por HS hasta 7.5% , siguiendo las sugerencias de la literatura (Akarsh et al., 2021; Liu et al., 2020; Azizi & Samimi, 2025). Se prepararon combinaciones con 0% de HS (referencia), 2.5% de HS, 5.0% de HS y 7.5% de HS. Se diseñó el hormigón utilizando la metodología IPT/ESUSP (Helene & Terzian, 1993), con una resistencia de diseño de 35 MPa a los 28 días. La elección de la metodología IPT/ESUSP (Helene & Terzian, 1993) se fundamenta en el empleo del agregado laterítico, que tiene una capacidad de absorción más elevada que un agregado convencional. Asimismo, el agregado grueso presenta una granulometría distinta a los límites recomendados por a la norma ASTM C33 (ASTM, 2018). La Tabla 2 presenta el detalle de los materiales utilizados por mezcla controlada.

Tabla 2*Cantidad de materiales por mezcla (para 1 m³)*

Mezclas	Cemento Portland (kg)	HS (kg)	Agregado fino (kg)	Agregado grueso (kg)	Agua (litros)
Referencia	533.33	-	766.67	1100.00	224.00
2.5 % HS	520.00	13.33	766.67	1100.00	224.00
5.0 % HS	506.66	26.67	766.67	1100.00	224.00
7.5 % HS	493.33	40.00	766.67	1100.00	224.00

El hormigón fue preparado en una mezcladora mecánica, utilizando moldes cilíndricos de PVC con dimensiones de 10 × 20 cm. Las probetas fueron conformadas en tres capas, aplicando 25 golpes de compactación por capa. Los cuerpos de prueba se mantuvieron en los moldes durante 24 horas, posteriormente fueron desmoldados y colocados en curado húmedo hasta la edad de ensayo.

Métodos

La trabajabilidad del hormigón se determinó mediante el ensayo del cono de Abrams, de acuerdo con la norma ASTM C143 (ASTM, 2012). Este ensayo consiste en llenar un molde troncocónico en tres capas de igual espesor, aplicando 25 golpes de compactación por capa con una varilla metálica estándar. Posteriormente, se retira el molde verticalmente y se mide el asentamiento (*slump*) del hormigón fresco. Para cada mezcla se realizaron tres mediciones, a partir de las cuales se calculó el promedio y la desviación estándar.

La resistencia a la compresión fue determinada conforme a la norma ASTM C39 (ASTM, 2021b), que establece el procedimiento para calcular la resistencia a la compresión en muestras de hormigón cilíndricas. Las pruebas se llevaron a cabo con una prensa hidráulica Controls Automax 50-C20M82 (Figura 2), con una capacidad máxima de 3000 kN, a las edades de 7 y 28 días. Para el cálculo de la media y la desviación estándar se consideraron de tres cuerpos de prueba.

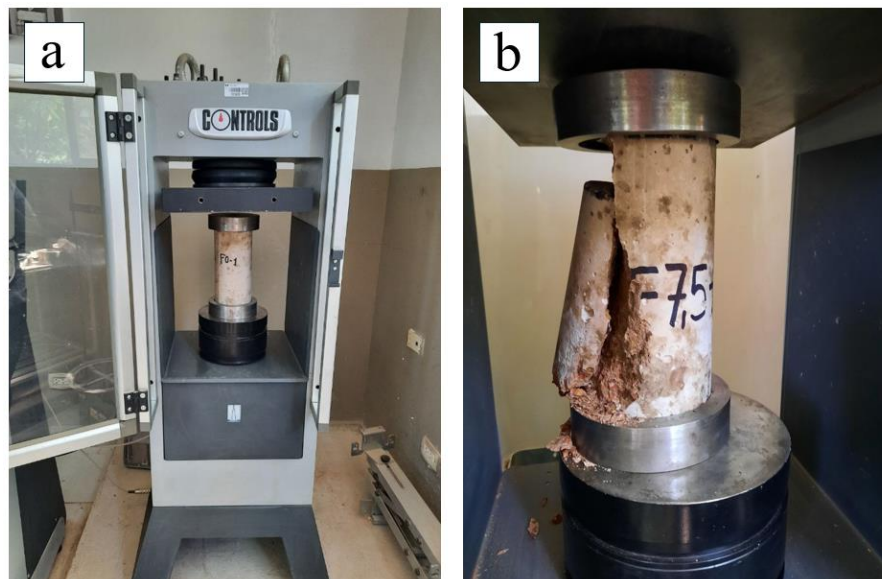
Se determinaron las propiedades físicas de absorción, densidad e índice de vacíos mediante la norma ASTM C642 (ASTM, 2021c) a los 7 y 28 días. Se utilizaron tres muestras por mezcla y edad para el cálculo de la media y la desviación estándar.

Para el análisis de la VPU se utilizó el equipo Controls 58-E4900, ensayando los cuerpos de prueba que posteriormente fueron utilizados para el ensayo de resistencia a la compresión, a las edades de 7 y 28 días. Se hicieron tres mediciones para cada cilindro, obteniéndose el promedio general y la desviación estándar de tres cilindros por mezcla y edad.

Por último, se analizaron estadísticamente todos los resultados experimentales, utilizando análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de Tukey HSD con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

Figura 2

(a) Prensa Controls Automax 50-C20M82; (b) rotura de una muestra cilíndrica



3. Resultados y Discusión

Asentamiento

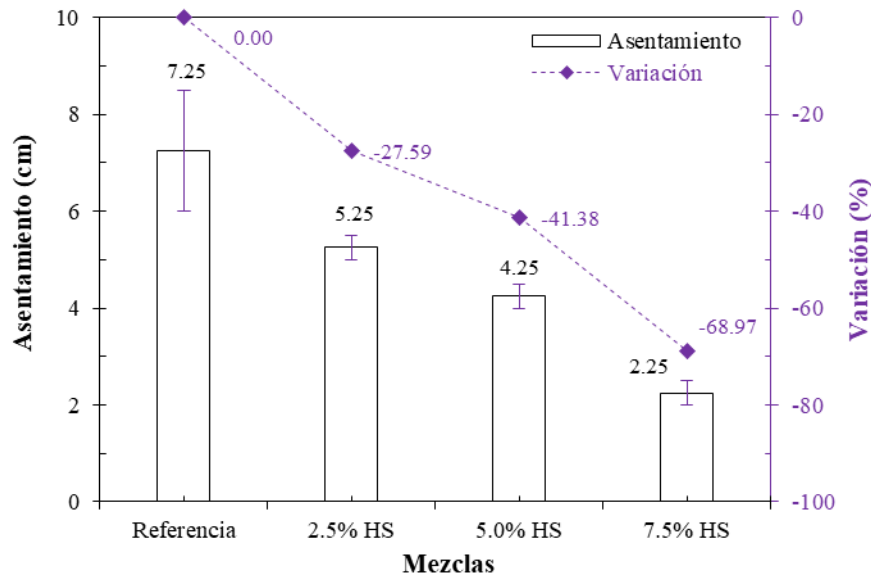
La Figura 3 presenta la variación del asentamiento del hormigón laterítico de acuerdo con el contenido de HS. Cuando la cantidad de HS aumenta, se observa una tendencia a la disminución de la trabajabilidad, con un descenso máximo del 68.97 % en la mezcla con 7.5 % de HS respecto a la referencia. Con ANOVA se verifica que hay diferencias estadísticamente significativas entre los grupos ($p = 0.0253$). No obstante, la prueba de Tukey HSD indicó que no hay distinciones significativas entre las mezclas con 2.5 % ($p = 0.2818$) y 5.0 % ($p = 0.1032$) de HS en comparación con la referencia. Por tanto, los resultados muestran un efecto significativo en la disminución de la trabajabilidad a partir del 7.5 % de sustitución de cemento Portland por HS.

La reducción del asentamiento se debe principalmente a la elevada finura y a la mayor área superficial específica del HS en comparación con el cemento Portland, lo que incrementa la demanda de agua en la mezcla (Alhajiri & Akhtar, 2023). En este sentido, el HS incrementa la cohesión interna y disminuye el agua libre disponible; esto puede beneficiar, por una parte, la densificación del hormigón; pero, por otra parte, producir mezclas menos manejables (Escobedo Villarruel et al., 2023). Asimismo, el HS tiene la capacidad de actuar como material de relleno en la matriz cementicia, lo que optimiza la homogeneidad y disminuye la segregación; no obstante, esta acción física impacta directamente en la trabajabilidad (Hamada et al., 2023). Además, la literatura confirma que, a medida que aumenta el contenido de HS en los compuestos cementicios, la trabajabilidad tiende a bajar (Vijayan et al., 2023). Por ejemplo, Habibi et al. (2021) informaron que el asentamiento disminuyó de 85 a 65 mm cuando se agregó un 6 % de HS. Por otra parte, Banar et al. (2022) reportaron pérdidas similares con un 8 % de sustitución de cemento Portland, resultados que son consistentes con los resultados del presente estudio. Es recomendable el uso de aditivos plastificantes o superplastificantes para minimizar la disminución de trabajabilidad sin perjudicar la

relación efectiva entre el agua y el cemento. Por ejemplo, Ferrufino et al. (2022) evidenciaron que en el hormigón con agregados lateríticos se pueden emplear superplastificantes para incrementar la trabajabilidad sin perjudicar las propiedades mecánicas.

Figura 3

Asentamiento del hormigón laterítico con SF



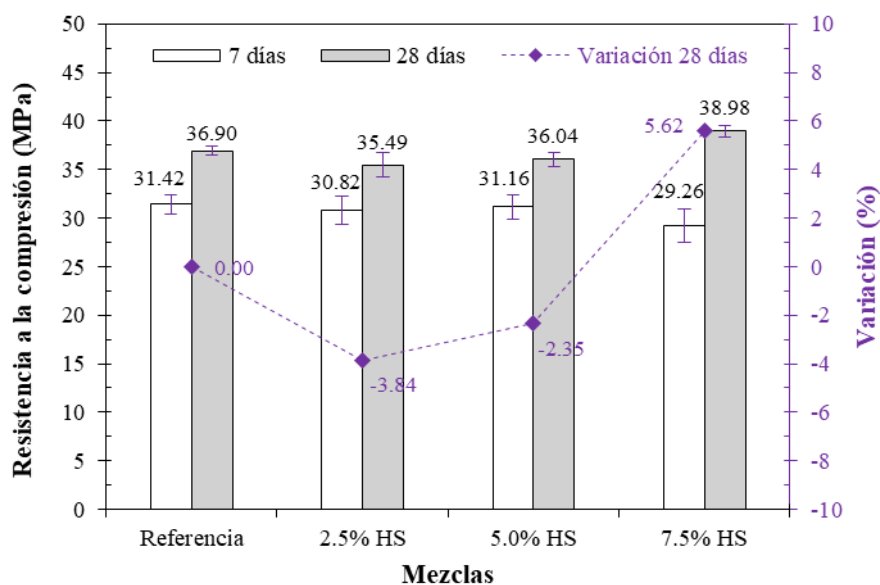
Resistencia a la compresión

La Figura 4 muestra los resultados de la resistencia a la compresión del hormigón laterítico con HS añadido, a las edades de 7 y 28 días. No se aprecia una tendencia clara acerca del uso de HS sobre la resistencia a la compresión a los 7 días de curado. ANOVA indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las mezclas, una vez que $p = 0.4488 (> \alpha)$. A los 28 días se puede confirmar que la dosificación conforme al método IPT/ESUSP (Helene & Terzian, 1993) fue adecuada, pues la mezcla de referencia logró una resistencia de 36.90 MPa, cifra que supera la resistencia de diseño (35 MPa). La presencia de diferencias estadísticamente significativas entre los grupos fue confirmada por ANOVA ($p = 0.0120 < \alpha$). La prueba de Tukey HSD, que permite la comparación múltiple, indicó diferencias entre las mezclas con 2.5 % y 7.5 % de HS ($p = 0.0112$) y las mezclas con 5.0 % y 7.5 % de HS ($p = 0.0279$). Esto indica que, a partir del 7.5 % de sustitución, la influencia del HS en la resistencia a la compresión se vuelve más significativa en edades avanzadas.

El incremento de resistencia a la compresión con la sustitución de cemento Portland por HS se asocia principalmente a dos mecanismos que se complementan. En primer lugar, se puede mencionar el efecto de relleno, donde las partículas ultrafinas de HS generan una matriz más compacta y homogénea (Ji et al., 2024). En segundo lugar, la reacción puzolánica secundaria entre la sílice amorfa del HS y el CH resultante de la hidratación del cemento, produciendo gel adicional de C–S–H, lo cual puede explicar el aumento en la resistencia mecánica (Xi et al., 2022; Yavuz et al., 2024). Sin embargo, este proceso se da principalmente hasta los 28 días, una vez que a 7 días no existían diferencias entre las mezclas con HS y la referencia.

Figura 4

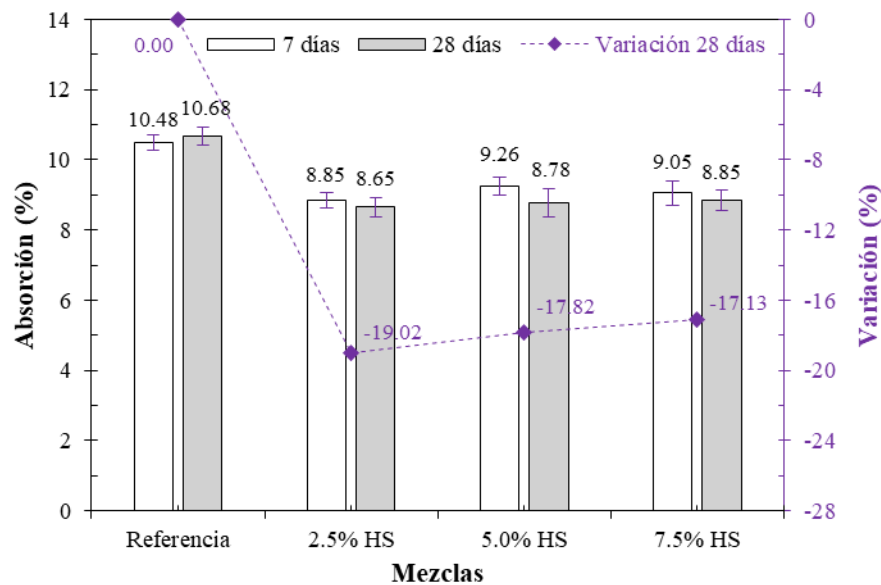
Resistencia a la compresión del hormigón laterítico con HS



La reacción puzolánica del HS y su efecto en el incremento de la resistencia a la compresión han sido ampliamente documentados en la literatura. Generalmente, bajos porcentajes de sustitución de cemento Portland por HS resultan efectivos. Por ejemplo, Liu et al. (2020) y Azizi & Samimi (2025) recomendaron que el contenido de HS fuera del 5.0 % y 10.0 %, respectivamente. En este estudio, se observó un incremento en la resistencia a la compresión cuando se utilizó 7.5 % de HS, comparable con Akarsh et al. (2021), quienes reportaron que el uso de 7 % de HS es efectivo, pues superó a la mezcla de referencia. En particular, la incorporación de 7.5 % de HS optimiza la resistencia del hormigón laterítico, validando su aplicación como SCM en regiones tropicales donde predominan los agregados lateríticos (Cruz et al., 2022; Ukpata et al., 2024).

Propiedades físicas

La Figura 5 muestra la variación de la absorción de agua del hormigón laterítico con diferentes contenidos de HS a 7 y 28 días de curado. En general, se observa una disminución progresiva de la absorción conforme aumenta el contenido de HS. A los 7 días, la mezcla de referencia presentó la mayor absorción (10.48 %), en comparación con las mezclas con HS. A través de ANOVA, se corroboró que había diferencias significativas entre las medias ($p = 0.0056 < \alpha$). De igual manera, la prueba de Tukey HSD demostró que la absorción de agua disminuye significativamente con la adición de HS, con valores de $p = 0.0048$, $p = 0.0215$ y $p = 0.0098$ para 2.5 %, 5.0 % y 7.5 % de HS, respectivamente. La misma tendencia se mantuvo a los 28 días, con variaciones relevantes entre las mezclas ($p = 0.011 < \alpha$). La prueba de Tukey HSD confirmó que todas las mezclas con HS presentaron una absorción significativamente menor que la de referencia, demostrando que la incorporación de HS reduce la absorción de agua del hormigón laterítico.

Figura 5*Absorción del hormigón laterítico con HS*

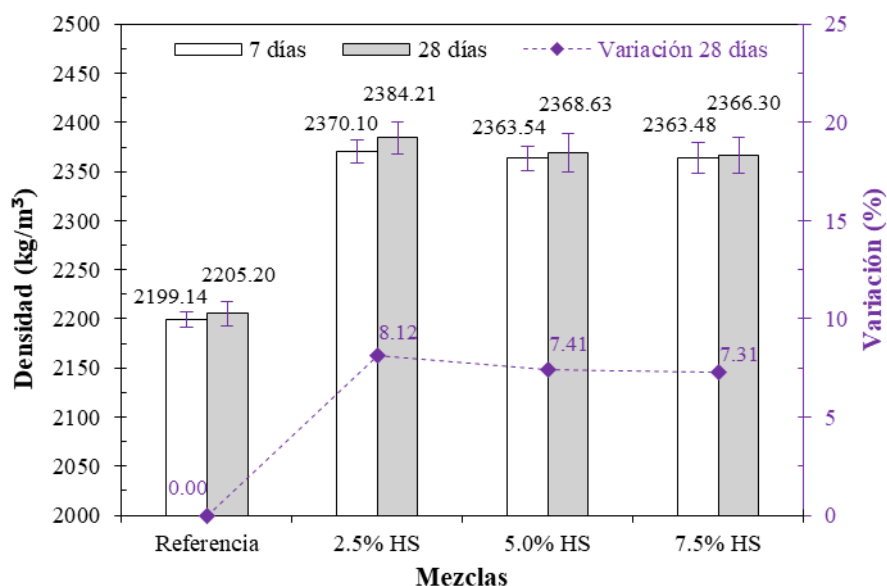
La disminución de la absorción de agua puede atribuirse principalmente al efecto de refinamiento de poros inducido por la incorporación de HS, resultado tanto del efecto de relleno como de la reacción puzolánica. La matriz cementicia se vuelve más compacta y menos permeable gracias a las partículas ultrafinas del HS y al gel C-S-H adicional, relleno de los poros y los espacios capilares (Mohan & Mini, 2018; Siddique, 2011). Los resultados estadísticos confirmaron que este proceso se intensifica con la edad, a medida que avanza la hidratación y la reacción puzolánica. Sin embargo, los valores de absorción son más altos que los hormigones convencionales. Esto se debe a la gran porosidad y capacidad de absorción de los agregados lateríticos utilizados (Fanijo et al., 2020). En este sentido, Muthusamy et al. (2015) señalaron que los hormigones con un 65 % de agregados lateríticos absorben más agua, y Yaragal et al. (2019) también informaron que el empleo del 100 % de agregado fino laterítico produce valores de absorción entre el 6 % y el 10 %. Más recientemente, Ukpata et al. (2024) evidenciaron que la absorción se eleva a medida que el porcentaje de agregado grueso laterítico crece, llegando a 4.75 % para contenidos del 25 %.

La Figura 6 muestra los resultados de la densidad del hormigón laterítico después de 7 y 28 días de curado. En los dos casos, se nota un aumento de la densidad al añadir HS en comparación con el hormigón de referencia. A los 7 y 28 días, ANOVA permitió evidenciar diferencias estadísticamente significativas entre las mezclas ($p < \alpha$), con valores de $p = 2.10 \times 10^{-5}$ y $p = 5.30 \times 10^{-10}$, respectivamente. Estos resultados fueron corroborados por la prueba de Tukey HSD, revelando que la mezcla de referencia tuvo la densidad más baja en comparación con las mezclas con HS. Los valores de p , a los 7 días, fueron de 2.9×10^{-5} , 3.7×10^{-5} y 3.7×10^{-5} para proporciones de 2.5 %, 5.0 % y 7.5 % de HS respectivamente. Estos resultados evidencian que la densidad del hormigón laterítico se eleva con el HS. Se observó la misma conducta a los 28 días, con diferencias notables entre el compuesto de referencia y el uso de 2.5 % ($p = 7.4 \times 10^{-5}$), 5.0 % ($p = 0.0001$) y 7.5 % ($p = 0.0030$) de HS. Por tanto, la incorporación de HS favorece la densificación del hormigón laterítico, tanto a edades tempranas como avanzadas. El incremento de la densidad con la adición de HS se asocia al efecto de relleno y al consecuente refinamiento microestructural del hormigón (Liu et al., 2025). Las partículas ultrafinas del HS se alojan en los vacíos capilares de la pasta cementicia, reduciendo la

porosidad y aumentando la compacidad del material. De forma simultánea, la reacción puzolánica secundaria contribuye a ocupar los espacios previamente porosos y a reforzar la matriz (Verma et al., 2020; Hamada et al., 2023).

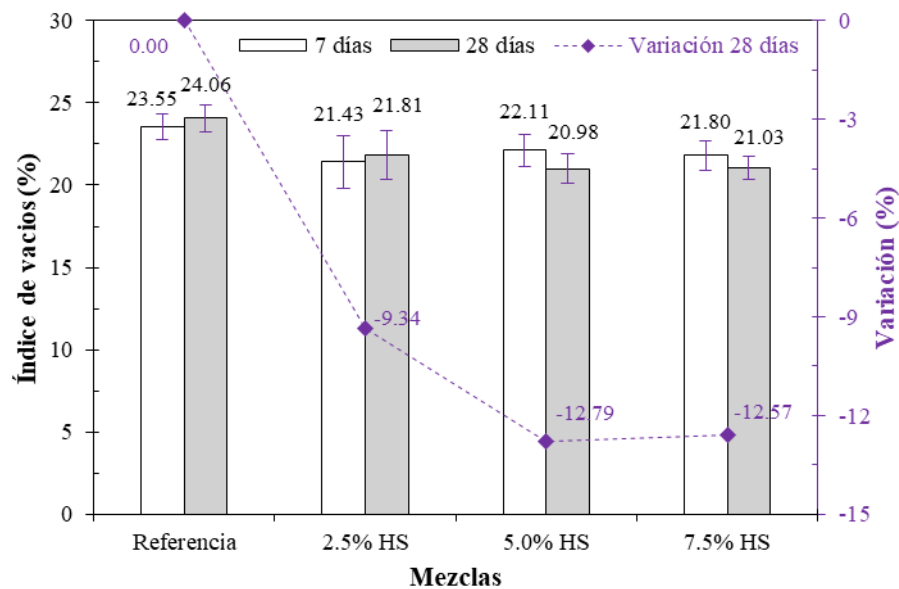
Figura 6

Densidad del hormigón laterítico con HS



La variación del índice de vacíos del hormigón laterítico a 7 y 28 días de curado se presenta en la Figura 7. En ambos casos, se puede distinguir que el índice de vacíos en las mezclas con HS es inferior al de la mezcla de referencia. En la mezcla de referencia, el índice de vacíos es más alto, 23.55 % y 24.06 % para 7 y 28 días de edad, respectivamente. Pese a que las mezclas con HS presentaron, en términos generales, valores más bajos, estas discrepancias no fueron estadísticamente significativas. Esto se debe a que ANOVA reportó valores de $p = 0.4646$ y $p = 0.0821$ para 7 y 28 días, respectivamente, ambos superando el nivel de significancia (α).

La ligera disminución del índice de vacíos observada con la incorporación de HS puede asociarse, primeramente, a la densificación de la matriz cementicia inducida por los mecanismos previamente descritos, principalmente el efecto de relleno de partículas finas y la formación adicional de gel C-S-H producto de la reacción puzolánica. No obstante, la ausencia de diferencias estadísticamente significativas indica que, para contenidos de HS iguales o inferiores al 7.5 %, el refinamiento de la porosidad no es lo suficientemente marcado como para reflejarse en el índice de vacíos del hormigón.

Figura 7*Índice de vacíos del hormigón laterítico con HS*

Este comportamiento puede atribuirse, a la naturaleza porosa de los agregados lateríticos utilizados, los cuales presentan una elevada capacidad de absorción de agua. La porosidad del agregado tiende a influenciar la respuesta del ensayo, atenuando el impacto del HS sobre la compactación total del material, aun cuando otras propiedades físicas y mecánicas, como la absorción de agua, la densidad aparente, la resistencia a la compresión y la VPU, evidencien mejoras con el incremento del contenido de HS.

Adicionalmente, debe considerarse que el ensayo de índice de vacíos basado en la norma ASTM C642 (ASTM, 2021c) cuantifica los vacíos accesibles al agua, por lo que puede no ser suficientemente sensible para detectar el refinamiento de poros a nivel de la pasta cementicia, particularmente asociado a la reducción de poros capilares finos y a la densificación de la microestructura inducida por el HS. En este sentido, la interpretación de los resultados del índice de vacíos puede considerarse preliminar y complementaria a otras propiedades físicas evaluadas en el presente estudio.

Resultados similares han sido reportados en la literatura, por ejemplo, Adil et al. (2020) observaron una reducción del índice de vacíos del 21.2 % al 18.8 % al incorporar un 5.0 % de HS como sustituto parcial del cemento Portland, mientras que Alhajiri & Akhtar (2023) señalaron que contenidos de HS de hasta el 10 % favorecen la mejora de propiedades físicas y de durabilidad del hormigón, principalmente debido al efecto de relleno y a la reacción puzolánica. En conjunto, los resultados que la incorporación muestran que el HS contribuye a la mejora del desempeño del hormigón; sin embargo, la confirmación directa del refinamiento de poros requeriría la aplicación de técnicas de caracterización microestructural específicas, como la microscopía electrónica de barrido (*Scanning Electron Microscopy, SEM*) y la porosimetría por intrusión de mercurio (*Mercury Intrusion Porosimetry, MIP*), las cuales se proponen como parte de estudios futuros.

La ligera disminución del índice de vacíos observada con la incorporación de HS puede asociarse, primeramente, a la densificación de la matriz cementicia inducida por los mecanismos previamente descritos, principalmente el efecto de relleno de partículas finas y la formación adicional de gel C-S-H producto de la reacción puzolánica. No

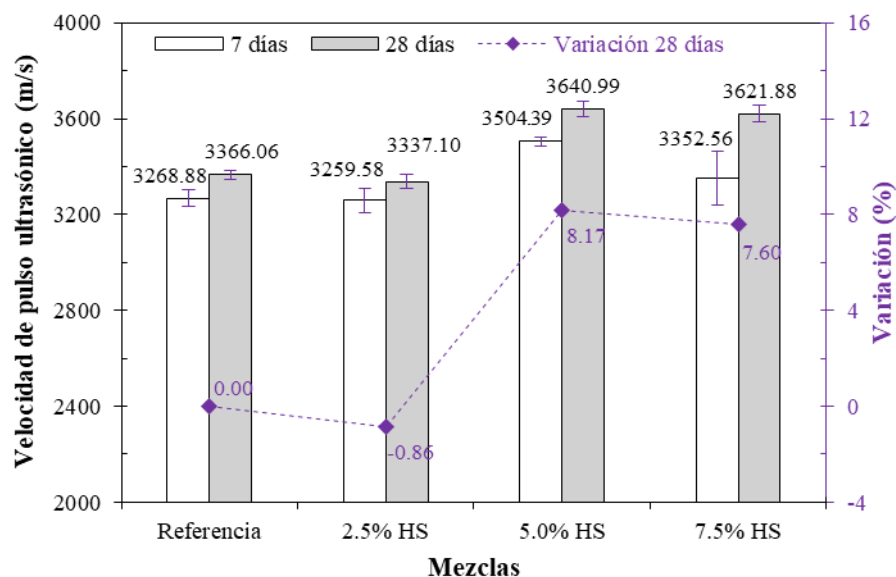
obstante, la ausencia de diferencias estadísticamente significativas indica que, para contenidos de HS iguales o inferiores al 7.5 %, el refinamiento de la porosidad no es lo suficientemente marcado como para reflejarse en el índice de vacíos del hormigón.

Velocidad de pulso ultrasónico

La VPU es un valor empleado para determinar la calidad y la homogeneidad interna del hormigón, una vez que se relaciona con el nivel de continuidad y compactación de la matriz (Saremi et al., 2023). La Figura 8 muestra los resultados de VPU para las edades de 7 y 28 días. Por lo general, se nota un aumento gradual de la VPU con el tiempo de curado y con la cantidad de HS, lo cual demostrando una mejora en la compacidad del material. En ambos casos, a los 7 y 28 días, ANOVA constató diferencias estadísticamente significativas ($p < \alpha$), con $p = 0.0171$ y $p = 8.61 \times 10^{-6}$, respectivamente. La prueba de Tukey HSD reveló una diferencia estadísticamente relevante entre la mezcla de referencia y la que contiene un 5.0 % de HS ($p = 0.0259$). A los siete días, la VPU no mostró grandes cambios entre la mezcla de referencia y las mezclas con HS. Las diferencias se volvieron más evidentes a los 28 días, pues la mezcla con un 2.5 % de HS ($p = 0.7710$) y la referencia mostraron similitud, mientras que las mezclas con un 5.0 % ($p = 7.41 \times 10^{-5}$) y un 7.5 % ($p = 0.0001$) de HS tuvieron diferencias significativas. Estos resultados demuestran que la adición de HS aumenta la rapidez con que se propaga el pulso ultrasónico, particularmente a 28 días, lo que indica una estructura interna de mayor densidad y homogeneidad.

Figura 8

VPU del hormigón laterítico con HS



Los resultados evidencian que la incorporación de 5.0 % de HS incrementa de manera significativa la VPU, especialmente a edades avanzadas, reflejando una estructura interna más densa y homogénea (Hasanzadeh & Shooshpasha, 2019). Este comportamiento está relacionado directamente con la disminución de la porosidad y el aumento de la densificación en la matriz cementicia, lo cual es consistente con los resultados sobre las propiedades físicas y de resistencia a la compresión. Una matriz más compacta propicia una propagación de las ondas

ultrasónicas más veloz, debido a que la rapidez de transmisión está determinada por la homogeneidad y rigidez del material (Hamid et al., 2021; Hong et al., 2021). Asimismo, el incremento progresivo de la VPU entre los 7 y 28 días refleja la evolución del proceso de hidratación y el desarrollo de las reacciones puzolánicas tardías del HS (Ahmad et al., 2022). Resultados similares fueron reportados por Ferrufino et al. (2022), quienes observaron un aumento de la VPU en hormigones con agregado laterítico modificados con aditivos superplastificantes, reportando un máximo valor de 3709 m/s, atribuido al aumento de la densificación interna y la reducción de la porosidad conectada. De manera análoga, las mezclas con 5.0 % y 7.5 % de HS en el presente estudio alcanzaron valores de VPU superiores a 3600 m/s, pudiéndose considerar como hormigones de buena calidad (Aquino Rocha et al., 2025), lo que confirma el efecto positivo del HS sobre la homogeneidad y cohesión del hormigón laterítico.

La sustitución parcial de cemento Portland por HS influye de manera integral en el comportamiento del hormigón laterítico, afectando tanto las propiedades en estado fresco como en estado endurecido. La trabajabilidad se redujo a medida que el contenido de HS aumentó, debido a que las partículas tienen una mayor finura y área superficial específica, lo cual hace que la mezcla necesite más agua y tenga mayor cohesión interna (Escobedo Villarruel et al., 2023). No obstante, esta disminución de fluidez fue contrarrestada por mejoras en la compactación, la resistencia mecánica y la calidad interna del material. Se observó una tendencia a la baja del índice de vacíos, un incremento en la densidad, una disminución de la absorción de agua y un aumento en la resistencia a la compresión y VPU, principalmente a 28 días de curado. En particular, el progreso de la VPU muestra una mayor uniformidad y continuidad interna, lo que la convierte en un indicador indirecto del nivel de densificación y de la calidad del hormigón laterítico modificado con HS (Hong et al., 2021). En resumen, los resultados corroboran que la aplicación de HS no solo mejora el rendimiento físico y mecánico del hormigón laterítico, sino que se presenta como una opción sostenible y viable para usos estructurales en áreas tropicales.

4. Conclusión

El impacto del HS como reemplazo parcial del cemento Portland en las características mecánicas, físicas y frescas del hormigón laterítico fue examinado en el presente estudio. A partir de los resultados experimentales se pueden llegar a las siguientes conclusiones:

- La trabajabilidad del hormigón laterítico disminuye con la inclusión de HS, con pérdidas considerables de asentamiento a partir del 7.5 %, debido a las propiedades físicas del HS, que aumentan tanto la demanda de agua en estado fresco como la cohesión interna.
- La resistencia a la compresión se incrementó de manera gradual con el contenido de HS, principalmente con la sustitución del 7.5 %. Este fenómeno se explica por el relleno físico de los poros y la reacción puzolánica secundaria, densificando la matriz cementicia.
- Se constató un aumento de la densidad del hormigón y una disminución en la absorción de agua con la incorporación de HS, lo que demuestra una mejora de la compactación del hormigón.
- A medida que el HS aumentó, la tendencia del índice de vacíos fue de disminución, aunque sin que existieran diferencias estadísticamente significativas, lo que puede ser explicado por la porosidad inherente de los agregados lateríticos.
- La VPU mostró una uniformidad interna más alta en el hormigón con un 5.0 % y un 7.5 % de HS, categorizando así el material como de buena calidad.
- El contenido ideal de HS es entre 5.0 % y 7.5 %. Este rango permite alcanzar un balance apropiado entre calidad interna, resistencia mecánica y densificación, demostrando el potencial del HS como un SCM para regiones tropicales.

Aunque los hallazgos obtenidos muestran la capacidad del HS como aditivo mineral para optimizar las propiedades físicas, mecánicas y no destructivas del hormigón con agregados lateríticos, el presente estudio se limitó a la evaluación del desempeño a edades tempranas, específicamente a 7 y 28 días. En este sentido, se recomienda que investigaciones futuras analicen el comportamiento del material a edades más avanzadas, considerando su evolución a largo plazo y su respuesta bajo condiciones de exposición agresiva, tales como ambientes con presencia de sulfatos, cloruros o ciclos de humectación–secado.

Adicionalmente, para una comprensión más integral del rendimiento del hormigón laterítico modificado con HS, se sugiere que estudios posteriores incorporen evaluaciones de durabilidad, análisis microestructurales que permitan confirmar el refinamiento de la porosidad de la matriz cementicia, así como análisis de ciclo de vida y estimaciones de costos. Estas líneas de investigación permitirán validar los mecanismos responsables de las mejoras observadas y evaluar la viabilidad técnica, ambiental y económica de su aplicación en el sector de la construcción.

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no tienen algún conflicto de interés.

5. Referencias bibliográficas

- Adil, G., Kevern, J. T., & Mann, D. (2020). Influence of silica fume on mechanical and durability of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 247, 118453.
- Ahmad, S., Al-Amoudi, O. S. B., Khan, S. M., & Maslehuddin, M. (2022). Effect of silica fume inclusion on the strength, shrinkage and durability characteristics of natural pozzolan-based cement concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01255.
- Akarsh, P. K., Marathe, S., & Bhat, A. K. (2021). Influence of graphene oxide on properties of concrete in the presence of silica fumes and M-sand. *Construction and Building Materials*, 268, 121093.
- Alhajiri, A. M., & Akhtar, M. N. (2023). Enhancing sustainability and economics of concrete production through silica fume: a systematic review. *Civil Engineering Journal*, 9(10), 2612-2629.
- Aquino Rocha, J. H., Murillo Borda, W., Herrera Rosas, M., & Cayo Chileno, N. G. (2025). Comparative Evaluation of Grids for the Detection of Internal Defects in Concrete Using Ultrasonic Pulse Velocity: Experimental Approach. *Journal of Structural Design and Construction Practice*, 30(4), 04025074.
- ASTM (2012). ASTM C143/C143M-12: Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. West Conshohocken, PA. ASTM International.
- ASTM (2015). ASTM C136-06: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. West Conshohocken, PA. ASTM International.
- ASTM (2018). ASTM C33/C33M-18: Standard Specification for Concrete Aggregates. West Conshohocken, PA. ASTM International.
- ASTM (2019). ASTM D75/D75M-19: Standard Practice for Sampling Aggregates. West Conshohocken, PA. ASTM International.
- ASTM (2020). ASTM C1240-20: Standard specification for silica fume used in cementitious mixtures. West Conshohocken, PA. ASTM International.
- ASTM (2021a). ASTM C595/C595M-21: Standard specification for blended hydraulic cements. West Conshohocken, PA. ASTM International.
- ASTM (2021b). ASTM C39/C39M-21: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. West Conshohocken, PA. ASTM International.
- ASTM (2021c). ASTM C642-21: Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. West Conshohocken, PA. ASTM International.
- ASTM (2022a). ASTM C128-22: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. West Conshohocken, PA. ASTM International.
- ASTM (2024). ASTM C127-24: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. West Conshohocken, PA. ASTM International.
- Azizi, M., & Samimi, K. (2025). Effect of silica fume on Self-compacting Earth Concrete: Compressive

- strength, durability and microstructural studies. *Construction and Building Materials*, 472, 140815.
- Banar, R., Dashti, P., Zolfagharnasab, A., Ramezaniapour, A. M., & Ramezaniapour, A. A. (2022). A comprehensive comparison between using silica fume in the forms of water slurry or blended cement in mortar/concrete. *Journal of Building Engineering*, 46, 103802.
- Corrales, H. N. C., Real, E. A. T., Llaves, M. C. M., Villarroel, J. G. P., & Rocha, J. H. A. (2025). Recycled and waste materials in construction in Bolivia: a systematic literature review. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 10(2), 108.
- Cruz, G. K. A., Neto, O. D. M. M., Arruda, S. M., Lucena, L. C. D. F. L., Ziegler, C. R., & da Silva, G. C. B. (2022). Influence of particle size selection methods on asphalt mixtures produced with lateritic aggregates. *Construction and Building Materials*, 314, 125201.
- Environment, U. N., Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and concrete Research*, 114, 2-26.
- Escobedo Villarruel, J. F., Rocha, J. H. A., & Cayo, N. G. (2023). Evaluación del uso de microsilíce como material cementicio suplementario (MCS) en el hormigón. En *CONPAT 2023: XVII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XIX Congreso de Control de Calidad en la Construcción* (Vol. 1). <https://doi.org/10.21041/CONPAT2023/V1CC4573>
- Fanijo, E. O., Kolawole, J. T., Babafemi, A. J., & Liu, J. (2023). A comprehensive review on the use of recycled concrete aggregate for pavement construction: Properties, performance, and sustainability. *Cleaner Materials*, 9, 100199.
- Fanijo, E., Babafemi, A. J., & Arowojolu, O. (2020). Performance of laterized concrete made with palm kernel shell as replacement for coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 250, 118829.
- Ferrufino, A. S., Colque, J. A. T., Torrez, R. M., & Rocha, J. H. A. (2022). Influencia del aditivo superplastificante en el hormigón con agregado laterítico: Influence of the superplasticizing additive in concrete with lateritic aggregate. *Métodos y Materiales*, 12, 42-51.
- Habibi, A., Ramezaniapour, A. M., Mahdikhani, M., & Bamshad, O. (2021). RSM-based evaluation of mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete containing GGBFS and silica fume. *Construction and Building Materials*, 270, 121431.
- Hamada, H. M., Abed, F., Katman, H. Y. B., Humada, A. M., Al Jawahery, M. S., Majdi, A., ... & Thomas, B. S. (2023). Effect of silica fume on the properties of sustainable cement concrete. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 8887-8908.
- Hamid, R., Yusof, K. M., & Zain, M. F. M. (2010). A combined ultrasound method applied to high performance concrete with silica fume. *Construction and Building Materials*, 24(1), 94-98.
- Hasanzadeh, A., & Shooshpasha, I. (2019). Effects of silica fume on cemented sand using ultrasonic pulse velocity. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 33(11), 1184-1200.
- Helene, P. R. L., & Terzian, P. (1993). *Manual de dosagem e controle do concreto*. São Paulo, Brasil: Pini.
- Hong, G., Oh, S., Choi, S., Chin, W. J., Kim, Y. J., & Song, C. (2021). Correlation between the compressive strength and ultrasonic pulse velocity of cement mortars blended with silica fume: An analysis of microstructure and hydration kinetics. *Materials*, 14(10), 2476.
- Ji, X., Han, F., Pan, T., Zhao, W., Sha, J., & Liu, J. (2024). Decoupling the physical and chemical effects of silica fume in ultra-high performance concrete (UHPC). *Construction and Building Materials*, 444, 137851.
- Juenger, M. C., Snellings, R., & Bernal, S. A. (2019). Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. *Cement and Concrete Research*, 122, 257-273.
- Knight, K. A., Cunningham, P. R., & Miller, S. A. (2023). Optimizing supplementary cementitious material replacement to minimize the environmental impacts of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 139, 105049.
- Liu, Y., Shi, C., Zhang, Z., Li, N., & Shi, D. (2020). Mechanical and fracture properties of ultra-high performance geopolymer concrete: Effects of steel fiber and silica fume. *Cement and Concrete Composites*, 112, 103665.

- Liu, Z., Jiao, Y., Zhang, Y., Li, P., & Du, Y. (2025). Partial replacement of silica fume with waste glass powder in UHPC: Filling micropores and promoting hydration. *Construction and Building Materials*, 490, 142581.
- Manan, A., Pu, Z., Sabri, M. M., Alattiyh, W., Ahmad, J., & Alzlfawi, A. (2025). Environmental and human health impact of recycle concrete powder: an emergy-based LCA approach. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1505312.
- Meng, L. Y., Wang, Y. S., Sun, F., Lin, R., & Wang, X. Y. (2025). An integrated strength-carbon emissions-total cost model for silica fume concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 22, e04327.
- Mohan, A., & Mini, K. M. (2018). Strength and durability studies of SCC incorporating silica fume and ultra fine GGBS. *Construction and Building Materials*, 171, 919-928.
- Muthusamy, K., Kamaruzaman, N. W., Ismail, M. A., & Budiea, A. M. A. (2015). Durability performance of concrete containing laterite aggregates. *KSCE journal of civil engineering*, 19(7), 2217-2224.
- Naik, P. A., & Marathe, S. (2025). Exploring the Potential of Lateritic Aggregates in Pervious Concrete: A Study on Mechanical Properties and Predictive Techniques. *CivilEng*, 6(2), 30.
- Raja, R., & Vijayan, P. (2020). Strength and microstructural behaviour of concrete incorporating laterite sand in binary blended cement. *Revista de la Construcción*, 19(3), 422-430.
- Reis, G. S. D., Quattrone, M., Ambrós, W. M., Grigore Cazaciu, B., & Hoffmann Sampaio, C. (2021). Current applications of recycled aggregates from construction and demolition: A review. *Materials*, 14(7), 1700.
- Rocha, J. H. A., Toledo Filho, R. D., & Cayo-Chileno, N. G. (2022). Sustainable alternatives to CO2 reduction in the cement industry: A short review. *Materials Today: Proceedings*, 57, 436-439.
- Saremi, S. G., Goulias, D. G., & Akhter, A. A. (2023). Non-destructive testing in quality assurance of concrete for assessing production uniformity. *Transportation Research Record*, 2677(1), 1259-1275.
- Siddique, R. (2011). Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11), 923-932.
- Snellings, R., Suraneni, P., & Skibsted, J. (2023). Future and emerging supplementary cementitious materials. *Cement and concrete research*, 171, 107199.
- Ukpata, J. O., Ewa, D. E., Success, N. G., Alaneme, G. U., Otu, O. N., & Olaiya, B. C. (2024). Effects of aggregate sizes on the performance of laterized concrete. *Scientific Reports*, 14(1), 448.
- Verma, S. K., Singla, C. S., Nadda, G., & Kumar, R. (2020). Development of sustainable concrete using silica fume and stone dust. *Materials Today: Proceedings*, 32, 882-887.
- Vijayan, D. S., Devarajan, P., & Sivasuriyan, A. (2023). A review on eminent application and performance of nano based silica and silica fume in the cement concrete. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 56, 103105.
- Vijerathne, D., Wahala, S., & Illankoon, C. (2024). Impact of crushed natural aggregate on environmental footprint of the construction industry: enhancing sustainability in aggregate production. *Buildings*, 14(9), 2770.
- Watari, T., Cao, Z., Serrenho, A. C., & Cullen, J. (2023). Growing role of concrete in sand and climate crises. *Iscience*, 26(5).
- Xi, J., Liu, J., Yang, K., Zhang, S., Han, F., Sha, J., & Zheng, X. (2022). Role of silica fume on hydration and strength development of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 338, 127600.
- Yaragal, S. C., Gowda, S. B., & Rajasekaran, C. (2019). Characterization and performance of processed lateritic fine aggregates in cement mortars and concretes. *Construction and Building Materials*, 200, 10-25.
- Yavuz, D., Akbulut, Z. F., & Guler, S. (2024). Porous concrete modification with silica fume and ground granulated blast furnace slag: Hydraulic and mechanical properties before and after freeze-thaw exposure. *Construction and Building Materials*, 447, 138099.

Guía práctica para la identificación de las pirañas de Bolivia (Characiformes: Serrasalminidae)

Practical identification guide to the piranhas of Bolivia (Characiformes: Serrasalminidae)

Fernando M. Carvajal-Vallejos^{1,*}, Selva Valeria Montellano Abasto²

*Correo de correspondencia: fmcvalle@yahoo.com, f.carvajal@umss.edu.bo

Resumen

Las pirañas o palometas de Bolivia pertenecen a los géneros *Serrasalmus*, *Pygocentrus* y *Pygopristis* (Characiformes: Serrasalminidae), y cumplen funciones ecológicas esenciales como depredadores secundarios y terciarios en los ecosistemas acuáticos de las tierras bajas. Además de su relevancia trófica y en el reciclaje de nutrientes, poseen importancia económica y social para comunidades ribereñas amazónicas, donde constituyen un recurso alimenticio y pesquero clave. Sin embargo, el conocimiento sobre su taxonomía, biología y ecología sigue siendo fragmentado debido a la escasa diferenciación morfológica entre especies y la limitada disponibilidad de estudios integradores. En la actualidad se reconocen diez especies del género *Serrasalmus* y dos de géneros afines en Bolivia, distribuidas principalmente en las cuencas del Amazonas y de La Plata. Recientes investigaciones han descrito *Serrasalmus magallanesi* y *S. castellonae*, y redescrito *S. hollandi*, aclarando la identidad de especies históricamente confundidas. Estas revisiones, basadas en caracteres morfológicos y análisis genéticos mitocondriales (COI), evidencian la complejidad taxonómica del grupo y sugieren la existencia de especies crípticas aún no reconocidas. El presente estudio sintetiza la información más reciente sobre la diversidad, distribución y diagnóstico morfológico de las pirañas bolivianas, y propone una clave artificial actualizada para su identificación. Este aporte busca fortalecer las herramientas de manejo, conservación e investigación ictiológica, promoviendo una identificación más precisa de las especies y reduciendo la confusión taxonómica que ha limitado la comprensión de la biodiversidad y el aprovechamiento sostenible de este grupo en Bolivia.

Palabras clave: palometa, taxonomía, sistemática, pesca de subsistencia, tierras bajas de Bolivia.

Abstract

Piranhas or palometas from Bolivia belong to the genera *Serrasalmus*, *Pygocentrus*, and *Pygopristis* (Characiformes: Serrasalminidae), and play essential ecological roles as secondary and tertiary predators in lowland aquatic ecosystems. In addition to their trophic importance and contribution to nutrient cycling, they hold significant economic and social value for Amazonian riverine communities, where they represent a key fishing and food resource. However, knowledge of their taxonomy, biology, and ecology remains fragmentary due to the limited morphological differentiation among species and the scarcity of integrative studies. Currently, ten species of the genus *Serrasalmus* and two of related genera are recognized in Bolivia, distributed mainly within the Amazon and La Plata river basins. Recent studies have described *Serrasalmus magallanesi* and *S. castellonae*, and redescrined *S. hollandi*, clarifying the identity of species that were historically misidentified. These revisions, based on morphological traits and mitochondrial COI genetic analyses, reveal the taxonomic complexity of the group and suggest the existence of yet unrecognized cryptic species. This study synthesizes the most recent information on the diversity, distribution, and morphological *Diagnosis* of Bolivian piranhas, and provides an updated artificial key for their identification. The contribution aims to strengthen tools for management, conservation, and ichthyological research, promoting more accurate species identification and reducing the taxonomic confusion that has long hindered the understanding, conservation, and sustainable use of this fish group in Bolivia.

Keywords: piranha, taxonomy, systematic, subsistence fisheries, Bolivian lowlands.

¹ Unidad de Limnología y Recursos Acuáticos, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0000-0002-9110-490X>

² Unidad de Limnología y Recursos Acuáticos, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0005-3797-0371>

1. Introducción

Los peces comúnmente conocidos en Bolivia como pirañas o palometas pertenecen a los géneros *Serrasalmus*, *Pygocentrus* y *Pygopristis*, integrantes de la familia Serrasalminae, orden Characiformes. Estas especies desempeñan un papel ecológico fundamental en los ecosistemas acuáticos de las tierras bajas bolivianas, donde actúan como consumidores secundarios y terciarios al alimentarse de insectos acuáticos, peces pequeños, y eventualmente partes vegetales (Ayala et al., 2000). De esta manera, contribuyen al reciclaje y flujo de nutrientes dentro de los cuerpos de agua donde habitan (Ferreira et al., 2014). En consecuencia, las pirañas participan activamente en la regulación de las comunidades ícticas, controlando poblaciones dominantes y acelerando los procesos de descomposición en ríos, arroyos, lagunas y planicies de inundación, como elementos importantes en la ecología funcional de comunidades de peces (Villéger et al., 2017).

Además de su relevancia ecológica, muchas especies de pirañas son abundantes y de amplia distribución, lo que les otorga un valor significativo para las pesquerías artesanales locales (Argote et al., 2014; Montellano et al., 2017). En diversas comunidades ribereñas indígenas y campesinas de la Amazonía boliviana, su captura representa una fuente importante de alimento y sustento económico, especialmente en épocas en que otras especies más apreciadas son escasas o menos accesibles (Argote et al., 2014; Macnaughton et al., 2017, 2025). Sin embargo, a pesar de su importancia ecológica, social y económica, el conocimiento taxonómico, biológico y ecológico de las pirañas bolivianas continúa siendo fragmentado. Aspectos clave como la morfología diagnóstica, la distribución geográfica, la biología reproductiva, la genética y la delimitación de especies permanecen poco estudiados o confusos (Gallo-Cardozo et al., 2024, 2025; Carvajal-Vallejos et al., 2025).

Uno de los principales desafíos en el estudio del grupo radica en la escasa diferenciación morfológica externa entre especies. Los caracteres tradicionalmente empleados —morfométricos y merísticos— suelen presentar baja variabilidad intraespecífica y diferencias diagnósticas muy sutiles, lo que ha conducido a múltiples revisiones y reinterpretaciones taxonómicas dentro del género *Serrasalmus* (Gallo-Cardozo et al., 2024, 2025).

Las pirañas se reconocen por diversos rasgos anatómicos distintivos empleados desde estudios clásicos para definir géneros y especies (Machado-Allison, 2002; Gallo-Cardozo et al., 2025). En general, las especies bolivianas raramente superan los 20–30 cm de longitud estándar (LE) (Carvajal-Vallejos et al., 2025). La variación morfológica se manifiesta principalmente en las proporciones corporales —altura y anchura del cuerpo, forma del hocico y perfil dorsal— más que en el tamaño absoluto (Machado-Allison, 2002; Gallo-Cardozo et al., 2023). Una característica diagnóstica clave es la presencia de una sola hilera de dientes en cada mandíbula. En *Pygocentrus* y *Serrasalmus*, los dientes son agudos, cortantes y bi- o tricúspides, mientras que en *Pygopristis* son penta- o heptacúspides (Machado-Allison, 1985, 2002). Los dientes están interconectados mediante un encaje preciso entre lóbulos anterior y posterior, formando una estructura compacta y eficiente (Machado-Allison, 2002). En el paladar, muchas especies presentan dos hileras de dientes puntiagudos insertos en el hueso ectopterigoide, lo que confiere gran eficiencia cortante al consumir presas o tejidos duros (Machado-Allison, 1985, 2002). En contraste, los caracteres merísticos (número de radios, escamas, vértebras, etc.) presentan poca variación entre especies, limitando su valor diagnóstico (Gallo-Cardozo et al., 2024, 2025). Por ello, la identificación se apoya principalmente en parámetros morfométricos, la forma del perfil cefálico y dorsal, y los patrones de coloración corporal y de las aletas, en especial la caudal (Gallo-Cardozo et al., 2024, 2025). No obstante, estas combinaciones de rasgos pueden originar confusión entre especies morfológicamente próximas, y algunos estudios (p.e. Hubert y Renno, 2010) han incurrido en errores de identificación (Gallo-Cardozo et al., 2024).

Hasta finales del siglo XX, la mayoría de los estudios ictiológicos en Bolivia se concentraban en zonas de relativamente fácil acceso, como ríos principales y llanuras de inundación. En las últimas décadas, la exploración

de regiones remotas o de difícil acceso —lagunas tectónicas, afluentes secundarios de grandes sistemas— ha permitido registrar nuevos taxa y ampliar el conocimiento sobre la diversidad y distribución de varias especies. Por ejemplo, se han confirmado nuevos registros de *Pygopristis denticulata* en lagunas tectónicas de los Llanos de Moxos (sub-cuenca del río Yata) (GTLM-WCS, 2022), así como la descripción de nuevas especies del género *Serrasalmus*, y una redescrición, en distintos puntos de la cuenca amazónica boliviana (Gallo-Cardozo et al., 2023, 2024, 2025).

En la actualidad se reconocen diez especies de *Serrasalmus* para Bolivia, distribuidas en las tierras bajas de las cuencas del Amazonas y de La Plata (Gallo-Cardozo et al., 2025). Algunas especies, como *Serrasalmus marginatus*, se restringen a la cuenca de La Plata, mientras que otras, como *S. maculatus* y *Pygocentrus nattereri*, habitan en ambas cuencas (Fink, 1993; Azurduy, 2008; Carvajal-Vallejos et al., 2014). La mayor diversidad de especies se concentra en la cuenca amazónica (Gallo-Cardozo et al., 2024, 2025).

Entre los avances recientes más notables en la ictiología amazónica boliviana destacan las descripciones de nuevas especies del género *Serrasalmus* y una redescrición del mismo género, evidenciando que la diversidad del grupo en el país aún no está completamente documentada. Gallo-Cardozo et al. (2024) describieron *S. magallanesi* a partir de colectas del drenaje del río Madera. Esta especie presenta una coloración caudal característica, similar a la de *S. hollandi*, con la cual fue previamente confundida. Los análisis morfológicos permitieron establecer diferencias diagnósticas basadas en proporciones corporales y caracteres osteológicos, mientras que los análisis genéticos del gen COI mostraron baja divergencia ($\approx 1\%$) respecto a especies morfológicamente afines, lo que evidencia la proximidad genética y complejidad taxonómica dentro del género. *S. magallanesi* habita arroyos, lagunas y sistemas de aguas blancas, claras o negras de la cuenca amazónica baja, asociada a hábitats meándricos del drenaje del río Madera.

A su vez, *Serrasalmus castellonae* fue descrita más recientemente a partir de especímenes del arroyo Florida cerca de Riberalta, subcuenca del río Beni (departamento del Beni, provincia Vaca Díez). Esta especie se distingue por su cuerpo alto y aplanado, así como por un patrón cromático particular que la diferencia de especies simpátricas, especialmente *S. compressus*, con la cual comparte similitudes morfológicas que explican su carácter críptico (Gallo-Cardozo et al., 2025).

La redescrición de *S. hollandi* de la sub-cuenca del río Iténez (Gallo-Cardozo et al. 2023), abordó la ambigüedad taxonómica que rodeaba a esta especie. Originalmente descrita en 1915 a partir de un único espécimen cuyo holotipo se perdió desde entonces, *S. hollandi* ha carecido durante mucho tiempo de un diagnóstico claro y con frecuencia se confundía con *S. eigenmanni*. En este trabajo, los autores redesciben a *S. hollandi* utilizando tanto datos morfológicos como genéticos mitocondriales del gen COI, y designan un neotipo proveniente del río Paraguá (un afluente cercano a la localidad tipo original en el lado brasileño). Se presentan caracteres diagnósticos que distinguen a *S. hollandi* de taxones similares en las cuencas del Amazonas y de La Plata en Bolivia, especialmente de *S. eigenmanni* que no estaría en la cuenca alta del río Madera. La redescrición aclara los límites específicos y mejora la identificación para nuevos inventarios ictiológicos, contribuyendo así a una mejor documentación de su distribución.

La descripción de *S. magallanesi* y *S. castellonae*, y la redescrición de *S. hollandi*, demuestran que la diversidad de pirañas en Bolivia está aún subestimada, y que la integración de enfoques morfológicos y moleculares, y otros adicionales (p.e. etológicos, ecológicos), es esencial para resolver los complejos taxonómicos dentro de *Serrasalmus* y géneros relacionados. Estos hallazgos resaltan la necesidad de revisar material histórico y reevaluar identificaciones previas bajo nuevas perspectivas analíticas.

Considerando los antecedentes mencionados, el presente estudio tiene como propósito sintetizar y actualizar la información disponible sobre las especies de pirañas registradas en Bolivia y presentar una clave dicotómica

artificial actualizada para su identificación en campo y laboratorio. Actualizar el conocimiento de especies nuevas y distribución de otras ya conocidas no solo enriquece el inventario nacional de biodiversidad, sino que también fortalece las estrategias locales de manejo y conservación, al proporcionar herramientas útiles para comunidades de pescadores y gestores ambientales, reduciendo así la confusión taxonómica y la posible sobreexplotación de especies raras.

2. Material y métodos

La información revisada sobre sistemática morfológica y taxonomía fue extraída de las publicaciones realizadas por Gallo-Cardozo et al. (2023, 2024, 2025). La identificación taxonómica de la especie asignada al género *Pygopristis* no es definitiva. Por razones prácticas y similitud observada, se la denominó provisionalmente como *P. denticulata*. No obstante, la determinación precisa de esta especie requiere un estudio taxonómico detallado, el cual deberá realizarse al disponer de una mayor cantidad de ejemplares y material genético. La descripción del color de esta especie y el dibujo presentado en la clave para la identificación fueron realizadas con base en la foto presentada por GTLM-WCS (2022), en la página 176.

El material examinado para confirmar las identificaciones de las especies se encuentra depositado en las colecciones de peces de la Unidad de Limnología y Recursos Acuáticos (ULRA), Departamento de Biología, Facultad de Ciencias y Tecnología (FCyT), de la Universidad Mayor de San Simón (Cochabamba, Bolivia), y del Centro de Investigaciones de Recursos Acuáticos (CIRA), de la Universidad Autónoma del Beni (Trinidad, Beni, Bolivia). Los ejemplares depositados en la colección de la ULRA están denominados con la codificación UMSS, y aquellos depositados en la colección del CIRA con la codificación CIRA-Ic. Las especies se presentan en orden alfabético de los epítetos que las componen.

La información sobre la distribución de las especies fue obtenida de Carvajal-Vallejos et al. (2014, 2025), Gallo-Cardozo et al. (2023, 2024, 2025). Datos complementarios fueron tomados de las bases de datos de las colecciones de la ULRA y el CIRA. La denominación principal de las sub-cuencas dentro las cuencas de Bolivia siguió la delimitación propuesta por SNHN (1998) y Carvajal-Vallejos et al. (2014).

El estado de conservación de las especies según la lista roja de la IUCN fue obtenido de Brejão (2024) – *Serrasalmus elongatus*, *S. hollandi*, *S. maculatus*, *S. marginatus*, *S. odyseii*, *S. rhombeus*, *S. spilopleura*, *Pygocentrus nattereri* y *Pygopristis denticulata* – excepto para *S. castellonae* y *S. magallanesi* que no fueron aun evaluadas. La sigla LC (Least Concern) de la IUCN, se refiere a la evaluación de Preocupación Menor.

Las diagnósticas taxonómicas y la clave artificial dicotómica se elaboraron exclusivamente a partir de caracteres morfológicos externos y patrones de coloración (tanto en ejemplares preservados como en individuos vivos) para optimizar su aplicabilidad y facilidad de uso en la identificación. Se excluyeron del presente estudio otros caracteres diagnósticos que requieren examen morfológico minucioso en laboratorio o la visualización de estructuras esqueléticas mediante técnicas de imagenología como radiografía o tomografía computarizada, entre otros. Estos caracteres más detallados forman parte de una revisión taxonómica exhaustiva del grupo de las pirañas, actualmente en curso por el equipo de la ULRA.

Los nombres comunes en español (ESP) fueron extraídos de Carvajal y Zeballos (2011), Ayala et al. (2000), y aquellos en inglés (ENG) de FishBase (Froese y Pauly, 2025). Algunos nombres en portugués (POR) fueron extraídos de la Red List de IUCN (2025).

Los dibujos presentados en la clave dicotómica fueron generados con ayuda de Inteligencia Artificial, y luego modificados con el programa GIMP 3.0.4.

3. Resultados

Serrasalmus castellonae Gallo-Cardozo, Careaga & Carvajal-Vallejos, 2025

Nombre(s) común(es): piraña, palometa (ESP).

Figura 1

Ejemplar de la piraña *Serrasalmus castellonae*, colectada en Lago El Carmen, Territorio Indígena Originario Campesino TIM II, porción baja de la sub-cuenca de río Beni, Cuenca del Amazonas, Bolivia. Paratipo UMSS 11612, 126.8 mm LE, 17 marzo 2012



Estatus lista roja IUCN: No evaluado.

Diagnosis: Se distingue por tener cuerpo comprimido y elevado (55-62% LE); cabeza comprimida y puntiaguda con la porción posterior sobre el opérculo amarillenta en vida; perfil dorsal ligeramente redondeado a aplanado; manchas redondeadas concentradas en la mitad superior del cuerpo; presencia de mancha difusa basal en la aleta caudal, a veces relativamente intensa; banda vertical oscura en la porción terminal de la aleta caudal; aleta anal ploma a negruzca con una banda terminal oscura en vida.

Notas: Especie poco abundante, y con parecido morfológico a *Serrasalmus compressus*. Se encuentra en arroyos y lagunas de aguas blancas y negras, y ríos de corriente suave.

Distribución: Cuenca del Amazonas; reportada en las sub-cuencas de los ríos Beni, Iténez, Mamoré, y Orthon.

Serrasalmus compressus Jégu, Leão & Santos, 1991

Nombre(s) común(es): piraña, palometa (ESP).

Figura 2

Ejemplar de la especie de piraña Serrasalmus compressus, colectada en el Arroyo Florida, 28 km al noreste de Riberalta, porción baja de la sub-cuenca de río Beni, Cuenca del Amazonas, Bolivia. UMSS 11183, 138 mm LE, 28 octubre 2011.



Estatus lista roja IUCN: LC.

Diagnosis: Se distingue por tener cuerpo comprimido y elevado (64-67% LE) de color plateado; cabeza comprimida y puntiaguda; perfil dorsal notablemente redondeado; manchas redondeadas concentradas en la mitad superior del cuerpo; presencia de mancha difusa basal en la aleta caudal, a veces cubriendo más de la mitad de manera irregular y tornándose intensa; banda vertical oscura en la porción terminal de la aleta caudal; aleta anal ploma a negruzca con una banda terminal oscura en vida.

Notas: Especie poco abundante que habita en aguas blancas y en aguas negras a claras de corriente suave. Recientemente fue redefinida y diferenciada de *Serrasalmus castellonae*, especie con la cual era previamente confundida (Gallo-Cardozo et al., 2025).

Distribución: Cuenca del Amazonas; sub-cuencas de los ríos Beni, Mamoré, Iténez, y Yata.

***Serrasalmus elongatus* Kner, 1958**

Nombre(s) común(es): Piraña mucura, Piraña eléctrica, Palometa (ESP), Slender piranha (ENG).

Figura 3

Ejemplar de la especie de piraña Serrasalmus elongatus, colectada en el río Ichilo, proximidades de Puerto Villarroel, porción alta de la sub-cuenca de río Mamoré, Cuenca del Amazonas, Bolivia. UMSS 4079.1, 231.5 mm LE, 21 noviembre 2006.



Estatus lista IUCN: LC.

Diagnosis: Se distingue por tener el cuerpo comprimido, alargado y bajo (altura 35-42% LE), de color plumizo a plateado con franjas punteadas o líneas continuas parciales verticales dispuestas en zig-zag desde el dorso hasta debajo de la línea lateral (hasta 3/4 del cuerpo aproximadamente); boca oblicua de amplia apertura; hocico alargado; presencia de 7 a 8 pares de dientes ectopterigóides en el paladar.

Notas: Especie poco abundante que habita en lagunas de aguas blancas, así como en arroyos y ríos de aguas negras de baja velocidad. Presenta una marcada variabilidad morfológica y, debido a su amplia distribución y posible especialización trófica (Carvajal-vallejos et al., 2025), es probable que constituya un complejo de especies que requiere una revisión morfológica y molecular a nivel regional.

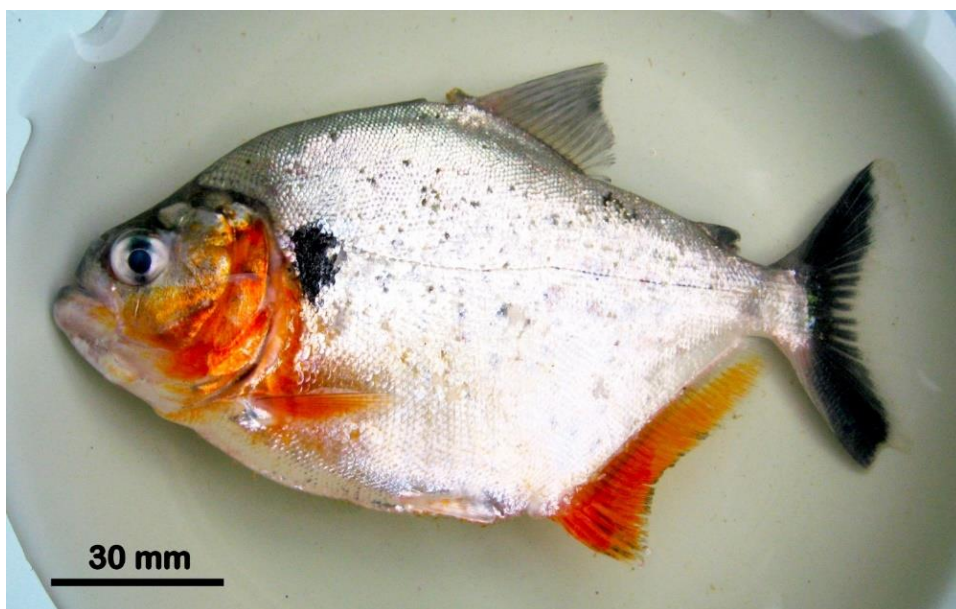
Distribución: Cuenca del Amazonas; sub-cuenca de los ríos Beni, Grande, Iténez, y Mamoré.

Serrasalmus hollandi Eigenmann, 1915

Nombre(s) común(es): Piraña dulce, Palometa (ESP).

Figura 4

Ejemplar de la especie de piraña Serrasalmus hollandi, colectada en proximidades de la confluencia de los ríos Manupare y Manurimi, sub-cuenca de río Madre de Dios, Cuenca del Amazonas. Ejemplar no preservado, 126.1 mm LE, 05 noviembre 2007



Estatus lista IUCN: LC.

Diagnosis: Se distingue por tener una mancha basal oscura sobre la aleta caudal, siendo el resto de la aleta hialina; perfil dorsal ligeramente aplanado, con un punto medio de inflexión que algunas veces da aspecto cuadrado a la forma del cuerpo; hocico corto (3.5-6.8% LE); porción media a posterior de la cabeza y aleta pectoral rojizas en vida; una mancha humeral conspicua; aleta anal casi completamente rojiza en vida, con banda estrecha oscura en la porción terminal.

Notas: Especie que habita preferentemente en aguas negras a claras. Es poco abundante y rara en las capturas experimentales. Durante mucho tiempo fue confundida e identificada erróneamente como *Serrasalmus (Pristobrycon eigenmanni)* (Gallo-Cardozo et al., 2023).

Distribución: Cuenca del Amazonas, sub-cuencas de los ríos Beni, Grande, Iténez, Madre de Dios, Mamoré, Orthon, Yata.

***Serrasalmus maculatus* Kner, 1858**

Nombre(s) común(es): Piraña amarilla, Palometa amarilla (ESP), Pirambebe (POR).

Figura 5

Ejemplar de la especie de piraña Serrasalmus maculatus, colectada en Lago 27 de Mayo, Territorio Indígena Originario Campesino TIM II, porción baja de la sub-cuenca de río Beni, Cuenca del Amazonas, Bolivia. UMSS 11013, 130.8 mm LE, 17 octubre 2011



Estatus lista roja IUCN: LC.

Diagnosis: Se distingue por tener cuerpo de color amarillento en vida, principalmente la porción media a ventral; mancha vertical oscura sub-terminal sobre la aleta caudal, dejando una zona hialina en la porción terminal; aleta anal con una banda longitudinal amarillenta a hialina a lo largo de la porción media, siendo las porciones proximal y terminal negruzcas; hocico corto; ojo blanquecino a plomizo en vida, a veces con porciones rojas rodeando la pupila; con un punto medio de inflexión que algunas veces da aspecto cuadrado a la forma del cuerpo.

Notas: Especie de amplia distribución, importante en las pesquerías comerciales y de subsistencia en la Cuenca del Amazonas. La especie es fácilmente reconocida por su patrón de coloración, pero puede estar compuesta por varias especies como fue observado en ríos del Brasil (Bignotto et al., 2020). Requiere de una revisión morfológica y molecular para su redefinición taxonómica, y la descripción potencial de alguna nueva especie.

Distribución: Cuenca del Amazonas; sub-cuencas de los ríos Beni, Grande, Iténez, Madre de Dios, y Mamoré. Cuenca de La Plata; sub-cuencas de los ríos Paraguay y Bermejo.

Serrasalmus magallanesi Gallo-Cardozo, Maldonado, Careaga & Carvajal-Vallejos, 2024

Nombre(s) común(es): Piraña, Palometa (ESP).

Figura 6

Ejemplar de la especie de piraña Serrasalmus magallanesi, colectada en Lago El Mentiroso, proximidades de la Comunidad Trinidacito, Territorio Indígena Originario Campesino TIM II, sub-cuenca de río Madre de Dios, Cuenca del Amazonas, Bolivia. UMSS 11609, 139.2 mm LE, 17 marzo 2012



Estatus lista roja IUCN: No evaluado.

Diagnosis: Se distingue por una mancha basal oscura sobre la aleta caudal, siendo el resto de la aleta hialina, a veces una banda estrecha en la porción terminal de los radios medios; mancha humeral tenue o a veces ausente; porción baja de la cabeza, opérculo y aleta pectoral con tonalidad rojiza a amarillento-anaranjado; aleta anal rojiza intensa con el borde terminal oscuro en vida; manchas redondeadas cubriendo principalmente la mitad superior del cuerpo.

Notas: Especie de amplia distribución, recientemente descrita con base en ejemplares de la sub-cuenca de río Beni. La especie fue confundida con *Serrasalmus humeralis* (Lauzanne y Loubens, 1985); una especie descrita para la cuenca del río Tocantins en Brasil.

Distribución: Cuenca del Amazonas; sub-cuencas de los ríos Beni, Iténez, Madre de Dios, Mamoré, Orthon.

Serrasalmus marginatus Valenciennes, 1837

Nombre(s) común(es): Piraña, Palometa (ESP).

Figura 7

Ejemplar de la especie de piraña Serrasalmus marginatus, colectada en la Laguna Cáceres, 4 km al este de Puerto Suarez, sub-cuenca de río Paraguay, Cuenca de La Plata, Bolivia. Ejemplar preservado UMSS 12299.1, 137 mm LE, 01 abril 2006



Estatus lista roja IUCN: LC.

Diagnosis: Se distingue por presentar coloración del cuerpo plumiza a oscura; presencia de mancha basal oscura y banda vertical oscura terminal sobre la aleta caudal; ojo blanquecino a plumizo en vida; 15-16 rayos totales dorsales; siete a ocho pares de dientes en el paladar; manchas redondeadas pequeñas cubriendo gran parte del cuerpo, generalmente alcanzando la base de la aleta anal.

Notas: Especie común en la sub-cuenca del río Paraguay, donde contribuye significativamente a las pesquerías de subsistencia y comerciales (Navia et al. 2008). Su taxonomía parece estable, y registros en la Cuenca del Amazonas son erróneos. Posiblemente, *Serrasalmus rhombeus* y *S. odyssei*, fueron identificados como esta especie por su parecido morfológico y de coloración.

Distribución: Cuenca de La Plata; sub-cuenca del río Paraguay.

***Serrasalmus odyssei* Hubert & Renno, 2010**

Nombre(s) común(es): Piraña, Palometa (ESP).

Figura 8

Ejemplar de la especie de piraña Serrasalmus odyssei, colectada en el Arroyo San Luis, Comunidad Flor de Octubre, Territorio Indígena Originario Campesino Multiétnico II, porción baja de la sub-cuenca de río Beni, Cuenca del Amazonas, Bolivia. UMSS 10948, 112.4 mm LE, 08 octubre 2011



Estatus lista roja IUCN: LC.

Diagnosis: Se distingue por cuerpo relativamente bajo (45-57% LE), de color plomo oscuro a plateado en vida, algunas veces el dorso con tonos púrpuras a lilas; mancha oscura basal y banda ancha oscura terminal sobre la aleta caudal, dejando una estrecha zona hialina entre ambas; perfil dorsal ligeramente redondeado; ojo de color anaranjado a rojizo en vivo; porción opercular y ventral del cuerpo con tonos anaranjados a amarillentos en vida; aleta pectoral hialina; aleta anal rojiza a anaranjada en su porción anterior con una banda oscura estrecha en su porción terminal; manchas redondeadas grandes cubriendo casi la totalidad del cuerpo. Más de 80 escamas perforadas sobre la línea lateral.

Notas: Especie descrita en un libro, sin la rigurosidad del proceso de revisión por pares propio de las revistas especializadas. Aunque su definición original es imprecisa y requiere una redesccripción, debido a que varios de sus caracteres se superponen con los de otras especies (Hubert y Renno, 2010), la especie parece ser válida y podría presentar una alta variabilidad morfológica o, en su defecto, existir al menos una especie muy similar.

Distribución: Cuenca del Amazonas; sub-cuenca de los ríos Beni, Grande, Iténez, Mamoré, Orthon, Yata.

Serrasalmus rhombeus Linnaeus, 1766

Nombre(s) común(es): Piraña blanca, Palometa blanca (ESP), Redeye piranha (ENG), Piranha-preta (POR).

Figura 9

Ejemplar de la especie de piraña Serrasalmus rhombeus, colectada en la Laguna de Corte Hondo, río Ichilo, proximidades de la comunidad de Puerto Villarroel, porción alta de la sub-cuenca de río Mamoré, Cuenca del Amazonas, Bolivia. UMSS 4060.1, 210.7 mm LE, 19 noviembre 2006



Estatus lista roja IUCN: LC.

Diagnosis: Se distingue por cuerpo relativamente elevado (45-59% LE), de color plomizo a plateado; mancha difusa basal y banda vertical oscura terminal sobre la aleta caudal, dejando una zona amplia hialina a blanquecina, en ejemplares mayores la aleta caudal puede ser completamente oscura; ojo rojizo intenso en vivo; porción inferior de la cabeza, opérculo, y zona ventral del cuerpo por lo general con tonos amarillentos en vivo; aleta pectoral amarillenta a hialina en vivo; aleta anal oscurecida en su porción basal, con la porción media amarillenta a tonos anaranjados en su porción media, y una banda oscura terminal en vivo; manchas redondas iguales o mayores a la pupila del ojo sobre la mayor parte del cuerpo, cubriendo sobre todo las porciones media y dorsal. Más de 80 escamas perforadas sobre la línea lateral.

Notas: Especie de amplia distribución y con elevada variabilidad morfológica. Algunas especies, posiblemente crípticas aun no descritas, son identificadas bajo el nombre de esta especie. La especie requiere de una redesccripción y redefinición para la cuenca alta del río Madera.

Distribución: Cuenca del Amazonas; sub-cuencas de los ríos Acre, Beni, Grande, Iténez, Mamoré, Madre de Dios, Orthon, y Yata.

***Serrasalmus spilopleura* Kner, 1858**

Nombre(s) común(es): Piraña, Palometa (ESP), Speckled piranha (ENG), Piranha-amarela (POR).

Figura 10

Ejemplar de la especie de piraña Serrasalmus spilopleura, colectada en Puerto Victoria, río Yata, sub-cuenca de río Yata, Cuenca del Amazonas, Bolivia. Ejemplar preservado UMSS 17658, 143.8 mm LE, 23 abril 2017



Estatus lista roja IUCN: LC.

Diagnosis: Se distingue por cuerpo plateado a plomizo con la porción inferior de la cabeza anaranjada a rojiza en vivo; cuerpo sin manchas o pequeñas manchas presentes principalmente en el dorso; aleta caudal uniformemente oscurecida o con manchas irregulares en su porción basal y/o terminal, los ejemplares menores pueden tener una zona media hialina; perfil dorsal aplanado con una inflexión media que da aspecto de forma cuadrada al cuerpo; mancha humeral tenue o ausente; ojo con porciones anaranjadas a rojizas alrededor de la pupila en vivo; hocico corto; aleta anal con zona media rojiza tenue y una banda terminal estrecha oscura; distancia interorbital 13-17% LE.

Notas: Especie rara y poco abundante. Parece tener preferencia por cuerpos de agua negra a clara. Posiblemente sinónimo de *S. hollandi*; requiere de una revisión exhaustiva para redefinir su diagnóstico.

Distribución: Cuenca del Amazonas; sub-cuencas de los ríos Beni, Iténez, Madre de Dios, Mamoré, Orthon.

***Pygocentrus nattereri* Kner, 1858**

Nombre(s) común(es): Piraña roja, Piraña colorada, Palometa roja, Palometa colorada, Ñata (ESP), Red piranha (ENG), Piranha-vermelha (POR).

Figura 11

*Ejemplar de la especie de piraña *Pygocentrus nattereri*, colectada en la laguna El Peligro, río Ichilo, sub-cuenca de río Mamoré, Cuenca del Amazonas, Bolivia. UMSS 4072.2, 140.3 mm LE, 20 noviembre 2006*



Estatus lista roja IUCN: LC.

Diagnosis: Se distingue por cabeza ancha con perfil redondeado y robusto; hocico corto y macizo; mandíbula inferior claramente prognata; ausencia de dientes en el paladar; perfil dorsal ligeramente redondeado, coloración ventral de la cabeza, opérculos, aletas pectorales y ventrales, y vientre rojizo o anaranjado intenso; aleta caudal con mancha tenue basal y banda oscura terminal ancha, dejando una zona hialina de tamaño variable, en ejemplares mayores la aleta casi totalmente oscurecida.

Notas: Especie de amplia distribución y abundante, importante para las pesquerías de subsistencia y comerciales en las sub-cuenclas de los ríos Beni y Mamoré (Macnaughton et al. 2017; Montellano et al. 2017). La especie es taxonómicamente estable pero los ejemplares de la Cuenca de La Plata son notablemente distintos morfológicamente a los ejemplares de la Cuenca del Amazonas.

Distribución: Cuenca del Amazonas; sub-cuenclas de los ríos Abuná, Beni, Grande, Iténez, Madre de Dios, Mamoré, Orthon, y Yata. Cuenca de La Plata, sub-cuenca del río Paraguay.

Pygopristis denticulata Cuvier, 1819

Nombre(s) común(es): Piraña, Palometa (ESP), Lobetoothed piranha (ENG)

Figura 12

Ejemplar de la especie de piraña Pygopristis denticulata, colectada en la laguna Versailles, 5 km al sudoeste de la Comunidad de Versailles, río Iténez, sub-cuenca de río Iténez, Cuenca del Amazonas, Bolivia. Ejemplar preservado CIRA-Ic 813, 153.2 mm LE, 18 agosto 2002



Estatus lista roja IUCN: LC

Diagnosis: Se distingue por la presencia de dientes penta- a hexacúspides en ambas mandíbulas (hasta sin cúspides en la mandíbula inferior), ausencia de dientes ectopterigoides, y ausencia de manchas sobre el cuerpo; manchas oscuras en la parte superior de la cabeza incluyendo suborbitales; mancha oscura presente delante de la aleta dorsal; aleta dorsal con coloración oscura en la porción terminal de los últimos radios, y longitud de su base mayor a 23% LE; porción terminal de la aleta caudal rojiza en vivo; presencia de dos manchas oscuras en la base de cada lóbulo de la aleta caudal en vivo; aleta anal amarillenta con banda rojiza terminal en vivo.

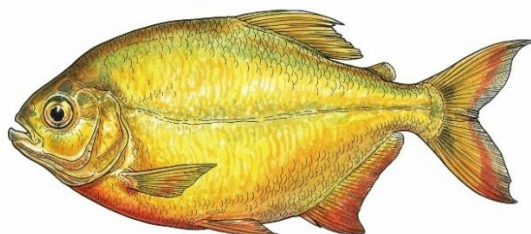
Notas: Especie rara y poco abundante. Ha sido reportada en cuerpos de aguas negras.

Distribución: Cuenca del Amazonas; sub-cuenca de río Iténez, sub-cuenca de río Yata.

Clave dicotómica artificial para la identificación de especies de pirañas (géneros *Serrasalmus*, *Pygocentrus* y *Pygopristis*) presentes en Bolivia

A continuación, se presenta una clave artificial dicotómica con base en caracteres morfológicos externos para la identificación de especies de pirañas en Bolivia.

- 1a.** Dientes palatinos incisiformes (de cinco a seis cúspides en ambas mandíbulas); sin espina preanal (espina ventral situada delante de la aleta anal) *Pygopristis denticulata* — Cuenca del Amazonas



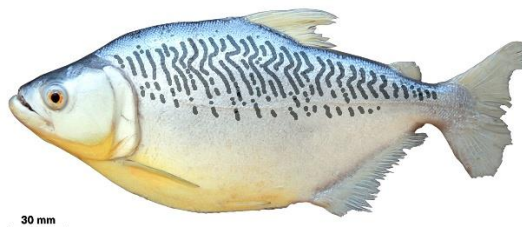
- 1b.** Dientes palatinos bi- a tricúspides en ambas mandíbulas; presencia de una espina preanal fuerte entre la cloaca y la aleta anal **2**

- 2a.** Dientes ectopterigoides ausentes; hocico ancho, macizo y obtuso; mandíbula inferior claramente prognata; vientre, opérculos, aletas pectorales y ventrales de color rojo a anaranjado intenso en vida *Pygocentrus nattereri* — Cuenca del Amazonas y Cuenca de La Plata



- 2b.** Dientes ectopterigoides presentes (aunque pueden reducirse con la edad) **3**

- 3a.** Presencia de pequeñas manchas en los flancos que forman líneas zigzagüeantes verticales; altura del cuerpo menor al 42% de la longitud estándar (LE) *Serrasalmus elongatus* — Cuenca del Amazonas



3b. Presencia de pequeñas manchas en los flancos sin formar líneas zigzagueantes verticales; altura del cuerpo mayor al 45% de la LE **4**

4a. Coloración corporal amarillenta en vida; aleta caudal con una banda vertical oscura subterminal y una banda vertical translúcida terminal *Serrasalmus maculatus* — Cuencas del Amazonas y Cuenca de La Plata



4b. Coloración corporal no amarillenta en vida; aleta caudal sin banda vertical oscura subterminal y sin banda terminal translúcida **5**

5a. Altura del cuerpo igual o superior al 64% de la LE *Serrasalmus compressus* — Cuenca del Amazonas



5b. Altura del cuerpo menor al 63% de la LE **6**

6a. Altura del cuerpo cercana al 62% de la LE *Serrasalmus castellonae* — Cuenca del Amazonas



6b. Altura del cuerpo menor al 60% de la LE **7**

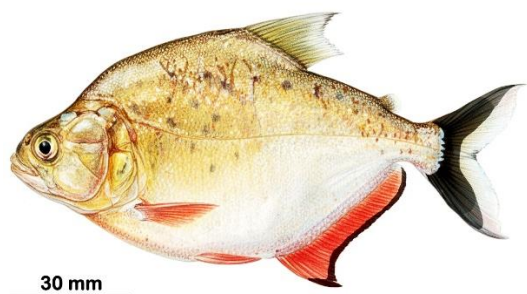
7a. Aleta caudal con la base oscura y el resto translúcido **8**

7b. Aleta caudal sin base oscura y con el resto de la aleta oscurecida o con bandas oscuras 9

8a. Mancha humeral oscura bien definida; hocico romo ***Serrasalmus hollandi*** — Cuenca del Amazonas



8b. Mancha humeral difusa o ausente; hocico oblicuo ***Serrasalmus magallanesi*** — Cuenca del Amazonas



9a. Distancia interorbital mayor al 50% de la longitud cefálica (LC) ***Serrasalmus spilopleura*** — Cuenca del Amazonas



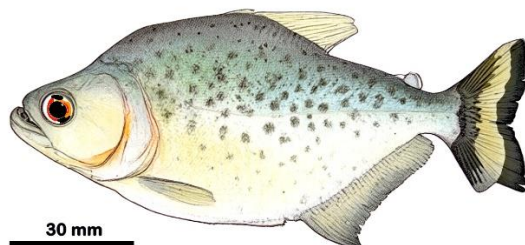
9b. Distancia interorbital menor al 49% de la LC 10

10a. Escamas perforadas en la línea lateral 77 o menos ***Serrasalmus marginatus*** — Cuenca de La Plata

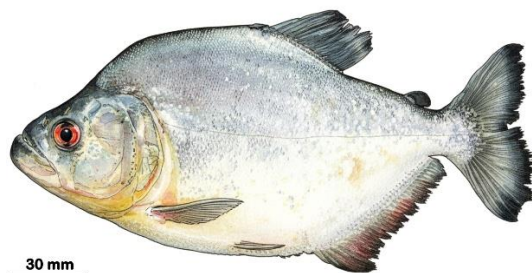


10b. Escamas perforadas en la línea lateral 80 o más 11

11a. Aleta caudal con parte subterminal translúcida y borde oscuro *Serrasalmus odyssei* — Cuenca del Amazonas



11b. Aleta caudal con banda vertical terminal oscura bien definida *Serrasalmus rhombeus* — Cuenca del Amazonas



4. Discusión

El análisis taxonómico y morfológico de las pirañas bolivianas muestra que la diversidad del grupo en el país podría estar aún subestimada, en concordancia con observaciones recientes en regiones amazónicas adyacentes (Gallo-Cardozo et al., 2023, 2024, 2025). La descripción reciente de nuevas especies como *Serrasalmus magallanesi* y *S. castellonae*, junto con la redescritción de *S. hollandi*, revela la existencia de un mosaico de linajes morfológica y genéticamente próximos cuya delimitación específica aún requiere revisión. Este patrón de alta similitud morfológica y baja divergencia genética ($\approx 1\%$ en el gen COI) refuerza la hipótesis de complejos crípticos dentro del género *Serrasalmus*, dentro el cual también se ha observado divergencias notables a nivel del locus COI (p.e. Bignotto et al., 2020).

La dificultad para discriminar especies exclusivamente mediante caracteres externos refleja las limitaciones de los métodos tradicionales de diagnóstico basados en rasgos morfométricos y merísticos. Muchos de estos caracteres presentan amplitud intraespecífica considerable y superposición entre especies simpátricas, especialmente en rasgos como la altura corporal, el perfil de la cabeza o la coloración de las aletas. En este contexto, la integración de análisis moleculares, osteológicos y ecológicos se vuelve indispensable para resolver las relaciones filogenéticas entre las pirañas de Bolivia, así como dentro la familia Serrasalminidae, y redefinir los límites específicos.

La distribución de las especies registradas evidencia patrones biogeográficos coherentes con la historia hidrográfica de Bolivia. La Cuenca del Amazonas alberga la mayor riqueza específica, actuando como centro de diversificación y conectividad genética. En contraste, la cuenca de La Plata presenta una menor diversidad, representada principalmente por *S. marginatus*, especie con relevancia pesquera (Navia et al., 2008). Las especies compartidas entre ambas cuencas, como *S. maculatus* y *Pygocentrus nattereri*, reflejan antiguos eventos de conexión fluvial y

dispersión, aunque diferencias morfológicas entre poblaciones sugieren una posible diferenciación regional aún no formalmente reconocida.

El valor ecológico y socioeconómico de las pirañas en Bolivia subraya la necesidad de un marco taxonómico sólido. Al ser componentes clave en las redes tróficas, su identificación correcta resulta esencial para evaluar adecuadamente su papel en la dinámica de las comunidades acuáticas y en la sostenibilidad de las pesquerías artesanales. La confusión taxonómica puede conducir a estimaciones erróneas de abundancia y distribución, afectando estrategias de manejo y conservación.

La clave artificial dicotómica presentada constituye una herramienta práctica para la identificación de campo y laboratorio, aunque debe considerarse provisional. La continua revisión de material de colección, el empleo de técnicas de imagenología avanzada (p. ej., microtomografía) y la incorporación de análisis genéticos multilocus permitirán mejorar la resolución diagnóstica y avanzar hacia una revisión taxonómica integral del grupo. Existe evidencia que sugiere la presencia potencial de una o dos especies del género *Serrasalmus* en la parte alta del río Mamoré, las cuales aún no habrían sido descritas formalmente y podrían estar siendo confundidas con especies morfológicamente similares reconocidas como válidas. Algo similar ocurre para la especie identificada provisionalmente como *Pygopristis denticulata*; esta especie posiblemente representa una especie nueva que habita ambientes de aguas negras a claras.

Finalmente, la evidencia obtenida y presentada sugiere que el inventario ictiológico nacional aún debe ser completado, por lo que la exploración de áreas remotas y el fortalecimiento de colecciones de referencia son prioridades para consolidar el conocimiento y conservación de las pirañas de Bolivia.

5. Conclusión

El presente estudio confirma que la diversidad de pirañas en Bolivia está aun incompletamente documentada y su taxonomía requiere una revisión integral basada en enfoques morfológicos, moleculares y ecológicos. La incorporación de nuevos registros, junto con la descripción de *Serrasalmus magallanesi* y *S. castellonae* y la redescritión de *S. hollandi*, demuestra la existencia de un complejo taxonómico dentro del género *Serrasalmus*, caracterizado por una alta similitud morfológica entre especies y baja divergencia genética. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de emplear metodologías integrativas para delimitar con precisión los límites específicos y evitar errores de identificación, comunes en estudios previos.

Asimismo, la elaboración de una clave dicotómica artificial actualizada representa un aporte práctico y valioso para la identificación de especies en campo y laboratorio, fortaleciendo las capacidades de investigación, monitoreo y manejo pesquero en el país. La información sintetizada sobre distribución geográfica, caracteres diagnósticos y estado de conservación contribuye directamente al inventario nacional de biodiversidad y al diseño de estrategias de conservación y uso sostenible. En conjunto, este trabajo evidencia que Bolivia alberga una riqueza ictiológica subestimada dentro del grupo de las pirañas, y que la continuidad de los estudios sistemáticos y genéticos será esencial para comprender su verdadera diversidad, distribución y papel ecológico en los ecosistemas acuáticos amazónicos y platenses.

Conflicto de interés

Los autores manifiestan que no tienen conflicto de intereses que puedan haber influido en los resultados o interpretaciones de este estudio.

Agradecimientos

A Reinaldo Cholima, Taka Yuki Yunoki, y Federico Moreno, por el acceso a material depositado en la colección de peces del CIRA-UAB (Trinidad, Beni). A Matías Careaga (estudiante de doctorado en la ULRA) por las fotos de ejemplares preservados de *Serrasalmus marginatus*, *S. spilopleura*, y *Pygopristis denticulata*. A Dylían Castellón (ex – directora, en memoria), Mabel Maldonado (docente investigadora), y Edgar Goitia (actual director, ULRA-UMSS) por el interés para apoyar la iniciativa de revisar la sistemática de las pirañas de Bolivia desde más de dos décadas atrás. Las imágenes de las especies fueron tomadas durante colectas de campo financiadas por WWF (Education for Nature Programme - EFN, y Monitoreo de la Cuenca Baja del río Beni), Proyecto Peces Para la Vida (PPV1, PPV2) financiado por el Fondo Internacional Canadiense de Investigación sobre la Seguridad Alimentaria (CIFSRF), con el apoyo financiero del Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC), y el Gobierno de Canadá, a través del Departamento de Relaciones Exteriores, Comercio y Desarrollo. A Joachim Carosfeld, Alison Macnaughton, Tiffanie Rainville (World Fisheries Trust - WFT, Canadá), y Paul A. Van Damme (Faunagua, Bolivia), por su apoyo e interés para estudiar los peces de importancia comercial y de subsistencia en la Amazonía boliviana. A la memoria de Camilo Carvajal, por todos aquellos años juntos.

6. Referencias bibliográficas

- Argote, A., Van Damme, P. A., Macnaughton, A., Villafán, & Carvajal-Vallejos, F. M. (2014). Pesca indígena en la Cuenca Amazónica Boliviana: Un estudio de caso en la Tierra Comunitaria de Origen Multiétnico II (pp. 297–338). En Sistema de monitoreo de los impactos de las represas hidroeléctricas Jirau y Santo Antonio en territorio boliviano: Línea de base sobre ecosistemas y recursos acuáticos en la Amazonía Boliviana. Ministerio de Relaciones Exteriores (MRE) y Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA). Editorial INIA.
- Ayala, G., Zambrana, K., & Maldonado, M. (2000). Estructura trófica de la ictiocenosis en lagunas de la llanura inundable de los ríos Ichilo y Chapare (Bolivia). *Revista Boliviana de Ecología y Conservación Ambiental*, 7, 25–35.
- Azurduy, H. (Ed.). (2008). Biodiversidad del Pantanal de Bolivia. MHNNKM, FUAMU, WWF.
- Bignotto, T. S., Maniglia, T. C., Gomes, V. N., Oliveira, I. J., Agostinho, J. S., Prioli, S. M. A. P., & Prioli, A. J. (2020). Genetic evidence for a species complex within the piranha *Serrasalmus maculatus* (Characiformes, Serrasalminidae) from three Neotropical river basins based on mitochondrial DNA sequences. *Genetics and Molecular Biology*, 43(1), e20190131. <https://doi.org/10.1590/1678-4685-gmb-2018-0131>
- Breirão, G. L. (2024). *Serrasalmus marginatus*. The IUCN Red List of Threatened Species 2024: e.T186740A1817669. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2024-2.RLTS.T186740A1817669.en>
- Carvajal-Vallejos, F. M., & Zeballos, A. (2011). Diversidad y distribución de los peces de la Amazonía boliviana (pp. 101–147). En P. A. Van Damme, F. M. Carvajal-Vallejos, & J. Molina (Eds.), *Los peces y delfines de la Amazonía Boliviana: Hábitats, potencialidades y amenazas*. Editorial INIA.
- Carvajal-Vallejos, F. M., Bigorne, R., Zeballos, A., Fernández, A. J., Sarmiento, J., Barrera, S., Yunoki, T., Pouilly, M., Zubieta, J., De La Barra, E., Jegú, M., Maldonado, M., Van Damme, P. A., Céspedes, R., & Oberdorff, T. (2014). Fish-AMAZBOL: A database on freshwater fishes of the Bolivian Amazon. *Hydrobiologia*, 732(1), 19–27. <https://doi.org/10.1007/s10750-014-1857-1>
- Ferreira, F., Vicentin, W., Costa, F. E., & Suárez, Y. (2014). Trophic ecology of two piranha species, *Pygocentrus nattereri* and *Serrasalmus marginatus* (Characiformes, Characidae), in the floodplain of the Negro River, Pantanal. *Acta Limnologica Brasiliensis*, 26(4), 381–391. <https://doi.org/10.1590/S2179-975X2014000400010>
- Fink, W. L. (1993). Revision of the piranha genus *Pygocentrus* (Teleostei, Characiformes). *Copeia*, 1993(3), 665–687. <https://doi.org/10.2307/1447232>
- Froese, R., & Pauly, D. (Eds.). (2025). FishBase (Version 04/2025) [Base de datos en línea]. www.fishbase.org

- Gallo-Cardozo, F., Careaga, M., & Carvajal-Vallejos, F. M. (2023). Redescription of the common but poorly known piranha *Serrasalmus hollandi* (Serrasalminae) from the Upper Madeira River. *Journal of Ichthyology*, 63(6), 1005–1024. <https://doi.org/10.1134/S003294522360005X>
- Gallo-Cardozo, F., Careaga, M., & Carvajal-Vallejos, F. M. (2025). A new cryptic species of piranha *Serrasalmus* (Serrasalminae) from the Bolivian Amazon, Upper Madeira River system. *Journal of Ichthyology*, 65, 574–592. <https://doi.org/10.1134/S0032945225050121>
- Gallo-Cardozo, F., Maldonado, M., Careaga, M., & Carvajal-Vallejos, F. M. (2024). A new species of piranha (*Serrasalmus*, Serrasalminae) from the Upper Madeira River system, Amazon basin, Bolivia. *Journal of Ichthyology*, 64, 386–409. <https://doi.org/10.1134/S0032945224040063>
- GTLM-WCS (Grupo de Trabajo para los Llanos de Moxos & Wildlife Conservation Society). (2022). Expedición científica a los Grandes Lagos Tectónicos de Exaltación. Informe Científico 2022. Relevamientos de biodiversidad y arqueología en los Llanos de Moxos, Beni. La Paz, Bolivia.
- Hubert, N., & Renno, J. F. (2010). Description of a new *Serrasalmus* species, *Serrasalmus odyssei* n. sp. (pp. 52–59). En *Evolution of the neotropical ichthyofauna: Molecular and evolutionary perspectives about the origin of the fish communities in the Amazon*. VDM Publishing House, Verlag Dr. Muller.
- IUCN. (2025). The IUCN Red List of Threatened Species (Version 2025-1). <https://www.iucnredlist.org>
- Lauzanne, L., & Loubens, G. (1985). Peces del río Mamoré. Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération, Éditions de l'ORSTOM. (Collection Travaux et Documents No. 192, 116 pp.)
- Machado-Allison, A. (2002). Los peces caribes de Venezuela: Una aproximación a su estudio taxonómico. *Boletín de la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales*, 63(1), 35–87.
- Machado-Allison, A. (1985). Estudios sobre la subfamilia Serrasalminae. III: Sobre el estatus genérico y relaciones filogenéticas de los géneros *Pygopristis*, *Pygocentrus*, *Pristobrycon* y *Serrasalmus* (Teleostei-Characidae-Serrasalminae). *Acta Biológica Venezuelica*, 12(1), 19–42.
- Macnaughton, A. E. (2025). Multi-modal livelihoods, access, and agency in small-scale fisheries: Case study insights from the Bolivian Amazon, Tesis doctoral, University of Victoria, Canada.
- Macnaughton, A. E., Montellano, S. V., Trujillo, S., Salas, R., & Carvajal-Vallejos, F. M. (2017). Los medios de vida en comunidades indígenas del norte de Bolivia: ¿Cuál es el rol actual y potencial de la pesca? (pp. 321–357). En F. M. Carvajal-Vallejos, R. Salas, J. Navia, J. Carolsfeld, F. Moreno, & P. A. Van Damme (Eds.), *Bases técnicas para el manejo y aprovechamiento del paiche (Arapaima gigas) en la Cuenca Amazónica Boliviana*. INIAF–IDRC. Editorial INIA.
- Montellano, S. V., Macnaughton, A., & Carvajal-Vallejos, F. M. (2017). Diagnóstico de las pesquerías en cuatro territorios indígenas del norte amazónico de Bolivia (pp. 207–319). En F. M. Carvajal-Vallejos, R. Salas, J. Navia, J. Carolsfeld, F. Moreno, & P. A. Van Damme (Eds.), *Bases técnicas para el manejo y aprovechamiento del paiche (Arapaima gigas) en la Cuenca Amazónica Boliviana*. INIAF–IDRC. Editorial INIA.
- Navia, C., Salas, R., Van Damme, P., & Ayala, R. (2008). Pescando en el Pantanal Boliviano: Cartilla sobre pesca sostenible. Editorial INIA, Cochabamba, Bolivia. 24 p.
- SNHN. (Servicio Nacional de Hidrografía Naval). (1998). Hidrografía de Bolivia: Descripción de ríos, lagos, salares y balance hídrico superficial de Bolivia. Ministerio de Defensa Nacional, Fuerza Naval Boliviana. Talleres Gráficos del Instituto Geográfico Militar, primera edición, La Paz, Bolivia. 359 p.
- Villéger, S., Brosse, S., Mouchet, M., Mouillot, D., & Vanni, M. J. (2017). Functional ecology of fish: Current approaches and future challenges. *Aquatic Sciences*, 79, 783–801. <https://doi.org/10.1007/s00027-017-0546-z>

Influencia de la incorporación de polvo de caucho reciclado en el desempeño de mezclas asfálticas por vía húmeda

Influence of recycled rubber powder incorporation on the performance of asphalt mixtures using the wet process

Filemón Mejía Blanco¹, Jahel Sarvia Ledezma Pérez^{2,*}, Victor Hugo Miranda Challapa³, Joaquín Humberto Aquino Rocha⁴

*Correo de correspondencia: ja.ledezma@umss.edu

Resumen

La susceptibilidad a la humedad y la deformación permanente inducida por cargas repetitivas de tráfico se constituyen en mecanismos de deterioro que debilitan la estructura de los pavimentos flexibles en edades tempranas. Paralelamente, el creciente volumen de neumáticos fuera de uso (NFU) plantea un desafío ambiental que puede ser abordado mediante procesos de reciclaje sostenibles. En este contexto, la incorporación de polvo de caucho reciclado (PCR) en mezclas asfálticas por vía húmeda ha surgido como una alternativa prometedora para mejorar el desempeño mecánico de los pavimentos. La presente investigación evalúa la influencia del cemento asfáltico modificado con PCR en la resistencia a la humedad y al ahuellamiento. Se analizaron tres tipos de mezclas asfálticas: una mezcla convencional, una modificada con polímero industrial Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) y una tercera modificada con PCR. En esta última, se empleó cemento asfáltico convencional de procedencia peruana (grado de penetración 60/70), modificado con 9% de PCR, sometido a un proceso de mezcla previa durante 1,5 horas a $175 \pm 5^\circ\text{C}$ y 1700 rpm. Los resultados muestran que la mezcla modificada con PCR presenta un desempeño superior respecto a las demás mezclas, evidenciando un incremento del 8% en la resistencia a la tracción indirecta respecto a la mezcla convencional. En cuanto a la deformación permanente, se observó una reducción del 69% frente a la mezcla convencional y del 45% respecto a la mezcla con SBS, destacando así el potencial del PCR como modificador sostenible para mejorar la durabilidad de los pavimentos flexibles.

Palabras clave: caucho reciclado, mezclas asfálticas modificadas, resistencia a la humedad, deformación permanente.

Abstract

Permanent deformation caused by repetitive traffic loads and moisture susceptibility are major deterioration mechanisms that compromise the structure of flexible pavements at early service ages. Simultaneously, the growing volume of end-of-life tires (ELT) presents a significant environmental challenge, which can be addressed through sustainable recycling strategies. In this context, the incorporation of recycled rubber powder (RRP) into asphalt mixtures via the wet process has emerged as a promising approach to enhance the mechanical performance of pavements. This study evaluates the influence of asphalt binder modified with RRP on moisture damage and rutting performance. Three types of asphalt mixtures were evaluated: a conventional mixture, a mixture modified with Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) polymer, and a third mixture modified with RRP. For the latter, a conventional asphalt binder sourced from Peru (penetration grade 60/70) was used, modified with 9% RRP through a pre-mixing process conducted for 1.5 hours at $175 \pm 5^\circ\text{C}$ and 1700 rpm. The results show that the RRP-modified asphalt mixture outperforms both the conventional and SBS-modified mixtures, with an 8% increase in indirect tensile strength relative to the conventional mixture. In terms of permanent deformation, the RRP-modified mixture exhibited a 69% reduction compared to the conventional mixture and a 45% reduction relative to the SBS-modified mixture. These findings highlight the potential of RRP as a sustainable modifier to enhance the durability of flexible pavements.

Keywords: recycled rubber, modified asphalt mixtures, moisture resistance, permanent deformation.

¹ Carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0004-0114-3692>

² Laboratorio de Pavimentos y Asfaltos, Departamento de Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0000-0002-2743-6256>

³ Laboratorio de Pavimentos y Asfaltos, Departamento de Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0009-2752-8087>

⁴ Laboratorio de Resistencia de Materiales, Departamento de Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0000-0002-3383-6379>

1. Introducción

La construcción y el mantenimiento de carreteras desempeñan un papel fundamental en el desarrollo económico y social de cualquier país (World Bank, 2020). En los últimos años, ha cobrado creciente importancia la implementación de procedimientos y metodologías orientados a mejorar el desempeño de los pavimentos flexibles, priorizando además la sostenibilidad mediante el empleo, reutilización y reciclaje de materiales que conforman la estructura vial, sin comprometer el cumplimiento de las especificaciones técnicas requeridas (Salehi et al., 2021; Li et al., 2022). Con el objetivo de optimizar el desempeño de las mezclas asfálticas, surge la necesidad de desarrollar materiales más resistentes, capaces de mejorar propiedades como la durabilidad, la resistencia al ahuellamiento y a la fatiga, especialmente frente a condiciones severas de tránsito y clima que afectan negativamente la vida útil de los pavimentos (Singh & Sahoo, 2021).

Entre las estrategias emergentes para modificar las mezclas asfálticas destaca la incorporación de polvo de caucho reciclado (PCR), obtenido a partir de la trituración de neumáticos fuera de uso (NFU). Su incorporación puede realizarse mediante dos métodos principales: vía húmeda, donde el ligante asfáltico es modificado previamente al mezclado a través de un proceso controlado de temperatura y agitación; y vía seca, donde el PCR se incorpora como parte de los agregados durante la mezcla (Zhao et al., 2023).

Diversos estudios han reportado resultados favorables: por ejemplo, Martínez et al (2018) observaron incrementos de hasta un 20 % en la resistencia al ahuellamiento de mezclas modificadas con PCR; Díaz & Castro (2017) documentaron mejoras en la durabilidad y la resistencia a la fatiga en condiciones de carga repetida; mientras que Zhao et al. (2023) identificaron que la incorporación de caucho reciclado redujo las deformaciones permanentes en un 15 % respecto a mezclas convencionales.

Además de contribuir al mejoramiento de las propiedades mecánicas, el uso de PCR ofrece beneficios ambientales significativos al reducir la contaminación derivada de la inadecuada disposición de neumáticos, tales como la quema a cielo abierto y las consecuentes emisiones de CO₂ (Díaz & Castro, 2017). Sin embargo, la adición de PCR también plantea desafíos técnicos que deben ser considerados. Entre ellos, se incluyen posibles variaciones en la trabajabilidad de la mezcla, cambios en la estabilidad del ligante y en la adherencia ligante-agregado, los cuales podrían afectar el desempeño final si no se controlan adecuadamente durante el proceso de modificación (Presti, 2013; Nanjegowda & Biligiri, 2023).

Particularmente en América Latina, y en Bolivia en específico, el creciente volumen de neumáticos fuera de uso representa un problema ambiental relevante, haciendo urgente la búsqueda de alternativas de reciclaje que no solo reduzcan su impacto negativo, sino que también mejoren el desempeño de las infraestructuras viales (Martínez-Arguelles et al., 2018).

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la influencia de la incorporación de PCR en el desempeño de mezclas asfálticas mediante el proceso de vía húmeda, enfocándose en la resistencia al daño por humedad y a la deformación permanente. La innovación de esta investigación radica en el análisis comparativo entre mezclas convencionales, mezclas modificadas con polímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) y mezclas modificadas con PCR, aplicando un proceso de modificación controlada del ligante. De esta manera, se busca aportar evidencia experimental sobre el potencial del PCR como una alternativa técnica y ambientalmente sostenible para mejorar la durabilidad de los pavimentos flexibles.

2. Material y métodos

Las características y propiedades de los materiales empleados en la presente investigación fueron determinadas con el fin de verificar su idoneidad para el uso en mezclas asfálticas. La caracterización se realizó en dos partes: por un lado,

se evaluaron los agregados minerales, y por otro, el cemento asfáltico, del tipo convencional, modificado con PCR y modificado con polímero SBS.

Caracterización de los agregados minerales

Los agregados utilizados en esta investigación provienen del acopio de materiales del río Espíritu Santo. La Tabla 1 presenta los ensayos realizados para su caracterización, los cuales fueron desarrollados de acuerdo con los procedimientos establecidos en las normas de la *American Society for Testing and Materials* (ASTM).

Tabla 1

Caracterización de los agregados minerales

Ensayo	Unidad	Norma	Límite	Resultado	Verificación
Agregado Grueso					
Gravedad específica del agregado grueso	g/cm ³	ASTM C127	-	4,95	-
Abrasión de los Ángeles	%	ASTM C131	Máx 40%	24,40	Cumple
Caras fracturadas	%	ASTM D5821	Min 90%	95,3	Cumple
Resistencia a los sulfatos (Sanidad)	%	ASTM C2419	Máx 12%	6,2	Cumple
Agregado Fino					
Gravedad específica del agregado fino	g/cm ³	ASTM C128	-	2,533	-
Equivalente de arena	%	ASTM D2419	Min 45%	86,16	Cumple

Fuente: Autores.

Caracterización del cemento asfáltico

El cemento asfáltico utilizado en la mezcla convencional proviene de Perú y presenta una clasificación de penetración 60/70. Para su caracterización, se realizaron los ensayos mostrados en la Tabla 2, desarrollados conforme a los procedimientos establecidos en las normas ASTM correspondientes.

Tabla 2

Caracterización del cemento asfáltico convencional

Ensayo	Unidad	Norma	Límite	Resultado 60/70	Verificación
Penetración a 25°C	mm	ASTM D5	Mín. 60	63,22	Cumple
Peso específico del asfalto a 25°C	g/cm ³	ASTM D71	-	1,029	-
Ductilidad a 25°C	cm	ASTM D113	Mín. 100	149,2	Cumple
Punto de ablandamiento	°C	ASTM D36	48-54	44,1	No Cumple
Punto de inflamación	°C	ASTM D92	Mín. 230	299,6	Cumple
Adhesividad de agregados gruesos– ligante asfáltico	%	DNER-ME 078	Min 95	97,58	Cumple
Adhesividad de los ligantes bituminosos a los agregados finos	%	INVIAS E 744	Min 4	3	No Cumple

Fuente: Autores.

Caracterización de cementos asfálticos modificados

Se realizaron ensayos de caracterización al cemento asfáltico modificado con un 9% de PCR y al cemento asfáltico modificado industrialmente con polímero SBS, siguiendo los procedimientos establecidos en las normas ASTM correspondientes. Los resultados obtenidos en la caracterización de ambos materiales se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3

Caracterización de cementos asfálticos modificados

Ensayo	Unidad	Norma	Límite	Resultado 9% PCR	Resultado SBS
Penetración a 25°C	mm	ASTM D5	Mín. 40	43.48	56.83
Peso específico del asfalto a 25°C	g/cm ³	ASTM D71	-	1.027	0.998
Ductilidad a 25°C	cm	ASTM D113	Mín. 100	13.39	86.14
Punto de ablandamiento	°C	ASTM D36	48-54	59.1	71.5
Punto de inflamación	°C	ASTM D92	Mín. 230	332.5	306.6
Adhesividad de agregados gruesos–ligante asfáltico	%	DNER-ME 078	Min 95	100 (con 0,8% de mejorador de adherencia)	98
Adhesividad de los ligantes bituminosos a los agregados finos	%	INVIAS E 744	Min 4	10	10

Fuente: Autores.

Diseño de mezcla asfáltica convencional y modificada

La dosificación utilizada tanto para las mezclas convencionales como para las modificadas se realizó siguiendo la metodología propuesta por el Instituto del Asfalto (*Asphalt Institute*, 2014), basada en el método Marshall. Se empleó una única gradación de agregados para la mezcla asfáltica convencional y la mezcla modificada con PCR. Para la mezcla modificada con polímero SBS, se utilizó una gradación similar, con variaciones únicamente en el porcentaje de material fino.

Para determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico, se ensayaron cinco porcentajes diferentes de asfalto, evaluando un promedio de tres resultados obtenidos de cuerpos de prueba compactados. La selección del contenido óptimo se basó, principalmente, en alcanzar un 4% de vacíos de aire en los especímenes compactados.

En el diseño de las mezclas asfálticas —convencional, modificada con SBS y modificada con PCR— se determinaron los parámetros volumétricos Marshall, entre los que se incluyen: porcentaje óptimo de cemento asfáltico, vacíos de aire en la mezcla compactada (Va), estabilidad, flujo, densidad específica *Bulk*, vacíos llenos de asfalto (VFA) y vacíos en el agregado mineral (VMA).

Evaluación de la susceptibilidad a la humedad

La evaluación de la susceptibilidad a la humedad en las mezclas asfálticas diseñadas se realizó siguiendo el procedimiento establecido en la norma ASTM D4867 (ASTM, 2014). Para ello, se elaboraron cuerpos de prueba correspondientes a la mezcla asfáltica convencional, a la mezcla modificada con polímero SBS y a la mezcla modificada con PCR.

Se utilizaron los contenidos óptimos de cemento asfáltico determinados mediante el método Marshall, elaborándose seis cuerpos de prueba para cada tipo de mezcla. Cada cuerpo de prueba presentó un diámetro de 102 mm y una

altura de 63,5 mm. Se verificó que el porcentaje de vacíos de aire estuviera dentro del rango requerido de 6% a 8%, utilizando un compactador giratorio.

Posteriormente, los cuerpos de prueba se dividieron en dos grupos: un grupo acondicionado en ambiente húmedo y otro en condiciones secas, siguiendo los procedimientos de acondicionamiento definidos en la norma. Una vez acondicionados, los especímenes fueron ensayados a compresión diametral en el equipo Marshall, determinándose la resistencia a la tracción indirecta de cada grupo.

Este ensayo permitió estimar el daño potencial de las mezclas asfálticas frente a la acción del agua, mediante la determinación de la resistencia a la tracción (S_t) y del índice de relación de resistencia a la tracción (TSR), utilizando la Ecuación (1).

$$TSR = \left(\frac{S_{TM}}{S_{TD}} \right) * 100 \quad (1)$$

Donde:

T_{SR} = Relación de resistencia a la tracción (%),

S_{TM} = Resistencia a la tracción del subconjunto condicionado por humedad (kPa),

S_{TD} = Resistencia a la tracción del subconjunto seco (kPa).

Evaluación de la susceptibilidad a la deformación permanente

La determinación de la susceptibilidad a la deformación permanente de los cuerpos de prueba se realizó siguiendo el procedimiento establecido en la norma AASHTO T324 (AASHTO, 2004). Este método, basado en el ensayo con la rueda de Hamburgo, permite identificar fallas prematuras en las mezclas asfálticas, atribuibles a debilidades en la estructura del agregado, rigidez inadecuada del cemento asfáltico o daño por humedad.

Para la ejecución del ensayo, se elaboraron cuatro cuerpos de prueba para cada tipo de diseño de mezcla asfáltica, cada uno con un diámetro de 150 mm. Durante la prueba, los especímenes se sumergieron en agua a una temperatura de 50 °C, aplicándoseles una carga de $705 \pm 4,5$ N a una velocidad de 50 ± 5 pasadas por minuto con la rueda de Hamburgo. El ensayo continuó hasta alcanzar 20.000 pasadas o hasta que se registrara una deformación máxima de 20 mm, conforme a los criterios establecidos por el Instituto del Asfalto (*Asphalt Institute*, 2014).

3. Resultados y Discusión

Diseño de la mezcla asfáltica convencional y modificado con PCR

Los resultados de los parámetros volumétricos obtenidos en el diseño Marshall de las mezclas asfálticas analizadas se presentan en la Tabla 4. Se observa que la estabilidad de la mezcla modificada con PCR se incrementa en un 10% respecto a la mezcla modificada con polímero SBS y en un 25% en comparación con la mezcla asfáltica convencional.

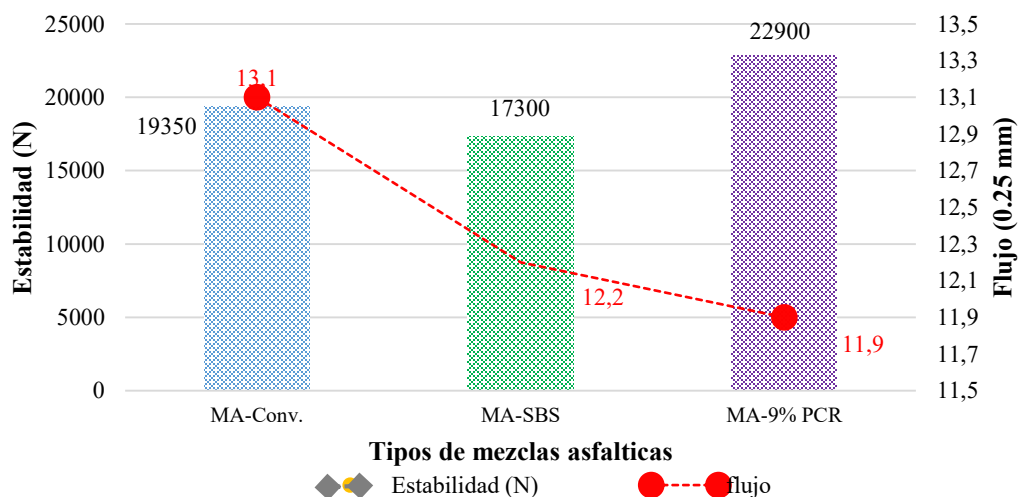
Tabla 4*Resultados obtenidos del diseño volumétrico de las mezclas asfálticas*

Parámetros volumétricos	Unidad	Requerimiento Instituto del Asfalto	Tipos de mezclas asfálticas		
			MA Conv.	MA SBS	MA 9% PCR
Contenido de cemento asfáltico óptimo	%	-	5,6	5,5	5,8
Vacios de aire en la mezcla compactada "Va"	%	3 - 5	4,4	4,6	3,9
Vacios en agregado mineral "VMA"	%	Min. 14	13,2	16,6	13,65
Vacios llenos de asfalto "VFA"	%	65-75	68	72	71
Estabilidad	N	Min. 8.006	19.350	17.300	22.900
Flujo	0,25 mm	8 - 14	13,1	12,2	11,9
Densidad	kg/m ³	-	2,326	2,298	2,302

Fuente: Autores.

Complementariamente, la Figura 1 presenta la comparación de los valores de estabilidad y flujo obtenidos para las mezclas asfálticas convencionales y modificadas. Se observa que la mezcla modificada con polvo de caucho reciclado (MA-9% PCR) alcanza el mayor valor de estabilidad (22.800 N), superando en un 25% al valor registrado por la mezcla convencional (19.350 N) y en un 27% al de la mezcla modificada con SBS (17.800 N).

Respecto al flujo, se evidencia una tendencia decreciente conforme se introducen modificaciones en la mezcla. La mezcla convencional presenta el valor más alto de flujo ($13,1 \times 0,25$ mm), seguido por la mezcla modificada con SBS ($12,8 \times 0,25$ mm) y, finalmente, por la mezcla modificada con PCR, que muestra el menor valor de flujo ($11,9 \times 0,25$ mm). Estos resultados indican que la modificación con polvo de caucho reciclado no solo mejora la estabilidad de la mezcla, sino que también contribuye a una disminución del flujo, sugiriendo una estructura interna más rígida y, potencialmente, una mayor resistencia frente a la deformación permanente.

Figura 1*Relación de estabilidad y flujo de las diferentes mezclas asfálticas*

Fuente: Autores.

Evaluación de la susceptibilidad a la humedad

Los resultados de TSR y de la resistencia a la tracción indirecta de los grupos seco y condicionado por humedad de las mezclas asfálticas evaluadas se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5

Resultados obtenidos del ensayo de susceptibilidad a la humedad

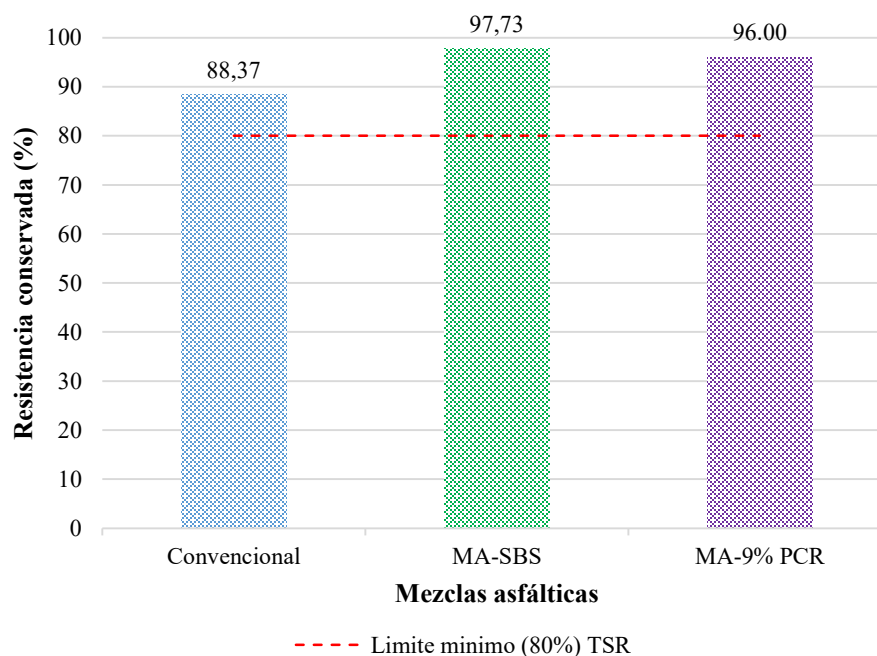
Tipo de mezcla asfáltica	Porcentaje de cemento asfáltico	Grupo de evaluación	Porcentaje de vacíos en la mezcla (Va)	Resistencia a la tracción indirecta (KPa)	Resistencia a la humedad (%)
Convencional	5,6	Seco	7,27	704,04	88,37
		Acondicionado	7,24	622,17	
MA-SBS	5,5	Seco	6,63	626,33	97,73
		Acondicionado	6,35	612,13	
MA-9% PCR	5,8	Seco	5,96	1.019,01	96,00
		Acondicionado	5,96	978,21	

Fuente: Autores.

Se observa que todas las mezclas analizadas cumplen con el requisito mínimo establecido por la norma ASTM D4867 (ASTM, 2014), que exige una relación de resistencia a la humedad superior al 80%. La mezcla asfáltica convencional obtuvo un TSR de 88,37%, mientras que las mezclas modificadas con polímero SBS y PCR alcanzaron valores de 97,73% y 96,00%, respectivamente, como se muestra en la Figura 2.

Figura 2

Resistencia a la humedad en las mezclas asfálticas evaluadas

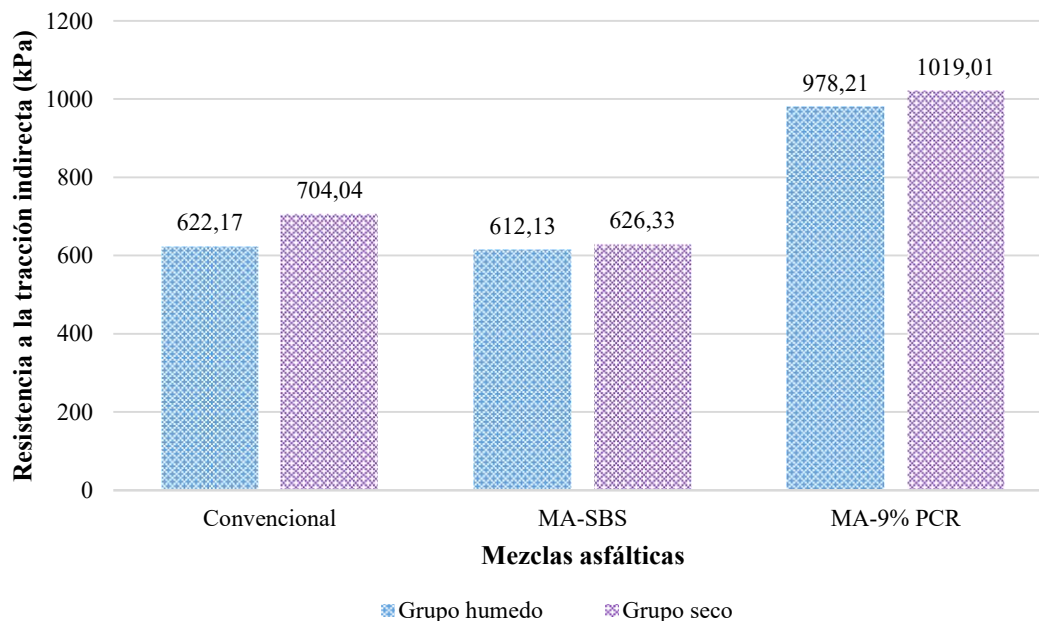


Fuente: Autores

Respecto a la resistencia a la tracción indirecta (Figura 3), se evidencia que la incorporación de modificadores mejora significativamente el desempeño de las mezclas. La mezcla modificada con SBS presenta un incremento aproximado del 10% en la resistencia a la tracción indirecta en estado seco respecto a la mezcla convencional. No obstante, la mezcla modificada con 9% de PCR exhibe la mayor resistencia a la tracción, con un aumento superior al 45% respecto a la mezcla convencional.

Figura 3

Resistencia a la tracción indirecta de las mezclas asfálticas evaluadas



Fuente: Autores.

Los resultados indican que el uso de modificadores, tanto SBS como PCR, mejora la resistencia de las mezclas asfálticas frente a los daños provocados por la humedad. Particularmente, la mezcla modificada con polvo de caucho reciclado mostró un desempeño superior en términos de resistencia a la tracción indirecta, consolidándose como una alternativa técnica viable para mejorar la durabilidad de los pavimentos frente a la acción del agua.

Evaluación de la susceptibilidad a la deformación permanente

La susceptibilidad a la deformación permanente de las mezclas asfálticas evaluadas se determinó mediante el ensayo de rueda de Hamburgo, conforme a la norma AASHTO T324 (AASHTO, 2004). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6

Resultados obtenidos del ensayo de la rueda de Hamburgo

Tipo de mezcla asfáltica	Porcentaje de cemento asfáltico	Rueda	Número de pasadas al punto de <i>stripping</i>	Ahuellamiento desarrollado	Media de ahuellamiento
Convencional	5,6	1	No presenta	6,91	6,03
		2	No presenta	5,14	
MA-SBS	5,5	1	No presenta	2,34	3,34
		2	No presenta	4,34	
MA-9% PCR	5,8	1	No presenta	2,09	1,85
		2	No presenta	1,60	

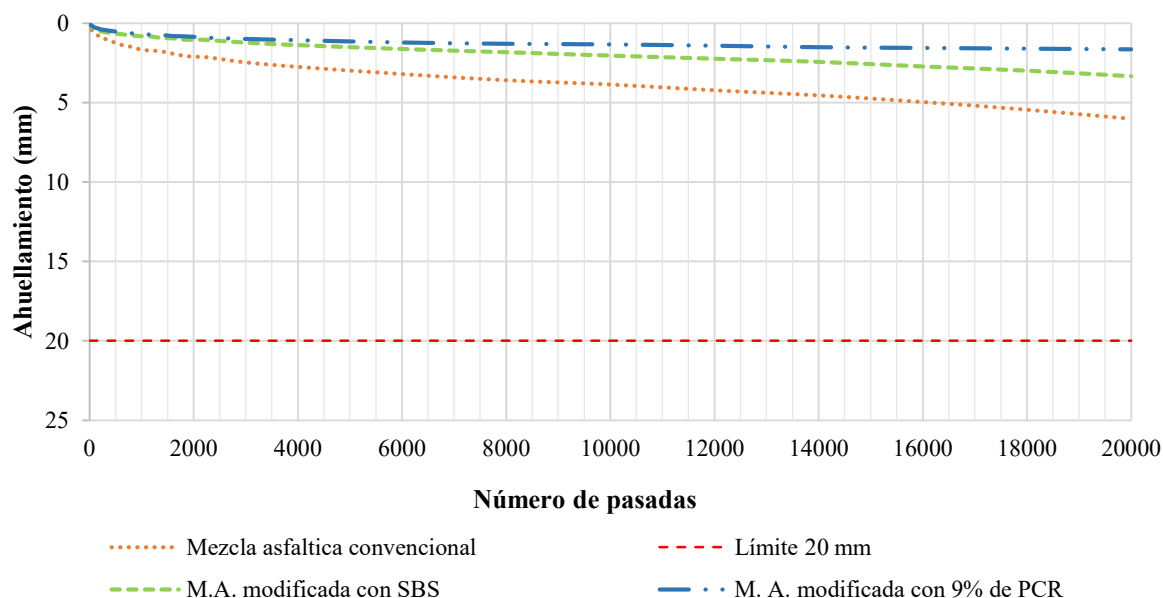
Fuente: Autores

Se observa que la mezcla asfáltica convencional exhibe el mayor valor de deformación permanente, con una media de 6,03 mm. En comparación, la mezcla modificada con polvo de caucho reciclado (MA-9% PCR) muestra una reducción del 69,3% en la deformación respecto a la mezcla convencional, mientras que la mezcla modificada con SBS registra una disminución del 44,6%. Todos los especímenes cumplieron con el criterio de la norma, limitando su deformación por debajo de los 20 mm y resistiendo 20.000 pasadas sin fallas por *stripping*.

En cuanto al comportamiento frente a la deformación progresiva, la Figura 4 muestra la evolución del ahuellamiento en función del número de pasadas. La mezcla modificada con PCR se distingue por su menor tasa de deformación acumulada, seguida por la mezcla modificada con SBS y, en último lugar, la mezcla convencional.

Figura 4

Deformación permanente de las mezclas asfálticas evaluadas



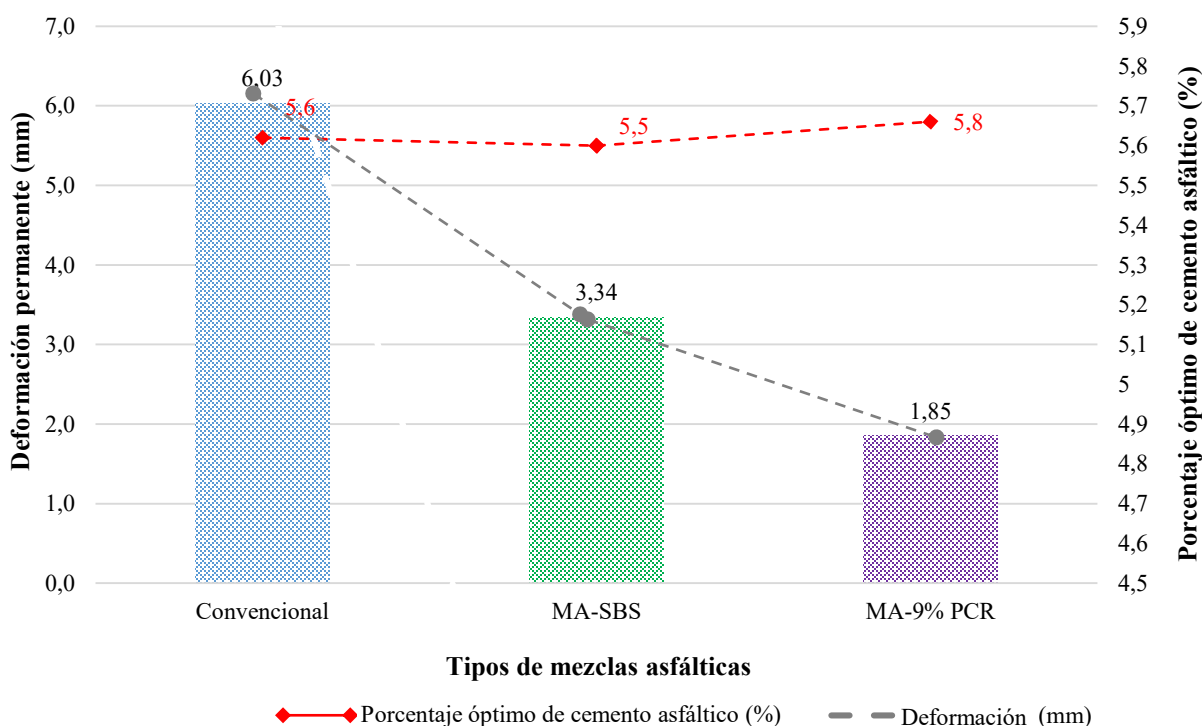
Fuente: Autores.

Por otro lado, la Figura 5 compara los valores medios de deformación permanente y los porcentajes óptimos de contenido de cemento asfáltico. Se evidencia que la mezcla MA-9% PCR no solo presenta el menor valor de deformación (1,85 mm), sino que también mantiene un contenido de cemento asfáltico similar al de las otras mezclas. Esto sugiere que la mejora en la resistencia al ahuellamiento se atribuye principalmente a las propiedades intrínsecas de la modificación con caucho reciclado a través del aumento de rigidez.

En resumen, los resultados obtenidos confirman que la modificación de mezclas asfálticas con polvo de caucho reciclado proporciona una mejora significativa en la resistencia a la deformación permanente, superando incluso a las mezclas modificadas con polímero SBS, y sin evidencias de *stripping*. Este comportamiento destaca el potencial del uso de PCR como una alternativa técnica viable y ambientalmente favorable en la mejora de la durabilidad de pavimentos asfálticos.

Figura 5

Resultados del ensayo de deformación permanente y porcentaje óptimo de cemento asfáltico de las mezclas asfálticas evaluadas



Fuente: Autores.

4. Conclusión

En la presente investigación se evaluó el desempeño de mezclas asfálticas convencionales y modificadas mediante la incorporación de PCR y polímero SBS, considerando ensayos de resistencia a la humedad, parámetros volumétricos Marshall y susceptibilidad a la deformación permanente. Con base en los ensayos realizados, se obtienen las siguientes conclusiones:

- En los ensayos de resistencia a la humedad, se evidenció que la mezcla modificada con PCR presenta un desempeño similar al de la mezcla modificada con SBS, con una diferencia de apenas 1,7% en la relación

de TSR. Ambas mezclas superaron ampliamente el límite mínimo del 80%, mientras que la mezcla convencional registró valores inferiores.

- En cuanto a los parámetros volumétricos Marshall, se observó que la estabilidad de la mezcla modificada con PCR aumentó aproximadamente un 10% respecto a la mezcla modificada con SBS y un 25% en comparación con la mezcla convencional, evidenciando una mejora significativa en la resistencia estructural del material.
- Respecto a la deformación permanente, se constató que la modificación del ligante 60/70 con un 9% de PCR permitió reducir la deformación en un 69% respecto a la mezcla convencional y en un 45% respecto a la mezcla modificada con SBS. Todas las mezclas ensayadas alcanzaron las 20.000 pasadas en la prueba de la rueda de Hamburgo sin superar la deformación máxima de 20 mm, además de no presentar fallas por *stripping* durante el ensayo.
- El adecuado desempeño frente a la humedad y la deformación permanente sugiere que la modificación con PCR mejora la adherencia ligante-agregado, contribuyendo positivamente a la durabilidad y desempeño mecánico de las mezclas asfálticas.

La incorporación de un 9% de PCR en mezclas asfálticas constituye una alternativa técnica viable y sostenible, capaz de mejorar significativamente el comportamiento mecánico frente a condiciones críticas de tráfico y clima, promoviendo además el aprovechamiento de residuos sólidos en aplicaciones de infraestructura vial.

Se recomienda la implementación del cemento asfáltico modificado con PCR en futuros diseños de mezclas asfálticas, especialmente en aquellas destinadas a zonas de alta carga de tránsito, debido a su destacada resistencia a la deformación permanente. Por otro lado, se sugiere ampliar los estudios a nivel nacional, evaluando diferentes porcentajes de incorporación de PCR y condiciones de carga y clima variables, a fin de establecer especificaciones técnicas más detalladas para su aplicación masiva en proyectos de infraestructura vial.

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no existe ningún conflicto de interés.

Agradecimientos: Se agradece de manera especial al Laboratorio de Pavimentos y Asfaltos y el Laboratorio de Resistencia de Materiales por proporcionar los medios, equipos e instalaciones necesarias para la ejecución de este proyecto de investigación.

5. Referencias bibliográficas

- AASHTO. (2004). T324-04: Hamburg wheel-track testing of compacted hot mix asphalt (HMA). Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Asphalt Institute. (2014). Marshall method of mix design. Asphalt Institute. (7 th Edition), Asphalt Mix Design Methods (Chapter 7, p. 77).
- ASTM. (2014). ASTM D4867/D4867M-14: Standard test method for effect of moisture on asphalt concrete paving mixtures. west conshohocken, PA: ASTM International.
https://doi.org/10.1520/D4867_D4867M-09R14
- Díaz, César Mauricio & Castro, Liliana Carolina. (2017). Implementación del grano de caucho reciclado (GCR) proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles en Bogotá, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia.
- Li, F., Zhang, X., Wang, L., & Zhai, R. (2022). The preparation process, service performances and interaction mechanisms of crumb rubber modified asphalt (CRMA) by wet process: A comprehensive review. *Construction and Building Materials*, 354, 129168.

- Martínez-Argüelles, G., Caicedo, B., González, D., Celis, L., Fuentes, L., & Torres, V. (2018). Trece años de continuo desarrollo con mezclas asfálticas modificadas con Grano de Caucho Reciclado en Bogotá: Logrando sostenibilidad en pavimentos. *Revista ingeniería de construcción*, 33(1), 41-50.
- Nanjegowda, V. H., & Biligiri, K. P. (2023). Utilization of high contents of recycled tire crumb rubber in developing a modified-asphalt-rubber binder for road applications. *Resources, Conservation and Recycling*, 192, 106909.
- Presti, D. L. (2013). Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: A literature review. *Construction and building materials*, 49, 863-881.
- Salehi, S., Arashpour, M., Kodikara, J., & Guppy, R. (2021). Sustainable pavement construction: A systematic literature review of environmental and economic analysis of recycled materials. *Journal of Cleaner Production*, 313, 127936.
- Singh, A. K., & Sahoo, J. P. (2021). Rutting prediction models for flexible pavement structures: A review of historical and recent developments. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(3), 315-338.
- World Bank. (2020). Transport overview. The World Bank. Disponible en: <https://www.worldbank.org/en/topic/transport/overview>
- Zhao, Z., Wu, S., Xie, J., Yang, C., Yang, X., Chen, S., & Liu, Q. (2023). Recycle of waste tire rubber powder in a novel asphalt rubber pellets for asphalt performance enhancement. *Construction and Building Materials*, 399, 132572.





Artículos de

Revisión



Sílice como recubridor de nanopartículas de oro para mejorar la biocompatibilidad

Silica as a coating for gold nanoparticles to improve biocompatibility

Gabriela Reyes Moreno^{1,*}, José Omar Arzabe Maure²

*Correo de correspondencia: gabireyesm6@gmail.com

Resumen

Las nanopartículas de oro (AuNPs) han surgido como una alternativa prometedora en biomedicina debido a su estabilidad química, facilidad de funcionalización y propiedades ópticas únicas. Sin embargo, su aplicación en sistemas biológicos se ve limitada por problemas de toxicidad y baja biocompatibilidad. Para superar estos desafíos, se han propuesto diversos recubrimientos, entre los cuales destaca la sílice (SiO₂), que ha demostrado ser una opción eficaz. La sílice actúa como una barrera inerte que mejora la estabilidad coloidal y reduce la toxicidad al evitar la interacción directa de las AuNPs con células y proteínas. Además, su superficie puede ser funcionalizada con grupos específicos, lo que permite aplicaciones dirigidas en el ámbito biomédico. El objetivo de esta revisión es analizar el impacto del recubrimiento de sílice sobre la estabilidad, toxicidad y funcionalidad de las AuNPs, comparando sus ventajas, limitaciones y aplicaciones en el campo biomédico. Para ello, se presentan los principales métodos de síntesis, caracterización y evaluación biológica, con el fin de ofrecer una visión integral del papel de la sílice en la mejora de la biocompatibilidad de las AuNPs y contribuir al desarrollo de nanosistemas más seguros y eficientes. Esta revisión es relevante porque, aunque se ha avanzado en el estudio de las AuNPs, aún no está completamente claro cómo el recubrimiento de sílice mejora su seguridad y aplicabilidad biomédica. Reunir y analizar la información disponible permite una visión más completa, resaltando beneficios y retos, lo que contribuye al desarrollo de aplicaciones más seguras y útiles.

Palabras clave: nanopartículas de oro, recubrimiento, sílice, biocompatibilidad, toxicidad, nanotecnología, nanomateriales, interacción.

Abstract

Gold nanoparticles (AuNPs) have emerged as a promising alternative in biomedicine due to their chemical stability, ease of functionalization, and unique optical properties. However, their application in biological systems is limited by issues related to toxicity and low biocompatibility. To overcome these challenges, various coatings have been proposed, among which silica (SiO₂) stands out as an effective option. Silica acts as an inert barrier that enhances colloidal stability and reduces toxicity by preventing the direct interaction of AuNPs with cells and proteins. In addition, its surface can be functionalized with specific groups, enabling targeted biomedical applications. The objective of this review is to analyze the impact of silica coating on the stability, toxicity, and functionality of AuNPs, comparing their advantages, limitations, and applications in the biomedical field. To this end, the main synthesis, characterization, and biological evaluation methods are presented, providing a comprehensive overview of the role of silica in improving the biocompatibility of AuNPs and contributing to the development of safer and more efficient nanosystems. This review is relevant because, although significant progress has been made in the study of AuNPs, it is still not entirely clear how the silica coating enhances their safety and biomedical applicability. Gathering and analyzing the available information allows for a more comprehensive understanding, highlighting both benefits and challenges, and thereby contributing to the development of safer and more effective applications.

Keywords: gold nanoparticles, coating, silica, biocompatibility, toxicity, nanotechnology, nanomaterials, interaction.

¹ Carrera de Licenciatura en Química, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0004-5047-5845>

² Carrera de Licenciatura en Química, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0000-0001-9792-5920>

1. Introducción

El uso de nanopartículas de oro (AuNPs) en aplicaciones biomédicas ha crecido significativamente debido a sus propiedades únicas, como la estabilidad química, la capacidad de absorción en el infrarrojo cercano y la facilidad de funcionalización superficial (Bansal et al., 2020). Sin embargo, a pesar de sus ventajas, las AuNPs pueden presentar ciertos desafíos en términos de biocompatibilidad y toxicidad, especialmente cuando interactúan con sistemas biológicos complejos (Rosero et al., 2024). La tendencia actual en la nanomedicina se centra en la modificación superficial de las AuNPs mediante recubrimientos que mejoren su estabilidad en medios fisiológicos, reduzcan su toxicidad y optimicen su interacción con células y tejidos. En este contexto, la sílice (SiO_2) ha emergido como uno de los recubrimientos más prometedores para mejorar la biocompatibilidad y reducir la toxicidad de las AuNPs (Niznik et al., 2024). La incorporación de este recubrimiento no solo permite modificar las propiedades fisicoquímicas de las AuNPs, sino que también puede conferirles nuevas funcionalidades, como una mayor estabilidad coloidal, resistencia a la agregación, mayor tiempo de circulación en el organismo y mejor selectividad hacia tejidos específicos.

La sílice es ampliamente utilizada en nanotecnología biomédica debido a su baja citotoxicidad, estabilidad química y facilidad de funcionalización. Cuando se emplea como recubrimiento de AuNPs, forma una capa protectora que evita la liberación de iones metálicos potencialmente tóxicos y permite la conjugación de biomoléculas específicas para aplicaciones dirigidas (Croissant et al., 2017). Además, las AuNPs recubiertas con sílice pueden mejorar la biodisponibilidad en terapias fototérmicas y en la administración de fármacos, optimizando su rendimiento en entornos biológicos (Hao et al., 2020). Dado el creciente interés en la aplicación de AuNPs en terapias biomédicas, es importante comprender cómo el recubrimiento de sílice puede mejorar la biocompatibilidad y reducir la toxicidad de estos nanomateriales.

2. Metodología de investigación

Las nanopartículas metálicas, como las de oro y óxido de hierro, se utilizan en la detección y tratamiento de enfermedades. Por ejemplo, las nanopartículas de oro (AuNPs) pueden reconocer y atacar selectivamente células cancerosas, mientras que las de óxido de hierro se emplean como agentes de contraste en imágenes por resonancia magnética y en terapias de hipertermia para destruir células tumorales. Además, se están desarrollando dispositivos que integran AuNPs para mejorar la detección precoz de enfermedades. Sin embargo, el desarrollo de estas tecnologías presenta desventajas en cuanto a biocompatibilidad y toxicidad, por lo que una solución a estos problemas son los recubrimientos (Hurtado et al., 2022).

Estos avances en química inorgánica, mediante el uso de nanopartículas y recubrimientos especializados, están transformando la medicina y la tecnología, ofreciendo soluciones más eficientes y personalizadas en el diagnóstico, tratamiento y desarrollo de materiales con propiedades superiores. El presente trabajo corresponde a una revisión integrativa con metodología sistemática, ya que se recopilaron, analizaron y sintetizaron estudios relevantes sobre el uso de sílice como recubridor de nanopartículas de oro, siguiendo criterios claros de inclusión y exclusión, una estrategia de búsqueda estructurada en diversas bases de datos científicas y un proceso de selección en dos etapas. Este enfoque permitió integrar de manera crítica la evidencia disponible, ofreciendo una visión amplia y organizada del tema.

Estrategia de búsqueda

La metodología desarrollada tiene como objetivo asegurar una recopilación exhaustiva y sistemática de literatura científica relevante sobre la sílice como recubridor de AuNPs para biocompatibilidad y reducción de toxicidad. Para poder garantizar un análisis completo, se seleccionaron bases de datos científicas reconocidas por su relevancia en nanociencia y biomedicina las cuales fueron:

- Sci-ELO: artículos académicos revisados por pares.
- PubMed: artículos y bases de datos especializadas en medicina.
- Google Académico: literatura académica de fácil alcance.

También se emplearon plataformas académicas y bases de datos científicas de acceso abierto que facilitaron la obtención de artículos relacionados con el tema de investigación. En algunos casos, los artículos disponibles en formato PDF permitieron un análisis más detallado del contenido.

Selección de Artículos

Para garantizar la calidad y relevancia de la literatura seleccionada, se aplicaron criterios adicionales de evaluación. Se priorizaron artículos publicados en revistas científicas y de alto impacto, revisados por pares y con un número significativo de citaciones dentro del área. Asimismo, se valoró la importancia de los estudios respecto al objetivo de la revisión, considerando únicamente aquellos que aportaran información directa sobre las propiedades, biocompatibilidad, toxicidad y aplicaciones biomédicas de las nanopartículas de oro recubiertas con sílice. De esta manera, se buscó asegurar la validez científica y la aplicabilidad de los hallazgos. Para comenzar se definieron palabras clave los cuales ayudaron con la división del tema en diferentes componentes principales, que se deben tocar al momento de realizar el artículo de revisión:

- Recubrimiento de nanopartículas de oro con sílice
- Biocompatibilidad de recubridores inorgánicos
- Nanopartículas de oro con recubrimiento de la sílice y reducción de toxicidad

Áreas prioritarias para la búsqueda de los artículos fueron: propiedades químicas y físicas de las nanopartículas de oro como también de la Sílice, interacción de los recubridores, eficacia terapéutica en modelos preclínicos y clínicos, biocompatibilidad y evaluación de toxicidad. También se agregaron conectores para mejorar las búsquedas: AND, OR, NOT. Ejemplo: las frases que se usaron en inglés con los conectores son "Gold nanoparticles coating" AND "silica" AND "biocompatibility", "Gold nanoparticles" AND "silica" AND "toxicity reduction". Estas palabras claves, frases y conectores están en inglés ya que la búsqueda de información en artículos en español fue escasa, así que el idioma principal de búsqueda fue el inglés. Ya que la mayoría de los artículos utilizados en la revisión están en este idioma, también se ajustaron las palabras clave según los resultados iniciales, si se encontraba muchos resultados irrelevantes, se especificaba más términos, y si los resultados son pocos, se expande la búsqueda usando sinónimos.

Los filtros que se estableció para seleccionar los artículos fueron:

- Año de publicación (últimos 5-10 años)
- Tipo de artículo (review, original research)
- Idioma (inglés, español)
- Evalúa la calidad de los artículos (relevancia para el tema, factor de impacto)

Para filtrar los resultados, se establecieron los siguientes criterios:

- **Inclusión:** Los estudios experimentales y revisiones de literatura con aplicaciones directas en nanopartículas, así como aquellos que analizaron la relación entre el tamaño, la forma y la funcionalización de las nanopartículas de oro (AuNPs) y sus recubridores funcionales.
- **Exclusión:** Los estudios fuera del ámbito biomédico, las publicaciones sin acceso al texto completo (salvo en casos justificados) y los documentos duplicados.

También se identifican los artículos más citados del tema, se revisa las secciones de referencias en revisiones previas para encontrar estudios relevantes que aporten a la información que está siendo revisada.

Para poder seleccionar los artículos finales que serán revisados se sigue un proceso de dos etapas:

- **Revisión inicial:** Análisis de títulos y resúmenes para identificar relevancia. en los cuales se identificaron 61 artículos, de los cuales se eliminaron 24 por no cumplir los criterios de inclusión.
- **Revisión completa:** Evaluación del contenido de los artículos para poder determinar su calidad metodológica, relevancia en el campo (impacto y citaciones) y su aplicabilidad de los hallazgos de los cuales se analizaron 37 artículos en detalle, y finalmente se seleccionaron 28 artículos que cumplen con los requisitos de calidad, relevancia y aplicabilidad en el campo biomédico.

Después de filtrar la información sobre el tema, se organiza la información por temas específicos que fueran relevantes en la información que tendría el artículo de revisión, también es importante realizar algunas preguntas, para que fueran respondidas en el cuerpo del artículo ejemplo: ¿Cómo influyen estos recubrimientos en la eficiencia de la terapia fototérmica contra el cáncer?, ¿Qué estudios han evaluado la biodistribución y eliminación de estas nanopartículas en modelos biológicos?, ¿Cuáles son los desafíos actuales y las perspectivas futuras para su aplicación en la medicina? etc. que serán de gran ayuda para desarrollar el tema.

En la elaboración del artículo de revisión, se utilizaron herramientas de inteligencia artificial únicamente como apoyo para la organización de ideas, traducción del resumen y palabras claves que se incluyen en el artículo de revisión (las inteligencias artificiales utilizadas son Chat GPT y DeepL).

Tabla 1

Resumen de artículos

Referencia	Objetivo del estudio	Principales resultados
Almada et al. (2023)	Analizar nanomateriales metálicos teragnósticos emergentes, incluidas AuNPs.	Destacan el potencial de las AuNPs en diagnóstico y terapia simultánea, resaltando problemas de toxicidad y biocompatibilidad.
Ansari (2019)	Revisar el transporte de nanopartículas en animales y humanos.	Describe la biodistribución, acumulación y mecanismos de transporte; resalta retos en seguridad biológica.
Bai et al. (2020)	Explicar propiedades básicas de AuNPs y sus aplicaciones en tumores.	Confirman utilidad en diagnóstico y terapia; resaltan limitaciones de toxicidad y eliminación in vivo.
Bahadur et al. (2011)	Desarrollar síntesis rápida “one-step” de AuNPs recubiertas con sílice.	El recubrimiento mejora estabilidad y funcionalización, facilitando aplicaciones biomédicas.
Bangwar et al. (2017)	Obtener sílice amorfa a partir de residuos de cáscara de arroz.	Producción eco-amigable de sílice útil como recubridor para nanopartículas.

Bansal et al. (2020)	Revisar aplicaciones biomédicas avanzadas de AuNPs.	Subrayan usos en terapia génica, liberación controlada y diagnóstico; recalcan necesidad de biocompatibilidad.
Chen et al. (2011)	Evaluar nanorods de Au recubiertos con sílice como nanoamplificadores foto acústicos.	El recubrimiento incrementó señal y estabilidad, útil en diagnóstico por imagen.
Chen et al. (2021)	Mejorar la fotoestabilidad de nanostars de Au recubiertos con sílice.	Recubrimiento prolonga estabilidad bajo irradiación y mejora eficiencia en terapia fototérmica.
Contreras-Vargas et al. (2021)	Explorar materiales mesoporosos en ingeniería de tejido óseo.	Sílice mesoporosa favorece proliferación celular y liberación de biomoléculas.
Costa & Paranhos (2018)	Evaluar producción sistemática de sílice amorfa de cáscara de arroz.	Métodos optimizados logran sílice de alta pureza y aplicabilidad como recubridor.
Croissant et al. (2017)	Analizar degradabilidad de nanopartículas de sílice y derivados.	Sílice mesoporosa presenta buena eliminación, aunque con acumulación parcial en órganos.
Erick (2020)	Sintetizar y evaluar sílice decorada con nanopartículas metálicas.	Materiales presentan propiedades catalíticas mejoradas; potencial de recubrimiento multifuncional.
Hammami et al. (2021)	Revisar síntesis y aplicaciones de AuNPs.	Confirman la versatilidad biomédica, destacando retos de toxicidad.
Han et al. (2008)	Desarrollar microemulsión inversa para síntesis de AuNPs y AgNPs recubiertas.	Síntesis controlada genera nanopartículas estables y uniformes.
Hao et al. (2020)	Desarrollar injertos vasculares de pequeño diámetro con rápida endotelización.	El recubrimiento bioactivo permitió la adhesión selectiva de células endoteliales, acelerando la regeneración vascular.
Hurtado et al. (2022)	Analizar aplicaciones tecnológicas de nanopartículas en medicina e industria.	Destacan el uso de AuNPs y sílice en diagnóstico, terapias avanzadas y recubrimientos industriales.
Kalimuthu et al. (2019)	Revisar síntesis ecológica y aplicaciones biomédicas de AuNPs.	Confirman que métodos “eco-friendly” reducen toxicidad y abren nuevas vías en nanomedicina.
Meena et al. (2020)	Evaluar partículas inorgánicas en la entrega de productos naturales.	Nanopartículas inorgánicas, incluida la sílice, mejoran estabilidad y biodisponibilidad de compuestos bioactivos.
Mitiche et al. (2021)	Estudiar recubrimiento de nanorods de Au con sílice frente a ROS.	El recubrimiento evita la generación de especies reactivas, aumentando la seguridad en aplicaciones biomédicas.
Montoto et al. (2018)	Desarrollar nanostars de Au recubiertos con sílice mesoporosa como agentes fototérmicos.	Demuestran ser eficaces, no tóxicos y capaces de liberar fármacos de forma controlada con láser.
Nieukirk et al. (2024)	Depositar selectivamente marcos y jaulas de sílice sobre Au nanoestructurados.	Logran síntesis precisa sin primers; estructuras estables con potencial biomédico avanzado.
Niznik et al. (2024)	Revisar toxicidad, seguridad y síntesis verde de AuNPs.	Resaltan ventajas de síntesis sostenible y discuten riesgos de acumulación en órganos.
Prasad & Selvaraj (2023)	Estudiar distribución de nanorods de Au en sílice mesoporosa.	Obtienen distribución homogénea, con gran potencial en teragnosis no invasiva.

Real et al. (1996)	Obtener sílice a partir de cascarilla de arroz.	Produjeron sílice pura y económica, aplicable como material de recubrimiento.
Rosero et al. (2024)	Revisar avances en recubrimiento y funcionalización de AuNPs.	Síntesis actualizada de recubrimientos; sílice destacada por su biocompatibilidad y versatilidad biomédica.
Sztandera et al. (2018)	Evaluar el uso de AuNPs en tratamiento de cáncer.	Confirman efectividad en terapia fototérmica y liberación de fármacos; destacan limitaciones de toxicidad.
Ulusal (2023)	Sintetizar AuNPs recubiertas con sílice mesoporosa a partir de aguas residuales.	Reporta baja citotoxicidad y aplicaciones biomédicas prometedoras.
Umeda & Kondoh (2010)	Obtener sílice amorfa pura a partir de cascarilla de arroz.	Lograron eliminación de impurezas metálicas y producción de sílice de alta calidad.

Fuente. Elaboración propia

3. Fundamentación teórica

El primer estudio sobre nanopartículas de oro (AuNPs) fue realizado en 1857 por Faraday, quien atribuyó su color rojo a la naturaleza coloidal y explicó sus propiedades ópticas mediante las ecuaciones de Maxwell. En 1971, Faulk y Taylor desarrollaron un método innovador de conjugación anticuerpo–oro coloidal para la microscopía electrónica, lo que impulsó numerosas investigaciones posteriores en aplicaciones biomédicas. Estos avances permitieron reconocer biomacromoléculas gracias a la funcionalización superficial y a métodos de síntesis controlada que posibilitan obtener AuNPs con formas y tamaños específicos (Sztandera et al., 2018).

Nanopartículas de oro

Definición y características

El oro es inerte y universalmente reconocido como biocompatible. Hasta tiempos recientes, solo se conocía en su forma metálica. Con la llegada de la nanotecnología y el descubrimiento de las nanopartículas de oro (AuNPs), junto con la exploración de sus propiedades fisicoquímicas, este material se ha consolidado como uno de los más prometedores para el desarrollo tecnológico y biomédico (Kalimuthu et al., 2019; Meena et al., 2020). Una nanopartícula se define como una partícula diminuta con un tamaño que varía entre 1 y 100 nm. Para comprender el efecto de superficie, a medida que disminuye el tamaño de un material, aumenta la relación área superficial/volumen, lo que amplifica sus propiedades y reactividad (Almada et al., 2023). Aunque se resalta la biocompatibilidad del oro y el efecto del tamaño nanométrico, el planteamiento es general y omite discutir los riesgos de toxicidad asociados a las AuNPs.

Propiedades de las nanopartículas de oro

Las AuNPs presentan propiedades físicas destacadas, como la resonancia plasmónica superficial localizada (LSPR), la radiactividad y el alto coeficiente de absorción de rayos X, características útiles en el diagnóstico y tratamiento de tumores. Su capacidad para formar enlaces estables con grupos S y N permite la unión a diversos ligandos, mejorando la biocompatibilidad, la orientación y la administración de fármacos. La biocompatibilidad se evalúa mediante farmacocinética, distribución tisular, toxicidad y depuración, y puede optimizarse con modificaciones superficiales, principalmente mediante enlaces Au–S. Además, se recomienda aumentar la vida media en circulación reduciendo la depuración o ajustando el tamaño físico (Bai et al., 2020). Sin embargo, aunque se resaltan

ventajas importantes, persisten limitaciones como la acumulación en órganos, la variabilidad biológica y la falta de evidencia clara sobre la seguridad a largo plazo de las AuNPs.

Mecanismos de transporte

El mecanismo de transporte de las AuNPs cargadas con moléculas de fármacos se produce principalmente por difusión pasiva (transporte pasivo no específico) o mediante sistemas de transporte activo, dependiendo del requerimiento energético. Estas nanopartículas pueden administrarse por vía oral, tras lo cual se absorben a través del tracto gastrointestinal y se distribuyen por todo el cuerpo mediante el sistema venoso. Además, pueden transportarse directamente hacia los órganos diana por vía intravenosa, eliminándose rápidamente del organismo a través de mecanismos de defensa, como la depuración por el sistema reticuloendotelial, o permaneciendo en circulación durante períodos prolongados, según su tamaño, forma y características superficiales (Ansari, 2019). Además, las AuNPs permiten una fácil disposición en diferentes tamaños y formas, así como la fijación de diversos grupos funcionales. Son químicamente biocompatibles y presentan propiedades ópticas ajustables, lo que amplía sus posibles aplicaciones (Meena et al., 2020). Conociendo todas las características y propiedades de las AuNPs, se pudo designar este material para su uso en la terapia fototérmica del cáncer y en otras áreas, gracias a las múltiples ventajas que han sido investigadas hasta el momento.

Síntesis de las nanopartículas de oro

Las AuNPs se han sintetizado a través de una variedad de procesos fisicoquímicos, todos los cuales han generado una demanda ambiental significativa. Entre las nanopartículas metálicas mencionadas, las AuNPs destacan por su extenso historial de aplicaciones terapéuticas. En la actualidad existen diversos métodos para sintetizarlas, entre los que se incluyen la síntesis química y la biosíntesis, esta última basada en el uso de plantas, bacterias u hongos, ofreciendo resultados equivalentes con un impacto ambiental mínimo en comparación con otros métodos convencionales. Por mencionar algunos ejemplos, se encuentran la síntesis ecológica de AuNPs mediante el cultivo de células vegetales, la síntesis biológica con bacterias y la síntesis verde con hongos, además de métodos tradicionales como el Turkevich–Frens y el Brust–Schiffrin, ampliamente empleados para obtener nanopartículas con control de tamaño y forma (Hammami et al., 2021).

Sílice

Generalidades

La sílice, o dióxido de silicio (SiO_2), es un material ampliamente utilizado en diversas aplicaciones industriales y biomédicas debido a sus propiedades únicas, como la estabilidad química, la biocompatibilidad y la facilidad de funcionalización superficial. En el ámbito de los recubrimientos, la sílice destaca por su capacidad para mejorar las propiedades y el desempeño de distintos materiales.

Propiedades de la Sílice

- Estructura amorfa: La sílice puede presentarse en formas cristalinas y amorfas. En su forma amorfa, carece de un ordenamiento espacial definido, lo que le confiere una estructura desordenada. Esta característica influye directamente en sus propiedades físicas y químicas, diferenciándose de su contraparte cristalina (Erick & Erick, 2020).

- **Mesoporosidad:** Los materiales de sílice mesoporosa, como MCM-41 y SBA-15, poseen una red de poros con diámetros entre 2 y 50 nm. Esta mesoporosidad proporciona una alta área superficial específica, que puede superar los 1000 m²/g, facilitando aplicaciones en adsorción y catálisis (Contreras-Vargas et al., 2021).
- **Estabilidad química:** La sílice amorfa es químicamente inerte y presenta estabilidad frente a diversos agentes químicos. Esta resistencia la convierte en un material adecuado para aplicaciones que requieren durabilidad y resistencia a la degradación química (Erick & Erick, 2020).
- **Biocompatibilidad:** La sílice amorfa es biocompatible y degradable en tejidos vivos. Estudios han demostrado que materiales mesoporosos de sílice, como MCM-41 y SBA-15, no resultan tóxicos para el organismo y pueden integrarse favorablemente en aplicaciones biomédicas (Contreras-Vargas et al., 2021).

Aunque los autores resaltan la biocompatibilidad y la estabilidad de la sílice, falta incluir los posibles riesgos de acumulación y la variabilidad en su degradación biológica, aspectos que constituyen puntos clave para su aplicación biomédica.

Obtención de Sílice Amorfa a partir de la Cáscara de Arroz

Tratamiento ácido y calcinación

El proceso de obtención de sílice amorfa comienza generalmente con un tratamiento ácido de la cáscara de arroz, empleando ácidos como HCl o H₂SO₄, seguido de una calcinación a altas temperaturas. Este procedimiento elimina impurezas metálicas y componentes orgánicos, dando como resultado una sílice de alta pureza (Real et al., 1996; Costa & Paranhos, 2018). La calcinación a temperaturas entre 600 °C y 800 °C es un procedimiento común para asegurar la eliminación del carbono y la obtención de una estructura amorfa de la sílice (Real et al., 1996; Bangwar et al., 2017). La dependencia de altas temperaturas y el uso de ácidos fuertes plantea problemas ambientales y de costo, lo que limita la sostenibilidad del proceso frente a métodos más ecológicos de síntesis.

Optimización de condiciones

La optimización de las condiciones de proceso, como la concentración del ácido y la temperatura de calcinación, es crucial para maximizar la pureza y el área superficial de la sílice obtenida. Por ejemplo, el uso de una solución de ácido cítrico al 1 % ha demostrado ser eficaz para eliminar óxidos metálicos como Na₂O y K₂O, mejorando así la pureza de la sílice (Umeda & Kondoh, 2010). Además, la calcinación a 700 °C durante 2 horas ha sido identificada como la condición óptima para obtener una sílice amorfa de alta pureza (Costa & Paranhos, 2018).

Síntesis de la sílice para recubrimiento de nanopartículas de oro

- **Microemulsión inversa:** Este método permite la preparación de AuNPs recubiertas con sílice sin necesidad de emplear un agente de acoplamiento de silano ni un polímero como imprimación superficial. Este enfoque ofrece un control preciso del grosor de la capa de sílice y permite recuperar AuNPs de diferentes tamaños a concentraciones más altas que las obtenidas mediante el método tradicional de Stöber (Han et al., 2008).
- **Síntesis rápida de un paso:** Se ha desarrollado un método rápido y sencillo de un solo paso para preparar AuNPs recubiertas con sílice, utilizando irradiación por microondas para lograr un recubrimiento uniforme en un tiempo muy corto. Este método elimina la necesidad de un pre-recubrimiento y permite la funcionalización superficial con diversos grupos funcionales (Bahadur et al., 2011).

- Método de Stöber modificado: El método de Stöber, ampliamente utilizado para formar coloides esféricos de sílice, ha sido modificado para permitir la deposición de estructuras complejas de sílice sobre nanomateriales metálicos, superando la vitrofobia mediante el uso de concentraciones elevadas de TEOS (Nieukirk et al., 2024).

Los autores presentan distintos métodos de síntesis de sílice para recubrir AuNPs, destacando mejoras en el control del espesor y la rapidez del recubrimiento. Sin embargo, no se mencionan limitaciones como la reproducibilidad ni los posibles efectos de residuos químicos sobre la biocompatibilidad, aspectos que continúan siendo retos importantes para la aplicación segura de estos nanosistemas.

Aplicación de la sílice como recubrimiento de nanopartículas de oro

El uso de sílice como recubrimiento de AuNPs representa un enfoque prometedor en diversas aplicaciones, especialmente en el campo biomédico. Este recubrimiento mejora la estabilidad, la biocompatibilidad y la funcionalidad de las AuNPs, haciéndolas más adecuadas para aplicaciones médicas (Ulusal, 2023; Prasad & Selvaraj, 2023). Aunque la literatura destaca consistentemente las ventajas del recubrimiento de sílice en AuNPs, la mayoría de los estudios se centran en condiciones de laboratorio y en aspectos teóricos. Persisten vacíos importantes respecto a su comportamiento en modelos biológicos complejos, particularmente en cuanto a acumulación, eliminación y seguridad a largo plazo, lo que limita la traslación clínica de estos avances.

Aplicaciones biomédicas

Las AuNPs recubiertas con sílice mejoran la estabilidad fototérmica y permiten la liberación controlada de fármacos bajo irradiación láser (Chen et al., 2021; Montoto et al., 2018). Las nanoestrellas de oro recubiertas con sílice mesoporosa son efectivas para la liberación de fármacos inducida por láser (Montoto et al., 2018). Las AuNPs recubiertas con sílice mejoran significativamente la señal fotoacústica, actuando como nanoamplificadores de señal debido a su alta estabilidad térmica y eficiente conversión de energía lumínica en calor (Chen et al., 2011). El recubrimiento de sílice en nanorods de oro previene la generación de especies reactivas de oxígeno, haciendo se más seguros para aplicaciones biomédicas (Mitiche et al., 2021). Si bien los estudios citados muestran resultados alentadores sobre la estabilidad, liberación controlada y seguridad de las AuNPs recubiertas con sílice, la mayoría se limita a pruebas in vitro o en modelos experimentales. Aún falta evidencia sólida proveniente de ensayos preclínicos y clínicos que confirmen la eficacia y seguridad de estas aplicaciones en contextos biomédicos reales.

4. Discusión

El recubrimiento de sílice en AuNPs se ha consolidado como una estrategia eficaz para mejorar su estabilidad coloidal, biocompatibilidad y rendimiento en aplicaciones de terapia fototérmica. Además, este recubrimiento permite la carga y liberación controlada de fármacos, ampliando el potencial de las AuNPs en sistemas de administración dirigida. Sin embargo, la mayoría de los estudios reportados se desarrollan bajo condiciones in vitro o en modelos animales de pequeña escala, lo que limita la extrapolación de los resultados hacia contextos clínicos. Aunque la sílice confiere robustez y facilita la funcionalización superficial, persisten limitaciones asociadas a su rigidez estructural, la ausencia de datos cuantitativos comparativos y la escasa evaluación de su comportamiento biológico a largo plazo. Asimismo, los efectos potenciales de acumulación en órganos, la degradabilidad del recubrimiento y la eliminación fisiológica de las AuNPs recubiertas con sílice continúan siendo vacíos de investigación críticos. Abordar estos aspectos es esencial para comprender los mecanismos de interacción entre el

recubrimiento y los sistemas biológicos, así como para garantizar su seguridad en aplicaciones terapéuticas prolongadas. Una alternativa a considerar son los sistemas híbridos, como la combinación de sílice con biopolímeros (por ejemplo, quitosano), los cuales representan opciones prometedoras para mejorar la flexibilidad, degradabilidad y respuesta biológica del nanomaterial. No obstante, la evidencia experimental sigue siendo limitada y requiere validación mediante ensayos sistemáticos.

Por tanto, resulta imprescindible promover estudios *in vivo* con seguimiento prolongado, que incluya análisis de biodistribución, toxicidad y cinética de eliminación, integrando además herramientas de modelado y caracterización avanzada. Solo a través de esta aproximación multidimensional podrá determinarse con mayor precisión la seguridad, eficacia terapéutica y viabilidad clínica de los recubrimientos de sílice en AuNPs.

5. Conclusión

Los recubrimientos de sílice representan una de las estrategias más efectivas para optimizar la estabilidad química, la biocompatibilidad y la funcionalidad de las AuNPs, reforzando su potencial en aplicaciones biomédicas avanzadas. Los resultados revisados demuestran que la sílice no solo reduce la toxicidad y previene la agregación de las AuNPs, sino que también proporciona una superficie versátil para la funcionalización, ampliando su aplicabilidad en terapias fototérmicas, diagnóstico y liberación controlada de fármacos.

El aporte de esta revisión se enfoca en ofrecer una síntesis crítica y actualizada que agrupa los avances más significativos, identifica vacíos de conocimiento y destaca los desafíos aún pendientes, como la acumulación en órganos, la degradabilidad y el control de la morfología y la superficie de las AuNPs. En este sentido, el principal aporte de este trabajo al campo de la ciencia es proporcionar un marco de referencia que oriente futuras investigaciones y facilite el diseño de nanosistemas más seguros, eficientes y clínicamente aplicables. Futuras líneas de investigación deberán responder a interrogantes clave, como: ¿qué estrategias pueden mejorar la eliminación segura de las AuNPs recubiertas con sílice del organismo?, ¿cómo equilibrar de manera óptima la funcionalización con la biocompatibilidad?, y ¿qué innovaciones permitirán trasladar estos desarrollos del laboratorio a la práctica clínica? Resolver estas preguntas será fundamental para impulsar el avance de la nanomedicina hacia aplicaciones más efectivas y seguras.

6. Referencias bibliográficas

- Almada, M., Hurtado, J. I., Juárez, J., & Encinas-Basurto, D. (2023). La edad de oro: Nanomateriales Metálicos Teragnósticos Emergentes. *INVURNUS*, 17(1). <https://doi.org/10.46588/invurnus.v17i1.55>
- Ansari, M. J. (2019). Transport Phenomenon of Nanoparticles in Animals and Humans. *Diffusion Foundations*, 23, 173–186. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/df.23.173>
- Bai, X., Wang, Y., Song, Z., Feng, Y., Chen, Y., Zhang, D., & Feng, L. (2020). The Basic Properties of Gold Nanoparticles and their Applications in Tumor Diagnosis and Treatment. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(7), 2480. <https://doi.org/10.3390/ijms21072480>
- Bahadur, N. M., Watanabe, S., Furusawa, T., Sato, M., Kurayama, F., Siddiquey, I. A., Kobayashi, Y., & Suzuki, N. (2011). Rapid one-step synthesis, characterization and functionalization of silica coated gold nanoparticles. *Colloids and Surfaces a Physicochemical and Engineering Aspects*, 392(1), 137–144. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2011.09.046>
- Bangwar, D. K., Saand, A., Keerio, M. A., Soomro, M. A., & Bhatti, N. (2017). Development of an Amorphous Silica from Rice Husk Waste. *Engineering Technology & Applied Science*

- Research, 7(6), 2184–2188.
<https://doi.org/10.48084/etasr.1534>
- Bansal, S. A., Kumar, V., Karimi, J., Singh, A. P., & Kumar, S. (2020). Role of gold nanoparticles in advanced biomedical applications. *Nanoscale Advances*, 2(9), 3764–3787.
<https://doi.org/10.1039/d0na00472c>
- Chen, Y., Frey, W., Kim, S., Kruizinga, P., Homan, K., & Emelianov, S. (2011). Silica-Coated Gold nanorods as photoacoustic signal nanoamplifiers. *Nano Letters*, 11(2), 348–354.
<https://doi.org/10.1021/nl1042006>
- Chen, Y., Xu, C., Cheng, Y., & Cheng, Q. (2021). Photostability enhancement of silica-coated gold nanostars for photoacoustic imaging guided photothermal therapy. *Photoacoustics*, 23, 100284.
<https://doi.org/10.1016/j.pacs.2021.100284>
- Contreras-Vargas, L., Noris-Suarez, K., & Gonzalez, G. (2021). APLICACIONES DE MATERIALES MESOPOROSOS EN LA INGENIERÍA DEL TEJIDO ÓSEO. *infoANALÍTICA*, 9(1), 17–45.
<https://doi.org/10.26807/ia.v9i1.126>
- Costa, J. a. S., & Paranhos, C. M. (2018). Systematic evaluation of amorphous silica production from rice husk ashes. *Journal of Cleaner Production*, 192, 688–697.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.028>
- Croissant, J. G., Fatieiev, Y., & Khashab, N. M. (2017). Degradability and clearance of silicon, organosilica, silsesquioxane, silica mixed oxide, and mesoporous silica nanoparticles. *Advanced Materials*, 29(9).
<https://doi.org/10.1002/adma.201604634>
- Erick, G. M., & Erick, G. M. (2020, May 1). Síntesis, caracterización y evaluación catalítica de partículas de sílice decoradas con nanopartículas metálicas. <http://hdl.handle.net/11191/7480>
- Hammami, I., Alabdallah, N. M., Jomaa, A. A., & Kamoun, M. (2021). Gold nanoparticles: Synthesis properties and applications. *Journal of King Saud University - Science*, 33(7), 101560.
<https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101560>
- Han, Y., Jiang, J., Lee, S. S., & Ying, J. Y. (2008). Reverse Microemulsion-Mediated synthesis of Silica-Coated gold and silver nanoparticles. *Langmuir*, 24(11), 5842–5848.
<https://doi.org/10.1021/la703440p>
- Hao, D., Fan, Y., Xiao, W., Liu, R., Pivetti, C., Walimbe, T., Guo, F., Zhang, X., Farmer, D. L., Wang, F., Panitch, A., Lam, K. S., & Wang, A. (2020). Rapid endothelialization of small diameter vascular grafts by a bioactive integrin-binding ligand specifically targeting endothelial progenitor cells and endothelial cells. *Acta Biomaterialia*, 108, 178–193.
<https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.03.005>
- Hurtado, R. B., Cortez-Valadez, M., & Acosta, M. F. (2022). Aplicaciones tecnológicas de las nanopartículas en la medicina e industria. *Epistemos*, 16(33).
<https://doi.org/10.36790/epistemos.v16i33.223>
- Kalimuthu, K., Cha, B. S., Kim, S., & Park, K. S. (2019). Eco-friendly synthesis and biomedical applications of gold nanoparticles: A review. *Microchemical Journal*, 152, 104296.
<https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.104296>
- Meena, J., Gupta, A., Ahuja, R., Panda, A. K., & Bhaskar, S. (2020). Inorganic Particles for Delivering Natural Products. In *Sustainable agriculture reviews* (pp. 205–241).
https://doi.org/10.1007/978-3-030-41842-7_6
- Mitiche, S., Gueffrache, S., Marguet, S., Audibert, J., Pansu, R. B., & Palpant, B. (2021). Coating gold nanorods with silica prevents the generation of reactive oxygen species under laser light irradiation for safe biomedical applications. *Journal of Materials Chemistry B*, 10(4), 589–597.
<https://doi.org/10.1039/d1tb02207e>
- Montoto, A. H., Montes, R., Samadi, A., Gorbe, M., Terrés, J. M., Cao-Milán, R., Aznar, E., Ibañez, J., Masot, R., Marcos, M. D., Orzáez, M., Sancenón, F., Oddershede, L. B., & Martínez-Máñez, R. (2018). Gold Nanostars Coated with Mesoporous Silica Are Effective and Nontoxic Photothermal Agents Capable of Gate Keeping and Laser-Induced Drug Release. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10(33), 27644–27656.
<https://doi.org/10.1021/acsami.8b08395>
- Nieukirk, B. D., Tang, R., Hughes, R. A., & Neretina, S. (2024). Site-Selective Deposition of Silica Nanoframes and Nanocages onto Faceted Gold

- Nanostructures Using a Primer-free Tetraethyl Orthosilicate Synthesis. *ACS Nano*, 18(29), 19257–19267.
<https://doi.org/10.1021/acsnano.4c05258>
- Niżnik, Ł., Noga, M., Kobylarz, D., Frydrych, A., Krośniak, A., Kapka-Skrzypczak, L., & Jurowski, K. (2024). Gold Nanoparticles (AUNPs)—Toxicity, Safety and Green Synthesis: A Critical review. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(7), 4057.
<https://doi.org/10.3390/ijms25074057>
- Prasad, R., & Selvaraj, K. (2023). Effective distribution of gold nanorods in ordered thick mesoporous silica: a choice of noninvasive theranostics. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 15(40), 47615–47627. <https://doi.org/10.1021/acsaami.3c06108>
- Real, C., Alcalá, M. D., & Criado, J. M. (1996). Preparation of Silica from Rice Husks. *Journal of the American Ceramic Society*, 79(8), 2012–2016. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1996.tb08931.x>
- Rosero, W. a. A., Barbezán, A. B., De Souza, C. D., & Rostelato, M. E. C. M. (2024). Review of Advances in Coating and Functionalization of gold Nanoparticles: From Theory to Biomedical application. *Pharmaceutics*, 16(2), 255.
<https://doi.org/10.3390/pharmaceutics16020255>
- Sztandera, K., Gorzkiewicz, M., & Klajnert-Maculewicz, B. (2018). Gold Nanoparticles in Cancer Treatment. *Molecular Pharmaceutics*, 16(1), 1–23.
<https://doi.org/10.1021/acs.molpharmaceut.8b00810>
- Ulusal, F. (2023). The synthesis and cytotoxicity analysis of gold nanoparticles coated with mesoporous SiO₂ from gold treatment wastewater for medical applications. *Inorganic Chemistry Communications*, 159, 111867.
<https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111867>
- Umeda, J., & Kondoh, K. (2010). High-purification of amorphous silica originated from rice husks by combination of polysaccharide hydrolysis and metallic impurities removal. *Industrial Crops and Products*, 32(3), 539–544.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.07.002>



Artículos de

Divulgación



Aplicación del índice de calidad del agua (ICA) en el río “Fin de Arroyo” influenciado por una industria en Shinahota (Cochabamba, Bolivia)

Application of the Water Quality Index (WQI) in the river “Fin de Arroyo” influenced by an industry in Shinahota (Cochabamba – Bolivia)

Mirtha Judith Rivero Lujan^{1,*}, José Paul Zubieta Zubieta², Fernando M. Carvajal-Vallejos³

*Correo de correspondencia: limnomr1@fcyt.umss.edu.bo

Resumen

Este estudio evaluó la calidad del agua en un río adyacente a una industria en Shinahota (cuatro puntos – FP1-FP4), y en cuatro ríos cercanos entre Chimoré y Shinahota (RS1-4), considerados como ríos de menor contaminación. Para interpretar las variables fisicoquímicas, se utilizó el Índice de Calidad del Agua (ICA). El monitoreo se realizó en dos períodos: aguas altas y estiaje, abarcando tanto los ríos contaminados como sitios de menor contaminación. Se seleccionaron ocho variables clave como indicadores de la calidad del agua en relación con la contaminación orgánica: pH, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), nitratos, fosfatos, temperatura del agua, sólidos disueltos, oxígeno disuelto y coliformes fecales. Los resultados del ICA mostraron que las estaciones de muestreo presentaron una clasificación de calidad del agua dentro de la categoría "regular" en ambas temporadas, con índices entre 57 y 67 en los ríos contaminados, y entre 51 y 62 en los sitios del río RS. Esto sugiere que no hay vertidos industriales significativos que incrementen las variables de contaminación orgánica en el río estudiado. Sin embargo, la calidad del agua del río de estudio está principalmente afectada por altas concentraciones de coliformes fecales (5600 UFC/100 ml), lo que indica contaminación microbiológica, principalmente por excretas humanas y animal que son un riesgo potencial para la salud humana y animal al consumir agua de estos ríos.

Palabras clave: contaminación, variables fisicoquímicas y bacteriológicas, Chapare, pie de monte, coliformes fecales.

Abstract

This study evaluated water quality in a river adjacent to an industry in Shinahota (four points – FP1-4) and in nearby rivers between Chimoré and Shinahota (four rivers – RS1-4), considered to be least polluted rivers. To interpret the physicochemical variables, the Water Quality Index (WQI) was used. Monitoring was carried out in two periods: high water and low water, covering both polluted rivers and sites in the SR river. Eight key variables were selected as indicators of water quality in relation to organic pollution: pH, biochemical oxygen demand (BOD), nitrates, phosphates, water temperature, dissolved solids, dissolved oxygen, and fecal coliforms. The results of the WQI showed that the sampling stations presented a water quality classification within the "regular" category in both seasons, with indices between 57 and 67 in the polluted rivers, and between 51 and 62 in sites of the RS river. This suggests that there are no significant industrial discharges that increase the variables of organic pollution in the river studied. However, the water quality of the study river was mainly affected by high concentrations of fecal coliforms (5600 CFU/100 ml), indicating microbiological contamination by humans and animal excreta. This poses a potential risk to human and animal health by consuming water from these rivers.

Keywords: organic waste, contamination, physicochemical and bacteriological variables, Chapare, foothills, fecal coliforms.

¹ Unidad de Limnología y Recursos Acuáticos, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0000-8458-2164>

² FAUNAGUA, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0007-5528-2059>

³ Unidad de Limnología y Recursos Acuáticos, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0000-0002-9110-490X>

1. Introducción

Los ríos son ecosistemas vulnerables a las alteraciones del entorno natural y a las actividades antropogénicas, que suelen impactar negativamente en la calidad de sus aguas (UNICEF & OMS 2017). En el departamento de Cochabamba (Bolivia), los principales contaminantes de los ríos están asociados al crecimiento poblacional y al desarrollo de actividades industriales, comerciales y agropecuarias. Estas actividades incrementan la generación de desechos y aguas residuales, muchas veces descargadas sin tratamiento, lo que provoca una elevada concentración de materia orgánica y coliformes fecales. Dicha contaminación microbiológica representa un riesgo significativo para la salud humana, animal y los organismos acuáticos que dependen de este recurso (Morales et al., 2014).

En Bolivia, según el Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA, 2008-2015), el 53 % de la población urbana cuenta con acceso a servicios de alcantarillado sanitario, pero solo el 24,50 % de las aguas residuales recibe un tratamiento adecuado. El resto es vertido directamente en cuerpos de agua como ríos y lagunas, incrementando la contaminación de los sistemas acuáticos. En las áreas rurales, la situación es aún más alarmante ya que más del 60 % de la población carece de saneamiento básico, incluyendo sistemas como cámaras sépticas o pozos ciegos, lo que amplifica el impacto ambiental.

De acuerdo con el informe de evaluación del proyecto “Incremento de la cobertura de agua potable y saneamiento básico para las familias campesinas del municipio de Tiraque – Bolivia (2007-2009)”, en Shinahota, solo el 37 % de los hogares tiene acceso a agua potable. La mayoría de la población se abastece de fuentes contaminadas como ríos y charcos. Además, el 87 % de las viviendas carecen de conexión a sistemas de alcantarillado y las aguas servidas se filtran hacia los ríos, contribuyendo a la contaminación microbiológica. Esta situación ha derivado en un incremento de enfermedades diarreicas agudas (EDAs), particularmente en la población infantil, donde la tasa de mortalidad alcanza los 94 por cada mil nacidos vivos.

En la región de Shinahota (provincia Chapare, Cochabamba), la calidad del agua de los ríos se ve particularmente afectada por actividades industriales. En esta área, una fábrica de palmito ubicada en la zona de Valle Hermoso Segundo, dedicada al procesamiento de productos agrícolas, genera residuos orgánicos durante los procesos de pelado, descabezado y trozado de tallos. Estos desechos son descargados mayoritariamente en el río “Fin de Arroyo”, para lo cual se evaluará la calidad del agua mediante el índice de calidad de agua ICA. Al respecto es importante mencionar que la carga de contaminación orgánica producida por las descargas industriales, pueden no presentar concentraciones elevadas de materia orgánica que puede deberse a la corriente continua del río lo que hace que la materia orgánica se diluya y no se acumule, por otra parte, el río tiene autodepuración natural por lo cual la materia orgánica, se degrada rápidamente y no se detecta contaminación orgánica persistente.

En la región del trópico de Cochabamba las agroindustrias palmiteras (BOLHISPANIA y FABOPAL) tienen una alta tasa de generación de residuos sólidos orgánicos (9.483 t año⁻¹), de los cuales el 98 % son biodegradables que pueden provocar impactos negativos en el medio ambiente, para lo cual se propuso una alternativa de obtención de abono orgánico sólido a través de la técnica de compostaje a alta temperatura para incrementar la rapidez de la descomposición (Yañez et al, 2007). Cabe indicar que los reactivos que se utilizan en el procesamiento de palmito son: ácido cítrico (C₆H₈O₇) en concentración 0,50-1 %, sal (NaCl) al 2 % y sulfito de sodio (Na₂ SO₃) de 0,10-0,20 %.

Para evaluar la calidad del agua en los ríos de Shinahota, se empleó el Índice de Calidad del Agua (ICA). Es una versión modificada del Water Quality Index (WQI) desarrollado por la Fundación de Sanidad Nacional (NSF) de EE.UU., permite resumir múltiples variables fisicoquímicas en un solo valor, facilitando el análisis y la interpretación de los datos. No obstante, es importante utilizar el ICA con precaución, ya que la simplificación puede generar interpretaciones incompletas o erróneas (Coello et al., 2013; DINAMA, 2008).

El objetivo del presente estudio fue evaluar la calidad del agua en sitios de un río “Fin de Arroyo” cercano a una fábrica de palmito en Shinahota utilizando el ICA, con el fin de determinar los niveles de contaminación orgánica. Asimismo, se compararon estos resultados con los obtenidos en ríos menos contaminados de la zona de Chimoré, los cuales fueron tomados como referencia.

2. Métodos

El área de estudio comprende la región entre Chimoré y Shinahota, ubicada a 182 km de la capital del departamento de Cochabamba, en la provincia Tiraque. La zona pertenece al Sindicato Agrario de Valle Hermoso Segundo, dentro de Tiraque tropical y está bajo la jurisdicción de la sub alcaldía de Shinahota. Esta región se caracteriza por la producción de palmito. El principal cuerpo de agua, denominado “Fin de Arroyo”, atraviesa la carretera principal y está a unos 400 m al este del Estadio de Shinahota.

Características geográficas y climáticas

El área de estudio se encuentra a una altitud de 272 metros sobre el nivel del mar, con coordenadas entre -17.03621 y -16.95621 de latitud y entre -65.28549 y -65.20549 de longitud (INE, 2001). Presenta un clima tropical húmedo, con temperaturas máximas diurnas entre 32-35 °C de enero a abril y temperaturas mínimas (nocturnas): 17-24°C. las temperaturas en invierno (junio-agosto) máxima de 25-30°C diurna y nocturna mínimas: 10-18 °C, según datos utilizados por SENAMHI (2025).

La región experimenta dos épocas climáticas principales. Época de aguas altas, de diciembre a marzo, con precipitaciones que van de 376 a 712 mm, y época de estiaje durante el invierno, de junio a septiembre, con precipitaciones entre 124 y 596 mm.

La barrera orográfica de la cordillera de los Andes influencia la dinámica climática local, atrapando los vientos cálidos y húmedos provenientes de las llanuras amazónicas del norte. Esto genera precipitaciones anuales que superan los 4500 mm (CUMAT-USAID/Bolivia-PDAC, 1989).

Estaciones de muestreo y metodología

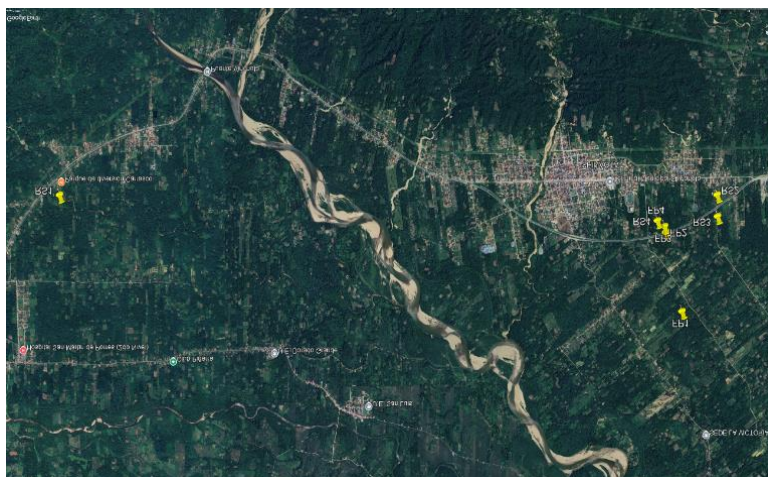
Las estaciones de muestreo fueron establecidas tras un reconocimiento de campo utilizando un GPS y criterios específicos basados en fuentes de contaminación a lo largo del efluente. Estas estaciones fueron FP1: Ubicada debajo de un puente que es utilizado como fuente de agua potable del río “Fin de Arroyo”; entre FP1 y FP2 existe una distancia de 1342 m y con respecto a FP3 de 97 m, entre FP3 y FP4 la distancia fue de 163 m, todos estos puntos localizados a lo largo del efluente contaminado y FP4: situadas inmediatamente aguas abajo del punto de vertido industrial.

Además, se seleccionaron ríos circundantes entre Chimoré y Shinahota como referencia de cuerpos de agua menos contaminados (RS1, RS2, RS3, RS4) (Figura 1). Los ríos estándar fueron de primer orden, y no tenían nombres específicos.

Se realizaron muestreos en las cuatro estaciones mencionadas, durante dos épocas del año (época de aguas altas y de estiaje), con dos repeticiones por estación.

Figura 1

Puntos de muestreo (FP1- FP4) y ríos estándar (Menos contaminados RS1-RS4) comprendidas entre Chimoré y Shinahota



Fuente: Google Earth, imagen 2023 Maxar technologies, imagen CNES / Airbus.

Variables analizadas y métodos empleados

Para evaluar la contaminación orgánica, se analizaron variables fisicoquímicas (temperatura, pH, oxígeno disuelto), indicadores químicos (Demanda Química de Oxígeno (DQO), nitratos, fosfatos, sólidos disueltos) y microbiológicas (Coliformes fecales).

Las mediciones de las variables fisicoquímicas se realizaron in situ utilizando equipos portátiles como oxímetro y pHmetro. Las muestras destinadas al análisis químico y microbiológico fueron recolectadas en frascos de polipropileno con preservantes adecuados y transportadas a laboratorios para su procesamiento.

Los análisis de laboratorio se realizaron siguiendo los procedimientos establecidos por la American Water Works Association (AWWA), la American Public Health Association (APHA) y la Water Environment Federation (WEF) (2012). Los sólidos disueltos fueron obtenidos mediante técnica gravimétrica (105 °C), con resultados en mgL^{-1} . Los valores de DQO se obtuvieron mediante la técnica de oxidación con dicromato de potasio. Los fosfatos (mgL^{-1}), fueron obtenidos mediante la técnica espectrofotométrica con el vanadomolibdato, que reducido por el ácido ascórbico, desarrolla una coloración azul que se mide colorimétricamente. Para los nitratos se utilizó la técnica de reducción con cadmio, resultados en mgL^{-1} . Finalmente, los coliformes fecales fueron evaluados mediante la técnica de membrana filtrante, con resultados en UFC/100 ml.

Determinación del Índice de Calidad del Agua (ICA)

Para evaluar la calidad del agua, se utilizó el Índice de Calidad del Agua (ICA), que integra múltiples variables en un valor único mediante una suma ponderada.

Asignación de pesos relativos:

Cada parámetro se ponderó según su relevancia en la contaminación orgánica y el riesgo asociado a su variación. Los pesos asignados suman un total de 1 (Tabla 1).

Tabla 1*Pesos relativos para cada variable del “ICA”*

Variables	Pesos relativos para cada variable de importancia para el subíndice i (w_i)
Temperatura	0,10
pH	0,12
Oxígeno disuelto	0,18
DQO	0,12
Nitratos	0,11
Fosfatos	0,11
Sólidos disueltos	0,10
Coliformes fecales	0,16
Total	1,00

Cálculo del índice:

$$ICA = \sum_{i=1}^8 (sub_i * w_i)$$

ICA: Índice de calidad del agua

sub_i: Subíndice de la variable i, obtenido a partir de gráficos establecidos (SNET, 2007).w_i: Peso relativo asignado a cada subíndice.

Los valores de sub_i se determinaron mediante gráficas de curvas de función específicas para cada parámetro. El valor medido de cada variable fue trasladado a las abscisas de la gráfica, y el punto de intersección con la curva proporcionó el valor del subíndice correspondiente (Tabla 2).

El ICA tiene un valor máximo de 100 en condiciones óptimas, disminuyendo a medida que aumenta la contaminación (Autoridad Nacional del Agua, 2020; Wills & Irvine, 1996).

Tabla 2*Clasificación del “ICA”*

Calidad del agua	Color	Valor subíndice
Excelente	Azul	91 a 100
Buena	Verde	71 a 90
Regular	Amarillo	51 a 70
Mala	Anaranjado	26 a 50
Pésima	Plomo	0 a 25

Fuente: Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2022); Wills & Irvine (1996).

3. Resultados

En la Tabla 3, se presentan los resultados resumidos de los análisis químicos del agua realizados en las diferentes estaciones y épocas de muestreo, así como en los ríos menos contaminados (RS).

Tabla 3

Promedio de las variables fisicoquímicas en el agua en las diferentes estaciones y épocas, así como en el agua de los ríos menos contaminados (RS)

Épocas	Época de aguas altas (ELL2)				Época de estiaje (ES2)				Ríos menos contaminados (RS)			
Mes de colecta	MARZO				JUNIO				JUNIO			
Estaciones	FP1	FP2	FP3	FP4	FP1	FP2	FP3	FP4	RS1	RS2	RS3	RS4
Temperatura (°C)	24,60	26,20	27,40	28,70	18,80	19,20	18,60	18,50	19,20	21,00	17,30	12,40
pH	4,99	5,18	5,49	5,59	5,02	4,98	6,01	5,46	5,13	5,10	5,74	6,43
Oxígeno disuelto (%)	80,10	81,00	44,00	54,00	86,00	81,00	31,00	47,00	70,00	56,00	58,00	85,00
DQO (mgL ⁻¹)	≤ 2,00	≤ 2,00	4,00	≤ 2,00	≤ 2,00	≤ 2,00	≤ 2,00	≤ 2,00	6,00	6,00	10,00	6,00
Nitratos (mgL ⁻¹)	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,00	0,07	0,08	0,10	0,18	0,19
Fosfatos (mgL ⁻¹)	0,64	1,12	0,78	0,39	0,23	0,21	0,67	0,36	0,45	0,07	0,55	0,00
Sólidos disueltos (mgL ⁻¹)	18,50	23,00	30,00	31,00	33,50	20,00	41,00	63,00	31,50	20,00	11,00	46,00
Coliforme Fecales (UFC*)	2700,00	5600,00	3600,00	3400,00	5300,00	230,00	1300,00	1900,00	375,00	270,00	150,00	500,00

*UFC = Unidades Formadoras de Colonias

En la Tabla 4 muestra los valores de los subíndices (sub_i) obtenidos para cada variable en las distintas estaciones y épocas de muestreo, incluyendo los ríos menos contaminados tomados como estándar.

Tabla 4

Determinación de los sub_i de las diferentes gráficas para las diferentes variables en las diferentes estaciones y épocas y los ríos menos contaminados (RS)

Épocas	Época de aguas altas (ELL2)				Época de estiaje (ES2)				Ríos menos contaminados (RS)			
Mes de colecta	Sub _i MARZO				Sub _i JUNIO				Sub _i ESTÁNDAR			
Estaciones	FP1	FP2	FP3	FP4	FP1	FP2	FP3	FP4	RS1	RS2	RS3	RS4
Temperatura (°C)	39,60	44,40	70,80	81,60	19,40	19,36	18,88	18,80	20,00	25,00	18,00	15,00
pH	25,00	30,40	39,70	42,70	25,30	24,70	52,27	31,90	25,00	25,00	44,98	67,91
Oxígeno disuelto (%)	59,00	60,00	30,40	39,10	91,60	88,60	21,45	39,80	74,00	54,00	57,00	95,00
DQO (mgL ⁻¹)	100,00	100,00	98,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	6,00	6,00	32,00	6,00
Nitratos (mgL ⁻¹)	99,00	99,00	99,00	99,00	99,80	99,85	100,00	99,65	99,60	99,50	99,10	99,05
Fosfatos (mgL ⁻¹)	61,60	38,32	53,20	76,60	86,20	87,40	59,80	78,40	73,00	95,80	67,00	100,00
Sólidos disueltos (mgL ⁻¹)	82,59	83,22	84,20	84,34	84,69	82,90	85,74	86,48	83,84	82,40	81,32	85,52
Coliforme Fecales (UFC*)	24,60	18,80	22,80	23,20	25,70	36,50	20,40	19,20	29,25	34,50	41,50	26,00

En la Tabla 5 se presentan los resultados de los valores sub_i multiplicados por sus respectivos pesos ponderados (w_i). La suma de estas ponderaciones fue comparada con los resultados obtenidos para los ríos menos contaminados,

permitiendo determinar la calidad del agua para cada zona y época de muestreo según la clasificación del Índice de Calidad del Agua (ICA).

Tabla 5

Índice de calidad "ICA" de la calidad del agua en ríos de las zonas Shinahota-Chimoré Chapare- Cochabamba

Épocas	Época de aguas altas (ELL2)				Época de estiaje (ES2)				Ríos no contaminados (RS)			
Mes de colecta	MARZO				JUNIO				ESTANDAR			
Estaciones	FP1	FP2	FP3	FP4	FP1	FP2	FP3	FP4	RS1	RS2	RS3	RS4
Temperatura (°C)	3,96	4,44	7,08	8,16	1,94	1,936	1,888	1,88	2,00	2,50	1,80	1,50
pH	3,00	3,64	4,76	5,12	3,03	2,96	6,27	3,82	3,00	3,00	5,40	8,15
Oxígeno disuelto (%)	10,62	10,80	5,47	7,03	16,48	15,94	3,86	7,16	13,32	9,72	10,26	17,10
DQO (mgL ⁻¹)	12,00	12,00	11,76	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	0,72	0,72	3,84	0,72
Nitratos (mgL ⁻¹)	10,89	10,89	10,89	10,89	10,97	10,98	11,00	10,96	11,00	10,95	10,90	10,90
Fosfatos (mgL ⁻¹)	6,77	4,21	5,85	8,42	9,48	9,61	6,57	8,62	8,03	10,54	7,37	11,00
Sólidos disueltos (mgL ⁻¹)	8,25	8,32	8,42	8,43	8,46	8,29	8,57	8,64	8,40	8,24	8,13	8,55
Coliforme Fecales (UFC*)	3,93	3,00	3,64	3,71	4,11	5,84	3,26	3,07	5,01	5,52	6,64	4,16
Índice "ICA"	59,44	57,32	57,88	63,78	66,50	67,57	53,43	56,17	51,48	51,18	54,34	62,08

Los valores calculados del ICA para el río en estudio se encuentran en el rango de 51 a 70, lo que corresponde a la categoría de calidad regular (color amarillo), en ambas épocas de muestreo y en las distintas estaciones analizadas. De manera similar, los ríos menos contaminados (RS) también se clasifican en la categoría regular (color amarillo) (Tabla 5). Esto sugiere que no se detectaron vertidos industriales significativos que puedan incrementar las variables de contaminación orgánica e influir de manera crítica en la calidad del agua del río en estudio.

No se observaron cambios significativos en el pH, que presentó valores entre 4,99 y 6,01, indicando una ligera acidez. Esto sugiere que las industrias no están desechando detergentes o soluciones de soda cáustica (NaOH), las cuales podrían elevar significativamente el pH y tornar las aguas básicas. De igual manera, los reactivos como el ácido cítrico en el agua que es considerado un ácido débil ($pK_a = 4,76$), presenta pH entre 4 y 6 y el sulfito de sodio en el agua entre 7,5 a 8,0 a las concentraciones tan bajas que se utilizan no tienen incidencia en cambios de pH y la contaminación del agua.

En la Tabla 3 se evidencia que no hay una carga notable de sólidos disueltos atribuible a desechos industriales de la fábrica. Los valores determinados siguen un patrón estacional de variación, sin indicios de arrastre significativo de sólidos suspendidos por actividades industriales. Las concentraciones obtenidas en el agua de las estaciones y épocas de muestreo oscilaron en época de aguas altas entre 18,50-31,00 mgL⁻¹ y de estiaje oscila entre 33,00 – 63,00 mgL⁻¹. De igual manera, para los ríos menos contaminados (RS) los valores fueron entre 11,00 – 46,00 mgL⁻¹. Todos estos valores se encuentran por debajo de los máximos admisibles (1000,00 mgL⁻¹), según la Ley del Medio Ambiente 1333.

Los niveles de oxígeno disuelto en el agua del río se encuentran en un rango adecuado para el desarrollo de organismos acuáticos. Durante la época de aguas altas, los valores oscilaron entre 44% y 81% de saturación, mientras que en la época de estiaje fluctuaron entre 31% y 86%. Los ríos menos contaminados mostraron valores entre 56% y 85%. Estos resultados indican condiciones óptimas para la vida acuática en las estaciones y épocas analizadas.

La DQO presentó concentraciones por debajo del valor máximo admisible ($10 \text{ mg O}_2\text{L}^{-1}$), según lo estipulado por la Ley de Medio Ambiente 1333. Aunque se observó que los desechos orgánicos generados por la fábrica de palmito son vertidos cerca del terreno industrial que debería afectar a la estación FP3, sin embargo, la carga orgánica aún es absorbida por el ecosistema, manteniendo concentraciones bajas de DQO en el agua. Cabe destacar que en la estación FP4 se percibió un olor característico de materia orgánica en descomposición, lo que indica la presencia de biodegradación.

Las concentraciones de DQO son de cero o bajas debido a que los residuos de palmito son principalmente fibras, celulosa y lignina que pueden depositarse rápidamente en el fondo del río, y la DQO mide sobre todo la materia orgánica disuelta u oxidable en la muestra de agua no la que se sedimenta. La muestra en el río fue tomada de la columna de agua donde la mayor parte de los desechos fue mineralizada (CO_2 , CH_4 , nutrientes), que implica que las concentraciones de DQO sean bajas o indetectable. Por otra parte, en la región de Shinahota-Chapare se tiene una rápida degradación biológica debido a las altas temperaturas y la actividad microbiana que favorece este proceso. Cuando la DQO es cero puede deberse a que las concentraciones en el agua son menores al límite de detección (2 mgL^{-1}).

La principal fuente de contaminación biológica detectada en el río estudiado es la presencia de excretas humanas y animales. Según la Tabla 3., las concentraciones de coliformes fecales oscilaron entre 2700 y 5600 UFC/100 ml durante las épocas de aguas altas y estiaje, excediendo los límites permisibles de 1000 UFC/100 ml establecidos en el Reglamento del Medio Ambiente 1333 (1995). En contraste, las estaciones de muestreo en los ríos menos contaminados mostraron concentraciones por debajo de este umbral, lo que refuerza su utilidad como referencia de calidad.

4. Discusión

En la investigación realizada por Saravia (2017), sobre los ríos Teocinte y Acatán en Guatemala, se analizaron las mismas variables utilizadas en el presente estudio. Según su clasificación del Índice de Calidad del Agua (ICA), el río Teocinte obtuvo un valor de 45,26, ubicándose en el límite del rango de mala calidad, lo que indica una baja diversidad acuática y problemas significativos de contaminación. En contraste, el río Acatán presentó un ICA de 55,35, clasificándose en la categoría de calidad media. Estos valores son comparables a los obtenidos en los ríos estudiados en esta investigación, cuyos índices oscilaron entre 51 y 70, dentro de la categoría de calidad regular. Sin embargo, la calidad del agua podría mejorarse, particularmente en lo referente a la contaminación por coliformes fecales, mediante la delimitación y control del uso del agua en la zona de estudio.

Por su parte, Méndez-Zambrano (2020), evaluó la calidad del agua del río Copueno, ubicado en el cantón Morona, provincia de Morona Santiago, Ecuador. Los resultados del índice ICA clasificaron dos tramos del río: el primero como de calidad buena (71,68) y el segundo, afectado por descargas de aguas residuales, con una calidad regular (59,99). Estos valores son equivalentes a los obtenidos en el presente estudio, reafirmando la similitud en las condiciones de calidad del agua en regiones con características y usos similares.

En el mismo estudio, Méndez-Zambrano identificó que la principal fuente de contaminación en el río Copueno fue la presencia de coliformes fecales, con concentraciones de 2531 UFC/100 ml. Comparando estos datos con los valores obtenidos en el río de estudio, las concentraciones son significativamente más altas, alcanzando hasta 5600 UFC/100 ml en ciertas zonas de muestreo.

Un caso destacado es el del río Rímac, en Perú, donde en 1991 el recuento de coliformes fecales excedió los 100000 organismos/100 ml, desencadenando una epidemia de cólera (Reiff, 1993). Este caso evidencia la relevancia de la calidad microbiológica del agua y su impacto en la salud pública. Las enfermedades asociadas con este tipo de

contaminación incluyen cólera, fiebre tifoidea, ascariasis, amebiasis, giardiasis e infecciones por *E. coli* enteroinvasivas (Pérez y Espigares García, 1999; Álvarez Vieites, 2017).

Los resultados reportados por Robledo-Hernández (2023), indican que el Río Dulce ubicada en el nororiente del caribe de Guatemala, aplicando el índice de calidad ICA-NSF, con la finalidad de interpretar los resultados de una manera holística y poder discutirlos en ámbitos académicos, no solo a nivel local, sino internacional, menciona que los análisis microbiológicos como el *E. coli* y sólidos totales disueltos (TDS) son los parámetros críticos que presentaron mayores concentraciones en el agua de los ríos estudiados, sin embargo, los mismos no alteran significativamente el índice, el cual aún presentó valores entre 68,00 y 83,00, calificando de forma general el agua como de calidad buena. Similar a los resultados encontrados en el presente estudio que, si se observó contaminación microbiológica elevada por coliformes fecales, pero tampoco alteraron los valores de los índices en los ríos.

A nivel nacional se presentó un artículo evaluando la calidad del agua en la cuenca del lago Poopó - Uru Uru, aplicando el índice ICA, que explica que los resultados de las zonas agrícolas los efluentes de este lago tienen mejor calidad; que los ríos que tienen actividad minera presentaron menor calidad del agua (Quino & Quintanilla, 2013)

En el contexto de la región estudiada, entre Shinahota y Chimoré, el uso del agua de los ríos como bebederos para ganado y como lugar de recreación por parte de los comunarios agrava la contaminación. Las principales fuentes de contaminación identificadas son las excretas humanas y animales, lo que resulta especialmente preocupante, ya que estas aguas son frecuentemente utilizadas como recursos superficiales para el consumo humano. Aunque el índice ICA clasifica la calidad del agua como regular, lo cual no afecta significativamente a los organismos acuáticos, la contaminación microbiológica representa un riesgo epidemiológico para la comunidad circundante de Shinahota, que depende de estos recursos para agua potable.

Por lo tanto, es crucial implementar medidas de manejo adecuado del agua y desarrollar programas de educación ambiental en la zona para mitigar los riesgos de salud asociados a la contaminación por coliformes fecales y otras fuentes orgánicas.

5. Conclusiones

Los resultados indican que la calidad del agua en el río estudiado se clasifica como regular según los valores identificados del Índice de Calidad de Agua (ICA), tanto en las épocas de aguas altas y estiaje. Las concentraciones de DQO fueron bajas, y los porcentajes de oxígeno disuelto óptimos. Aunque se detectaron ciertas fuentes de contaminación, como coliformes fecales, no se evidenció un impacto significativo de vertidos industriales que pudiera alterar de manera crítica las características del agua.

6. Referencias bibliográficas

- Álvarez Vieites. Julio 2017. Memoria del trabajo de fin de grado. Universidad de Coruña. "Calidad Microbiológica del agua del río Mero".
- Archivo meteorológico Shinahota según la fuente de datos utilizado por reanálisis climatológico ERA5 (1979-2021) producido por ECMWF. Meteoblue. <https://www.meteoblue.com>. Departamento de Cochabamba, Bolivia.
- Autoridad Nacional del Agua. (ANA), 2022. Resultados del monitoreo de calidad de agua superficial dentro de las acciones de vigilancia y control en las U.H.M.
- Coralaque, Medio Alto Tambo, Medio Tambo y Bajo Tambo. Informe Técnico N° 0031-2022-
- Brown R. M., McClelland N. I., Deninger R. A. and Tozer R. G. (1970). "A water quality index: do we dare?", Water & Sewage Works, vol 117, no. 10, pp. 339-343., Gillette Pub. Co., Chicago, USA.
- Coello, J.R.; Ormaza, R.M.; Déley, Á.R.; Recalde, C.G.; Ríos, 2013, A.C.: "Aplicación del ICA-NSF para determinar la calidad del agua de los ríos Ozogoché, Pichahuiña y Pomacocha-Parque Nacional Sangay-Ecuador", Revista del Instituto de Investigación de

- la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, 16(31): 58-69, ISSN: 1561-0888.
- CUMAT, PDAC USAID Bolivia, 1989. Evaluación del impacto ambiental para el mantenimiento y mejoramiento de caminos vecinales del Chapare.
- DINAMA. Dirección Nacional De Medio Ambiente. Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y medio Ambiente y Universidad de la Republica, Facultad de ciencias, Sección Limnología. Evaluación Ecológica de cursos de Agua y Biomonitorio. Informe final 2008.
- INE-Instituto Nacional de Estadística, Bolivia, 2001. Archivado el 27 de enero del 2016 en Wayback Machine.
- Informe de evaluación del proyecto “Incremento de la cobertura de agua potable y saneamiento básico para las familias campesinas del municipio Tiraque – Bolivia, 2009, ONGD española gestora y responsable de la subvención: MUSOL; ONG boliviana responsable de la ejecución del proyecto: CEDESCO; Financiado principal: AECID; Co-financiado: Agencia Cantonal. Municipal de Shinahota Cantonal de la provincia Tiraque.
- Ley 1333, N., 2013. 1333. Ley del Medio Ambiente. Gaceta Oficial de Bolivia, La Paz, Bolivia.
- Méndez-Zambrano I Patricio Vladimir; Jessica Paola Arcos-Logroño; Paola Arcos. 2020, determinación del índice de calidad del agua (NSF) del río Copueno ubicado en Cantón Morona. Dom. Cien., ISSN: 2477-8818 Vol. 6, núm. 2, Especial junio 2020, pp. 734-746
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (2008). Plan Nacional de Saneamiento Básico 2008-2015. La Paz: MMAyA.
- Morales, M.; Vanegas, E.; García, N. 2014, “Uso de la tierra y calidad del agua superficial en la cuenca periurbana río Platanitos, Guatemala”, Revista Ingeniería Agrícola, 4(4): 19–23, ISSN: 2306-1545, 2227-8761.
- Pérez López, J.A.; Espigares García, M. (Ed.). (1999). Estudio sanitario del agua. Granada: Editorial Universidad de Granada.
- Quino Israel y ; Quintanilla Jorge, 2013. índice de calidad del agua en la cuenca del lago poopó -uru uru aplicando herramientas sig . Laboratorio de Hidroquímica, Instituto de Investigaciones Químicas, UMSA, C.P. 303, La Paz - Bolivia, Proyecto: "Gestión de Cuencas Áridas y Semiáridas con Influencia Minera – CAMINAR. Rev. Bol. Quim vol.30 no.1 La Paz 2013. versión On-line.
- Ramírez, R. 1992. Diagnostico biofísico cuencas de los ríos Ichilo y Chimore SENMA-BIO sub proyecto de protección de etnias y Recursos Naturales Renovables.
- Reiff, F. 1993. Impactos sobre la salud relacionados con la agricultura de riego en América Latina. in: FAO. prevención de la contaminación del agua por la agricultura y actividades afines pp 353-365.
- Robledo-Hernández, José Adiel. 2023. Evaluación del Índice de Calidad de Agua ICA-NSF en las microcuencas del Parque Nacional Río Dulce como herramienta en la gestión integral del manejo sustentable, Livingston, Izabal, Guatemala, Centroamérica. Revista Tecnología en Marcha vol.36 n.1 Cartago Jan./Mar. 2023 <http://dx.doi.org/10.18845/tm.v36i1.6241> On-line versión ISSN 0379-3982 Print versión ISSN 0379-3982.
- Saravia Solares Pablo Cesar Aníbal, 2017, Determinación de los índices de calidad del agua ICA-NSF para consumo humano de los ríos Teocinte y Acatán, que abastecen la planta de tratamiento de agua Santa Luisa zona 16, Guatemala. Agua y Saneamiento & Ambiente.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), 2025. Bolentín de pronóstico hidrológico Cochabamba <https://senamhi.gob.bo>.
- SNET. Servicio Nacional de Estudios Territoriales. Índice de calidad del agua general “ICA”, 2007.
- Standard Methods for the Examination of wáter and, wastewater (2012). 22th. Edition. AWWA, APHA, WEF. USA.
- UNICEF & OMS (2017): Progress on Drinking Water, Sanitation and Hygiene: 2017 Update and SDG Baselines.
- Yañez Q Paola., Alberto Levy M., Mauricio Azero A. 2007. versión On-line ISSN 1683-0789. Rev. Acta Nova. v.3 n.4 Cochabamba
- Wills, M., & Irvine, K. (1996). Application of the National Sanitation Foundation Water Quality Index in Cazenovia Creek, NY, Pilot Watershed Management Project. Middle States Geographer, 95–104.



Reconocimientos



El legado de una mujer en la educación de biólogos y ecólogos acuáticos de Bolivia Dylian T. Castellón Reinaga (1954 - 2021)

Fernando M. Carvajal-Vallejos¹

Correo de correspondencia: f.carvajal@umss.edu.bo, fmcvalle@yahoo.com



Dylian Teresa Castellón Reinaga

Con profunda tristeza, se anunció el inesperado fallecimiento de la M.Sc. Dylian T. Castellón Reinaga el 8 de septiembre de 2021. Este suceso ocurrió tras una prolongada y valiente lucha contra una enfermedad degenerativa, que lamentablemente la obligó a retirarse de sus actividades académicas y educativas a la edad de 67 años. Nacida en el departamento de Cochabamba el 17 de septiembre de 1954, y con raíces familiares en el departamento de Oruro, se trasladó a Cochabamba, donde obtuvo su Licenciatura en Biología en 1990, seguida de una Maestría en Ciencias Ambientales en 2003 y un Diplomado en Educación Superior en 2004. Todos estos títulos fueron otorgados por la Universidad Mayor de San Simón (UMSS)

En 1988, inició su distinguida carrera académica universitaria en la UMSS, dedicando 34 años de su vida a la formación de profesionales. Su legado en la academia y la investigación científica ha dejado una huella notable,

particularmente dentro de la Unidad de Limnología y Recursos Acuáticos (ULRA), Departamento de Biología, Facultad de Ciencias y Tecnología (FCyT) de la UMSS en Cochabamba, Bolivia, donde se incorporó en 1993. Como directora de la ULRA desde 2001 hasta 2021, desempeñó un papel fundamental en la gestión administrativa de la unidad y la planificación de actividades académicas y científicas, trabajando junto a seis investigadores y dos miembros del personal de apoyo administrativo.

Su dedicación por la enseñanza la llevó a impartir cursos de genética, citogenética, biofísica y evolución dentro del programa de Biología, así como a impartir conocimientos de biología celular y molecular en el programa de Ingeniería de Alimentos. Cabe destacar que enseñó biología a todos los estudiantes del Colegio San Agustín (dos cursos paralelos de siete grados) durante siete años, específicamente entre 1984 y 1988, y de 1991 a 1992.

Con mucha dedicación a la educación y las actividades académicas, también dirigió sesiones de capacitación para profesores de escuela y brindó orientación a numerosos estudiantes en la culminación de sus tesis de licenciatura y posgrado en ecología acuática, avanzando así el estudio de la Limnología en Bolivia. Su compromiso con la ciencia trascendió fronteras, ya que fomentó colaboraciones nacionales e internacionales que enriquecieron la formación de jóvenes investigadores profesionales.

Realizó contribuciones significativas al conocimiento de la ecología acuática e ictiología boliviana a través de sus esfuerzos administrativos y académicos, promoviendo estudios sobre peces, pesquerías, acuicultura y recursos hidrobiológicos en diversas regiones de Cochabamba (por ejemplo, lagunas Alalay, Angostura, Vacas) y Bolivia.

¹ Unidad de Limnología y Recursos Acuáticos (ULRA), Departamento de Biología, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0000-0002-9110-490X>

Como tributo a su notable trabajo y colaboración, una nueva especie de piraña, *Serrasalmus castellonae* Gallo-Cardozo, Careaga & Carvajal-Vallejos 2025 - Journal of Ichthyology (<https://rdcu.be/eqrFR>), fue descrita y publicada el pasado mes de junio en su honor, perpetuando así su contribución a la academia y su legado en la ciencia boliviana.

A pesar del paso de varios años, su memoria perdura en la comunidad académica y científica, entre sus estudiantes y colegas, y en cada contribución y colaboración que hizo al avance del conocimiento sobre peces, pesquerías, acuicultura y ecosistemas acuáticos en Bolivia. Es recordada con afecto entre sus colegas y estudiantes por su inteligencia, su capacidad para mantenerse discreta, su agudo ingenio perspicaz y su excelente sentido del humor. Que descanse en paz, y nuestra eterna gratitud por su colaboración y dedicación a la formación de las generaciones actuales de biólogos, ecólogos acuáticos, e ictiólogos en Bolivia.

Agradecimientos

Se extiende gratitud a las siguientes personas por su amabilidad al proporcionar contribuciones esclarecedoras para la preparación de este obituario y/o revisar el documento: Sandra Antezana (Secretaria Administrativa, Departamento de Biología, FCyT - UMSS), José Carlos Pérez (Jefe del Departamento de Biología, FCyT – UMSS), Silvia Castellón (Responsable de Laboratorio del Departamento de Biología, FCyT – UMSS), Amparo Bruckner (Docente del Departamento de Biología. FCyT – UMSS), Melina Campero (ex-Directora de la ULRA – UMSS), Santos Tordoya (Administrador, FESA - Colegio San Agustín), Viviana Delgadillo (Secretaria Administrativa, FESA - Colegio San Agustín), Roberto Figueroa (Director Ejecutivo, FESA - Colegio San Agustín), Selva Montellano (Investigadora Asociada a ULRA). Miguel Camacho y Willy Camacho efectuaron una revisión de la información personal presentada. Mabel Maldonado (investigadora de la ULRA – UMSS) y Alicia Andrea Valdivia Castellón (hija) proporcionaron gentilmente varias fotos presentadas en la portada y esta nota. El autor fue estudiante de la Profesora Dylían Castellón tanto en el Colegio San Agustín como en la carrera de Biología de la UMSS. Durante su función como directora de la ULRA, brindó un valioso apoyo institucional, contribuyendo a la obtención de los títulos de Licenciatura y Maestría en Bolivia, así como del Doctorado en Perú y Francia. Se reconoce aquí una sincera y profunda gratitud por el apoyo constante brindado.

INSTRUCCIONES PARA AUTORES

1. Generalidades

Los manuscritos enviados a la Revista Ciencia y Tecnología deben ajustarse estrictamente a las presentes normas editoriales. El envío de un manuscrito implica que el trabajo es original, inédito y no se encuentra en proceso de evaluación en otra revista. Los autores son responsables del contenido del manuscrito, así como de la veracidad de los datos presentados. El incumplimiento de estos principios dará lugar a la suspensión inmediata del proceso editorial.

Todos los manuscritos serán evaluados mediante un sistema de revisión por pares doble ciego, garantizando la confidencialidad tanto de autores como de revisores. La decisión final sobre la aceptación corresponde al Comité Editorial.

2. Formato general del manuscrito

Los manuscritos deben presentarse en formato digital (DOC o DOCX), en hoja tamaño carta, con márgenes de 2,5 cm.

El texto debe cumplir con las siguientes características:

- Fuente: Times New Roman, tamaño 12
- Interlineado: 1,5
- Alineación: justificada
- Numeración de páginas: esquina superior derecha
- Numeración de líneas: margen izquierdo en todo el documento

El texto normal de todos los manuscritos debe usar a 1,5 espacios entre líneas y justificado a la izquierda, pero en tablas complejas puede reducirse a 10 puntos e interlineado simple. El uso de letra cursiva se restringirá a palabras en latín u otro idioma.

El manuscrito debe incluir:

- Carátula: título, autores, afiliación institucional, correo electrónico, ORCID y autor de correspondencia.
- Texto del manuscrito
- Agradecimientos (opcional)
- Declaratorias (Punto 9)

La plantilla DOC está en la Plataforma OJS de la revista:

<http://cienciaytecnologia.umss.edu.bo/index.php/cienciaytecnologia/Plantilla>

3. Tipos de artículos

3.1 Artículos científicos (investigación original, extensión máxima 25 páginas)

Los artículos científicos están basados en una investigación completa, presentan datos originales, y organizan su texto bajo los títulos primarios de: introducción, métodos, resultados, discusión (con conclusiones o recomendaciones opcionales) y referencias bibliográficas

3.2 Artículos de revisión (extensión máxima 25 páginas)

Los artículos de revisión tienen como objetivo sintetizar, analizar y discutir el estado del conocimiento en un área específica, identificando tendencias, vacíos y oportunidades de investigación. Se aceptan dos tipos:

a) Revisión sistemática de la literatura

Debe seguir una metodología estructurada, transparente y reproducible para la búsqueda, selección y análisis de estudios científicos. Se recomienda incluir:

- Estrategia de búsqueda (bases de datos, palabras clave)
- Criterios de inclusión y exclusión
- Proceso de selección (por ejemplo, diagrama de flujo)
- Análisis cualitativo y/o cuantitativo de los estudios

Debe evidenciar rigor metodológico y permitir la replicabilidad del proceso.

b) Revisión narrativa (o tradicional)

Presenta un análisis crítico del estado del arte sin seguir necesariamente un protocolo sistemático formal, pero debe mantener:

- Coherencia temática
- Rigor en la selección de fuentes
- Discusión crítica y fundamentada

No debe limitarse a una descripción de estudios, sino aportar interpretación y síntesis.

3.3 Artículos de divulgación científica (extensión máxima 15 páginas)

Están orientados a la difusión de conocimientos científicos y tecnológicos hacia una audiencia amplia, manteniendo claridad, precisión y rigor conceptual. Son flexibles en su estructura y pueden mantener algunos títulos principales (introducción, discusión) e incorporar otros.

Se valorará la capacidad de comunicar conceptos complejos de manera accesible, sin perder el sustento científico.

3.4 Artículos técnicos o de aplicación (extensión máxima 25 páginas)

Presentan aplicaciones prácticas del conocimiento científico y tecnológico, incluyendo:

- Estudios de caso
- Desarrollo o validación de metodologías
- Innovaciones tecnológicas
- Aplicaciones en campo o industria

Deben incluir:

- Contexto y justificación
- Metodología aplicada
- Resultados o desempeño de la solución
- Análisis crítico de su implementación

Se valorará especialmente su relevancia práctica, impacto y posibilidad de replicación.

4. Estructura del manuscrito

4.1 Título

Debe ser conciso, claro e informativo, y presentarse en español e inglés.

4.2 Resumen

Debe tener entre 150 y 250 palabras, en un solo párrafo, incluyendo objetivo, metodología, resultados principales y conclusiones. No debe incluir citas.

4.3 Palabras clave

Incluir 5 términos compuestos o simples, que no repiten los del título, ordenados alfabéticamente.

4.4 Abstract y Keywords

Traducción fiel del resumen y palabras clave al inglés.

5. Desarrollo del artículo

5.1 Introducción

Debe contextualizar el problema, justificar su relevancia y establecer claramente los objetivos o hipótesis del estudio, basándose en una revisión bibliográfica pertinente.

5.2 Materiales y métodos

Debe describir con precisión los procedimientos, materiales y normas utilizadas, de modo que el estudio pueda ser reproducido por otros investigadores.

5.3 Resultados

Debe presentar los datos obtenidos de forma clara, lógica y objetiva, evitando interpretaciones. Se recomienda el uso adecuado de tablas y figuras.

5.4 Discusión

Debe interpretar los resultados, compararlos con estudios previos, identificar limitaciones y destacar implicaciones teóricas y prácticas. No debe repetir resultados ni convertirse en una revisión extensa.

6. Tablas y figuras

Las tablas se deben incluir al final del texto, cada una en una hoja separada y precedidos por su leyenda. En el texto, se debe señalar el lugar aproximado donde se insertará cada cuadro. Deben presentarse como tablas de Word, sin líneas verticales, y deben contar con título y encabezados (de columnas y filas). Evitar enviar tablas como imágenes o fotos de tablas, a fin de que se permita la edición de esta.

Las figuras pueden ser mapas, gráficos, dibujos o fotos. Deben estar impresas en páginas separadas al final del manuscrito y contar con sus respectivas leyendas. Los detalles de dibujos y gráficos (letras, símbolos) deben ser legibles si son reducidos ($\leq 50\%$) para la impresión final. Todos los términos, abreviaturas y símbolos usados deben ser consistentes entre figuras, tablas y el texto. En el texto, se debe señalar el lugar aproximado donde se insertará cada figura.

Las imágenes deben ser enviadas en los siguientes formatos: TIFF, JPG, EPS o PSD con una resolución mínima de 300 dpi para fotografías comunes, 600 dpi para fotografías que contienen líneas finas, setas, subtítulos etc.

Las tablas y figuras deberán tener una estructura según estilo APA 7ma edición.

7. Unidades y formato numérico

Se debe emplear el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Los números deben seguir el formato:

- Separador decimal: coma (,)
- Separador de miles: punto o espacio

8. Referencias y citas

El propósito de esta sección es dar el crédito a los autores de quienes se tomó ideas o datos. Antes de someter su manuscrito verifique que toda la literatura citada en el texto esté incluida en la lista de referencias y que ninguna referencia que no se haya citado en el texto haya sido incluida en la lista de referencias. Usar estilo APA 7ma edición. Es recomendable generar la lista de referencias con ayuda del gestor de referencias usado para insertar las citas bibliográficas.

9. Declaraciones obligatorias

9.1 Conflicto de intereses

En todos los manuscritos presentados a la Revista Ciencia y Tecnología, cualquiera sea su naturaleza, los Conflictos de Intereses deben ser reconocidos y mencionados por los autores. Antes de las referencias bibliográficas se indicará tanto la existencia o no de algún conflicto de interés.

9.2 Uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores deben declarar en su manuscrito si han empleado herramientas de IA para la generación de contenido, análisis de datos o traducción. Esta información debe especificarse en la sección de metodología o agradecimientos, según corresponda.

La IA no puede ser considerada como autor o coautor de los artículos. Los autores son responsables únicos del contenido publicado y deben garantizar que el uso de IA no compromete la originalidad ni la rigurosidad académica del trabajo.

Se prohíbe el uso de IA para la generación automática de artículos sin validación humana. Todo contenido debe ser revisado para evitar sesgos, errores o afirmaciones infundadas que puedan comprometer la calidad científica de la revista.

La IA:

- No puede ser considerada autor
- No reemplaza la responsabilidad de los autores
- Debe utilizarse bajo supervisión crítica

10. Ética de publicación

La revista promueve la integridad científica y el cumplimiento de buenas prácticas en investigación. Los autores deben garantizar: (i) originalidad del manuscrito, (ii) ausencia de plagio y autoplagio, (iii) uso adecuado de fuentes, y (iv) respeto a normas éticas en investigación.

En caso de detectarse malas prácticas, el manuscrito será rechazado y se podrán aplicar medidas editoriales adicionales.

11. Autoría

Se considerará autor a quien haya contribuido significativamente al diseño, desarrollo, análisis o redacción del trabajo.

Todos los autores deben:

- Aprobar la versión final
- Asumir responsabilidad sobre el contenido

La inclusión de autores debe reflejar contribuciones reales al estudio.

12. Proceso editorial

El proceso editorial comprende las siguientes etapas:

- a) Revisión preliminar por el Comité Editorial
- b) Evaluación por pares bajo modalidad doble ciego
- c) Emisión de dictamen (aceptación, revisión o rechazo)
- d) Corrección por parte de los autores
- e) Decisión final y publicación

13. Derechos de autor

Los autores conservan los derechos sobre sus trabajos, autorizando a la revista su publicación y difusión en medios electrónicos e impresos.

14. Envío del manuscrito

El envío se realiza a través del sistema OJS de la revista. Los documentos complementarios (carta de autoría, figuras adicionales, entre otros) deben ser remitidos al correo institucional correspondiente.

Para poder enviar el manuscrito se debe Iniciar Sesión en una cuenta ya existente o Registrarse para crear una nueva cuenta. Todos los documentos complementarios al artículo, como ser carta de responsabilidad de autoría y aceptación de condiciones, figuras que no deban estar incrustadas en el manuscrito, entre otros, deben ser enviados al correo electrónico: cyt@fcyt.umss.edu.bo.

