



FACULTAD DE CIENCIAS Y  
**TECNOLOGÍA**  
IICyT INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN



# CIENCIA Y TECNOLOGÍA

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN - FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA - UMSS

Vol.17 Núm.2  
2025



Cochabamba - Bolivia

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

**Revista Ciencia y Tecnología, Vol. 17 Núm. 2, 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

#### **Laboratorio de Hidráulica**

Personal técnico efectuando mediciones de caudal en: el canal de restitución de la Central Hidroeléctrica Chururaqui - La Paz,(izq.) y el río Ravelo en Chuquisaca, (der.).

Contraportada: Equipos e instrumental de medición de caudales sólidos y líquidos, equipos de georeferenciación topográfica, ecosondas y sensores electrónicos.

---

#### **Contactos**

📍 Calle Sucre frente Parque de la Torre  
☎ 4231765  
📠 591-4541781  
✉ [cyt@fcyt.umss.edu.bo](mailto:cyt@fcyt.umss.edu.bo)  
📘 Revista Ciencia y Tecnología - UMSS  
🌐 [cienciaytecnologia.umss.edu.bo](http://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 publica y transformación de esta obra que no cuente previamente con autorización de los titulares de propiedad intelectual.



*Revista*  
**CIENCIA Y  
TECNOLOGÍA**

**Vol. 17 Núm. 2**

*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.

**Rodrigo Echeverría Herrera**, Director, Instituto de Investigación, 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 Saúl 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

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

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

**Pascual Maldonado Lopez**, *Director, Carrera de Mecánica, 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.*

**Luis Aguirre Urioste**, *Director, Centro de Biodiversidad y Genética, 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.*

**Renán Orellana Lafuente**, *Docente, Departamento de Mecánica, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.*

**Danny Ariel Flores Taboada**, *Docente, Ciencias Básicas, Universidad del Valle, 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.*

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

**Walter Oscar Gonzalo Salinas Pericón**, *Docente, Departamento de Matemáticas, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.*

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

**Edgar Gareca León**, *Docente Investigador, Centro de Biodiversidad y Genética, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.*

**Walter Canedo Espinoza**, *Docente, Departamento de Mecánica, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.*

**Diego Parraga Menchaca**, *Docente Investigador, Universidad Autónoma del Beni "José Ballivian".*



## Nota editorial

La Revista Ciencia y Tecnología de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Mayor de San Simón presenta el Volumen 17 Número 2, edición que reúne investigaciones orientadas al análisis de problemáticas ambientales, educativas y tecnológicas de impacto regional y nacional.

Los trabajos publicados abordan temas relacionados con la gestión de riesgos hidrológicos, el uso de modelos de aprendizaje automático aplicados al rendimiento académico, la vulnerabilidad de acuíferos y el comportamiento mecánico de pavimentos de concreto. Asimismo, esta edición incorpora un estudio de divulgación científica enfocado en el análisis energético y exergético de sistemas termoindustriales.

Con esta publicación, la revista reafirma su compromiso con la difusión del conocimiento científico en acceso abierto, promoviendo la investigación y el intercambio académico entre investigadores, docentes y estudiantes.

Agradecemos a autores, revisores y colaboradores por su valioso aporte al fortalecimiento de la producción científica y tecnológica.

Aidee Vargas Colque  
Editora Responsable  
**Revista Ciencia y Tecnología**  
**Facultad de Ciencias y Tecnología**





## CONTENIDO

### Artículos científicos

#### **Análisis de riesgo de inundación mediante una metodología estocástica-determinística combinada aplicado en el río Chulla del municipio de Vinto – Cochabamba**

*Flood risk analysis using a combined stochastic-deterministic methodology applied to the Chulla river of municipality of Vinto – Cochabamba*

Ronald Galarza Gonzales, Mauricio F. Villazón Gómez..... 15 – 35

#### **Predicción del bajo rendimiento académico en ámbitos rurales de Bolivia mediante modelos de aprendizaje automático**

*Prediction of poor academic performance in rural areas of Bolivia using machine learning models*

Limberg Villca Coraite..... 36 - 50

#### **Vulnerabilidad intrínseca de acuíferos. Estudio de Caso: Huerta Mayu, Cochabamba, Bolivia**

*Intrinsic vulnerability of aquifers. A Case Study: Huerta Mayu, Cochabamba, Bolivia*

Galo Osvaldo Muñoz Vásquez, José Carlos Chambi Gonzales ..... 51 - 62

### Artículo de revisión

#### **Ventana de corte de juntas en pavimentos de concreto: una revisión sistemática basada en el fraguado y comportamiento mecánico temprano**

*Joint saw-cutting window in concrete pavements: a systematic review based on setting characteristics and early-age mechanical behavior*

Yhovana Monica Marca Colque , Jahel Sarvia Ledezma Perez, Victor Hugo Miranda Challapa, Joaquin Humberto Aquino Rocha..... 65 – 82

### Artículos de divulgación

#### **Análisis energético y exergético de un caldero pirotubular de dos pasos**

*Energetic and exergetic analysis of a two-step fire tube boiler*

Vanessa Bautista Paganelli1, Andres Mirko Morales Camacho, Félix Rustan Roca, Aderli Torrico Rojas ..... 85 – 98





*Artículos*

*Científicos*



# Análisis de riesgo de inundación mediante una metodología estocástica-determinística combinada aplicado en el río Chulla del municipio de Vinto - Cochabamba

## Flood risk analysis using a combined stochastic-deterministic methodology applied to the Chulla river of municipality of Vinto - Cochabamba

Ronald Galarza Gonzales<sup>1,\*</sup>, Mauricio F. Villazón Gómez<sup>2</sup>

\*Correo de correspondencia: [ronaldgalarza.g@gmail.com](mailto:ronaldgalarza.g@gmail.com)

### Resumen

La cuenca del río Rocha se caracteriza por tener un régimen hidrológico con crecidas intempestivas de corta duración, sumado al crecimiento urbano no planificado, en los últimos años ha generado inundaciones en diferentes zonas, incluyendo el municipio de Vinto. El presente estudio tiene como objetivo estimar el riesgo de pérdidas económicas y social asociado a inundaciones en la zona de Chulla del municipio de Vinto, y cuantificar la rentabilidad de medidas de mitigación en el río, combinando la metodología estocástica y determinística. La zona de estudio comprende el tramo del río Chulla desde la av. Alvina Patiño hasta la desembocadura en el río Rocha, donde el lecho del río se encuentra al nivel o por encima de las llanuras de inundación. Con el software IT-NHRain se generaron 50 escenarios estocásticos de tormentas para la cuenca del río Rocha con datos de precipitación de 16 estaciones meteorológicas con duraciones de 6 horas. Mediante modelación hidrológica en HEC-HMS, las tormentas se convirtieron en hidrogramas. El análisis hidrodinámico se realizó en HEC-RAS para el escenario de la media de los 50 escenarios estocásticos más una desviación estándar, considerado como el escenario extremo con mayor probabilidad de ocurrencia. El análisis de riesgo se realizó en la plataforma determinística de Mi-Resiliencia, los resultados indican que las obras hidráulicas planteadas generan una reducción del riesgo total del 87% respecto a la situación inicial y tienen una rentabilidad de 0.6, que económicamente no es positivo, pero el análisis del alto valor agregado hace que no sean descartadas.

**Palabras clave:** amenaza de inundación, análisis estocástico, cuantificación de riesgo, Mi-Resiliencia.

### Abstract

The Rocha River Basin is characterized by a hydrological regime with short-lived, sudden floods, coupled with unplanned urban growth, in recent years it has generated floods in different areas, including the municipality of Vinto. The objective of this study is to estimate the risk of economic and social losses associated with flooding in the Chulla area of the municipality of Vinto, and to quantify the profitability of mitigation measures in the river, combining the stochastic and deterministic methodology. The study area includes the section of the Chulla river from the av. Alvina Patiño to the mouth of the river Rocha, where the river bed is on the level or above the flood plains. With the IT-NHRain software, 50 stochastic scenarios of storms were generated for the Rocha River basin with precipitation data of 16 meteorological stations with duration of 6 hours. By hydrological modeling in HEC-HMS, storms became hydrographs. The hydrodynamic analysis was carried out in HEC-RAS for the scenario of the average of the 50 stochastic scenarios plus a standard deviation, considered as the extreme scenario with the greatest probability of occurrence. The risk analysis was carried out on the deterministic platform of Mi-Resiliencia. The results indicate that the hydraulic works raised generate a reduction of the total risk of 87% compared to the initial situation and have a profitability of 0.6, which is economically not positive, but the analysis of the high added value makes them not discarded.

**Keywords:** flood risk, Mi-Resiliencia, risk quantify, stochastic analysis.

<sup>1</sup> Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0001-5090-9525>.

<sup>2</sup> Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0000-0003-1175-5022>

## 1. Introducción

El río Rocha fluye por el Valle Central de Cochabamba atravesando los centros urbanos desde el municipio de Sacaba hasta Vinto, se caracteriza por tener un régimen hidrológico con crecidas intempestivas que tienen una corta duración durante la época lluviosa (PROMIC, 2011). El crecimiento de la mancha urbana en el área metropolitana de Cochabamba, en los últimos años, se ha incrementado de manera desordenada y sin planificación (TYPESA, 2013) además, se han evidenciado la ocurrencia de eventos extremos de precipitación que han generado inundaciones. Mediante modelaciones hidrológicas e hidráulicas se ha identificado como una zona susceptible a inundaciones las riberas del río rocha en el municipio de Vinto (SEI, 2019). Un reporte del diario (OPINIÓN, 2018) del 4 de febrero de 2018 señaló que las inundaciones que afectaban al municipio de Vinto eran a causa de las lluvias intensas. (Palagi y otros, 2014) señalan que las inundaciones urbanas se han incrementado causando también un incremento en las pérdidas sociales y económicas en varias ciudades afectadas y se requiere un análisis más amplio. Para hacer frente a estas situaciones es necesario desarrollar y mejorar métodos de análisis de riesgo de inundación para estimar las zonas potenciales de inundación y además cuantificar las pérdidas económicas y sociales (Rincón y otros, 2022). En el presente estudio, el análisis del riesgo de inundación se realizó mediante una combinación de la metodología estocástica, para generar una amplia serie de escenarios de tormentas posibles de ocurrencia aleatoriamente, y la determinística para reducir y enfocar el análisis al escenario más probable de ocurrencia, reduciendo el esfuerzo y los recursos necesarios. Además, por las características topográficas del río Chulla donde el lecho del río está al mismo nivel o por encima de las zonas expuestas a inundación.

En ese sentido se tiene como objetivo estimar el riesgo de pérdidas económicas y social asociadas a la amenaza de inundación en la zona de Chulla del municipio de Vinto y cuantificar la rentabilidad de medidas de mitigación en el río, combinando la metodología estocástica de IT-NHRain para generar escenarios estocásticos de precipitación, transformarlas en tormentas con HEC-HMS, realizar la modelación hidráulica bidimensional con HEC-RAS 2D para generar mapas de inundación, y mediante la metodología determinística de la plataforma Mi-Resiliencia, realizar el análisis de riesgo de inundación para evaluar la rentabilidad de las obras hidráulicas.

IT-NHRain es parte de los programas de CAPRA, varios estudios en diferentes contextos han utilizado CAPRA para el análisis. Por ejemplo, (Zapata y otros, 2024) aplicaron CAPRA en la cuenca del río Chico, en Chuquisaca, Bolivia para evaluar el riesgo de inundaciones bajo escenarios de cambio climático. En El Salvador, el Ministerio de Medio Ambiente y el BID (BID & MARN, 2013) utilizaron CAPRA para evaluar el riesgo de inundaciones a nivel país. En Venezuela, (BID & ITEC, 2014) desarrollaron perfiles de riesgo de inundación para el todo el país. En Perú (Ccopi-Trucios, 2023) han aplicado la metodología estocástica en comunidades andinas para evaluar el riesgo de inundaciones. Estas aplicaciones indican que la metodología estocástica es ampliamente utilizada para análisis de riesgo de inundaciones en diferentes escalas.

## 2 Materiales y métodos

### Área de estudio

El estudio se realizó en la cuenca del río Chulla ubicado en el municipio de Vinto del departamento de Cochabamba. La región seleccionada para el caso de estudio se localiza en el tramo del río Chulla comprendido entre la av. Alvina Patiño hasta la desembocadura en el río Rocha con una longitud aproximada de 1.5 km. Este tramo es altamente susceptible a sufrir inundaciones y en general lo son el resto de los afluentes del río Rocha desde la ciudad de Cochabamba. La razón de la alta susceptibilidad para sufrir inundaciones incluye el incremento de las urbanizaciones asentadas en los márgenes

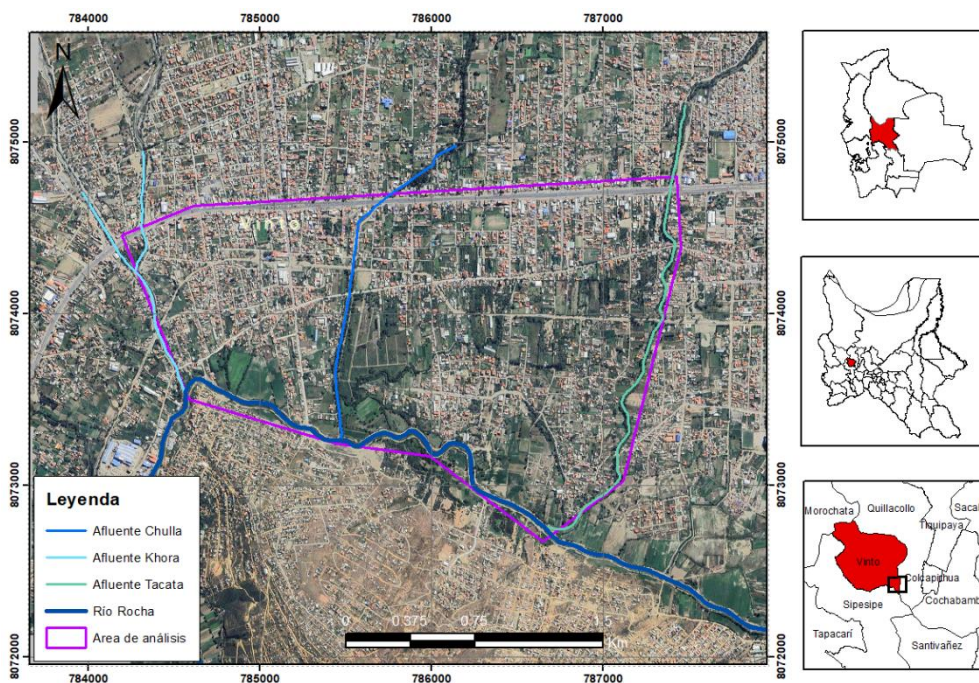


del río en los últimos años, las cuales han ido estrechando y modificando la sección natural del río, además de la reducción natural de la pendiente del cauce por la cercanía con el río Rocha, en el cual desemboca.

El río Chulla nace en la cordillera del Tunari. La parte alta de la cuenca es zona montañosa, al ingreso a la zona metropolitana de Vinto existen urbanizaciones dispersas, las mismas se intensifican conforme avanzan aguas abajo. La cuenca del río Chulla tiene un área de drenaje de 72.2 km<sup>2</sup>. Un tramo de aproximadamente 415 m, desde la av. Alvina Patiño, se encuentra canalizado con muros de concreto con una sección de 8 m de ancho y 2 m de profundidad, el tramo aguas abajo es de sección natural. En la Figura 1 se ilustra la zona de estudio.

**Figura 1**

*Área de estudio*



### Descripción de la metodología de análisis

El análisis de riesgo y costo-beneficio se realizó en la herramienta Mi-Resiliencia, una herramienta WEB-SIG para el análisis de riesgo de desastres y costo-beneficio de una medida de mitigación para periodos de retorno de 20, 50 y 100 años (GEOTEST AG, 2018). La evaluación se realiza en base a: mapas de intensidades de amenaza; mapas de exposición; y funciones de vulnerabilidad (integradas en la herramienta). El mapa de exposición fue elaborado en base a las clases de objetos definidos en la herramienta. Para generar los mapas de amenaza se realizaron modelaciones hidráulicas en HEC-RAS 2D con caudales producto de un análisis hidrológico en HEC-HMS con tormentas estocásticas generadas con el módulo IT-NHRain de la plataforma CAPRA.

### Datos de análisis

Para la topografía de la cuenca se utilizó un Modelo de Elevación Digital Global de ASTER (Global Digital Elevation Model - GDEM) con una resolución espacial de 30 m (NASA/METI/AIST, 2019). La identificación de

los afluentes (principalmente en la zona urbanizada) fue ajustada mediante visitas a campo para caracterizar el curso de los ríos y recolectar información adicional para afinar la delimitación de las subcuencas.

La información meteorológica fue extraída del informe Perfil de Riesgo de Desastres para Bolivia (BID, 2016) realizado por ITEC (INGENIERÍA TÉCNICA Y CIENTÍFICA S.A.S). Se utilizaron 16 estaciones que presentan datos diarios para el periodo 1971-2016. Adicionalmente, se utilizó información procesada y rellenada por centro de investigaciones en Ingeniería Civil y Ambiental de la UPB (2021) y se incorporó datos obtenidos del LH-IMSS y el SENAMHI para completar datos faltantes. En la Tabla 1 se presenta información general de las 16 estaciones utilizadas, la base de datos contiene registros desde 1/1/1980 al 31/12/2021. En la Figura 2 se muestra la serie histórica de precipitaciones de la estación Pairumani, que es la más cercana a la zona de estudio.

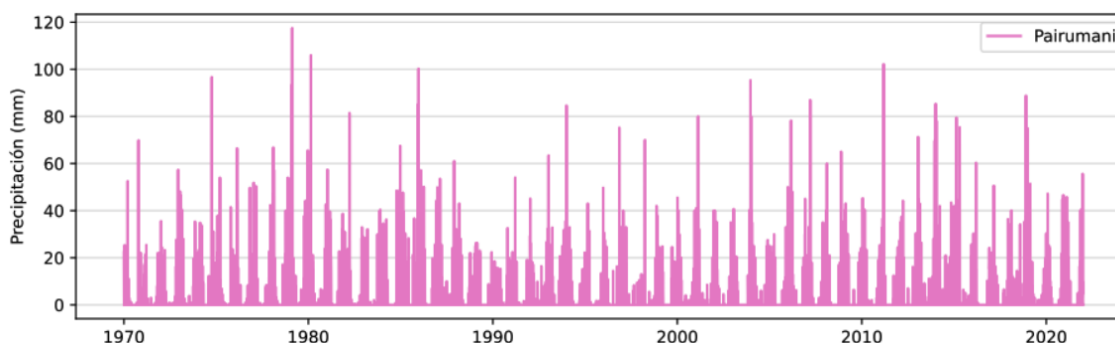
**Tabla 1**

*Información general de las estaciones utilizadas*

| Estación        | Longitud | Latitud | Elevación | Tipo de datos |
|-----------------|----------|---------|-----------|---------------|
| Arani           | -65.754  | -17.574 | 2836      | Precipitación |
| Capinota        | -66.261  | -17.717 | 2395      | Precipitación |
| CBBA Aeropuerto | -66.179  | -17.414 | 2563      | Precipitación |
| Colomi          | -65.871  | -17.336 | 3284      | Precipitación |
| La Tamborada    | -66.136  | -17.449 | 2583      | Precipitación |
| La Violeta      | -66.232  | -17.347 | 2607      | Precipitación |
| Pairumani       | -66.319  | -17.366 | 2615      | Precipitación |
| Parotani        | -66.344  | -17.566 | 2475      | Precipitación |
| San Benito      | -65.904  | -17.526 | 2708      | Precipitación |
| Santivañez      | -66.249  | -17.565 | 2537      | Precipitación |
| Sarco           | -66.176  | -17.384 | 2569      | Precipitación |
| Tarata          | -66.023  | -17.609 | 2750      | Precipitación |
| Tiraque         | -65.724  | -17.425 | 3295      | Precipitación |
| 4 Esquinas      | -66.241  | -17.198 | 3994      | Precipitación |
| Morochata       | -66.967  | -17.217 | 3817      | Precipitación |
| Misicuni        | -66.327  | -17.090 | 3793      | Precipitación |

**Figura 2**

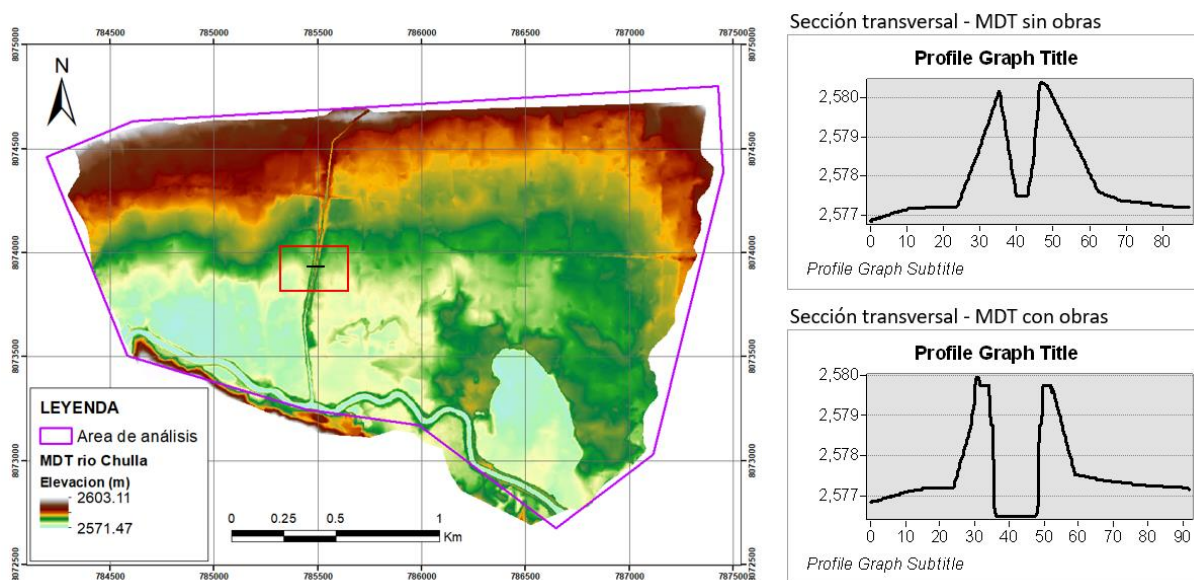
*Serie histórica precipitación en la estación Pairumani*



La topografía del río Chulla fue generada por la Empresa Consultora CIVILDEA el año 2024, que consiste un Modelo Digital de Terreno (MDT) con resolución espacial de 0.25 m producto de un levantamiento topográfico, utilizado en la implementación del modelo hidráulico 2D para tener una representación física precisa del río. El MDT fue modificado por la consultora para implementar obras hidráulicas en el tramo final del río que tiene sección natural. En la Figura 3 se muestra el MDT de la zona de estudio y una comparación del cauce del río sin obras y con obras.

**Figura 3**

*Modelo Digital de Elevación de la zona de estudio del río Chulla*



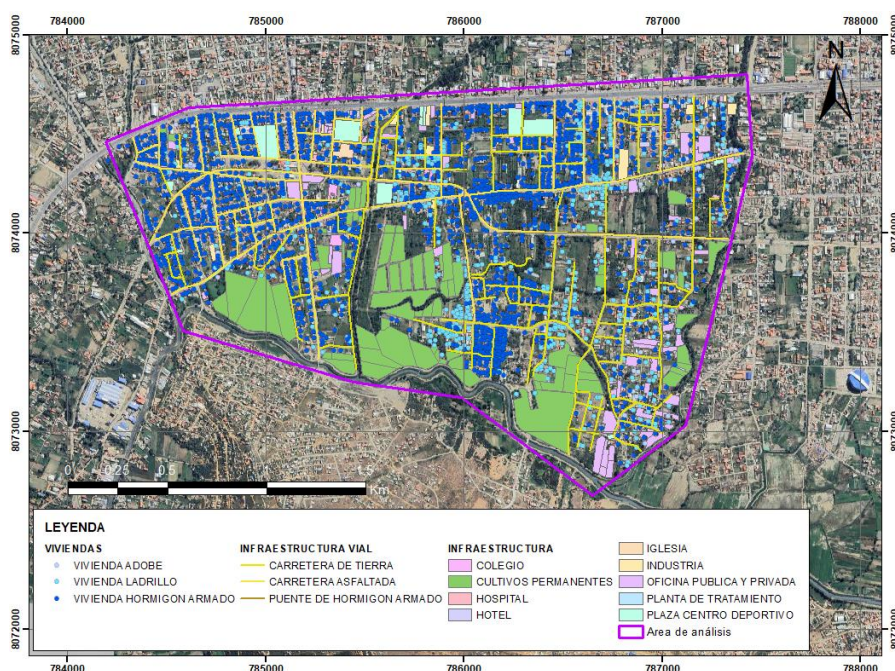
El inventario de los elementos expuestos a la amenaza de inundación fue generado por la Empresa Consultora CIVILIDEA el año 2024. El inventario comprende construcciones o viviendas, infraestructura pública, áreas agrícolas y personas, principalmente. La información de las construcciones o viviendas generalmente incluye el tipo y/o material de la construcción, la ubicación, el valor de cotización y el número de pisos de la construcción (Rincón y otros, 2022). Esta información fue procesada de acuerdo a lo requerido por Mi-Resiliencia en ArcMap como elementos punto, línea y o polígonos dependiendo el tipo de objeto. En la Figura 4 se muestra el mapa de exposición clasificado en diferentes categorías.

La estimación económica de cada elemento expuesto es una tarea difícil (Pellicani y otros, 2018), ya que esta información no se conoce con exactitud y no es pública en ningún caso, además que es muy variable, aún en la misma zona. Para la determinación de los costos de inversión privada como ser viviendas de abobe, ladrillo y hormigón se tomaron los valores presentados en (BOENCO, 2021) obtenidos a partir de avalúos realizados en el departamento de Cochabamba. En el caso de infraestructura pública y demás elementos, la información se tomó de los anexos de Mi-Resiliencia (GEOTEST AG, 2018). En la Tabla 2 se muestra los valores económicos usados para la infraestructura privada.



**Figura 4**

*Mapa de exposición clasificado para la zona de estudio*



**Tabla 2**

*Costos de infraestructura privada y/o viviendas*

| Tipo de Infraestructura      | Costo avalúo (Bs/m <sup>2</sup> ) |
|------------------------------|-----------------------------------|
| Vivienda de madera y/o adobe | 750                               |
| Vivienda de ladrillo         | 1500                              |
| Vivienda de hormigón         | 1800                              |

## Amenaza de lluvia – Estudio Estocástico

El análisis de lluvia y la distribución de su intensidad en la región de análisis se realizó en las herramientas IT-NHRain, IT-Flood, HEC-HMS y HEC-RAS.

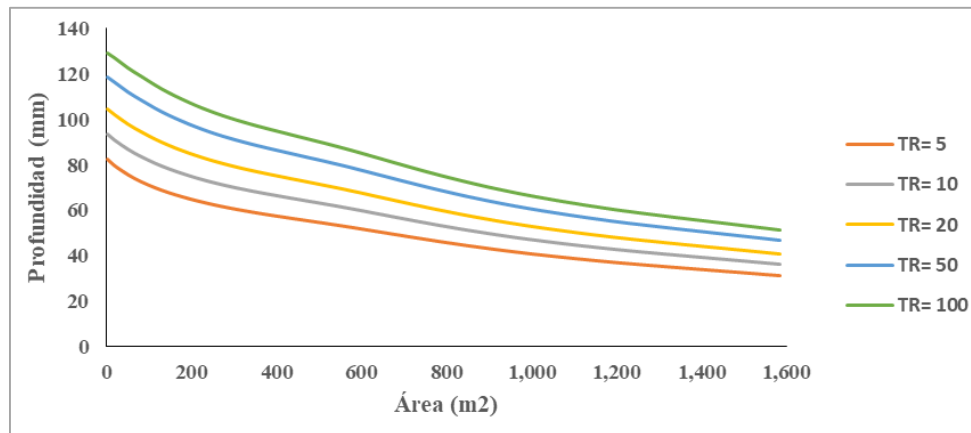
Con los datos meteorológicos de las 16 estaciones seleccionadas se generaron 50 escenarios de tormentas estocásticas con ubicación aleatoria, forma e intensidad para una duración y frecuencia seleccionada siguiendo el procedimiento indicado a continuación: 1) Caracterización geográfica de la cuenca, para determinar propiedades físicas del área de aporte; 2) Caracterización hidrológica de la cuenca, para determinar las máximas lluvias y generar las curvas Precipitación-Área-Duración-Frecuencia (PADF); y 3) Generación de tormentas estocásticas.

(ERN-AL, 2011) plantea la incorporación de un sistema de generación de lluvias convectivas estocásticas que permitan definir escenarios de amenaza específicos para la posterior evaluación del peligro de inundación asociado. El modelo seleccionado permite caracterizar las condiciones de precipitación de una cuenca en términos de curvas PADF (Cardozo & Le Noir, 2024). Estas curvas relacionan la profundidad de precipitación esperada, el área de

influencia, la duración de la tormenta y su periodo de retorno. El análisis se realizó para cinco periodos de retorno (5, 10, 20, 50 y 100 años) con una duración de las tormentas de un día teniendo en cuenta 4 estaciones con precipitación mayor a cero. La Figura 5 muestra las curvas PADF generadas para la cuenca del río Rocha.

**Figura 5**

*Curva PADF cuenca río Rocha*



### Modelación hidrológica

Utilizando los escenarios estocásticos de lluvia se realizó el análisis hidrológico dentro la cuenca del río Rocha en el módulo IT-Flood de la plataforma CAPRA. Este módulo requiere un modelo hidrológico en HEC-HMS versión 4.0 para determinar los hidrogramas en la salida de cada subcuenca de interés producto de la amenaza de lluvia generada en IT-NHRain (León y otros, 2018). En el procedimiento se define que la duración de la tormenta en la cuenca del río Rocha es de 6 horas, la distribución temporal es de 25% las primeras dos horas, 60% las siguientes dos horas y por último un 15 % las últimas horas, en base a observaciones de hietogramas de tormentas históricas medidas por estaciones meteorológicas dentro la cuenca.

Para delimitar las subcuencas, determinar el curso de los ríos y las uniones, se utilizó un DEM con resolución espacial de 30 m de ASTER (NASA/METI/AIST, 2019). Se identificaron 15 puntos de interés, la delimitación automática de las subcuencas urbanas fue ajustada mediante visitas a campo. En la Tabla 3 se presenta datos de los puntos de interés para el modelo hidrológico y en la Figura 6 el resultado de las subcuencas ajustadas para cada punto. Los factores de corrección se aplicaron a los hidrogramas de salida de los puntos de interés.

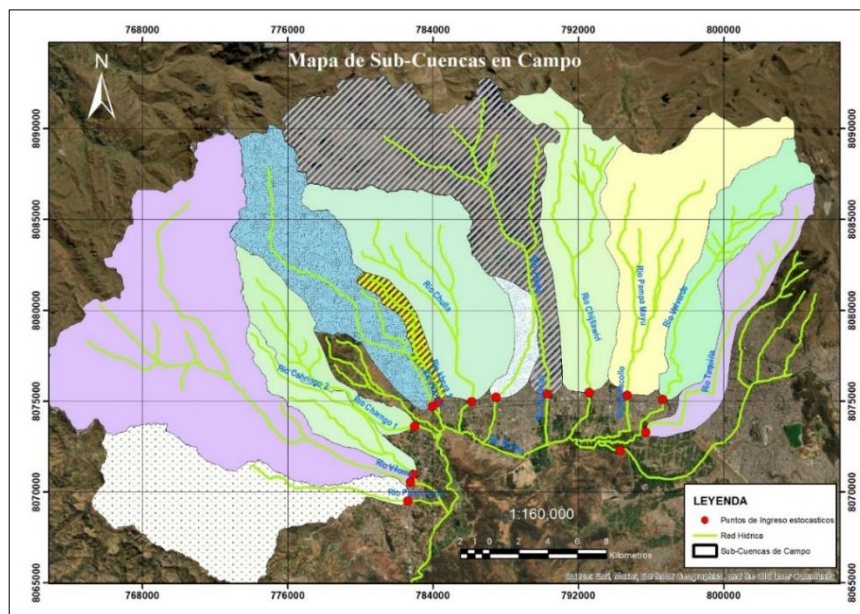
**Tabla 3**

*Puntos de interés en modelo hidrológico*

| Nombre de afluentes | ID punto de interés | Áreas de campo (km <sup>2</sup> ) | Áreas en HEC-HMS (km <sup>2</sup> ) | Elemento (HEC-HMS) | Factor de corrección |
|---------------------|---------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------|----------------------|
| Rio Pancuruma       | EST-1               | 71.0                              | 67.5                                | J4220              |                      |
| Rio Viloma          | EST-2               | 151.4                             | 148.8                               | J3606              |                      |
| Rio Charingo 2      | EST-3               | 19.0                              | 19.8                                | J3668              |                      |
| Rio Charingo 1      | EST-4               | 24.0                              | 29.0                                | J3685              |                      |
| Rio Khora 2         | EST-5               | 45.2                              | 58.6                                | J3665              | 1.29                 |
| Rio Khora 1         | EST-6               | 18.6                              | 17.9                                | J3647              |                      |
| Rio Chulla          | EST-7               | 66.0                              | 41.3                                | J3630              | 1.61                 |
| Rio Huayculli       | EST-8               | 77.0                              | 99.1                                | J3662              | 0.77                 |
| Rio Tacata          | EST-9               | 32.0                              | 3.1                                 | J3937              | 10.00                |
| Rio Chijllawiri     | EST-10              | 53.0                              | 16.4                                | J3690              | 3.22                 |
| Rio Pampamayu       | EST-11              | 70.9                              | 75.8                                | J3650              |                      |
| Rio Valverde        | EST-12              | 37.0                              | 89.0                                | J3641              | 0.40                 |
| Rio Taquiña         | EST-13              | 26.9                              | 89.0                                | J3641              | 0.33                 |
| Entrada Rocha       |                     |                                   |                                     | J3677              |                      |
| Salida Rocha        |                     |                                   |                                     | J4000              |                      |

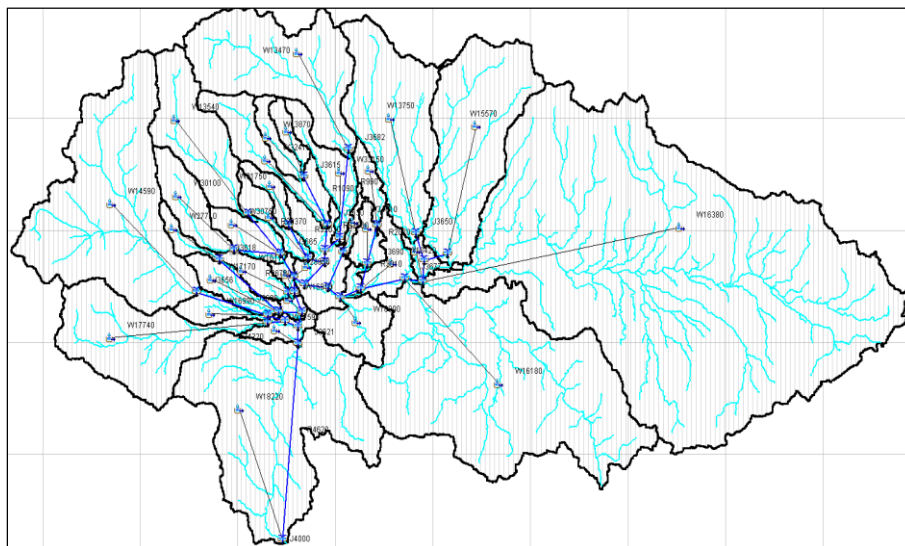
**Figura 6**

*Subcuencas delimitadas y ajustadas para el modelo hidrológico*



Para el cálculo de las pérdidas iniciales se utilizó el método del Número de Curva (CN) desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) y para la transformación lluvia-escorrentía se seleccionó el método del Hidrograma Unitario de Clark. Para el tránsito del hidrograma en los elementos río se utilizó el método de Miskingum-Cunge, el tiempo de concentración se calculó con la ecuación de Kirpich. En la Figura 7 se presenta el esquema del modelo hidrológico implementado en HEC-HMS, el cual utiliza como entrada precipitación grillada.

### Modelo hidrológico de la cuenca del río Rocha en HEC-HMS

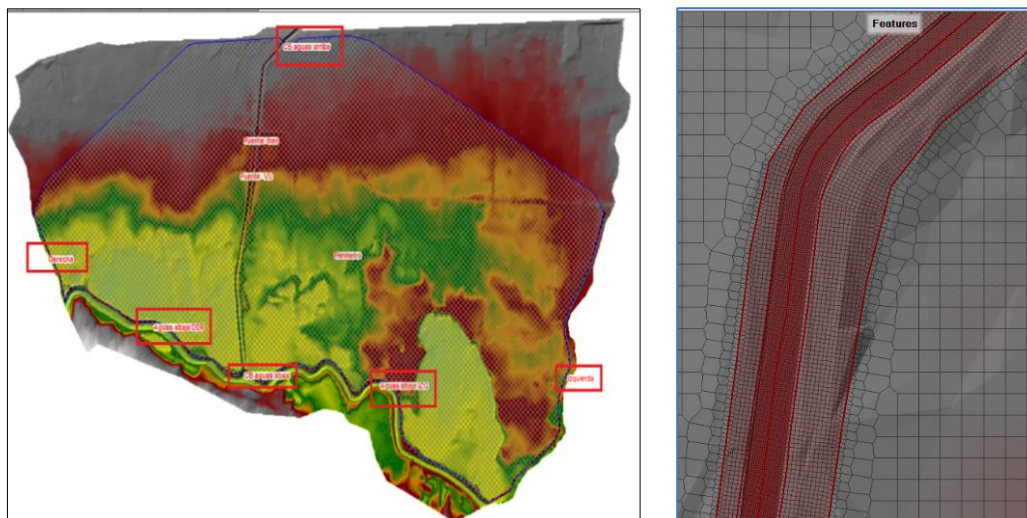


La grilla del modelo 2D fue creada con un tamaño de celda de 5 m y se introdujeron áreas de refinamiento para los taludes laterales del río con una resolución de 1 m y en el cauce de 0.5 m con el fin capturar el detalle del río Chulla en el modelo. En la Figura 8 se muestra el resultado de la configuración de la malla 2D.



**Figura 8**

*Malla 2D y condiciones de borde en el modelo (izq), zonas refinamiento de la malla 2D (der)*



En el tramo de estudio del río Chulla se tiene 4 puentes vehiculares, cada uno fue implementado en el modelo. La rugosidad de Manning fue estimada con el procedimiento propuesto por Cowan descrito en (Chow, 1959) y se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 4**

*Valores del coeficiente de Manning para el área de estudio*

| Uso de Suelo    |                                                                         | Tipo de Suelo                                         | n     |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------|
| Agricultura     |                                                                         | Cultivos de campo maduros                             | 0.045 |
| Arboles         |                                                                         | Terreno despejado con troncos de árboles, con brotes. | 0.05  |
| Canal Revestido |                                                                         | Concreto                                              | 0.015 |
| Caminos         |                                                                         | Asfalto                                               | 0.016 |
| Cauce de Ríos   | Limpio, rectó sin fisuras, fondo profundo, con algunas piedras y pastos |                                                       | 0.035 |
| Suelo Desnudo   |                                                                         | Suelo sin Cobertura Vegetal                           | 0.025 |
| Urbano          |                                                                         | Pavimento con infraestructura                         | 0.04  |

Los hidrogramas calculados en HEC-HMS fueron introducidos como condiciones de borde aguas arriba. La estimación de la pendiente normal fue considerada como condiciones de borde aguas abajo. Las simulaciones realizadas para el análisis de riesgo corresponden a la media de los 50 escenarios estocásticos más una desviación estándar, considerado como el escenario extremo con mayor probabilidad de ocurrencia y el que captura la esencia del análisis hidrológico estocástico.

Para los cálculos del modelo se utilizó las ecuaciones de onda difusa (Diffusion Wave Equations) bajo un enfoque general de solución (Brunner G. W., 2024). El intervalo de cálculo fue establecido en base pruebas de sensibilidad teniendo en cuenta un valor que mantenga la precisión de los resultados y estabilidad numérica establecido en el



criterio de Courant (Brunner G. W., 2023). El tiempo determinado fue de 3 s para un tiempo de simulación de 48 horas.

Las medidas de mitigación contemplan el dragado y conformación de muros de gaviones en el cauce principal del río chulla, con el fin de evitar afectar los bancos naturales del cauce y mantener en lo posible la pendiente natural del lecho. Se considera dos sectores de intervención, el primero inicia en la finalización de la canalización del cauce y el segundo en el tramo final previo a la confluencia con el río Rocha, ya que estos sectores se identificaron como potenciales para que se produzcan desbordes. Las medidas de mitigación fueron introducidas mediante modificaciones en el MDT del cauce (ver Figura 3), con ajustes en la malla 2D para considerar los cambios en la topografía, manteniendo igual el resto de los parámetros.

### Análisis de riesgo de inundación

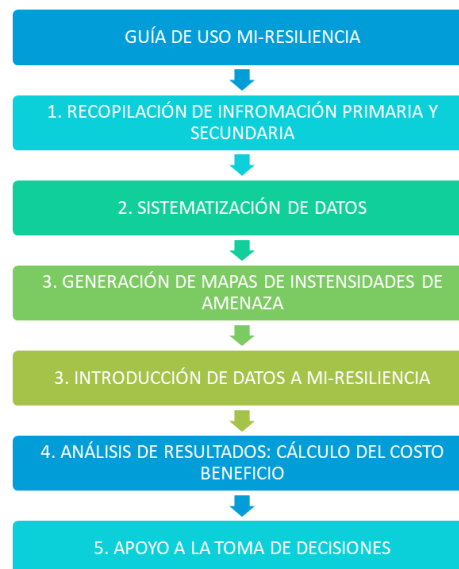
El riesgo se refiere a las pérdidas que puedan ser generadas por una amenaza, como inundación, en un elemento específico bajo la amenaza en un periodo o escenario particular (Peduzzi y otros, 2009). El riesgo es resultado de la intersección de la amenaza, el inventario de elementos expuestos y vulnerabilidad asociada a determinadas funciones que resultan en una cuantificación del daño económico y social (Rincón y otros, 2022).

El análisis se llevó a cabo en la plataforma Mi-Resiliencia, una herramienta WEB-SIG que permite realizar el análisis de riesgo de desastres y costo-beneficio de una medida de mitigación. El análisis de la amenaza de inundación puede ser evaluado para periodos de retorno de 20, 50 y 100 años. (GEOTEST AG, 2018).

A través de la modelación hidrológica e hidrodinámica se generó el nivel de amenaza existente y mediante levantamiento de información socioeconómica se determinó el nivel de exposición, teniéndose así, los insumos necesarios para el análisis. En la Figura 9 se muestra el flujograma de procesos para el desarrollo del análisis en la plataforma.

**Figura 9**

*Flujograma de procesos para mi-resiliencia*



La vulnerabilidad física de los objetos expuestos en Mi-Resiliencia están caracterizados mediante valores empíricos dependiendo del tipo de construcción y el nivel de intensidad de la amenaza, los valores están en el rango de 0 (sin daño) a 1 (daño total) (GEOTEST AG, 2018) y no pueden ser modificados por el usuario.

La amenaza de inundación se analizó para 100 años de periodo de retorno para el escenario de la media más una desviación estándar que trae el efecto estocástico y el posterior análisis probabilístico. La amenaza representada por mapas de inundación, fueron clasificados en tres intensidades: baja, media y alta, en base a los umbrales señalados en (GEOTEST AG, 2018) para las variables de profundidad de inundación  $h$  (m) y velocidad de flujo  $v$  (m/s) de la Tabla 5.

**Tabla 5**

*Clasificación de intensidades de amenaza de inundación*

| Amenaza    | Variable                        | Intensidad |           |       |
|------------|---------------------------------|------------|-----------|-------|
|            |                                 | Baja       | Media     | Alta  |
| Inundación | $h$ (m)                         | $< 0.5$    | $0.5 - 2$ | $> 2$ |
|            | $v \cdot h$ (m <sup>2</sup> /s) | $< 0.5$    | $0.5 - 2$ | $> 2$ |

Para cada escenario de análisis, el riesgo total se calcula con la ecuación 1

$$R_j = \sum RBD_j + RPD_j + RI_j \quad (E1)$$

Donde:  $R_j$  = Riesgo total (Bs/año);  $RBD_j$  = Riesgo para bienes, daños directos (Bs/año);  $RPD_j$  = Riesgo para personas, daños directos (Bs/año)

El riesgo para bienes por daños directos en edificios, caminos y agricultura se calcula con la ecuación 2.

$$RBD_j = (p(OE) * VU * VE_j) + (p(OE) * VU * VC * g_j) + (p(OE) * VU * VA * A_j) \quad (E2)$$

El cálculo del riesgo para personas por daños directos dentro de edificios y caminos son calculados con la ecuación 3 y 4 respectivamente.

$$\text{Dentro de edificios: } RPD_j = p(OE) * MO * NP * WP * p(pr)_j \quad (E3)$$

$$\text{En caminos: } RPD_j = p(OE) * MO * OV * FR * WP * \frac{FR * g}{v * 24000}_j \quad (E4)$$

Los riesgos de daños indirectos cuantifican posibles costos de pérdidas de ingresos mediante la ecuación 5.

$$RI_j = DP + p(OE) + EM + PE(1 - FRs) \quad (E5)$$

Donde:  $RBD_j$  = Riesgo de bienes para escenario  $j$  por daños directos (Bs/año);  $RPD_j$  = Riesgo de personas para escenario  $j$  por daño directo (Bs/año);  $RI_j$  = Riesgo por daños indirectos para escenario  $j$  (Bs/año);  $p(OE)$  = Probabilidad de ocurrencia espacial (-);  $VU$  = Vulnerabilidad física (-);  $VE$  = Valor edificio (Bs/und);  $VC$  = Valor camino (Bs/m);  $g$  = Longitud de camino expuesto (m);  $A$  = Área expuesta (ha);  $j$  = Escenario, periodo de retorno considerado, en este caso 100 (-);  $MO$  = Mortalidad (-);  $NP$  = Número de personas dentro el mismo objeto (-);  $p(pr)$  = Probabilidad de presencia (-);  $OV$  = Ocupación promedio por vehículo (-),  $FR$  = Cantidad promedio diario de

vehículos en el camino (-);  $v$  = Velocidad media de vehículos en el camino (km/h); WP = Voluntad de pago (Willingness to pay) (Bs); DP = Días con pérdida de ingresos (días); EM = Cantidad de empleados afectados (-); PE = Pérdida económica diaria (Bs/día); FRs = Factor resiliencia (-).

El valor del “Costo anual de la medida” dentro del análisis del Beneficio/Costo está dado ecuación:

$$\text{Costo anual medida} = \frac{CC}{VUI} + CM + CO + \frac{CC}{2} * \frac{TIB}{100} \quad (E6)$$

Donde: CC = Costo de construcción (Bs); CM = Costo anual de mantenimiento (Bs/año); CO = Costo anual de operación (Bs/año); Tasa de interés bancaria (%); VUI = Vida útil de la medida (años).

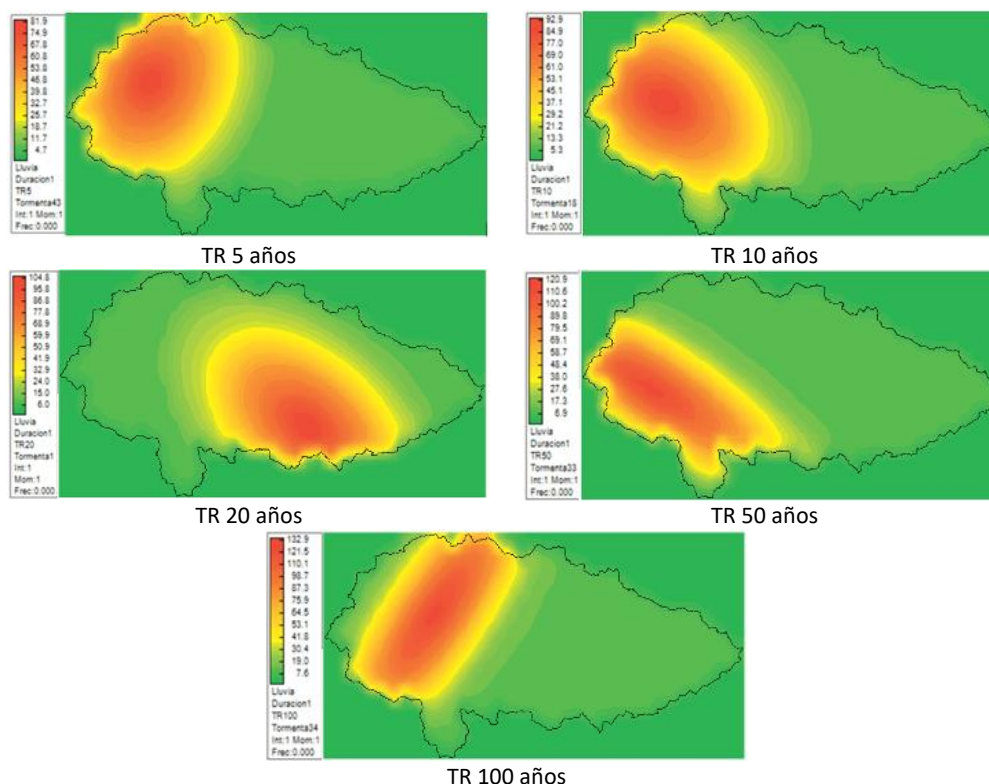
### 3. Resultados y discusión

#### Amenaza de lluvia y modelación hidrológica

Con las curvas PDAF determinadas para la cuenca del río Rocha a partir de precipitaciones diarias de 16 estaciones y la grilla de la cuenca se generó escenarios sintéticos de lluvia con patrones espaciales elípticos en IT-NHRain. Se generaron 50 escenarios por periodo de retorno (5, 10, 20, 50 y 100 años) dando como consecuencia un total de 250 escenarios, siendo cada uno resultado de 100 simulaciones para una resolución espacial de 2000 m. Los resultados generados por IT-NHRain fueron almacenados en un archivo con formato \*.AME. Para su visualización se utilizó el software CAPRA-GIS, en la Figura 10 se muestra los escenarios considerados críticos para cada periodo de retorno de análisis, cada uno con un centro de tormenta diferente.

**Figura 10**

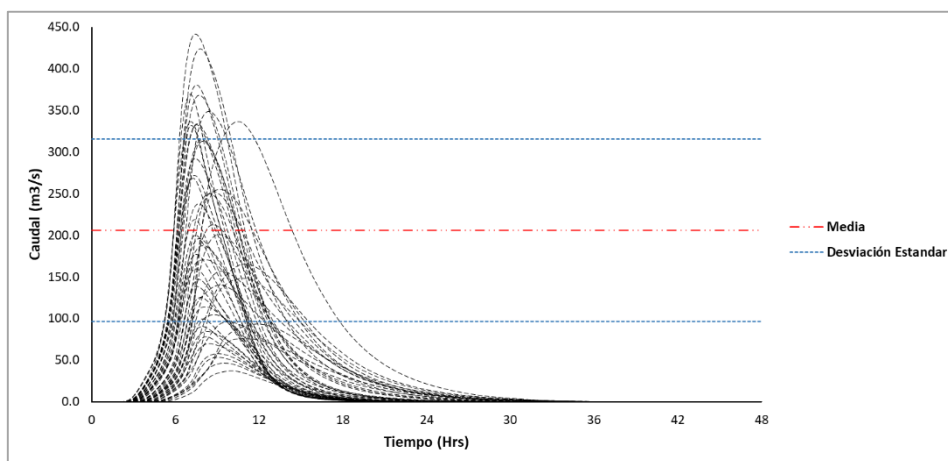
*Escenarios de precipitación estocástica*



Las tormentas estocásticas introducidas en el modelo hidrológico HEC-HMS generaron los hidrogramas de crecida en los puntos de interés de la cuenca para cada escenario y periodo de retorno. En la Figura 11 se muestra los hidrogramas obtenidos en la salida de la cuenca del río Rocha para los 50 escenarios estocásticos para un periodo de retorno de 5 años.

**Figura 11**

*Hidrogramas de salida del modelo hidrológico para los 50 escenarios estocásticos para un periodo de retorno de 5 años en la salida de la cuenca del río Rocha*



La verificación de los resultados se realizó mediante comparaciones con caudales de las estaciones hidrométricas del Puente El Abra, Puente Cajón (Aeropuerto) y Puente Pico de Loro ubicados en el río Rocha y los resultados del modelo hidrológico. Se tomaron caudales para un periodo de retorno de 5 años calculados con la metodología de análisis de extremos empíricos y el caudal medio de las 50 simulaciones realizadas. Dado que la comparación se realizó entre valores puntuales, se emplearon métricas de error simples en lugar de indicadores globales, como son el error absoluto (EA) (ecuación 7) y la diferencia porcentual simétrica (DP) (ecuación 8) para cuantificar la diferencia relativa. En la Tabla 6 se presenta los resultados de la comparación.

$$EA = |Q_{\text{Calculado}} - Q_{\text{Estación}}| [m^3/s] \quad (E7)$$

$$DP = \frac{|Q_{\text{Calculado}} - Q_{\text{Estación}}|}{(Q_{\text{Calculado}} + Q_{\text{Estación}})/2} * 100 [\%] \quad (E8)$$

**Tabla 6**

*Caudal medio de 50 simulaciones en HEC-HMS vs caudal extremo empírico calculado en estaciones hidrométricas del río Rocha para un periodo de retorno de 5 años*

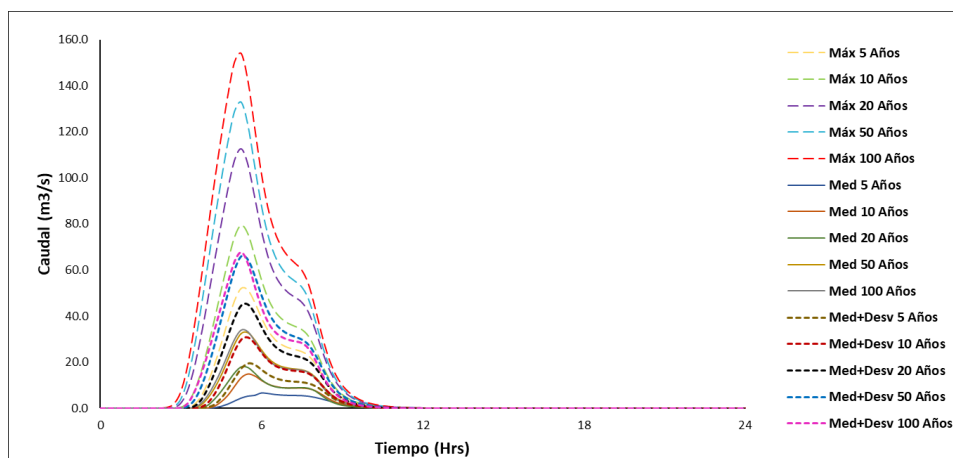
| Estación hidrométrica   | Caudal medio modelo HEC-HMS (m³/s) | Caudal extremo empírico (m³/s) | EA (m³/s) | DP (%) |
|-------------------------|------------------------------------|--------------------------------|-----------|--------|
| Puente Abra             | 31.55                              | 19.34                          | 12.21     | 47.98  |
| Puente Cajón Aeropuerto | 45.07                              | 52.97                          | 7.9       | 16.12  |
| Puente Pico de Loro     | 71.13                              | 64.35                          | 6.78      | 10.01  |

Se observa que la media de los hidrogramas calculados se encuentra próximo a los valores de extremos empíricos para un periodo de retorno de 5 años en base a la información hidrométrica de las estaciones automáticas con una diferencia porcentual del 10% en la estación Pico de Loro y 16% en Puente Cajón, indicando un buen desempeño de los resultados calculados en estas estaciones. En la salida de la cuenca del río Rocha no se cuenta con datos medidos.

En la Figura 12 se presentan los hidrogramas máximo, medio y medio más una desviación estándar para el río Chulla para los periodos de retorno de 5, 10, 20, 50 y 100 años.

**Figura 12**

*Hidrogramas de salida máximo, medio y medio más una desviación estándar en la cuenca del río Chulla para los diferentes periodos de retorno*



El desarrollo del análisis hidrológico para toda la cuenca del río Rocha y los diferentes periodos de retorno permitió tener una visión más amplia de los procesos hidrológicos, la variabilidad e influencia que tienen entre sí y para evaluar la consistencia de resultados obtenidos.

### Modelación hidráulica

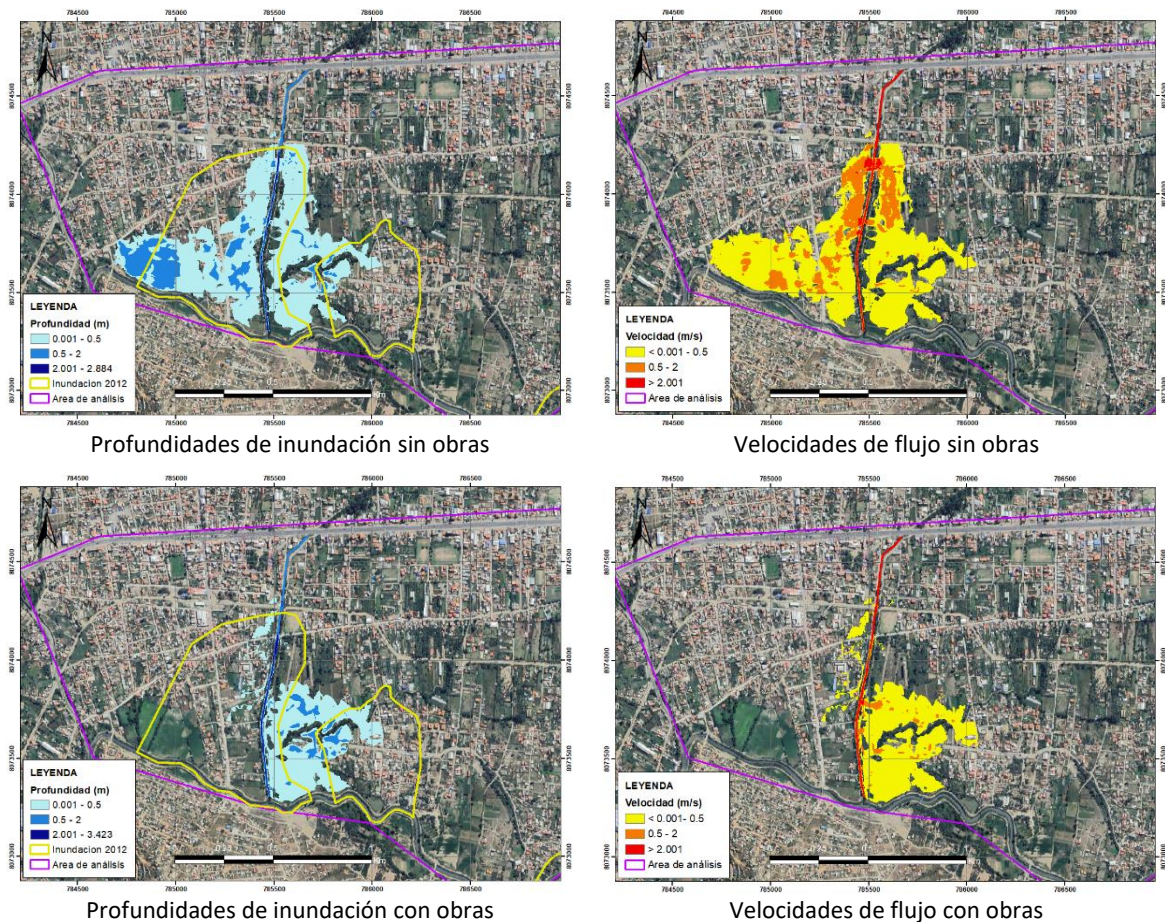
Las simulaciones en el modelo hidráulico HEC-RAS 2D se realizaron para la media de los 50 escenarios estocásticos más una desviación estándar de cada periodo de retorno, que como se indicó previamente captura el análisis estocástico y la probabilidad de ocurrencia.

El análisis contempló la situación sin obras y con obras (o medidas de mitigación), en la Figura 13 se muestran los resultados de las áreas de inundación generados para un periodo de retorno de 100 años. Los mapas son comparados con las áreas de inundación reportadas por el Gobierno Autónomo Departamental de Cochabamba del año 2012, en base a una evaluación visual se observa la existencia de un importante grado de correlación con los resultados para la situación sin obras.



**Figura 13**

*Área de inundación simulada para los escenarios de 100 años para situación sin obras y con obras*



El modelo 2D permitió tener una alta consistencia de los resultados para las inundaciones estimadas, sin embargo, aquello fue posible alcanzar debido al uso de topografía con resolución mucho mayor frente al de fuentes gratuitas (como ASTER), haciendo que la representación del río y las llanuras de inundación sea mucho más precisa considerando sus características físicas.

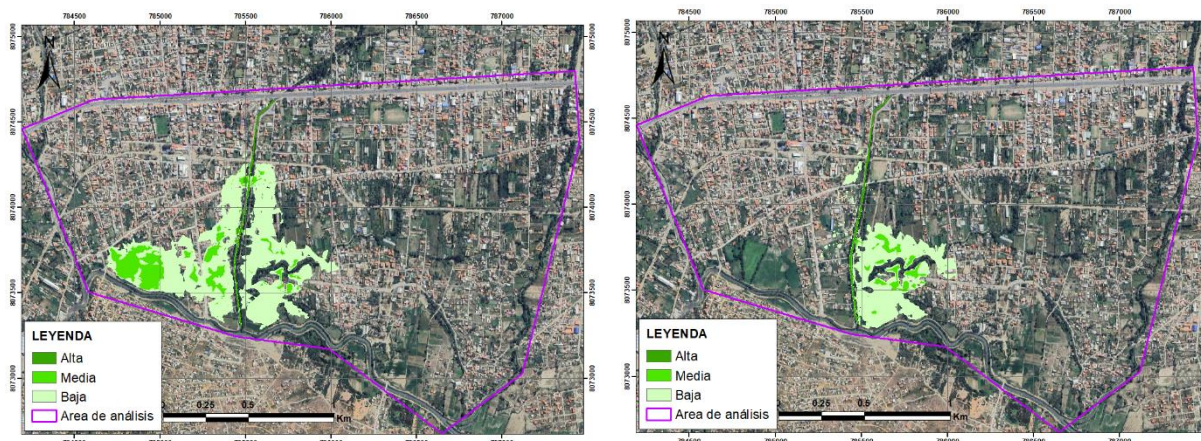
### Análisis de riesgo de inundación

En base a los umbrales de la Tabla 5 se generaron los mapas de intensidades de amenaza, los resultados se muestran en la Figura 14 para la situación sin medidas y con medidas.



**Figura 14**

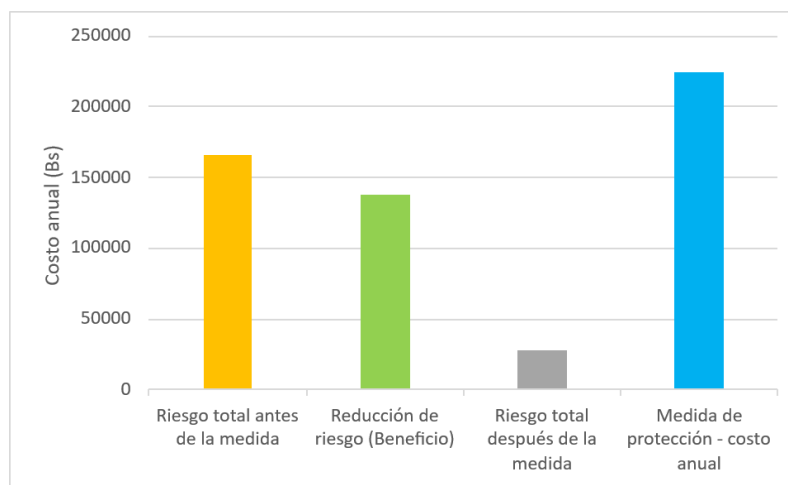
Mapa de intensidades histórico TR100 años media + desviación sin medidas de mitigación (izq.) y con medidas de mitigación (der.)



Posteriormente a la introducción de datos en Mi-Resiliencia, se ejecutó la corrida, dando como resultado la Figura 15 que resume el trabajo realizado para el escenario de la media más una desviación estándar y un periodo de retorno de 100 años.

**Figura 15**

Gráfico de resultados Beneficio/Costo de Mi-Resiliencia



La gráfica anterior contrasta el riesgo (Bs/año) que la zona de estudio tenía antes de implementar medidas de mitigación con respecto al riesgo (Bs/año) después de implementarlas, dando como resultado una reducción de los riesgos (Bs/año), que llega a ser el beneficio que tendrá el proyecto para la amenaza de inundación por desborde del río Chulla.

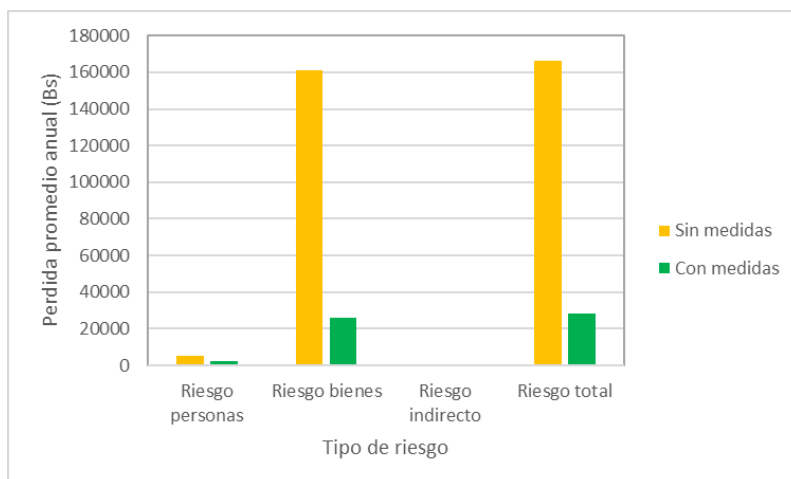
El beneficio generado por la implementación de las medidas de mitigación consideradas representa 83 % (138 mil Bs) del riesgo total sin las medidas (166 mil Bs) en promedio durante cada año. El costo anual de las obras es

calculado para el periodo de vida útil estimado de 50 años y una tasa de interés bancaria del 21.83%. La rentabilidad de las medidas contempladas para reducir y/o evitar el riesgo de inundación dio como resultado un valor de 0.6. Una medida rentable es aquella que refleja los beneficios de una inversión, como la capacidad de generar utilidades o ganancia. En el caso de estudio de Chulla, la rentabilidad obtenida no alcanza para clasificar las medidas como positivas o de ganancia actualmente, debido al uso agrícola de gran parte de las zonas inundables que representan un riesgo económico menor frente a zonas urbanas, sin embargo los beneficios son la protección y contención de vidas humanas, infraestructura pública y privada y área cultivada con un valor social asociado, además de asegurar un crecimiento urbano con mayor seguridad frente a inundaciones justifican las obras planteadas.

Adicionalmente, se presenta el cálculo del riesgo por personas, bienes, riesgo indirecto y riesgo total en la Figura 16. La reducción del riesgo como reducción anual de costos por pérdidas (beneficio) es determinado como la diferencia entre los riesgos totales para la situación actual y la situación esperada después de la implementación de las medidas.

**Figura 16**

*Resumen de los riesgos por personas, bienes, riesgo indirecto y riesgo total*

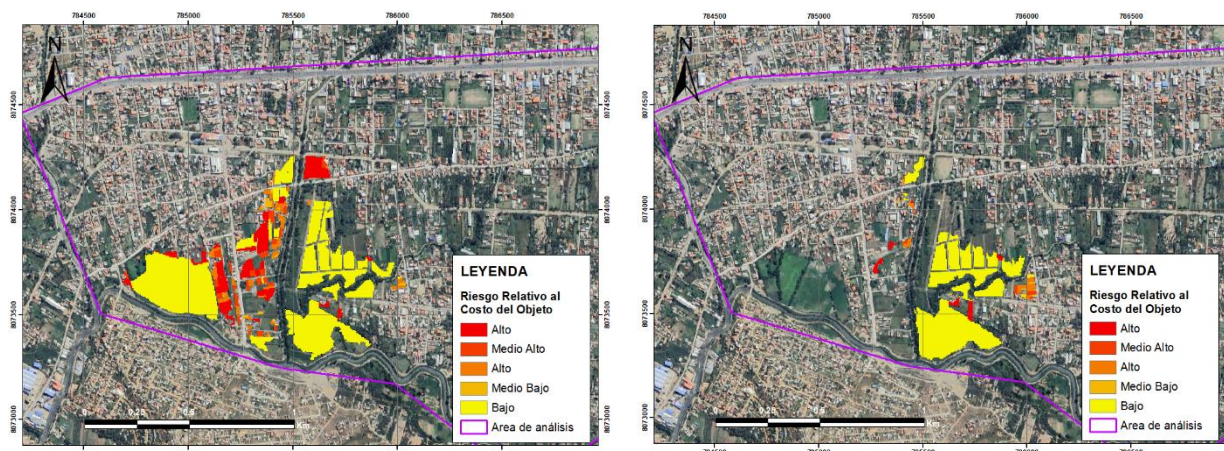


La distribución espacial de las pérdidas anuales calculadas no es posible visualizar en Mi-Resiliencia, para poder identificar las zonas con mayor riesgo de pérdidas se generó un mapa de riesgo relativo al costo del objeto en base al tipo de elemento u objeto expuesto y el mapa de amenaza de inundación, los resultados se muestran en la Figura 17. Las zonas con riesgo de pérdidas anual más alto para la situación sin obras está ubicado en la parte media del margen derecho del río Chulla y la zona próxima a la av. Blanco Galindo en el margen izquierdo, estas zonas corresponden a zonas urbanizadas con viviendas de más de 2 pisos y una elevada presencia de personas, además de algunas infraestructuras públicas. Las zonas de menor riesgo de pérdidas corresponden a zonas de cultivos en su mayoría donde la presencia de personas es mínima o nula.

A pesar de los resultados que el enfoque combinado dio, la metodología introduce incertidumbre debido a la reducción a uno solo el escenario de análisis, así como la información y métodos utilizados. Aunque en el proceso se realizaron evaluaciones específicas, la incertidumbre no se elimina completamente de las simplificaciones y lo que otros eventos podrían generar.

**Figura 17**

*Riesgo relativo al costo del objeto expuesto en la zona de estudio sin medidas de mitigación (izq.) y con medidas de mitigación (der.)*



En base a los resultados obtenidos, el análisis y cuantificación del riesgo es un proceso complejo que depende de varios factores, como social, económico, cultural y otros, pudiendo cualquier de ellos tener un valor más alto que el climático. El enfoque del análisis estocástico de las precipitaciones, a diferencia de uno determinístico, permitió obtener un amplio rango de posibles escenarios de tormentas considerando variabilidad espacial, la posibilidad de analizar la probabilidad de ocurrencia y los impactos que puedan tener. Esto da un mejor entendimiento del impacto de clima en la amenaza de inundación y las consecuencias sociales y económicas. La asunción del escenario de la media más una desviación estándar como el escenario más desfavorable y representativo, permitió el planteamiento de las obras y la cuantificación del riesgo. La adaptación y reducción del riesgo es más efectiva cuando se tiene conocimiento de la magnitud de la amenaza existente y la vulnerabilidad de los objetos expuestos.

#### 4. Conclusiones

La estimación de las crecidas para la evaluación de puntos críticos y diseño de obras hidráulicas en los afluentes del río Rocha se ha realizado utilizando diferentes metodologías y enfoques en estudios previos. La presente investigación contempla una metodología combinada entre un análisis estocástico y determinístico. La combinación de ambas metodologías fue satisfactoria obteniéndose resultados que permiten un análisis más amplio en el diseño de obras hidráulicas.

El análisis del riesgo de inundación en el río Chulla comprendió el tramo entre la av. Blanco Galindo y la confluencia con el río Rocha. Con la metodología estocástica de IT-NHRain se generó 50 escenarios estocásticos de lluvia con patrones de forma elíptica con ubicaciones e intensidades aleatorias en base a datos de precipitación de 16 estaciones meteorológicas para cinco periodos de retorno para la cuenca del río Rocha. Mediante modelación hidrológica se generó hidrogramas de salida en diferentes puntos. Los caudales calculados se verificaron con registros hidrométricos de 3 puntos monitoreados en el Río Rocha: Puente del Abra, Puente Cajón Aeropuerto y Puente Pico de Loro, donde las diferencias porcentuales alcanzan 48%, 16% y 10% respectivamente.

La modelación hidráulica en HEC-RAS 2D se ejecutó para la media de 50 escenarios estocásticos más una desviación estándar, considerado el escenario más desfavorable con mayor probabilidad de ocurrencia y con el cual

se pretende capturar la esencia estocástica de la hidrología. Los resultados permitieron determinar las magnitudes de la amenaza y generar mapas de inundación. El modelo, combinado con topografía de alta resolución fue clave para superar las características físicas del río Chulla que tiene el lecho al mismo nivel o por encima de las llanuras de inundación. Las manchas de inundación obtenidas presentaron buena correlación con datos reportados por el GAD Cochabamba del año 2012.

El análisis determinístico de Mi-Resiliencia permitió calcular el riesgo económico de pérdidas anuales y el impacto de las medidas de mitigación en términos económicos (reducción de riesgo), reflejando la relación de los beneficios que generan las obras planteadas, incluyendo beneficios de reducción de riesgos a infraestructuras, viviendas, áreas cultivables, y riesgo de vida humana con respecto al costo total que tendrían las medidas de mitigación. Las obras hidráulicas consideradas generan una importante reducción en el riesgo anual que alcanza el 87% del riesgo total, con una rentabilidad económica de 0.6, el cual desde el punto de vista financiero no es positivo, pero el valor agregado de evitar inundaciones en una zona de crecimiento urbano acelerado tiene valor adicional para la implementación de las obras.

Los resultados demuestran que en la evaluación de riesgo de inundación y la rentabilidad de cualquier obra hidráulica se debe considerar, además de la reducción de la mancha de inundación, otros factores importantes como la exposición social y económica con una valoración a futuro.

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

**Uso de inteligencia artificial:** El presente trabajo ha sido elaborado sin el uso de inteligencia artificial en ninguna de sus etapas.

### Agradecimientos

Los autores agradecen a la Empresa CIVILIDEA por la información topográfica y el inventario de elementos expuestos provistos, que fueron la base para el desarrollo del modelo hidráulico y análisis de riesgo de inundación, además de otra información adicional, y a Vanesa Ponce por la colaboración en la modelación hidrológica.

## 5. Referencias bibliográficas

- BID & ITEC. (2014). Perfil de riesgo de desastres por inundaciones en Venezuela mediante la plataforma CAPRA.
- BID & MARN. (2013). Perfil de riesgo de desastres por inundaciones en el Salvador utilizando la metodología CAPRA.
- BID, B. I. (2016). *Perfil de Riesgo de Desastres para Bolivia*.
- BOENCO. (2021). *Estudio de Riesgos de Inundaciones y Deslizamientos Bajo Escenarios de Vulnerabilidad y Cambio Climático en la Subcuenca Maylanco*. Cochabamba.
- Brunner, G. W. (2023). *HEC-RAS, River Analysis System - Hydraulic Reference Manual*. Davis, CA, USA: U.S. Army Corps of Engineers'.
- Brunner, G. W. (2024). *HEC-RAS: River Analysis System - HEC-RAS 2D User's Manual*. Davis, CA, USA: U.S. Army Corps of Engineers'.
- Bruno, L. S., Mattos, T. S., Oliveira, P. T., Almagro, A., & Rodriguez, D. B. (2022). Hydrological and Hydraulic Modeling Applied to Flash Flood Events in a Small Urban Stream. *Hydrology*, 9, 223. <https://doi.org/10.3390/hydrology9120223>
- Cardozo, A., & Le Noir, C. (2024). Determinación y Análisis de los Caudales de Evento Extremo Mediante Tormentas Estocásticas en la Cuenca del Río Misicuni. *Investigación & Desarrollo*, 24(2), 29-41.



- Ccopi-Trucios, J. (2023). Evaluación del riesgo de desastres por inundaciones en comunidades andinas del Perú bajo enfoques probabilísticos. *Sustainability*, 15(18), 13768.
- Chow, V. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. Nueva York: McGraw-Hill.
- ERN-AL. (2011). *Consorcio Evaluación de Riesgos Naturales - América Latina. Tomo 1: Metodología de Modelación Probabilista de Riesgos Naturales. Informe Técnico ERN-CAPRA-T1-3: Modelos de Evaluación de Amenazas Naturales y Selección*.
- GEOTEST AG. (2018). *MiResiliencia Bolivia - Herramienta para el Análisis del Riesgo de Desastres y Costo Beneficio de Medidas de Mitigación*. Zollikofen, Suiza.
- León, N., López, L., & Velandia, J. (2018). *User Manual Software IT-NHRain V.3.0*. Bogotá: ITEC - Ingeniería Técnica y Científica S.A.S.
- León, N., Velandia, J., López, L., & Yamin, L. (2018). *User Manual Software IT-Flood V.2.2*. Bogotá: ITEC - Ingeniería Técnica y Científica S.A.S.
- Lourenço, M. T., Villazón, M. F., Montenegro, L. E., & Heredia, M. W. (2019). Comparison of 1d and 2d hydrodynamic models for the assessment of dredging in the studies of alternatives for the implementation of the of the. *XVII Congreso Boliviano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*.
- NASA/METI/AIST. (2019). *Modelo Digital de Elevación ASTER V003*. Sioux Falls, Dakota del Sur, USA: Centro de Archivo Activo Distribuido de Procesos Terrestres de la NASA.
- OPINIÓN. (4 de Febrero de 2018). *OPINIÓN, Diario de Circulación Nacional*. Recuperado el 20 de Septiembre de 2025, de Tres ríos amenazan Vinto y cifra de familias afectadas en el país sube a 6.322. <http://www.opinion.com.bo/opinion/articulos/noticias.php?a=2018&md=0214&id=245137>
- Palagi, S., Patzlaff, J., Sutumpf, M., & Kern, A. (2014). Análisis del Impacto de las Inundaciones en el Valor de las Propiedades Inmobiliarias en la Ciudad de Lajeado, Brasil - Estudio de caso de Viviendas Unifamiliares. *Revista Ingeniería de Construcción*, 29(1).
- Peduzzi, P., Dao, H., Herold, C., & Mouton, F. (2009). Assessing global exposure and vulnerability towards natural hazards: The Disaster Risk Index. *Nat. Hazards Earth Syst.*, 9, 1149-1159.
- Pellicani, R., Parisi, A., Lemmolo, G., & Apollonio, C. (2018). Economic Risk Evaluation in Urban Flooding and Instability-Prone Areas: The Case Study of San Giovanni Rotondo (Southern Italy). *Geosciences*, 8, 112.
- PROMIC. (2011). *Manejo Integral de la Cuenca del Río Rocha*. Cochabamba.
- Rincón, D., Velandia, J. F., Tsanis, I., & Khan, U. (2022). Stochastic Flood Risk Assessment under Climate Change Scenarios for Toronto, Canada Using CAPRA. *Water*, 14(2), 227. <https://doi.org/10.3390/w14020227>
- SEI. (2019). *Formulación y Actualización del Plan Director de la Cuenca del Río Rocha, Bajo un Enfoque de Adaptación al Cambio Climático – Entregable C*. Cochabamba.
- TYPSA. (2013). *Plan Maestro Metropolitano de Agua Potable y Saneamiento de Cochabamba - Resumen ejecutivo*. Cochabamba.
- Zapata, R., Hernández, C., Fernández, S., Flores, M., López, S., & Choque, D. (2024). Evaluación probabilística de riesgo de inundaciones bajo escenarios de cambio climático en una cuenca de los Cintis (Chuquisaca, Bolivia). *Revista Técnica Ingenium*, 1(5), 81-94.

# Predicción del bajo rendimiento académico en ámbitos rurales de Bolivia mediante modelos de aprendizaje automático

## Prediction of poor academic performance in rural areas of Bolivia using machine learning models

Limberg Villca Coraite<sup>1</sup>

Correo de correspondencia: [limbervillcacoraite@gmail.com](mailto:limbervillcacoraite@gmail.com)

### Resumen

En Bolivia, la desigualdad educativa entre zonas urbanas y rurales continúa siendo un desafío estructural. Este estudio analiza el rendimiento académico en una unidad educativa rural del departamento de Santa Cruz, utilizando registros de calificaciones entre los años 2015 y 2024. El análisis evidenció una concentración significativa de reprobaciones en tres materias clave: Biogeografía/Ciencias Naturales (17.24%), Matemáticas (16.55%) y Comunicación y Lenguajes (13.79%), que en conjunto agrupan el 47.58% de los casos. Estos resultados reflejan debilidades persistentes en competencias científicas y comunicativas.

Con el objetivo de anticipar casos de reprobación, se entrenaron distintos modelos de aprendizaje automático supervisado. Entre ellos, el algoritmo CatBoost alcanzó el mejor desempeño, con un F1-score ponderado de 0.84 y una precisión del 91%, superando a modelos como XGBoost, Random Forest, SVM y redes neuronales. La implementación del modelo permitió generar listas predictivas de estudiantes en riesgo para los siguientes cinco años, lo cual brinda al equipo docente una herramienta operativa para diseñar intervenciones pedagógicas tempranas y focalizadas. Los resultados muestran el potencial del uso de inteligencia artificial en contextos educativos rurales, aportando soluciones basadas en datos para mejorar la equidad y la calidad del aprendizaje.

**Palabras clave:** analítica de datos, educación rural, F1-score ponderado, modelos predictivos, generación de predicción.

### Abstract

In Bolivia, educational inequality between urban and rural areas continues to be a structural challenge. This study analyzes academic performance in a rural educational unit in Sant Cruz city, using grade records between 2015 and 2024. The analysis showed a significant concentration of failures in three key subjects: Biogeography/Natural Sciences (17.24%), Mathematics (16.55%) and Communication and Languages (13.79%), which together account for 47.58% of the cases. These results reflect persistent weaknesses in scientific and communicative competencies.

In order to anticipate failure cases, different supervised machine learning models were trained. Among them, the CatBoost algorithm achieved the best performance, with a weighted F1-score of 0.84 and an accuracy of 91%, surpassing models such as XGBoost, Random Forest, SVM and neural networks. The implementation of the model allowed generating predictive lists of at-risk students for the next five years, providing teachers with an operational tool for designing early and targeted educational interventions. The results demonstrate the potential of using artificial intelligence in rural educational contexts, contributing data-driven solutions to improve equity and the quality of learning.

**Keywords:** data analytics, rural education, F1-score weighted, predictive models, prediction generation.

## 1. Introducción

Bolivia enfrenta desafíos estructurales en el ámbito educativo, siendo uno de los más persistentes la marcada disparidad entre la calidad de la educación en zonas urbanas y rurales (Fernandez, 2024). Esta brecha no solo limita

<sup>1</sup> Carrera de Ingeniería de Sistemas, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.  
<https://orcid.org/0009-0006-1428-8828>



las oportunidades de aprendizaje, sino que profundiza desigualdades sociales y económicas en el largo plazo. La UNESCO ha señalado que las áreas rurales de América Latina enfrentan condiciones más adversas en términos de acceso, permanencia y calidad educativa, por lo que destaca la necesidad de incorporar herramientas tecnológicas que contribuyan a reducir la brecha de aprendizaje (UNESCO, 2023).

En los últimos años, múltiples diagnósticos advierten sobre el deterioro de la calidad educativa en Bolivia (Amonzabel, 2025). Esto se refleja en los bajos niveles de preparación con los que muchos estudiantes ingresan al nivel universitario, especialmente en las áreas científicas y lógico-matemáticas (Roca, 2025).

A nivel nacional, estudios recientes han revelado que solo 2 de cada 100 estudiantes lograron aprobar pruebas diagnósticas estandarizadas en 2023 (Trigo, 2025), y que más del 79% de los bachilleres presenta un dominio insuficiente del lenguaje escrito (Santo Bacallao, 2020).

Pese a la existencia de estudios que abordan el bajo rendimiento académico, la mayoría se concentran en contextos urbanos y analizan el fenómeno desde una perspectiva agregada. Predominan los enfoques que utilizan datos estadísticos oficiales para estimar tasas generales de abandono o reprobación, sin llegar a identificar a los estudiantes individuales que presentan mayor riesgo de repetir curso (Laime, 2024).

Existen diversos estudios que han aplicado técnicas de minería de datos para predecir el fracaso escolar en contextos urbanos, destacándose el trabajo doctoral de Márquez Vera (Marquez Vera, Predicción del fracaso y abandono escolar mediante técnica de minería de datos, 2015) y sus contribuciones publicadas en revistas especializadas como IEEE (Marquez Vera, Romero Morales, & Ventura Soto, Predicción del Fracaso Escolar mediante, 2012), centrando su estudio en modelos de clasificación con fines de alerta temprana.

A diferencia de estos enfoques, el presente estudio adopta una perspectiva personalizada. Se propone no solo estimar la proporción de estudiantes en riesgo, sino también identificar específicamente quiénes son esos estudiantes y en qué materias ya han presentado antecedentes de reprobación. Esta aproximación permite anticipar casos críticos y tomar decisiones pedagógicas tempranas y focalizadas, con el fin de prevenir la repetición del año escolar y mitigar los efectos acumulativos del bajo rendimiento académico.

Por motivos de privacidad y viabilidad operativa, el análisis se enfocó en una sola unidad educativa: la Unidad Educativa San José Obrero, ubicada en una zona rural del departamento de Santa Cruz, Bolivia. La base de datos utilizada incluye registros académicos anonimizados de estudiantes de nivel primario y secundario, correspondientes al periodo comprendido entre 2015 y 2024, incluyendo información personal de los estudiantes, así como también datos sobre sus calificaciones por materia, historial de permanencia y evolución del desempeño académico.

## Objetivo

Analizar el rendimiento académico de los estudiantes de las zonas rurales de Bolivia, identificando materias que tienen mayor cantidad de reprobados y desarrollando un modelo de predicción basado en técnicas de aprendizaje supervisado para anticipar casos de estudiantes con riesgos de reprobación.

## 2. Material y métodos

Este estudio adopta un enfoque cuantitativo, de tipo descriptivo y predictivo, cuyo propósito es analizar el rendimiento académico de estudiantes en un contexto rural de Bolivia y construir un modelo que permita anticipar posibles casos de reprobación. Esta investigación se desarrolló utilizando datos provenientes de la Unidad Educativa San José Obrero. Esta unidad fue seleccionada por tratarse de un establecimiento educativo rural con registros completos y continuos de varias gestiones.

## Conjunto de datos

Se trabajó con datos académicos correspondientes a estudiantes de los niveles primario y secundario de educación regular, comprendidos entre las gestiones 2015 y 2024. La base de datos inicial estaba compuesta por veinte archivos independientes (10 del nivel primario y 10 del nivel secundario), los cuales fueron consolidados en un único conjunto estructurado en formato Excel. Este conjunto de datos incluyó variables personales y calificaciones por gestión y materia, promedio anual general y datos de permanencia institucional del/la estudiante. La información recopilada permitió construir una matriz de datos apta para su posterior análisis exploratorio y modelado predictivo.

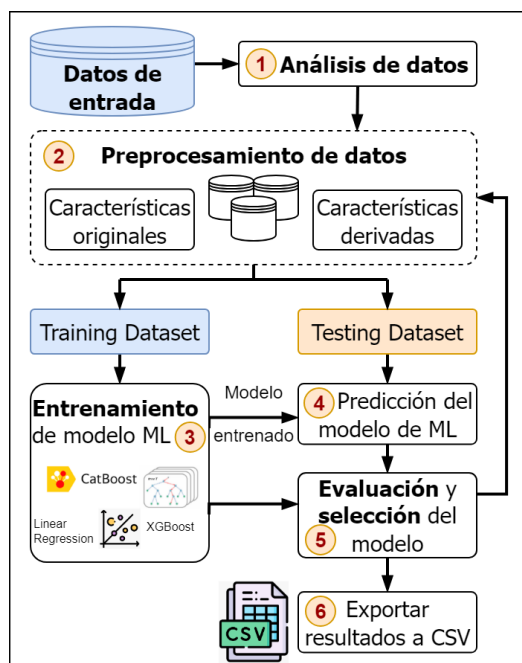
## 3. Metodología

Este estudio sigue la metodología CRISP-DM (Cross Industry Standard Process for Data Mining), ampliamente reconocida por ofrecer una estructura clara para el desarrollo de proyectos analíticos basados en datos. Sin embargo, considerando las particularidades de este proyecto, se optó por desarrollar un flujograma metodológico adaptado a las necesidades específicas del presente estudio a partir de la metodología ya mencionada.

El diagrama de la Figura 1 resume el flujo lógico de trabajo seguido, facilitando su comprensión tanto para especialistas en el área como para responsables de la toma de decisiones en el ámbito educativo.

**Figura 1**

*Flujograma metodológico propuesto, inspirado en la metodología CRISP-DM*



Fuente: Elaboración propia (2025)

## Análisis de datos

Una vez consolidado el conjunto de datos, se realizó un análisis exploratorio con el propósito de identificar patrones relevantes en el rendimiento académico de los estudiantes. Este análisis permitió observar tendencias generales y específicas que orientaron el posterior diseño del modelo predictivo.

Entre los principales hallazgos se destacan los siguientes:

**Tendencia descendente en el promedio general:** Se evidenció una disminución sostenida del promedio anual en la unidad educativa analizada, pasando de 74.24 puntos de promedio general en el año 2015 a 69.91 puntos en 2024 como unidad educativa. Este descenso sugiere un deterioro progresivo del rendimiento académico a lo largo del tiempo (ver Figura 2)

**Figura 2**

*Evolución del promedio por año*



Fuente: Elaboración propia (2025)

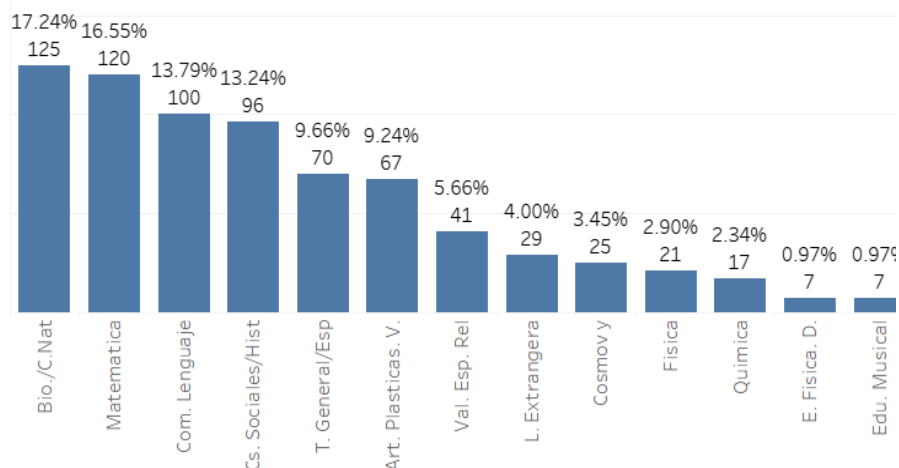
**Desempeño por género:** Al comparar los promedios por género, se observó que las estudiantes mujeres presentan, en promedio, mejores calificaciones que sus pares varones. El promedio general femenino fue de 73.73 puntos, superando al promedio masculino, lo que refleja una diferencia consistente en el rendimiento académico por género.

**Materias con mayor índice de reprobación:** El análisis identificó tres áreas con mayor concentración de estudiantes reprobados: Biogeografía/Ciencias Naturales (17.24%), Matemáticas (16.55%) y Comunicación y Lenguajes (13.79%). En conjunto, estas materias agrupan el 47.58% del total de reprobaciones, evidenciando debilidades marcadas tanto en competencias científicas como comunicativas. (ver Figura 3).

**Aumento de la reprobación anual:** Se constató un incremento sostenido en el número de estudiantes reprobados por gestión. Mientras que en 2015 solo se registraron 6 casos, para el año 2024 la cifra ascendió a 31. Cabe destacar que el año 2020 no presenta registros de reprobación debido a las disposiciones excepcionales del Ministerio de Educación durante la pandemia de COVID-19 (ver Figura 4)

**Figura 3**

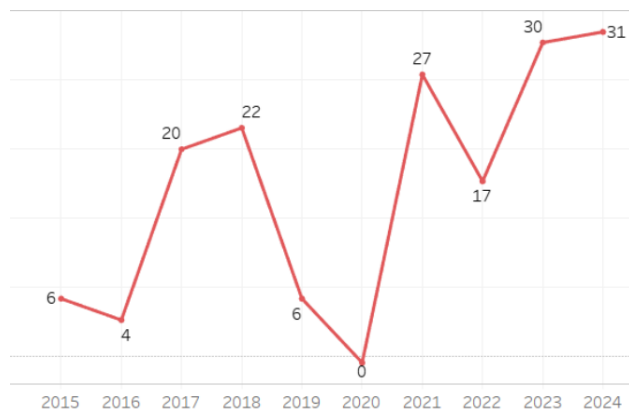
*Materias con mayor índice de reprobación*



Fuente: Elaboración propia (2025)

**Figura 4**

*Cantidad de reprobados por año*



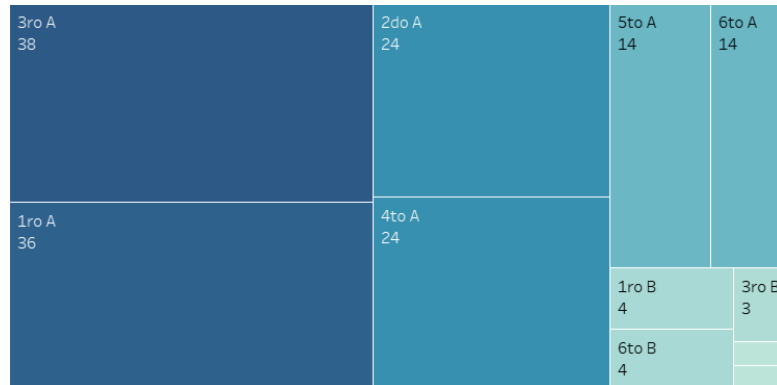
Fuente: Elaboración propia (2025)

**Distribución por curso:** El curso con mayor número acumulado de reprobaciones fue Tercero de Secundaria “A” (3ro A), con un total de 38 estudiantes reprobados entre 2015 y 2024. Este dato sugiere que existen desafíos estructurales específicos en ese nivel o grupo (ver Figura 5).

**Comparación con el promedio nacional:** La unidad educativa seleccionada presenta una tasa de reprobación global del 5.51%, superando la media nacional reportada para el año 2023, que fue de 3.61% (Ministerio de educación Bolivia, 2023). Esta diferencia refuerza la necesidad de intervenciones focalizadas en el ámbito rural.

**Figura 5**

*Cantidad de reprobados por curso*

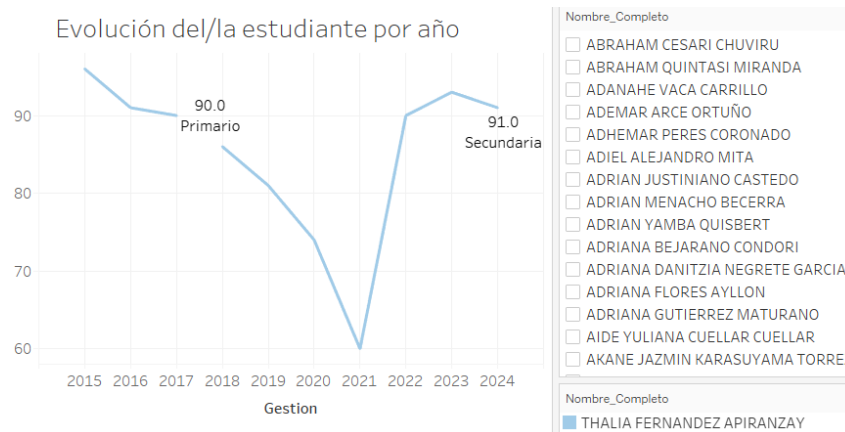


Fuente: Elaboración propia (2025)

**Evolución individual del rendimiento estudiantil:** Además del análisis agregado, se evaluó la evolución del promedio académico de cada estudiante a lo largo de su trayectoria en la unidad educativa. Este enfoque permitió identificar casos de mejoría, estancamiento o deterioro en el rendimiento, información que luego fue traducida en variables como la tendencia del promedio, el delta de variación interanual y la variabilidad histórica. La Figura 6 muestra algunos ejemplos de estas trayectorias individuales.

**Figura 6**

*Evolución de estudiantes por gestión educativa*



Fuente: Elaboración propia (2025)

Estos hallazgos permitieron delimitar con claridad las áreas críticas del rendimiento académico y sentaron las bases para el diseño de un modelo de predicción que no solo cuantifique el riesgo de reprobación, sino que también identifique a los estudiantes más vulnerables con suficiente anticipación para prevenir esta situación con acción temprana.

## Preprocesamiento de datos

El preprocesamiento representa una de las fases más críticas en el desarrollo de modelos predictivos, ya que sienta las bases sobre las cuales se construyen las predicciones. En este estudio, se prestó especial atención a la limpieza, transformación y estructuración temporal de los datos, asegurando su calidad y adecuación al objetivo planteado.

**Limpieza y estructuración inicial:** Con el conjunto de datos consolidado, se procedió a un riguroso proceso de depuración y transformación para garantizar su calidad analítica. La limpieza incluyó la eliminación de valores nulos y registros duplicados, así como la conversión y normalización de tipos de datos, asegurando la coherencia entre columnas numéricas, categóricas y temporales. Se realizó también una segmentación estructurada entre variables de carácter personal y académico, lo que facilitó su posterior manejo.

**Evaluación de la calidad del dato:** Una vez depurada la información, se evaluaron aspectos clave como la completitud, consistencia interna y validez semántica de las variables. Esta revisión permitió identificar y excluir columnas con baja densidad informativa o inconsistencias evidentes. Como resultado, el conjunto de datos final del trabajo quedó conformado por 2.958 registros útiles y 31 variables relevantes que se usaron para la parte analítica y predictiva.

**División temporal para validación:** Para asegurar una validación sólida del modelo predictivo, se aplicó una estrategia de división temporal. Todas las gestiones anteriores a 2024 fueron utilizadas para entrenamiento, mientras que los datos correspondientes a la gestión 2024 se reservaron exclusivamente para validación. Este enfoque simula de forma más realista la aplicación del modelo sobre cohortes futuras, sin riesgo de fuga de información, se contempló también el caso de estudiantes nuevos en la unidad educativa (o con permanencia de una gestión), para este tipo de casos se tomó una característica en donde 1 identifica a estudiante nuevo y 0 en otro caso.

**Preparación de variables de entrada:** A partir del historial académico de cada estudiante, se construyeron variables derivadas que capturan dimensiones relevantes del desempeño individual. Entre estas se encuentran el promedio global, el promedio de los últimos tres años, la tendencia del rendimiento, la variabilidad interanual, la cantidad acumulada de reprobaciones, los años de permanencia institucional, la condición de ingreso, el delta intergestión del promedio y la ratio personal de reprobación.

**Transformaciones para el modelado:** Con el fin de adaptar los datos a los algoritmos de clasificación, las variables categóricas fueron transformadas mediante codificación One Hot Encoding. Posteriormente, se aplicaron técnicas de escalado y estandarización a todas las variables numéricas, asegurando la uniformidad de sus rangos. Finalmente, se definió la variable objetivo como binaria, donde el valor 1 indica que el estudiante reprobó en la gestión 2024, y 0 en caso contrario.

Este proceso de preparación no solo permitió estructurar un conjunto de datos consistente y libre de errores, sino que habilitó el desarrollo de modelos de clasificación sobre una base sólida y de calidad. A partir de esta matriz, fue posible avanzar hacia el entrenamiento de distintos algoritmos supervisados, buscando identificar aquellos con mejor capacidad de predicción y generalización para obtener resultados con buena precisión.

## Entrenamiento del modelo predictivo

El objetivo central de esta fase fue desarrollar una herramienta capaz de anticipar la probabilidad de que un estudiante repruebe en los siguientes 5 años (configurable a más años), a partir de su historial académico. Para lograrlo, se entrenaron modelos de clasificación binaria, una técnica de aprendizaje automático supervisado.



## ¿Qué es un modelo supervisado?

Los modelos supervisados aprenden a predecir un resultado específico (llamado variable objetivo) a partir de datos de entrada (variables predictoras), utilizando ejemplos previamente conocidos (IBM, 2024). En este caso, el modelo aprende a clasificar si un estudiante reprobará (1) o no (0), basándose en sus registros históricos a lo largo de 10 gestiones académicas. Esta técnica es ampliamente usada en contextos educativos, médicos y financieros, donde es crucial anticipar eventos adversos para actuar de forma temprana (Marquez Vera, Romero Morales, & Ventura Soto, Predicción del Fracaso Escolar mediante, 2012).

## Modelos evaluados

Para asegurar la robustez del análisis, se compararon distintos algoritmos que representan enfoques diversos del aprendizaje automático. A continuación, se describen brevemente los modelos utilizados:

**Regresión logística:** modelo lineal simple que estima la probabilidad de un evento utilizando una función sigmoide. Es útil como línea base por su interpretabilidad, aunque limitado frente a relaciones complejas (Hosmer, Lemeshow, & Sturdivant, 2013).

**Random Forest:** conjunto de árboles de decisión entrenados sobre subconjuntos aleatorios del dato. Tiende a ser robusto y menos propenso al sobreajuste que un árbol individual (Breiman, 2001).

**Gradient Boosting y sus variantes (XGBoost, LightGBM y CatBoost):** algoritmos que construyen secuencialmente árboles, corrigiendo los errores del modelo anterior. XGBoost incluye regularización para evitar sobreajuste (Chen & Guestrin, 2016), LightGBM se enfoca en eficiencia computacional (Ke, y otros, 2017), y CatBoost es especialmente eficaz con variables categóricas (Prokhorenkova, Vorobev, Dorogush, Gulin, & Gusev, 2018).

**SVM (Support Vector Machine):** modelo que encuentra un límite (hiperplano) óptimo para separar clases, maximizando la distancia entre los grupos. Es efectivo para espacios de alta dimensión, pero sensible al escalado y menos eficiente con grandes volúmenes de datos (Cortes & Vapnik, 1995).

**MLP (Perceptrón Multicapa):** tipo de red neuronal con capas intermedias que permiten aprender relaciones no lineales. Es flexible, pero puede requerir mucho ajuste de parámetros y más datos (Friedman, 2001).

Estas alternativas permitieron evaluar modelos tanto simples como complejos, lineales y no lineales, deterministas y estocásticos, brindando una visión integral del problema.

## Validación y métrica de evaluación

El conjunto de datos se dividió de forma temporal: las gestiones académicas hasta 2023 se utilizaron para entrenamiento, mientras que 2024 se reservó para validación. Esta estrategia simula el uso real del modelo, evitando que aprenda sobre casos que debería predecir.

Además, se aplicó validación cruzada, una técnica que consiste en entrenar y probar el modelo múltiples veces sobre diferentes particiones del mismo conjunto de datos. Esto permite obtener un estimado más confiable de su rendimiento (Kohavi, 1995).

Para comparar los modelos, se utilizó el F1-score ponderado como métrica principal. A diferencia del accuracy (que solo mide cuántas veces acierta), el F1-score equilibra precisión y exhaustividad, lo que lo hace más adecuado

cuando las clases están desbalanceadas (Chicco & Giuseppe, 2020). En este caso, había menos casos de reprobación que de aprobación, lo cual hacía necesario un criterio más riguroso.

### **Contenido generado por IA**

Herramienta: ChatGpt: Generó el contenido del Abstract y keywords a partir de original en español (en inglés). Se usó también Claude para la revisión y mejora de la redacción de todo el documento en conjunto con Chatgpt a partir de la redacción original y gráficos de la investigación.

## **4. Resultados y Discusión**

El análisis del rendimiento académico permitió identificar patrones persistentes de reprobación en la unidad educativa estudiada, así como también validar la utilidad del modelo predictivo desarrollado para anticipar estos casos. Además, los resultados obtenidos fueron contrastados con estudios previos, lo que permitió dimensionar el aporte del presente trabajo frente a enfoques existentes. Los resultados se presentan a continuación:

### **Identificación de áreas críticas de reprobación**

Los datos mostraron una disminución sostenida en el promedio general de la unidad educativa entre los años 2015 y 2024, pasando de 74.24 a 69.91 puntos. Esta tendencia descendente se observó tanto a nivel institucional como individual, donde se evidenció que un número significativo de estudiantes presentaba una caída progresiva en su desempeño a lo largo del tiempo. Este patrón fue especialmente visible en cursos intermedios del nivel secundario, como 3ro de secundaria "A", que concentró la mayor cantidad de estudiantes reprobados en la unidad educativa. En términos de asignaturas, el análisis permitió identificar tres materias con tasas particularmente altas de reprobación: Biogeografía/Ciencias Naturales (17.24%), Matemáticas (16.55%) y Comunicación y Lenguajes (13.79%). En conjunto, estas tres áreas agruparon el 47.58% del total de reprobaciones, lo cual sugiere la existencia de brechas estructurales tanto en competencias científicas como en habilidades comunicativas.

La concentración de reprobaciones en asignaturas como Matemáticas y Ciencias Naturales adquiere especial relevancia si se considera su relación directa con la continuidad de estudios superiores en áreas científicas y tecnológicas. En muchos casos, las bases que los estudiantes desarrollan durante la educación secundaria en estas materias influyen significativamente en su capacidad para acceder y adaptarse a carreras universitarias vinculadas a las áreas STEM (Science, Technology, Engineering and Mathematics). En contextos rurales, donde las oportunidades educativas suelen ser más limitadas, las debilidades acumuladas en estas áreas pueden reducir las posibilidades de que los estudiantes opten por trayectorias académicas en campos científicos o tecnológicos. En este sentido, la identificación temprana de dificultades en asignaturas clave podría permitir implementar estrategias de apoyo académico antes de que los estudiantes concluyan la educación secundaria, contribuyendo a fortalecer sus competencias y ampliar sus oportunidades de acceso a la educación superior. Estos hallazgos coinciden con estudios previos sobre el bajo dominio del lenguaje y razonamiento lógico en estudiantes egresados de secundaria en Bolivia (Santo Bacallao, 2020).

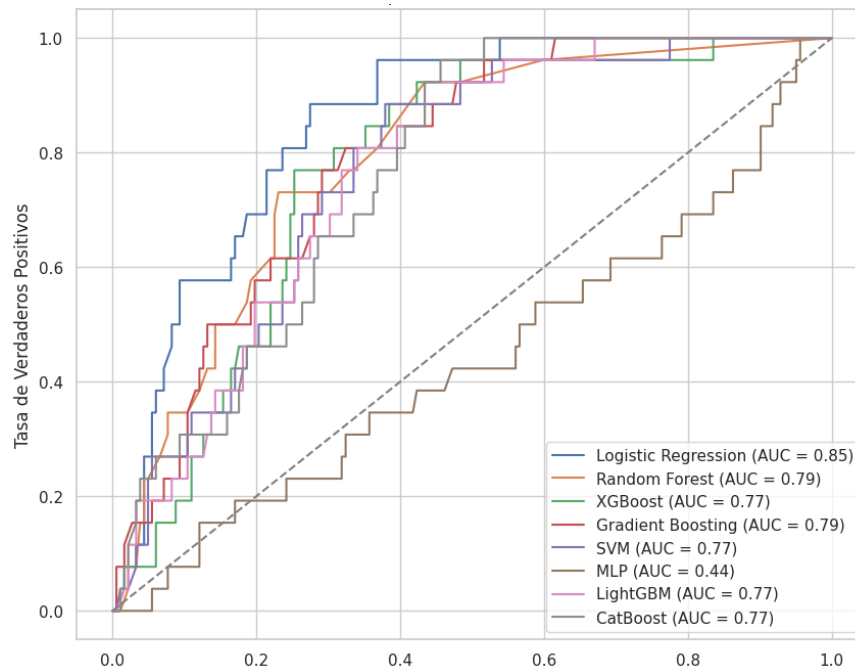
Asimismo, se evidenció un crecimiento progresivo en el número de reprobaciones por año, pasando de solo seis casos en 2015 a más de treinta en 2024, lo que refuerza la hipótesis de un deterioro acumulativo en el rendimiento académico. Este panorama es especialmente preocupante si se considera que la tasa de reprobación de esta unidad educativa (5.51%) supera la media nacional reportada para el año 2023 (3.61%) por el Ministerio de Educación.

## Evaluación del modelo predictivo

Con base en los hallazgos anteriores, se desarrollaron modelos predictivos para anticipar casos de reprobación. Se entrenaron y compararon ocho algoritmos de clasificación, representativos de diferentes enfoques del aprendizaje automático supervisado: modelos lineales, de ensamblado, redes neuronales y SVMs como se ve en la Figura 7. Todo el conjunto de datos, proceso y resultados se encuentran disponibles en el repositorio de GitHub agregado en la bibliografía de este artículo (Villca Coraite, 2025).

**Figura 7**

*Cuadro comparativo de entrenamiento de modelos*



Los resultados comparativos de los modelos se presentan en la Tabla 1 conjuntamente con sus respectivas métricas.

**Tabla 1**

*Cuadro comparativo de resultado de los modelos*

| Modelo              | Accuracy | F1-Score ponderado | Precision | Recall |
|---------------------|----------|--------------------|-----------|--------|
| Regresión logística | 0,7019   | 0,7521             | 0,8892    | 0,7019 |
| Random forest       | 0,8702   | 0,8143             | 0,7651    | 0,8702 |
| XGBoost             | 0,8077   | 0,8077             | 0,8077    | 0,8077 |
| Gradient boosting   | 0,8702   | 0,8298             | 0,8216    | 0,8702 |
| SVM                 | 0,8077   | 0,816              | 0,8256    | 0,8077 |
| MLP                 | 0,8654   | 0,8119             | 0,7646    | 0,8654 |
| LightGBM            | 0,8317   | 0,8239             | 0,8171    | 0,8317 |
| CatBoost            | 0,851    | 0,8408             | 0,8331    | 0,851  |

Fuente: Elaboración propia (2025)

El algoritmo CatBoost fue el que alcanzó el mejor rendimiento general, destacando especialmente en la métrica F1-score ponderado (0.8408) y en recall (0.8510), lo que indica una alta capacidad para detectar correctamente a los estudiantes que efectivamente reprobaron. Su precisión (0.8331) y su exactitud global (85.1%) también fueron superiores a la mayoría de los otros modelos evaluados.

Con el propósito de comprender mejor cómo el modelo realiza sus predicciones, se analizó la importancia relativa de las variables utilizadas por el algoritmo CatBoost. Este análisis permite identificar cuáles de las características del historial académico influyen con mayor peso en la estimación del riesgo de reprobación. Los resultados muestran que variables relacionadas con la trayectoria académica del estudiante como la tendencia del promedio general, el número acumulado de reprobaciones y el promedio de los últimos años tienen una influencia particularmente alta en la predicción del modelo. Asimismo, factores como los años de permanencia en la unidad educativa y la variación interanual del rendimiento también aportan información relevante para estimar el riesgo académico.

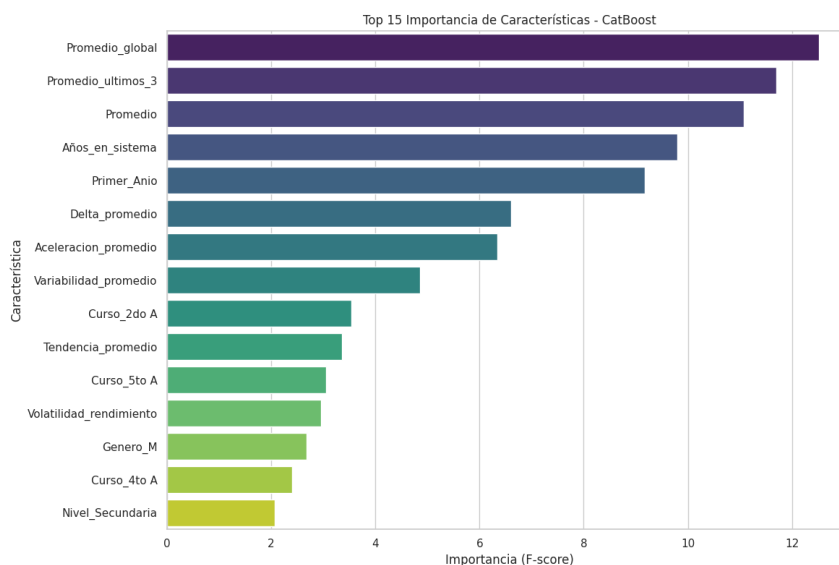
La Figura 8 presenta el ranking de importancia de variables obtenido a partir del modelo entrenado. Este tipo de análisis resulta útil no solo para validar el comportamiento del algoritmo, sino también para ofrecer una interpretación más clara de los factores que están asociados al bajo rendimiento escolar en el contexto analizado.

Estos resultados validan el uso del algoritmo CatBoost, en contextos educativos con datos tabulares y categóricos. Además, la selección de F1-score ponderado como métrica principal resultó adecuada dada la naturaleza desbalanceada del conjunto de datos, donde los casos de reprobación son minoritarios pero críticos (Chicco & Giuseppe, 2020).

El modelo entrenado permitió proyectar el número estimado de estudiantes reprobados para los próximos cinco años, tal como se ilustra en la Figura 9. Además, posibilitó la identificación individual de los estudiantes con mayor riesgo de reprobación (Figura 10). Estas predicciones fueron organizadas en listas anuales y exportadas en un formato accesible para docentes y personal administrativo, con el objetivo de facilitar su uso como herramienta de alerta temprana y apoyar la toma de decisiones pedagógicas orientadas a la prevención.

**Figura 8**

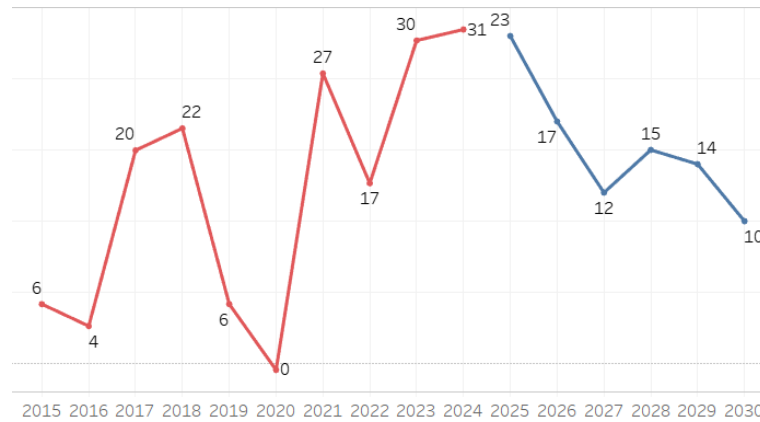
*Importancia de variables del modelo CatBoost*



Fuente: Elaboración propia (2026)

**Figura 9**

*Cantidad de estudiantes reprobados por año (Rojo real y azul predicción)*



Fuente: Elaboración propia (2025)

**Figura 10**

*Estudiantes con mayor probabilidad de reprobación en los siguientes años*

### Estudiantes con peligro de reprobación

| Código Rude (pedicc.. | Nombre_Completo             |       |
|-----------------------|-----------------------------|-------|
| 519500012013922       | YOLVER CRESPO RAMOS         | 2,025 |
| 519500012016007       | MOISES CHOQUE ROCA          | 2,025 |
| 519500012016009       | FAVIO ANDRES SURUBI VACA    | 2,025 |
| 519500012017008       | RUBEN SOLIZ PEÑA            | 2,025 |
| 519500012017009       | GUILLERMO VERA TELMO        | 2,025 |
| 519500012018010       | YANETH YAMBAMINI SOLIZ      | 2,025 |
| 519500012020017       | DILAN PERES ROCA            | 2,025 |
| 519500012020024       | JAZMIN ALBA CORTEZ          | 2,025 |
| 519500012021961A      | EZEQUIEL CLAURE CUELLAR     | 2,025 |
| 519500012024471A      | VALENTINA SIANCAS CAMACHO   | 2,025 |
| 719500632013951       | YESSICA CHAMO ESTRADA       | 2,025 |
| 719500632014275       | ADRIANA BEJARANO CONDORI    | 2,025 |
| 719500632014457       | BEATRIZ CAMPOS CUELLAR      | 2,025 |
| 719500632014990       | JOSE EDUARDO PEDRAZA PEDR.. | 2,025 |
| 719500632016011       | HIROSHI ISHIZAKI ORELLANO   | 2,025 |
| 719500632017028       | DAYANA FIORELLA ARAUZ APAR  | 2,025 |

Fuente: Elaboración propia (2025)

En conjunto, los resultados muestran que es posible anticipar con alta precisión los casos de bajo rendimiento académico en contextos rurales, utilizando técnicas de aprendizaje supervisado sobre datos históricos de calificaciones. Esta capacidad predictiva, cuando es aprovechada de forma adecuada, puede convertirse en un insumo valioso para diseñar estrategias focalizadas de acompañamiento escolar y mejorar la calidad educativa en regiones con limitaciones estructurales.

### Comparación con estudios previos

Los resultados obtenidos en este estudio pueden ser mejor comprendidos al contrastarlos con investigaciones previas que abordaron problemáticas similares desde un enfoque predictivo y analítico.

Uno de los referentes más citados en la literatura es el trabajo de Carlos Márquez Vera (2015), quien aplicó técnicas de minería de datos para predecir el abandono y fracaso escolar en contextos urbanos de España. Su modelo logró una precisión del 91% utilizando el algoritmo ICRM (Incremental Cost-sensitive Rule Mining) con un conjunto de datos acotado a una gestión anual. Aunque su enfoque fue eficaz para establecer patrones generales de fracaso escolar, se centró principalmente en el nivel agregado de tasas de abandono, sin identificar individualmente a los estudiantes en riesgo (Marquez Vera, Predicción del fracaso y abandono escolar mediante técnica de minería de datos, 2015).

En el entorno local, el trabajo de Maya Wara López Laime (2024) analizó el rendimiento académico en municipios de Bolivia a través de agrupamiento y aprendizaje automático. Su modelo basado en Random Forest obtuvo una precisión de 58%, centrando su análisis en indicadores globales sin profundizar en predicciones personalizadas por estudiante. Esta investigación utilizó menos variables contextuales para la parte predictiva (Laime, 2024).

En comparación, el presente estudio no solo alcanzó una mayor precisión global (91%), sino que también incorporó una perspectiva individualizada del riesgo, generando listas de estudiantes y por gestión futura en la que muy probablemente este repruebe según indica la predicción. La Tabla 2 resume los resultados comparativos con otras investigaciones similares en el tema educativo.

**Tabla 2**

*Comparativa con otras investigaciones*

| Comparación                    | Esta investigación | Carlos Márquez | Maya Wara López |
|--------------------------------|--------------------|----------------|-----------------|
| Mejor modelo                   | CatBoost           | ICRM           | Random forest   |
| Accuracy                       | 0,9182             | 0,91           | 0,58            |
| Tasa de reprobación            | 0,0551             | 0,09           | 0,0702          |
| Gestiones de datos usadas      | 2015-2024          | 2009           | 2006-2019       |
| Aumento de datos el último año | 11                 | 0              | -576            |
| Cantidad de filas              | 2978               | 670            | 4746            |

Fuente: Elaboración propia (2025)

Estas diferencias metodológicas refuerzan el valor añadido del presente trabajo: mientras los estudios anteriores se enfocan en identificar patrones generales, este estudio ofrece una herramienta operativa que permite anticipar de forma concreta qué estudiantes podrían reprobar y en qué momento actuar. Esta capacidad resulta especialmente relevante en contextos rurales, donde las intervenciones deben ser altamente focalizadas debido a las limitaciones estructurales y de recursos.

En conjunto, los hallazgos aquí presentados no solo coinciden con la literatura en cuanto a la relevancia del uso de técnicas de aprendizaje supervisado, sino que también avanzan un paso más al integrar predicción personalizada, validación temporal, y una propuesta concreta de aplicación pedagógica a nivel institucional.

## 5. Conclusión

Este estudio logró cumplir su objetivo de analizar el rendimiento académico en un contexto rural boliviano, identificando materias con alta tasa de reprobación e implementando un modelo de predicción que permite anticipar casos de estudiantes en riesgo. A partir de un conjunto de datos consolidada y preprocesada con criterios de calidad, se identificó una tendencia sostenida de deterioro en los promedios académicos entre 2015 y 2024, con especial concentración de reprobaciones en materias como Biogeografía/Ciencias Naturales, Matemáticas y Comunicación y Lenguajes.



La aplicación de técnicas de aprendizaje automático supervisado, específicamente el modelo CatBoost, permitió generar predicciones individualizadas con alta precisión (F1-score ponderado de 0.84 y accuracy del 91%), superando enfoques previos centrados únicamente en tasas globales de abandono o reprobación. Este modelo permitió identificar variables clave como la tendencia del promedio, el historial de reprobaciones y los años que el estudiante prevaleció en la unidad educativa, lo que facilita una comprensión más completa del desempeño académico individual.

Al comparar los resultados con investigaciones anteriores, se destaca que este trabajo avanza en la capacidad de predicción personalizada, aportando una herramienta concreta para la toma de decisiones pedagógicas en contextos de alta vulnerabilidad educativa. La posibilidad de generar listas anticipadas de estudiantes en riesgo representa una innovación útil para la gestión educativa rural, donde los recursos son limitados y las intervenciones deben ser focalizadas cuanto antes.

Como recomendación, se sugiere replicar este enfoque en otras unidades educativas del país rurales y urbanas, incorporando además variables socioeconómicas, emocionales y contextuales que puedan enriquecer la capacidad predictiva del modelo. Asimismo, la participación de equipos multidisciplinarios, como psicopedagogos o especialistas en gestión educativa, podría potenciar la aplicación práctica de los resultados, garantizando no solo la identificación de riesgos, sino también la implementación de estrategias de acompañamiento efectivas.

Aunque el análisis se desarrolló a partir de los datos de una sola unidad educativa rural, el enfoque metodológico empleado presenta el potencial de ser aplicado en otros contextos educativos del país. El modelo se basa principalmente en registros académicos históricos, información que generalmente está disponible en las instituciones educativas, lo que facilita su posible implementación en otras regiones.

No obstante, Bolivia presenta una gran diversidad de realidades socioeducativas entre departamentos, municipios y comunidades rurales. Por esta razón, la replicación del modelo en otros contextos requeriría procesos de validación y ajuste que consideren particularidades locales, como diferencias en estructura curricular, condiciones socioeconómicas o dinámicas institucionales. Evaluar el desempeño del modelo en distintos entornos permitiría determinar su capacidad de generalización y fortalecer su utilidad como herramienta de apoyo para la toma de decisiones educativas a mayor escala.

### Agradecimientos

Agradezco a Ing. Evelyn Cusi e Ing. Ariel Mamani por guiarme y asesorarme para que este artículo se lleve a cabo, a mi querida tía Delia Villca por siempre apoyarme y animarme en los aspectos académicos, a mi madre y mis hermanas Zunilda y Luz Darley por darme ese apoyo en los momentos difíciles.

Dedico este artículo al P. Hermann Nigris SDB (+), gracias a sus consejos y ejemplo de vida como misionero salesiano que trabajó incansablemente por ayudar a los demás.

### 6. Referencias bibliográficas

- |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Amonzabel, M. A. (5 de marzo de 2025). YouTube. Obtenido de youtube.com: <a href="https://www.youtube.com/watch?v=gImhqTufEMQ">https://www.youtube.com/watch?v=gImhqTufEMQ</a></p> <p>Breiman, L. (2001). Random forest. Machine Learning, Springer nature link, 5-32.</p> <p>Chen, T., &amp; Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD, 785-794.</p> | <p>Chicco, D., &amp; Giuseppe, J. (2020). The advantages of the Matthews correlation coefficient (MCC) over F1 score and accuracy in binary classification evaluation. BMC Genomics, 6.</p> <p>Cortes, C., &amp; Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. Machine learning, Springer nature link, 273-297.</p> <p>Fernandez, M. (20 de febrero de 2024). La educación rural en Bolivia: desafíos y oportunidades. El país.</p> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

- Friedman, J. (2001). Greedy function approximation: a gradient boosting machine. *Annals of statistics*, 1189-1232.
- Hosmer, D. W., Lemeshow, S., & Sturdivant, R. (2013). *Applied Logistic Regression*. Hoboken, New Jersey: Wiley.
- IBM. (28 de diciembre de 2024). ibm.com. Obtenido de [www.ibm.com: https://www.ibm.com/es-think/topics/supervised-learning](https://www.ibm.com/es-think/topics/supervised-learning)
- Ke, G., Meng, Q., Finley, T., Wang, T., Chen, W., Ma, W., . . . Liu, T.-Y. (2017). LightGBM: A Highly Efficient Gradient Boosting Decision Tree. *NeurIPS*, 3146-3154.
- Kohavi, R. (1995). A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. In *Ijcai* , 1137-1145.
- Laime, M. W. (2024). *ddigital*. Obtenido de [http://ddigital.umss.edu: http://ddigital.umss.edu/bitstream/123456789/43657/1/MONOGRAFIA\\_LOPEZ%20LAIME%20MAYA%20WARA.pdf](http://ddigital.umss.edu/bitstream/123456789/43657/1/MONOGRAFIA_LOPEZ%20LAIME%20MAYA%20WARA.pdf)
- Marquez Vera, C. (2015). Predicción del fracaso y abandono escolar mediante técnica de minería de datos. Córdoba: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba.
- Marquez Vera, C., Romero Morales, C., & Ventura Soto, S. (2012). Predicción del Fracaso Escolar mediante. *IEEE-RITA*.
- Ministerio de educación Bolivia. (2023). Tasa de reprobación anual. La paz: [minedu.gob.bo](http://minedu.gob.bo).
- Prokhorenkova, L., Vorobev, A., Dorogush, A. V., Gulin, A., & Gusev, G. (2018). CatBoost: unbiased boosting with categorical features. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 31.
- Roca, E. (1 de marzo de 2025). La calidad de la educación en Bolivia. *Opinión*.
- Santo Bacallao, A. (2020). Rendimiento escolar en la asignatura de lenguaje y comunicación en el nivel secundario de Bolivia. *Scielo*.
- Trigo, M. S. (2 de marzo de 2025). *Infobae*. Obtenido de [infobae.com: https://www.infobae.com/america/america-latina/2025/03/02/preocupacion-por-el-nivel-educativo-en-bolivia-solo-tres-de-cada-100-estudiantes-aprobaron-matematicas-y-quimica-en-un-examen-de-diagnostico/](https://www.infobae.com/america/america-latina/2025/03/02/preocupacion-por-el-nivel-educativo-en-bolivia-solo-tres-de-cada-100-estudiantes-aprobaron-matematicas-y-quimica-en-un-examen-de-diagnostico/)
- UNESCO. (2023). Informe de seguimiento de la educación en el mundo – América Latina. París: UNESCO.
- Villca Coraite, L. (agosto de 2025). *GitHub*. Obtenido de [GitHub.com: https://github.com/LimbergVillcaCoraite/Proyecto-Dip.-Ciencia-de-datos.git](https://github.com/LimbergVillcaCoraite/Proyecto-Dip.-Ciencia-de-datos.git)

# Vulnerabilidad intrínseca de acuíferos. Estudio de Caso: Huerta Mayu, Cochabamba, Bolivia

## Intrinsic vulnerability of aquifers. A Case Study: Huerta Mayu, Cochabamba, Bolivia

Galo Osvaldo Muñoz Vásquez<sup>1,\*</sup>, José Carlos Chambi Gonzales<sup>2</sup>

\*Correo de correspondencia: g.munoz@umss.edu

### Resumen

El estudio evalúa la vulnerabilidad intrínseca del acuífero freático en Huerta Mayu, Cochabamba, mediante el método paramétrico DRASTIC. Los resultados (índices 91-127) identifican zonas de vulnerabilidad moderada al norte y este, y baja al sur. Se determinó que la vulnerabilidad está controlada principalmente por la geología local, la diferencia entre depósitos aluviales permeables al norte y materiales más finos al sur, así como por la profundidad del nivel freático.

Estos hallazgos permiten la generación de mapas de riesgo al integrar vulnerabilidad y amenaza, facilitando la identificación de sectores críticos para la recarga hídrica. La delimitación de estas áreas podrá fundamentar propuestas de gestión técnica y ambiental orientadas a la planificación del uso del suelo y la conservación del recurso subterráneo.

**Palabras clave:** vulnerabilidad, DRASTIC, acuíferos.

### Abstract

This study assessed the intrinsic vulnerability of the phreatic aquifer in Huerta Mayu, Cochabamba, using the DRASTIC method. Results (indices 91-127) identified moderate vulnerability zones in the north and east, and low vulnerability in the south. Vulnerability was determined to be primarily controlled by local geology—distinguishing between permeable alluvial deposits in the north and finer materials in the south—as well as by the depth to the water table. These findings enable the generation of risk maps by integrating vulnerability and hazards, facilitating the identification of critical groundwater recharge sectors. The delimitation of these areas could be a good support for technical and environmental management proposals aimed at land-use planning and groundwater resource conservation.

**Keywords:** Vulnerability, DRASTIC, aquifers.

## 1. Introducción

El agua es una necesidad fundamental para el desarrollo de las actividades domésticas, agrícolas y económicas. En zonas donde la oferta del agua superficial es escasa, las aguas subterráneas resultan una opción confiable, desempeñando un papel crucial ante el crecimiento demográfico y el desarrollo industrial con el objetivo de mantener la sostenibilidad, la protección y la distribución equitativa del recurso hídrico (Das, 2023). No obstante, una débil gestión y la sobreexplotación de los recursos hídricos subterráneos pueden tener graves consecuencias, como la contaminación del suelo y el agua, el agotamiento del agua subterránea, y el hundimiento de suelos (F. J. Chang et al., 2017). El hundimiento del suelo, atribuido principalmente a la extracción de aguas subterráneas (Poland & Davis, 1969), ha impactado numerosas regiones en el mundo, incluyendo casos notorios como el Valle de San Joaquín en California (Galloway et al., 2008), y grandes urbes como Beijing (Zhu et al., 2015), Shanghai (Shi et al., 2008) y Ciudad de México (Ortiz-Zamora & Ortega-Guerrero, 2010).

Por otra parte, la presión sobre los recursos hídricos subterráneos es especialmente crítica en regiones con climas áridos y semiáridos (Watto & Mugerá, 2016), (Shiferaw, 2021) donde la demanda de agua para la agricultura ha

<sup>1</sup> Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.  
<https://orcid.org/0009-0008-2232-0562>

<sup>2</sup> Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.  
<https://orcid.org/0009-0003-5375-6629>

impulsado una explotación insostenible de los acuíferos. Esta situación no es ajena a Cochabamba, Bolivia, una región climatológicamente semiárida y vulnerable a las sequías. El crecimiento de la población y el desarrollo urbano no planificado han llevado a la proliferación de pozos y a la sobreexplotación de las aguas subterráneas en el Valle de Cochabamba, superando la capacidad de recarga del acuífero (Stockholm Environment Institute US CENTER, 2019). Un área representativa de esta problemática es Huerta Mayu, una zona agrícola de 17 hectáreas ubicada en la parte oriental del Valle de Cochabamba. El área está delimitada al sur por las serranías del cerro San Pedro y que enfrenta la presión de la expansión urbana desde el oeste y el norte. Su vocación agrícola ha resultado en una alta densidad de pozos excavados para la extracción de agua desde un acuífero freático (o no confinado) que yace a poca profundidad. Se postula que la recarga principal del acuífero proviene de la infiltración de agua de lluvia y del flujo subsuperficial del río Wara Wara, originado en la Cordillera del Tunari (Muñoz Vásquez & Pérez Mercado, 2024). Fuentes de recarga adicionales incluyen el retorno de riego de las parcelas agrícolas hacia el subsuelo con el riesgo de introducir contaminantes como pesticidas (Salas García, 2025). Otra fuente adicional de degradación potencial de la calidad del agua del acuífero es la infiltración de las aguas contaminadas desde río Rocha hacia el acuífero. Esta interacción con potenciales fuentes puntuales y difusas de contaminación (Foster, 1987) (Toledo Medrano & Amurrio Derpic, 2006), unida a una sobreexplotación que amenaza el agotamiento del acuífero, compromete el desarrollo agrícola y la seguridad alimentaria de la zona. Dada la interacción de estos factores de riesgo, es necesario implementar medidas de mitigación y preservación del recurso hídrico subterráneo (Stockholm Environment Institute US CENTER, 2019).

Una herramienta analítica apropiada para abordar la aptitud natural del acuífero a ser dañado es la evaluación de la vulnerabilidad hidrogeológica intrínseca del sistema. Las evaluaciones de vulnerabilidad describen los estados de susceptibilidad al daño a acuíferos ayudando a identificar zonas de alto o bajo riesgo, aspecto que permite formular estrategias de mitigación ante amenazas de contaminantes. Existen diversos métodos paramétricos para mapear la vulnerabilidad de las aguas subterráneas, tales como GOD (Foster, 1987), DRASTIC (Foster, 1987), EPIK (Doerflinger et al., 1999) y SINTACS (Civita & Maio, 2004). Cada uno de los métodos tiene ventajas y desventajas de aplicación; por ejemplo, GOD es aplicado en estudios preliminares de vulnerabilidad a escala regional y por ello emplea únicamente tres variables hidrogeológicas (tipo de acuífero, litología de la zona no saturada y la profundidad del agua) siendo útil para evaluaciones preliminares. El método DRASTIC es el método más utilizado y validado mundialmente; emplea siete factores hidrogeológicos tanto externos como intrínsecos a la constitución del subsuelo. De la aplicación de este método en el Valle de Cochabamba se tiene resultados alcanzados en la zona de Vinto – Sipe Sipe (Zurita, 2007) y La Mayca (Gonzales, 2007) o, como las de (Gonzales Amaya et al., 2018; Rosales et al., 2024) que evaluaron la vulnerabilidad del acuífero de Punata. El método EPIK está exclusivamente concebido para su utilización en acuíferos cársticos que no están presentes en las formaciones geológicas del Valle de Cochabamba.

El objetivo del estudio, es evaluar la vulnerabilidad intrínseca del acuífero freático de Huerta Mayu, aplicando la metodología paramétrica DRASTIC (Aller et al., 1987). Los hallazgos de esta investigación están destinados a proporcionar una base cartográfica para la gestión del acuífero y para el desarrollo de estrategias de prevención de la contaminación.

## **2. Material y métodos**

La investigación se desarrolló en el área agrícola de Huerta Mayu. Esta zona se ubica en el límite entre los municipios de Cochabamba y Sacaba. Huerta Mayu es una comunidad agrícola enclavada al pie de la serranía del Cristo de la Concordia en la ciudad de Cochabamba. La comunidad se halla a tres cuerdas al sur de la rotonda del Servicio de Caminos (SEDCAM) y cuatro cuerdas al este del Puente Siles sobre el río Rocha. Las siguientes son las coordenadas de ubicación general: zona 19 K; 805147 Este y 8076102 Sur; su elevación promedio es de 2 590 msnm.

Huerta Mayu queda situada a la vera del río Rocha, a corta distancia de la confluencia con el río Wara Wara y es parte de su abanico aluvial. En general, subsuelo está conformado por material grueso apto para la infiltración. No obstante, el suelo superficial ha sido acondicionado para las prácticas agrícolas obteniéndose un huerto de provisión de vegetales para los mercados de la ciudad. Huerta Mayu cuenta con una densidad considerable de pozos excavados, todos ellos destinados a la provisión de agua para riego suplementario en momentos de estrés hídrico, pues el resto del tiempo, el agua para riego proviene de tres pozos profundos en la zona.

Según el Plan Director de la Cuenca del Río Rocha (Stockholm Environment Institute US CENTER, 2019), el subsuelo de Huerta Mayu está formado por depósitos lacustres en la parte norte y material aluvial al sur. La recarga al sistema hidrogeológico es compleja y no está completamente comprendida. Se disponen de indicios que parte del agua subterránea llega a través de antiguos cauces del río Wara Wara que confluye hacia el río Rocha; esta agua es de buena calidad y se manifiestan sus excesos a través de vertientes y humedales durante la época de lluvias (Muñoz Vásquez & Pérez Mercado, 2024). La otra fuente la constituiría el flujo del agua contaminada que desde el río Rocha se infiltra a través su lecho y alcanza el acuífero freático (Toledo Medrano & Amurrio Derpic, 2006). La tercera fuente es el agua empleada para el riego de las parcelas y que por infiltración llega al mismo acuífero. Esta agua puede acarrear elementos químicos de los pesticidas empleados en la agricultura (Salas García, 2025). La posibilidad y el riesgo de que estos elementos contaminantes alcancen el acuífero dependerá de la facilidad que presenten las capas del subsuelo para la movilidad del agua y los solutos, es decir, suelos con baja permeabilidad se constituirán en una capa protectora que retarde o detenga en tránsito de solutos; suelos con textura liviana serían propicios para facilitar la degradación de la calidad del agua; pero por otra parte, también dependerá de las características individuales de cada soluto para moverse en los tipos de suelo. Uno de los primeros pasos en la gestión de protección de los recursos hídricos subterráneos es la evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos, como una propiedad intrínseca que determina su sensibilidad a ser afectado negativamente por los contaminantes (Martínez et al., 1998). Esta investigación aplica la metodología DRASTIC para estudiar la vulnerabilidad del acuífero bajo Huerta Mayu.

### Método de evaluación de vulnerabilidad: DRASTIC

Las metodologías para evaluar la vulnerabilidad de acuíferos buscan definir las características intrínsecas del sistema (acuífero y capas suprayacentes) que controlan el transporte y la atenuación de contaminantes. El método paramétrico DRASTIC evalúa el potencial de contaminación a partir de siete variables hidrogeológicas. Los parámetros del método son: D (Depth to water): profundidad del agua subterránea; R (Net recharge): recarga efectiva; A (Aquifer media): medio poroso que conforma el acuífero; S (Soil media): medio poroso de la capa de suelo más superficial del terreno (horizonte A); T (Topography): la inclinación topográfica del terreno; I (Impact of the vadose zone): tipo de material geológico que se encuentra debajo de la capa de suelo y por encima del acuífero; C (Conductivity): conductividad hidráulica del acuífero.

El método DRASTIC funciona como un modelo de suma ponderada. A cada uno de los siete parámetros se le asigna un valor numérico en una escala del 1 al 10, donde valores más altos indican una mayor vulnerabilidad. Además, cada parámetro tiene un peso relativo asignado según su importancia. El índice de vulnerabilidad DRASTIC final se calcula multiplicando el valor de cada parámetro por su peso y sumando los resultados. La ecuación 1 presenta la estructura de los parámetros y los pesos relativos (Aller et al., 1987).

$$(DRASTIC=(D\_r D\_w )+ (R\_r R\_w ) + (A\_r A\_w ) + (S\_r S\_w ) + (T\_r T\_w ) + (I\_r I\_w ) + (C\_r C\_w ) \text{ \#Ecuación 1})$$

Los valores del índice resultante, que generalmente varían entre 50 y 200, se clasifican en categorías de vulnerabilidad (baja, moderada, alta, etc.) para facilitar la interpretación y la creación de mapas de vulnerabilidad. La Tabla 1 presenta los valores aceptados para los parámetros asociados con la naturaleza del medio poroso del suelo, el acuífero y de la zona vadosa.

**Tabla 1**

*Valores de los parámetros del DRASTIC asociados con el medio poroso de subsuelo*

| <b>Parámetro A</b>                        |              | <b>Parámetro S</b>                   |              | <b>Parámetro I</b>             |              |
|-------------------------------------------|--------------|--------------------------------------|--------------|--------------------------------|--------------|
| <b>Litología del acuífero</b>             | <b>Rango</b> | <b>Suelo superficial</b>             | <b>Rango</b> | <b>Zona no saturada</b>        | <b>Rango</b> |
| Pizarra masiva                            | 2            | Fina o ausente, grava                | 10           | Caliza kárstica                | 10           |
| Metamórfica/ígneas                        | 3            | Arenisca y turba volcánica           | 9            | Basalto                        | 9            |
| Metamórfica/ígneas meteorizadas           | 4            | Turba                                | 8            | Arena y grava                  | 8            |
| Arenas y gravas de origen glacial         | 5            | Arcilla agregada, aluvión            | 7            | Grava, arena                   | 7            |
| Secuencias de arenisca, caliza y pizarras | 6            | Franco arenoso, pizarra, arena       | 6            | Caliza, grava, arcilla arenosa | 6            |
| Arenisca maciza                           | 6            | Franco                               | 5            | Limo arenoso                   | 5            |
| Caliza maciza                             | 6            | Franco limoso                        | 4            | Grava y arenisca metamórfica   | 4            |
| Arena o grava                             | 8            | Franco arcilloso                     | 3            | Pizarra, limo y arcilla        | 3            |
| Basaltos                                  | 9            | Granitoide                           | 2            | Arcilla limosa                 | 2            |
| Caliza kárstica                           | 10           | Arcilla sin contracción ni agregados | 1            | Capa confinante, granito       | 1            |

(Aller et al., 1987; Vargas Quintero, 2010)

La Tabla 2 presenta los valores de los parámetros complementarios para conformar el índice DRASTIC de la vulnerabilidad de un acuífero.

**Tabla 2**

*Valores de los parámetros complementarios del método DRASTIC*

| <b>Parámetro D</b>              |              | <b>Parámetro T</b>               |              | <b>Parámetro C</b>                    |              | <b>Parámetro R</b>  |              |
|---------------------------------|--------------|----------------------------------|--------------|---------------------------------------|--------------|---------------------|--------------|
| <b>Profundidad del agua (m)</b> | <b>Rango</b> | <b>Pendiente topográfica (%)</b> | <b>Rango</b> | <b>Conductividad Hidráulica (m/d)</b> | <b>Rango</b> | <b>Recarga (mm)</b> | <b>Rango</b> |
| 0 a 1.5                         | 10           | 0 a 2                            | 10           | 0.04 a 4.08                           | 1            | 0 a 50              | 1            |
| 1.5 a 4.6                       | 9            | 2 a 6                            | 9            | 4.08 a 12.22                          | 2            | 50 a 103            | 3            |
| 4.6 a 9.1                       | 7            | 6 a 12                           | 5            | 12.22 a 28.55                         | 3            | 103 a 178           | 6            |
| 9.1 a 15.2                      | 5            | 12 a 18                          | 3            | 28.55 a 40.75                         | 6            | 178 a 254           | 8            |
| 15.2 a 22.9                     | 3            | >18                              | 1            | 40.75 a 81.49                         | 8            | > 254               | 9            |
| 22.9 a 30.5                     | 2            |                                  |              | > 81.49                               | 10           |                     |              |
| > 30.5                          | 1            |                                  |              |                                       |              |                     |              |

(Aller et al., 1987; Auge, 2007; Vargas Quintero, 2010)

El Laboratorio de Hidráulica realizó un estudio geoelectrico para conocer la configuración de los estratos bajo la superficie, pues ellos son el medio por donde transita la humedad proveniente del riego y la lluvia logrando alcanzar el nivel freático. La resistividad de los suelos tiene un amplio margen de variación lo que implica que pueden interpretarse diferentes tipos de suelo para un mismo valor de resistividad. La identificación completa se apoya en información complementaria de calicatas, perfiles estratigráficos, análisis de muestras de suelo y la experiencia del geólogo.

El equipo ABEM Terrameter LS de industria sueca fue empleado para realizar el estudio geoelectrico. Se tendieron 17 segmentos longitudinales de líneas de corriente que cubrieron toda el área de interés. Los valores registrados de resistividad abarcan un rango de resistividades entre 10 – 1000 Ohm-m. Los valores de 10 – 100 Ohm-m representan



suelos finos como limos y arenas con y sin presencia de humedad. Los valores de 100 – 400 Ohm-m indican una mezcla de arenas y gravas con un poco de finos. Finalmente, valores encontrados mayores a 400 Ohm-m representan el material grueso como gravas, bolones y rocas.

Se han practicado calicatas en diversos sitios de las parcelas agrícolas a fin de identificar y confrontar los horizontes de suelo obtenidos en el estudio geoeléctrico. El reconocimiento visual de los estratos y el análisis de laboratorio de las muestras de suelo extraídas de ellos, permitieron conocer la secuencia de horizontes de suelo: se identificó una capa superficial de suelo arable caracterizado como suelo franco; por debajo de él, un horizonte de suelo franco arenoso, seguido de un suelo franco arenoso y un estrato de material más fino. Las muestras de suelos fueron analizadas en el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias de la UMSS.

El valor de los parámetros que definen el índice DRASTIC fueron determinados en función a un trabajo de campo que se extendió durante los años 2023 a 2024, en el marco de la investigación “Estudio del intercambio de agua y contaminantes del río rocha con el acuífero freático de Huerta Mayu, empleando modelación matemática” realizado por el LHUMSS y el C.A.S.A de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la UMSS (Muñoz Vásquez & Pérez Mercado, 2024). Los valores son:

#### ***Parámetro Depth (D):***

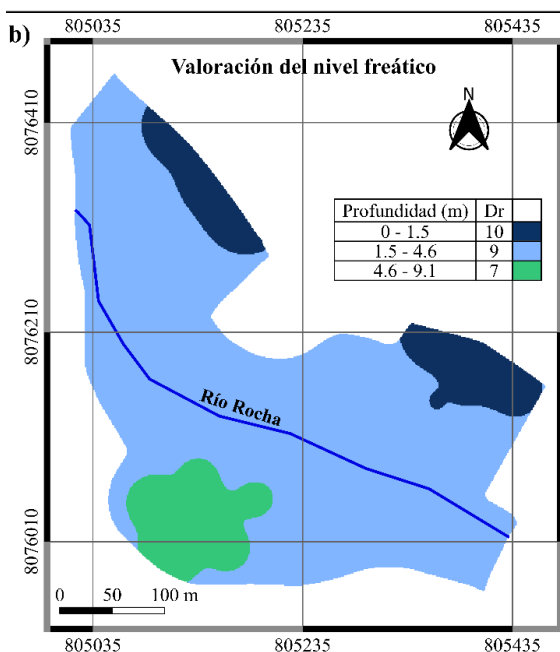
Corresponde a la distancia vertical desde la superficie hasta el nivel freático. Este parámetro es crítico, ya que una mayor profundidad implica un mayor tiempo de viaje del contaminante a través de la zona no saturada. Esto aumenta la probabilidad de que procesos de atenuación natural, como la filtración, sorción y biodegradación, reduzcan la concentración del contaminante antes de que alcance el acuífero (Auge, 2007). Por el contrario, un nivel freático somero reduce el tiempo de atenuación y eleva el riesgo de contaminación. En el caso de Huerta Mayu y como resultado del monitoreo quincenal de casi dos años, de la profundidad de agua en los pozos excavados, ha constatado que la profundidad de agua fluctúa entre los 0.3 a 5 m. El primer valor es representativo de la zona norte de Huerta Mayu, mientras que el segundo corresponde a la parte sur. La Figura 1 muestra el mapa de Huerta Mayu una vez que han sido valorados por sectores y las ponderaciones que les correspondiese según el método DRASTIC para la profundidad.

#### ***Parámetro Net Recharge (R)***

Es la cantidad total de agua por unidad de área que se infiltra a través de la superficie y llega efectivamente al acuífero. Proviene principalmente de la precipitación, pero también puede incluir el riego o las fugas de infraestructuras. La recarga es el vehículo de transporte para los contaminantes desde la superficie hasta el acuífero. El agua de recarga es el agente que lixivia los contaminantes de las capas superficiales del suelo y los transporta verticalmente a través de la zona vadosa. Una mayor cantidad de agua de recarga significa un mayor potencial de transporte. La recarga efectiva al acuífero freático de Huerta Mayu fue calculada utilizando el modelo matemático HELP (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance) (Schroeder, 1994) para ello se utilizaron los registros mensuales de 10 años de precipitación en las estaciones meteorológicas del Laboratorio de Física de la UMSS y la información de suelos obtenida en este estudio. La recarga efectiva calculada fue de 41 a 64 mm. La Figura 2 muestra la variación espacial de la valoración de la recarga efectiva según el método DRASTIC.

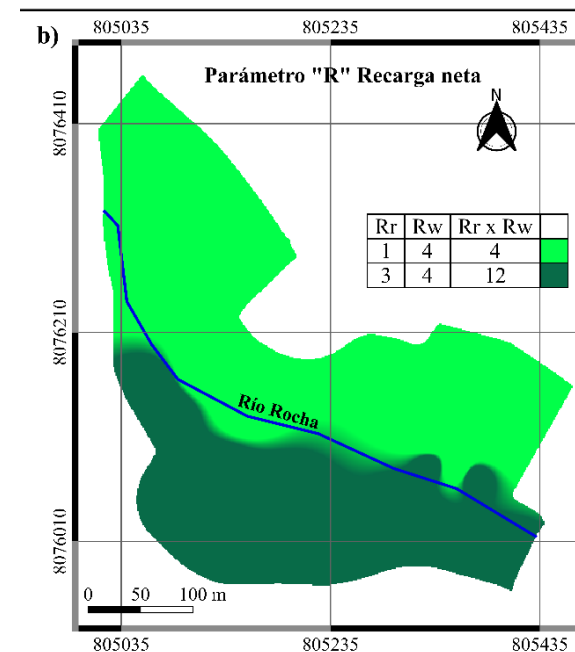
**Figura 1**

*Parámetro D de la profundidad*



**Figura 2**

*Parámetro R de la recarga efectiva*



### ***Parámetro Acuífer media (medio poroso del acuífero)***

Describe la naturaleza del material geológico que compone la zona saturada del acuífero (suelo o roca) en que el agua está almacenada y se mueve. Expresa la capacidad del acuífero para almacenar y transmitir agua, y la facilidad y la velocidad con la que un contaminante puede dispersarse una vez que ha llegado al agua subterránea. Un material muy permeable permite que el contaminante se difunda rápidamente y se extienda ampliamente. Un material menos permeable confina el contaminante y ralentiza su avance. El acuífero freático de Huerta Mayu está constituido para material aluvial gravo arenoso a franco arenoso, según la prospección geofísica realizada.

### ***Parámetro Soil media (tipo de suelo)***

Este parámetro se refiere a la capa más superficial del terreno, la cubierta edáfica que se encuentra justo debajo de la superficie. Esta es la capa en la que se desarrolla la actividad biológica (raíces y microorganismos) y está sujeta a procesos de meteorización. Es la capa que controla la cantidad de agua y contaminantes disueltos que se infiltran hacia las capas inferiores.

En Huerta Mayu, esta capa está constituida por suelo agrícola especialmente preparado cuya textura corresponde a suelo franco. En la parte norte del sitio de estudio, el suelo exhibe una textura más gruesa entre arenas a limo arenosa; mientras que en la parte sureña el material es más fino siendo limo arcilloso. La zona radicular, dependiendo del cultivo, se extiende a una profundidad de hasta 90 cm. La Figura 4 presenta la variación del tipo de suelo valorado según la metodología DRASTIC.

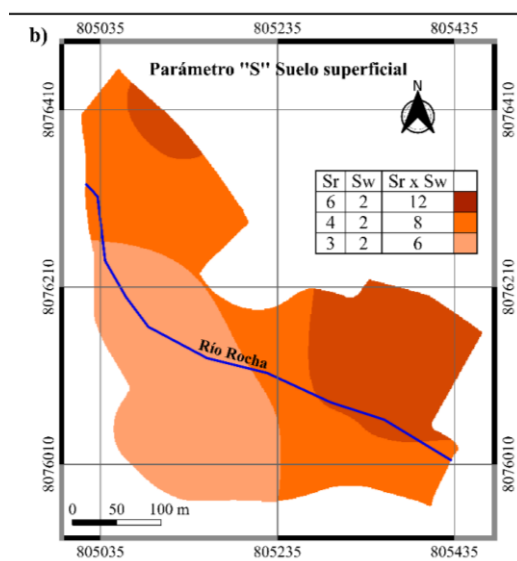
### ***Parámetro T (Pendiente topográfica)***

Se refiere este parámetro a la pendiente o relieve de la superficie del terreno. Dependiendo de la inclinación del suelo, el agua de lluvia o de riego permanecerá en la superficie el tiempo suficiente para infiltrarse o si, por el contrario, se convertirá rápidamente en escorrentía superficial. Cuando el terreno es casi llano o con pendientes pequeñas, el agua tiende a acumularse y moverse lentamente sobre la superficie, lo que maximiza el tiempo

disponible para la infiltración. En terrenos con pendientes pronunciadas, el agua fluye rápidamente como escorrentía, reduciendo la cantidad que se infiltraría. El terreno de Huerta Mayu es relativamente llano. Gran parte de él está conformado por parcelas sobre las que se riegan por el método de inundación o por surcos, de esa manera el agua tiene mayor oportunidad de infiltrarse. Las otras áreas que no son de cultivo, las constituyen los caminos, sendas y techos de viviendas sobre las cuales solo incide el agua de lluvia. El relevamiento topográfico realizado muestra pendiente dominantes menores al 2%. La Figura 4 muestra la variación del parámetro T según el método DRASTIC.

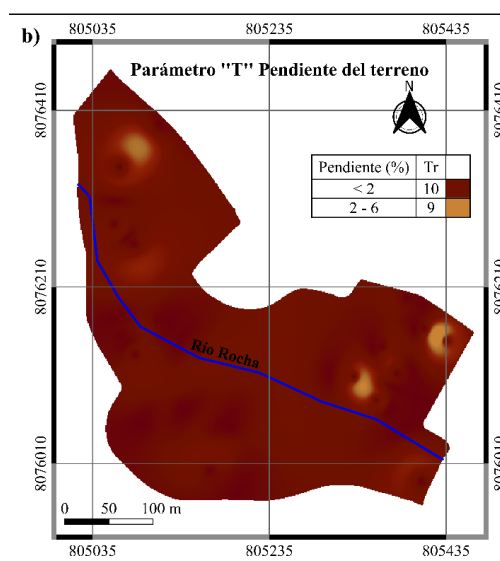
**Figura 3**

*Parámetro S del tipo de suelo*



**Figura 4**

*Parámetro T de la pendiente del terreno*



### ***Parámetro I (Impacto de la zona vadosa)***

Se refiere al material geológico que se encuentra debajo de la capa de suelo y por encima del nivel freático. Su función es controlar el tiempo de viaje y la atenuación del contaminante una vez que ha pasado la capa de suelo. La naturaleza de esta zona vadosa condicional el tiempo de residencia del agua y contaminantes en su viaje vertical al acuífero; un material permeable permitirá un paso rápido mientras que un material poco permeable demorará significativamente el flujo de agua dando mayor oportunidad a que desarrollen los procesos naturales de atenuación. En Huerta Mayu la zona vadosa está conformada, en general, por un horizonte franco al que le subyace un horizonte franco arenoso, debajo de él un horizonte franco limoso que confinare el acuífero freático; le sucede una capa de limo y nuevamente un suelo franco arenoso que conforma el acuífero libre. En la parte norte, los suelos son más granulares que los de la zona sur en los que se evidencia mayor presencia de finos. La Figura 5 exhibe la variación espacial del parámetro I en Huerta Mayu, según el método DRASTIC.

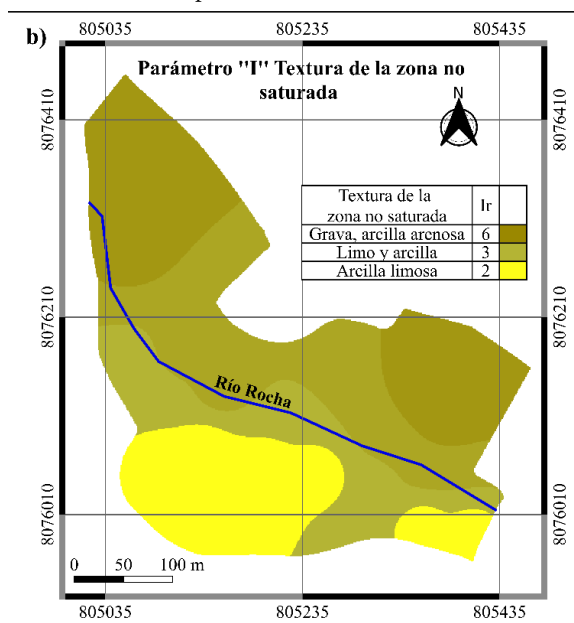
### ***Parámetro C (Conductividad hidráulica)***

Este parámetro expresa la capacidad de un material del acuífero para transmitir agua. Aunque está intrínsecamente relacionada con el parámetro "Acuifer media" (A), este parámetro es un valor numérico específico que define la velocidad del flujo subterráneo y la posibilidad del ritmo al que se extendiera una pluma de contaminación si alcanza el acuífero. Para la determinación de la conductividad hidráulica en Huerta Mayu, se realizaron ocho ensayos de

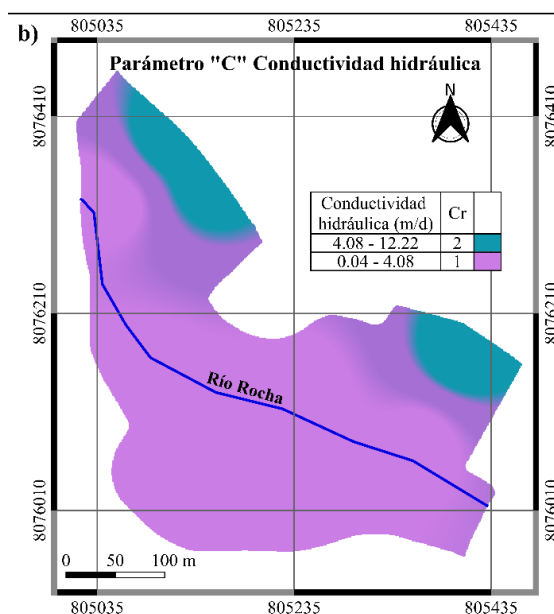
infiltración empleando el método de la doble anillas y pruebas de recuperación en los pozos de la zona. Los valores de conductividad hidráulica son más altos en la zona norte (40 m/día) y menores en la zona sur (0.9 m/día) del área de estudio. La Figura 6 muestra la distribución del factor C en el mapa de la zona.

El índice de vulnerabilidad DRASTIC final se calculó como un modelo de suma ponderada, según la Ecuación 1 y los pesos relativos presentados en la Tabla 3.

**Figura 5**  
Parámetro I del impacto de la zona vadosa



**Figura 6**  
Parámetro C de la conductividad hidráulica



**Tabla 3**

Factores de ponderación (peso relativo) de los parámetros del método

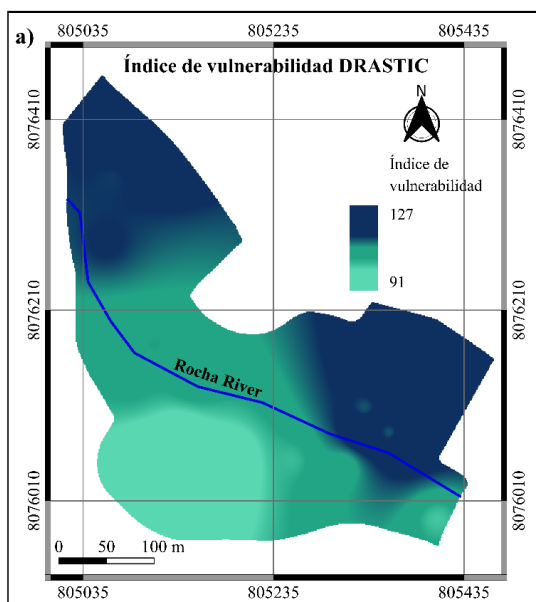
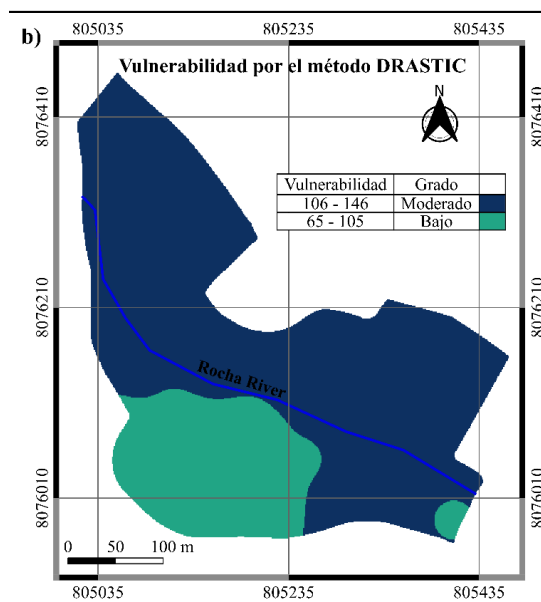
| Profundidad | Recarga neta | Medio Acuífero | Tipo suelo | Topografía | Impacto zona vadosa | Conductividad hidráulica |
|-------------|--------------|----------------|------------|------------|---------------------|--------------------------|
| D           | R            | A              | S          | T          | I                   | C                        |
| 5           | 4            | 3              | 2          | 1          | 5                   | 3                        |

(Aller et al., 1987)

Se utilizó Google AI Studio para la revisión lexicográfica de la redacción del texto de este artículo y los autores asumen la responsabilidad total de los contenidos de la publicación.

#### 4. Resultados y discusión

La Figura 7 muestra los valores del índice DRASTIC resultante; estos valores se enmarcan entre 91 y 127. La Figura 8 presentan al grado de vulnerabilidad según el índice DRASTIC encontrado. La vulnerabilidad para Huerta Mayu distingue a la zona en dos sectores: la parte norte y la parte este son calificadas de moderada vulnerabilidad, mientras que la parte más sureña se cataloga como de baja vulnerabilidad.

**Figura 7***Mapa del índice de vulnerabilidad***Figura 8***Vulnerabilidad según DRASTIC*

A pesar de la reducida extensión del área de estudio (17 ha), se identificaron dos zonas con grados de vulnerabilidad distintos. Este hallazgo se entiende si uno toma en cuenta la historia geológica del Cuaternario y la configuración de la red de drenaje local, elementos que han modelado las características hidrogeológicas del subsuelo. El mapa geomorfológico del Valle de Cochabamba identifica suelos de origen lacustre en la zona norte de Huerta Mayu mientras que, al sur, suelos aluviales al pie de la serranía del Cristo de la Concordia (Renner & Velasco, 2000). Por el análisis granulométrico de los suelos y los niveles de agua en los pozos y por las conductividades eléctricas medidas, se puede afirmar la existencia de dos acuíferos. Uno en la parte norte y otro en la parte sur. Se infiere que el acuífero freático norte, de mayor vulnerabilidad, está asociado a un paleocauce del río Wara Wara. Este antiguo curso, con depósitos aluviales más gruesos y permeables, seguiría funcionando como una vía preferencial para el flujo subterráneo proveniente del subálveo del Wara Wara. Esta hipótesis es respaldada por la presencia de vertientes estacionales en la zona norte, que manifiestan el carácter somero del acuífero durante la época húmeda. En contraste, la zona sur de baja vulnerabilidad se caracteriza por la presencia de materiales de origen lacustre, más finos y menos permeables, y una mayor profundidad del nivel freático, que en conjunto actúan como una barrera protectora más eficaz contra la infiltración de contaminantes. Los pozos excavados exhiben presencia de agua con variaciones próximas a un metro entre meses húmedos y lluviosos. Por otra parte, y conforme la información de los lugareños, en las faldas de la serranía del Cristo de la Concordia durante los meses de lluvia, se observan el alumbramiento de algunas vertientes pero que tienen presencia efímera pues desaparecen en los meses secos; el agua en los pozos excavados, de esta zona sur, está en torno a una profundidad de cinco metros pero que se agotan en la época de estiaje. La calidad del agua declina espacialmente, observándose lecturas de conductividad eléctrica tres veces mayor valor que en la zona norte. Se deduce que el agua subterránea en esta parte sur proviene de las fracturas en el macizo rocoso, el escurrimiento del agua de lluvias sobre las faldas del cerro y en menor grado, por la recarga debido al riego excedente en las parcelas. La textura del subsuelo es franco a franco limoso; por encima de él se halla el suelo agrícola, un suelo especialmente acondicionado por los agricultores para mejorar su textura y favorecer la retención de agua y humedad. Este aspecto reduce su conductividad hidráulica constituyendo una

primera barrera para la infiltración y protección del acuífero. Se entiende que este horizonte de suelo protege a los acuíferos del norte y del sur, pero la profundidad del nivel freático es mucho menor en el norte que en el sur. Estos elementos y la textura de los suelos, permiten explicar los dos valores de vulnerabilidades encontrados.

Debe tenerse en cuenta que la vulnerabilidad hallada para Huerta Mayu en esta investigación está referida a la posibilidad de la afectación por agua de lluvia y el riego en las parcelas, pero no así, a la posibilidad de que el acuífero freático pueda ser degradado por el flujo de solutos desde el río Rocha hacia el sistema subterráneo. Los resultados encontrados con DRASTIC se los considera consistentes con estudios realizados en otras zonas del Valle de Cochabamba; por ejemplo, en el caso de la determinación de la vulnerabilidad en el sistema hidrogeológico de Vinto Sipe Sipe (Zurita, 2007) indica una vulnerabilidad media general, pero en sitios particulares, una vulnerabilidad alta. Se atribuye aquello a la ponderación inducida por la textura de suelos gruesos (gravas gruesas y arenas) que son depositados por las quebradas que descienden con alta pendiente de la cordillera del Tunari. Así mismo el estudio de vulnerabilidad llevado adelante en la zona de La Maica (Gonzales, 2007) caracterizada por acuíferos de suelos de textura pesada, reportan vulnerabilidades entre media y baja. En aquel estudio se comparó los resultados de aplicar el método DRASTIC y el método GOD hallándose resultados similares entre ambos, a pesar que DRASTIC fue concebido para análisis detallados mientras que GOD es empleado en etapas iniciales de caracterización de acuíferos.

## 5. Conclusión

Se concluye que los valores de vulnerabilidad del acuífero freático, a pesar de la reducida extensión del área, explicable por la constitución de los horizontes de suelo resultados de los procesos climáticos desarrollados durante el Cuaternario. La zona noreste de vulnerabilidad moderada se asocia a la reducida profundidad a la que se halla el acuífero freático y al valor de la conductividad hidráulica que exhibe el subsuelo, condiciones que limitan un rápido transporte de contaminantes desde la superficie. En contraste, la zona de baja vulnerabilidad en el sur se caracteriza por la presencia de materiales de origen aluvial, pero con presencia de horizontes de suelo fino depositados durante la fase lacustrina del Valle, aspecto que confiere menor permeabilidad. A ello se suma la mayor la profundidad comparativa a la que se halla el acuífero somero. Por otra parte, el horizonte de suelo agrícola particularmente conformada por los agricultores de Huerta Mayu, se constituye como una barrera protectora eficaz contra la infiltración de contaminantes pero que, a la vez, limita el proceso de infiltración y percolación del agua de lluvia y riego hacia el acuífero somero subyacente. Este último aspecto ha sido estudiado por Salas (2025), encontrándose concordancia la vulnerabilidad y disposición natural que tienen los estratos de Huerta Mayu a ser afectados por la acción antrópica.

Si bien la vulnerabilidad es el primer paso en camino a la protección de los recursos hídricos subterráneos en la zona, se recomienda al Municipio de Sacaba y la Gobernación de Cochabamba que se realicen análisis de presencia de compuestos químicos en perfiles de suelos que permitan corroborar los resultados hallados con DRASTIC, particularmente en el área contigua al río Rocha por la posibilidad de migración de solutos desde el río hacia el acuífero de interés.

Los autores declaran no existir ningún tipo de conflicto de interés en la investigación realizada.



## 5. Referencias bibliográficas

- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J., Petty, R. J., & Hackett, G. (1987). DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. In US Environmental Protection Agency (p. 455).
- Auge, M. (2007). Vulnerabilidad de acuíferos - Conceptos y métodos. CONICET.
- Chang, F. J., Huang, C. W., Cheng, S. T., & Chang, L. C. (2017). Conservation of groundwater from over - exploitation - Scientific analyses for groundwater resources management. *Science of the Total Environment*, 598, 828–838.
- Civita, M., & Maio, M. (2004). Assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination: the Italian combined approach. *Geofísica Internacional*, 43(4), 513–532.
- Das, S. (2023). Groundwater Sustainability, Security and Equity: India Today and Tomorrow. *Journal of the Geological Society of India*, 99(1), 5–8. <https://doi.org/10.1007/s12594-023-2260-x>
- Doerfliger, N., Jeannin, P.-Y., & Zwahlen, F. (1999). Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method. *Environmental Geology*, 39, 165–176.
- Foster, S. S. D. (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy.
- Galloway, D. L., Bawden, G. W., Leake, S. A., & Honegger, D. G. (2008). Land subsidence hazards. In *Landslide and Land Subsidence Hazards to Pipelines: US Geological Survey Open-File Report*.
- Gonzalez A. (2007) “Spatial determination of the phreatic aquifer of La Maica” International Congress on Development, Environmental and Natural Resources: Multi-level and Multiscale Sustainability. Cochabamba, Bolivia
- Gonzales Amaya, A., Dahlin, T., Barmen, G., & Rosberg, J.-E. (2018). A geoelectrical and geomorphological based method for groundwater vulnerability assessment in alluvial fans: a case study in the Punata fan (Bolivia).
- Lara, E. L., Simeón, C. P., & Navarro, J. G. M. (2006). Los sistemas de información geográfica. *Geoenseñanza*, 11, 16.
- López Lara, E. J., Posada Simeón, J. C., & Moreno Navarro, J. G. (1998). Los sistemas de información geográfica.
- Martínez, M., Delgado, & Fabregat, V. (1998). Aplicación del método DRASTIC para la evaluación del riesgo de afección a las aguas subterráneas por una obra lineal. *Jornadas sobre la contaminación de las aguas subterráneas*.
- Muñoz Vásquez, G., & Pérez Mercado, L. F. (2024). Estudio del intercambio de agua y contaminantes del río Rocha con el acuífero freático de Huerta Mayu, empleando modelación matemática. Universidad Mayor de San Simón.
- Ortiz-Zamora, D., & Ortega-Guerrero, A. (2010). Evolution of long-term land subsidence near Mexico City: Review, field investigations, and predictive simulations. *Water Resources Research*, 46(1).
- Poland, J. F., & Davis, G. H. (1969). Land subsidence due to withdrawal of fluids.
- Renner, S., & Velasco, C. (2000). Geología e Hidrogeología del Valle Central de Cochabamba (Boletín del Servicio Nacional de Geología y Minería, Ed.; Vol. 34). SERGEOMIN.
- Rosales, L., Saavedra, O., López, B., & Ureña, J. (2024). Evaluación de la vulnerabilidad en pozos del Valle Central de Cochabamba. *Investigación & Desarrollo*, 24(2), 69–78.
- Salas García, B. (2025). Estimación de la recarga al acuífero freático de Huerta Mayu por infiltración de agua de riego, aplicando el modelo Hydrus 1D [Tesis de Licenciatura]. Universidad Mayor de San Simón.
- Schroeder, P. R. (1994). The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model: Engineering documentation for version 3. Risk Reduction Engineering Laboratory, Office of Research and Development.
- Shi, X., Wu, J., Ye, S., Zhang, Y., Xue, Y., Wei, Z., Li, Q., & Yu, J. (2008). Regional land subsidence

- simulation in Su-xi-Chang area and Shanghai City, China. *Engineering Geology*, 100(1–2), 27–42.
- Shiferaw, B. (2021). Addressing groundwater depletion: Lessons from India, the world's largest user of groundwater. *Worldbankgroup.Org/Blog/Addressinggroundwater-Depletion-Lessons-India-Worlds-Largest-User-Groundwater*.
- Stockholm Environment Institute US CENTER. (2019). *Formulación y Actualización del Plan Director de la cuenca del Río Rocha, bajo un enfoque de adaptación al cambio climático. Proyecto Piloto de Resiliencia Climática*.
- Toledo Medrano, R., & Amurrio Derpic, D. (2006). Evaluación de la calidad de las aguas del río Rocha en la jurisdicción de SEMAPA en la provincia Cercado de Cochabamba - Bolivia. *Acta Nova*.
- Vargas Quintero, M. C. (2010). *Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación* (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, Ed.).
- Watto, M. A., & Muger, A. W. (2016). Groundwater depletion in the Indus Plains of Pakistan: imperatives, repercussions and management issues. *International Journal of River Basin Management*, 14(4), 447–458.
- Zhu, L., Gong, H., Li, X., Wang, R., Chen, B., Dai, Z., & Teatini, P. (2015). Land subsidence due to groundwater withdrawal in the northern Beijing plain, China. *Engineering Geology*, 193, 243–255.
- Zurita C. (2007) “Evaluación de la vulnerabilidad a contaminación de las aguas subterráneas mediante aplicación de SIG” *International Congress on Development, Environmental and Natural Resources: Multi-level and Multiscale Sustainability*. Cochabamba, Bolivia.



*Artículos de*

*Revisión*

---



# Ventana de corte de juntas en pavimentos de concreto: una revisión sistemática basada en el fraguado y comportamiento mecánico temprano

## Joint saw-cutting window in concrete pavements: a systematic review based on setting characteristics and early-age mechanical behavior

Yhovana Monica Marca Colque<sup>1,\*</sup>, Jahel Sarvia Ledezma Perez<sup>2</sup>, Victor Hugo Miranda Challapa<sup>3</sup>, Joaquin Humberto Aquino Rocha<sup>4</sup>

\*Correo de correspondencia: monikyhovana@gmail.com

### Resumen

La fisuración a edades tempranas afecta significativamente el desempeño estructural y la durabilidad de los pavimentos de concreto. En este contexto, el momento de corte de juntas es un parámetro crítico para controlar la localización de fisuras. El objetivo del presente trabajo es analizar de manera crítica el estado del arte sobre la determinación de la ventana óptima de corte en pavimentos de concreto, considerando el comportamiento temprano del material, las propiedades mecánicas, los métodos de evaluación en campo, la activación de juntas y los aspectos de durabilidad. Se realizó una revisión sistemática de la literatura (RSL) utilizando las bases de datos *Scopus* y *Web of Science* para el periodo 2016–2026. Se seleccionaron 15 estudios con enfoques experimentales, numéricos y de campo. Los resultados evidencian que los enfoques empíricos basados únicamente en el tiempo son insuficientes para definir de manera confiable la ventana de corte, ya que no consideran la evolución real del concreto ni la influencia de las condiciones ambientales y de la mezcla. Se identificaron como parámetros más representativos el tiempo de fraguado, la resistencia mecánica temprana y el módulo elástico. Por otro lado, la combinación de técnicas no destructivas, sensores y sistemas de monitoreo en tiempo real representa el enfoque más completo para la toma de decisiones en campo, al permitir capturar la variabilidad espacial y temporal del material. Finalmente, se destaca que la ventana de corte influye no solo en el control de la fisuración, sino también en la evolución microestructural y la durabilidad de las juntas a largo plazo.

**Palabras clave:** fisuración temprana; pavimentos de concreto; corte de juntas; activación de juntas; método de madurez.

### Abstract

Early-age cracking significantly affects the structural performance and durability of concrete pavements. In this context, the timing of joint saw-cutting is a critical parameter for controlling crack localization. The objective of this study is to critically analyze the state of the art regarding the determination of the optimal saw-cutting window in concrete pavements, considering the early-age behavior of concrete, mechanical properties, field evaluation methods, joint activation, and durability aspects. A systematic literature review (SLR) was conducted using the *Scopus* and *Web of Science* databases for the period 2016–2026. A total of 15 studies involving experimental, numerical, and field-based approaches were selected. The results indicate that empirical approaches based solely on elapsed time are insufficient to reliably define the saw-cutting window, as they do not account for the actual evolution of concrete properties or the influence of environmental and mixture-related factors. Setting time, early-age mechanical strength, and elastic modulus were identified as the most representative parameters. Furthermore, the combination of nondestructive testing techniques, sensors, and real-time monitoring systems represents the most comprehensive approach for field decision-making, as it enables the assessment of both spatial and temporal variability of the material. Finally, the findings highlight that the saw-cutting window influences not only crack control but also the microstructural evolution and long-term durability of pavement joints.

**Keywords:** early-age cracking; concrete pavements; joint saw-cutting; joint activation; maturity method.

**Keywords:** early-age cracking; concrete pavements; joint saw-cutting; joint activation; maturity method.

<sup>1</sup> Licenciatura en Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0003-2190-1078>

<sup>2</sup> 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>

<sup>3</sup> 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>

<sup>4</sup> Laboratorio de Resistencia de Materiales y Estructuras, 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 desempeño estructural y la durabilidad de los pavimentos de concreto dependen en gran medida del control adecuado de la fisuración a edades tempranas (Safiuddin *et al.*, 2018; Abadin *et al.*, 2025). Durante las primeras horas después de la colocación, el concreto experimenta procesos simultáneos de hidratación, desarrollo de resistencia, contracción térmica y por secado, los cuales generan tensiones internas que pueden superar la resistencia a tracción del material, provocando la formación de fisuras no controladas (Hong *et al.*, 2023; Qu *et al.*, 2024). En este contexto, la construcción de juntas mediante el corte superficial (*saw-cutting*) constituye una de las estrategias más utilizadas para inducir y controlar la localización de las fisuras, evitando su aparición aleatoria y garantizando un comportamiento estructural adecuado del pavimento (Song *et al.*, 2022; Jamieson & White, 2023).

Sin embargo, el éxito del sistema de juntas depende críticamente del momento en que se realiza el corte. Si el corte se ejecuta demasiado temprano, cuando el concreto aún no ha desarrollado suficiente cohesión interna, puede producirse daño superficial en forma de desgranamiento (*raveling*). Por el contrario, si el corte se retrasa en exceso, las tensiones generadas por la contracción pueden dar lugar a fisuras aleatorias antes de que la junta sea capaz de activarse correctamente. Este comportamiento evidencia la existencia de una ventana de corte óptima, dentro de la cual es posible minimizar tanto el daño superficial como el riesgo de fisuración no controlada (Bautista & Basheer, 2008; Zhang *et al.*, 2022; Lu *et al.*, 2022).

Tradicionalmente, la determinación de esta ventana de corte se ha basado en criterios empíricos, tales como el tiempo transcurrido desde la colocación o la experiencia del operador en obra (Raoufi *et al.*, 2008). No obstante, estos enfoques presentan limitaciones significativas, ya que no consideran la influencia de variables fundamentales como las condiciones ambientales, el tipo de mezcla, la velocidad de hidratación o el desarrollo de propiedades mecánicas del concreto. En consecuencia, se han reportado numerosos casos de fisuración prematura y fallas en la activación de juntas, incluso en pavimentos correctamente diseñados desde el punto de vista estructural (DeSantis *et al.*, 2023; Darnell & Vandebossche, 2026).

En los últimos años, diversos estudios han propuesto enfoques más racionales para la determinación del momento óptimo de corte, basados en parámetros medibles del material, tales como el tiempo de fraguado, el desarrollo de la resistencia mecánica, el módulo elástico o el estado de deformaciones a edades tempranas (Tran & Roesler, 2020; Kosar *et al.*, 2023a). Igualmente, el avance de técnicas no destructivas, como el método de madurez y el ultrasonido sin contacto, ha permitido el monitoreo continuo del comportamiento del concreto en tiempo real, facilitando una mejor estimación de las condiciones óptimas para la ejecución del corte (Kosar *et al.*, 2023b; Yami *et al.*, 2024). Sin embargo, estos enfoques han sido desarrollados de manera fragmentada, enfocándose en variables específicas sin una integración clara entre los distintos mecanismos involucrados.

Adicionalmente, investigaciones recientes han demostrado que el desempeño del sistema de juntas no depende únicamente del momento de corte, sino también de factores como la activación efectiva de la junta, el espaciamiento entre juntas, las condiciones de curado posterior y la exposición ambiental durante la vida útil del pavimento (Shafiee & Maadani, 2022; Chen *et al.*, 2022). En particular, se ha observado que una junta correctamente cortada puede no activarse si las tensiones inducidas son insuficientes, o bien que las zonas de junta pueden constituir regiones críticas desde el punto de vista de durabilidad debido a su mayor porosidad y exposición a agentes agresivos (Tiznobaik & Bassuoni, 2019; Elbakari & Shehata, 2022).

En este contexto, resulta necesario desarrollar una visión integral que permita comprender la interacción entre los diferentes factores que controlan la formación de fisuras y el desempeño de las juntas en pavimentos de concreto mediante una revisión sistemática de la literatura. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo es analizar de manera crítica el estado del arte relacionado con la determinación de la ventana de corte en pavimentos rígidos, considerando los mecanismos de fisuración a edades tempranas, el desarrollo de propiedades del material, los métodos de evaluación en campo, la activación de juntas



y los aspectos de durabilidad. A partir de este análisis, se busca identificar las principales limitaciones de los enfoques actuales y proponer una base conceptual integrada que contribuya a mejorar la toma de decisiones en la práctica constructiva de pavimentos rígidos.

## 2. Metodología

La presente investigación se desarrolló mediante una RSL, planteando la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué variables determinan la ventana óptima de corte de juntas en pavimentos de concreto considerando el comportamiento temprano del material? El proceso metodológico se estructuró siguiendo lineamientos ampliamente aceptados para revisiones sistemáticas (Snyder, 2019; Chigbu *et al.*, 2023). La Figura 1 presenta de manera esquemática el procedimiento adoptado para la identificación y selección de los estudios considerados en esta investigación.

La búsqueda bibliográfica se realizó en las bases de datos de *Scopus* y *Web of Science*, donde se emplearon combinaciones de palabras clave relacionadas con el tema de estudio, utilizando operadores booleanos. La búsqueda se limitó a artículos publicados en inglés en revistas indexadas durante el periodo 2016-2026, priorizando estudios experimentales y numéricos.

Se definieron criterios para garantizar la relevancia y calidad de los estudios seleccionados. En el caso de los criterios de inclusión se consideraron: a) estudios relacionados con pavimentos de concreto; b) investigaciones que analicen el tiempo de corte de juntas o variables asociadas, y c) artículos con resultados experimentales, numéricos o de campo. Por otro lado, los criterios de exclusión se definieron como: a) estudios enfocados en pavimentos flexibles, b) trabajos sin relación directa con fisuración o juntas y c) artículos duplicados entre bases de datos

**Figura 1**  
*Metodología adoptada*



El proceso de selección de artículos incluyó inicialmente una recolección de artículos a partir de las bases de datos, posteriormente, una revisión de títulos y resúmenes para descartar estudios no relevantes, y finalmente análisis detallado del contenido completo de los artículos seleccionados. Por último, se seleccionaron 15 artículos que cumplen con los criterios establecidos y que representan de manera adecuada las diferentes dimensiones del problema estudiado. La Tabla 1 presenta el detalle de los artículos, considerando el enfoque realizado, la principal variable y los resultados más relevantes.

**Tabla 1**

Descripción de los estudios seleccionados

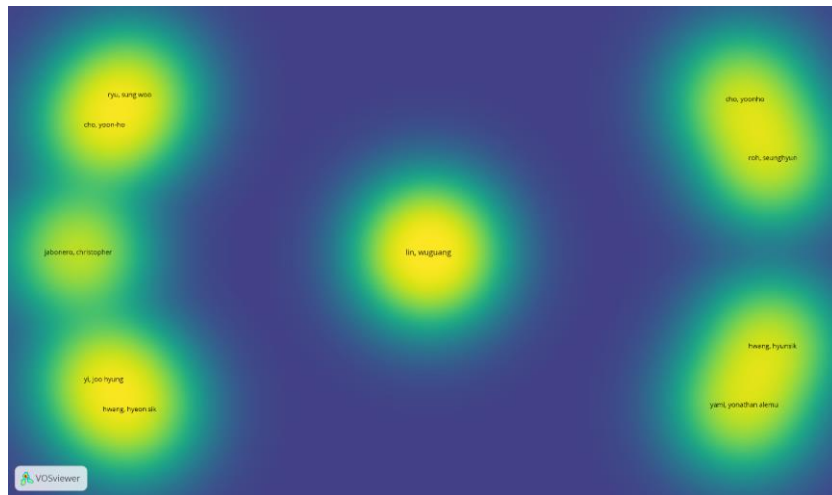
| #  | Autores                | Año   | Revista                                                  | Enfoque principal                                                                         | Variable clave                                                  | Resultado principal                                                                                                                                |
|----|------------------------|-------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Yami <i>et al.</i>     | 2024  | <i>Construction and Building Materials</i>               | Madurez + resistencia + penetración (enfoque integrado + IoT)                             | Madurez ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ ) + resistencia (MPa) | Ventana óptima: 670–760 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ ( $\approx 5\text{--}8$ MPa) a 20 $^{\circ}\text{C}$ ; sistema IoT mejora control en campo |
| 2  | Lin <i>et al.</i>      | 2020  | <i>KSCE Journal of Civil Engineering</i>                 | Deformaciones tempranas (campo)                                                           | Strain ( $\mu\epsilon$ ) + $\Delta T$                           | Ambiente controla fisuración; exterior $\approx 2\times$ mayor deformación                                                                         |
| 3  | Kosar <i>et al.</i>    | 2023a | <i>Journal of Traffic and Transportation Engineering</i> | NDT (madurez + ultrasonido) para decisión temprana                                        | Resistencia (MPa) + velocidad de onda (SWV)                     | Ultrasonido más preciso; método de madurez conservador; alta variabilidad espacial                                                                 |
| 4  | Tiznobaik & Bassuoni   | 2019  | <i>Road Materials and Pavement Design</i>                | Corte + curado de juntas                                                                  | Resistencia (MPa) + humedad + microestructura                   | Corte temprano expone a evaporación; mejor desempeño con corte tardío + curado                                                                     |
| 5  | Kashif <i>et al.</i>   | 2021  | <i>Applied Sciences</i>                                  | Inducción de fisuras mediante cortes parciales (ARCP vs CRCP)                             | Tensiones térmicas + FE + posición de corte                     | Las fisuras se inician en el corte; mejora el control del patrón de fisuración                                                                     |
| 6  | Kosar <i>et al.</i>    | 2023b | <i>Applied Sciences</i>                                  | Estimación de resistencia a edad temprana mediante NDT combinados (ultrasonido + madurez) | Velocidad de onda + temperatura                                 | Mejora la precisión en la estimación de resistencia y permite predecir el momento óptimo de intervención                                           |
| 7  | Elbakari & Shehata     | 2022  | <i>Canadian Journal of Civil Engineering</i>             | Método experimental para evaluar la durabilidad de juntas bajo sales y ciclos ambientales | Tipo de sal + ciclos FT/WD                                      | La combinación de ciclos y sales (especialmente $\text{CaCl}_2$ ) acelera el deterioro de juntas                                                   |
| 8  | Baral & Roesler        | 2023  | <i>Transportation Research Record</i>                    | Monitoreo en tiempo real de propiedades a edad temprana para determinar corte de juntas   | Tiempo de fraguado (tf) + SCM (fly ash - FA)                    | El corte debe definirse en función del fraguado; cortes tempranos generan <i>raveling</i>                                                          |
| 9  | Shafiee & Maadani      | 2022  | <i>Canadian Journal of Civil Engineering</i>             | Modelación de fisuración temprana bajo condiciones climáticas (HIPERPAV)                  | Temperatura + humedad + viento                                  | La temperatura es el factor dominante en el riesgo de fisuración temprana                                                                          |
| 10 | DeSantis <i>et al.</i> | 2023  | <i>Transportation Research Record</i>                    | Evaluación en campo de fisuración prematura en pavimentos urbanos                         | Activación de juntas y prácticas constructivas                  | 57% de secciones con fisuración prematura asociada a deficiencias en corte y diseño                                                                |
| 11 | Chen <i>et al.</i>     | 2022  | <i>Road Materials and Pavement Design</i>                | Activación de juntas y espaciamiento en sobrelosas (NDT – MIRA)                           | Espaciamiento de juntas                                         | Mayor espaciamiento $\rightarrow$ mayor activación ( $>95\%$ ); espaciamientos cortos $\rightarrow$ juntas no activadas                            |
| 12 | Tran & Roesler         | 2020  | <i>Journal of Transportation Engineering (ASCE)</i>      | Determinación del tiempo de corte mediante ultrasonido no contacto + visión computacional | tf (fraguado final) + RDI                                       | $t_s = 1.3 \cdot t_f + 39$ min para minimizar <i>raveling</i>                                                                                      |
| 13 | Sok <i>et al.</i>      | 2020  | ICE Transport                                            | Decisión de corte de juntas en RCCP basada en espaciamiento de fisuras y LTE              | Ls, LTE, abertura de fisura                                     | Espaciamiento natural ( $\approx 8\text{--}36$ m) no garantiza LTE $\rightarrow$ se requiere corte                                                 |
| 14 | Mahmood <i>et al.</i>  | 2025  | <i>International Journal of Pavement Engineering</i>     | Monitoreo <i>in situ</i> + método de madurez para definir corte                           | M(t), temperatura, resistencia                                  | Predicción de resistencia $\pm 10\%$ $\rightarrow$ permite corte seguro                                                                            |
| 15 | Song <i>et al.</i>     | 2022  | <i>Sensors</i>                                           | Ultrasonido sin contacto + daño real                                                      | VLR, E, daño (DI)                                               | Corte óptimo $\approx 11.5$ GPa                                                                                                                    |

## Análisis bibliométrico

El mapa de coautoría (Figura 2) evidencia la presencia de grupos de investigación relativamente aislados, con baja interconectividad entre autores. Se identifican *clusters* definidos y asociados a diferentes líneas de trabajo, indicando que la producción científica en este campo se ha desarrollado con poca colaboración entre grupos. Esta estructura muestra la ausencia de una red de investigación consolidada a nivel global sobre este tema, lo que puede limitar la integración de enfoques y el desarrollo de criterios unificados para la determinación de la ventana de corte en pavimentos de concreto.

**Figura 2**

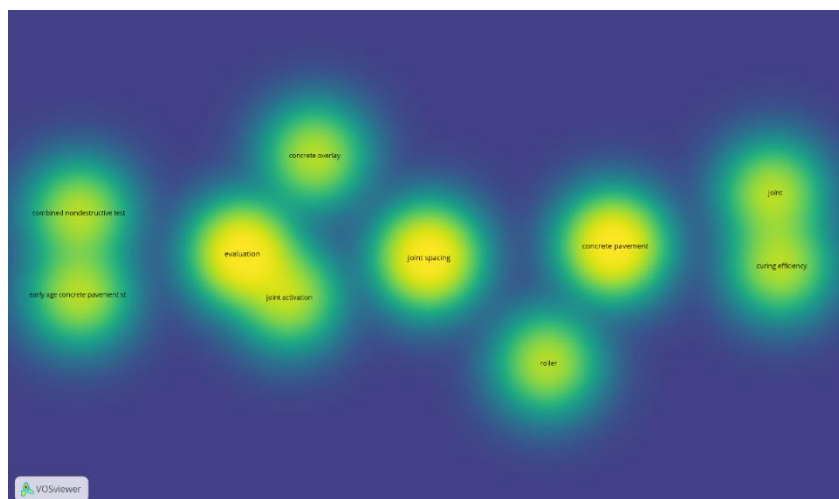
*Autores con mayor producción*



En caso de las palabras más frecuentes en los títulos (Figura 3), se puede observar que la investigación se concentra principalmente en cuatro ejes temáticos: la evaluación del comportamiento del pavimento, la activación de juntas, el espaciamiento de fisuras y el uso de técnicas no destructivas. Este resultado refleja un enfoque predominantemente aplicado, orientado al análisis de variables específicas del sistema. No obstante, se observa una limitada presencia de términos directamente relacionados con la determinación de la ventana de corte, demostrando que este problema ha sido abordado de manera indirecta a través de estudios parciales.

**Figura 3**

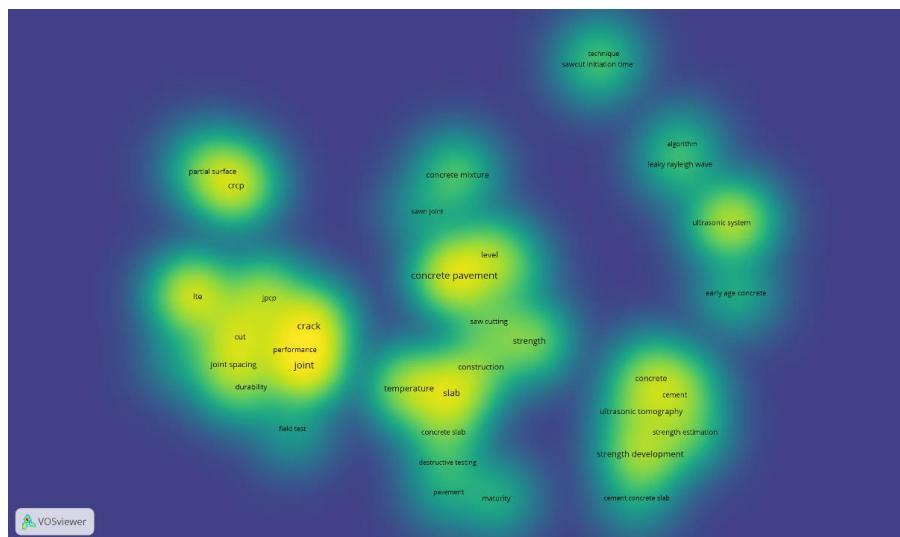
*Palabras más frecuentes en los títulos*



La Figura 4 muestra los términos más relevantes en los resúmenes, donde se evidencia una fuerte relación entre variables mecánicas (resistencia), condiciones ambientales (temperatura) y fenómenos físicos asociados a la fisuración (*crack*), así como elementos estructurales del pavimento (*joint slab*). Sin embargo, la determinación de la ventana de corte no aparece como un eje central de investigación, indicando un vacío en la literatura, donde los factores que controlan el comportamiento temprano del concreto han sido estudiados de forma aislada, sin integrarse plenamente en un criterio que permita definir de manera sistemática el momento óptimo de corte.

**Figura 4**

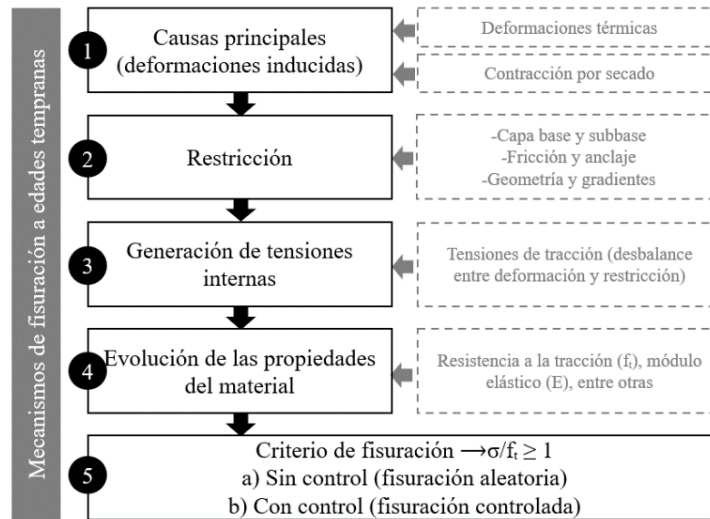
*Palabras más frecuentes en los resúmenes*



El análisis bibliométrico muestra una baja colaboración entre autores y un enfoque en líneas temáticas aisladas. Si bien se han estudiado ampliamente variables clave del comportamiento a edad temprana, como las propiedades mecánicas, las condiciones ambientales y los fenómenos de fisuración, la determinación de la ventana de corte no ha sido abordada de manera integrada como un eje central de investigación. Esto resalta la necesidad de un enfoque que relacione diferentes factores y permita establecer criterios más confiables para la definición del momento óptimo de corte en pavimentos de concreto.

### **Mecanismos de fisuración a edades tempranas**

De los estudios revisados, se evidencia que la fisuración a edades tempranas en pavimentos de concreto resulta de la interacción entre deformaciones inducidas (principalmente térmicas y por secado) y el desarrollo de las propiedades mecánicas del material. Estas deformaciones, al estar parcialmente restringidas, generan tensiones internas que pueden superar la resistencia a tracción del concreto, generando fisuras (Figura 5). Los gradientes térmicos han sido identificados por Lin *et al.* (2020) como uno de los factores más influyentes, reportando que las condiciones ambientales no controladas pueden duplicar las deformaciones térmicas respecto a ambientes confinados, intensificando fenómenos de curvatura (*curling*) y aumentando las tensiones de tracción. En la misma línea, Shafiee & Maadani (2022) analizaron la fisuración mediante la relación de las tensiones inducidas y la resistencia a la tracción ( $\sigma/f_t$ ), donde se identificó a la temperatura ambiente como el factor dominante, con una influencia cercana al 49% en el desarrollo de tensiones. Adicionalmente, la contracción por secado contribuye a la acumulación de deformaciones, especialmente en la superficie, donde la pérdida de humedad es más significativa. Aunque su magnitud inicial es menor que la térmica, su efecto combinado resulta determinante en la generación de tensiones (Lin *et al.*, 2020), lo que evidencia que la fisuración no puede explicarse mediante un único mecanismo.

**Figura 5***Mecanismos de fisuración*

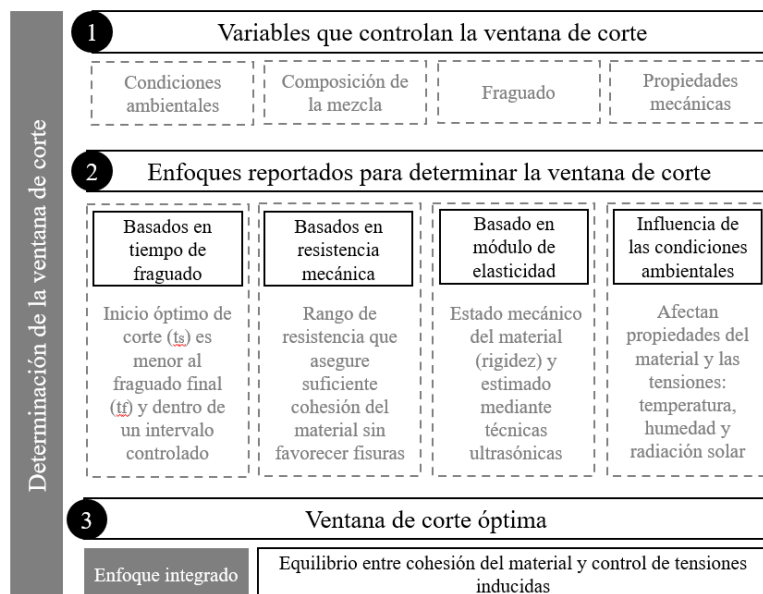
Por otra parte, también se ha reportado que la susceptibilidad a la fisuración depende de la evolución de la resistencia mecánica y del estado de cohesión interna. Yami *et al.* (2024) mostraron que la resistencia mecánica, asociada a la madurez del concreto, define rangos críticos en los cuales el material comienza a resistir las tensiones inducidas. En este sentido, Baral & Roesler (2023) evidenciaron que mezclas con altos contenidos de ceniza volante (*fly ash*, FA) retrasan el fraguado, prolongando el periodo de vulnerabilidad y aumentando el riesgo de fisuración si no se ajustan los tiempos de intervención. Por último, Song *et al.* (2022) propusieron al módulo elástico como un indicador representativo, demostrando que la rigidez del material, estimada mediante técnicas ultrasónicas, está directamente relacionada con su capacidad para resistir daño y deformaciones, sugiriendo que la fisuración depende no solo de la resistencia mecánica, sino también de la evolución de la rigidez. En general, la literatura muestra que los mecanismos de fisuración a edades tempranas están controlados por varios factores relacionados, lo que limita la aplicabilidad de enfoques basados en variables únicas, resaltando la necesidad de estrategias integradas para el control de fisuración, como la ejecución del corte de juntas.

**Determinación de la ventana de corte**

Si bien el momento de corte de juntas en pavimentos de concreto se define principalmente en función del tiempo transcurrido desde la colocación, este criterio no necesariamente representa el comportamiento real del concreto a edades tempranas. Esto se debe a que no se considera la influencia de otras variables, como las condiciones ambientales, la composición de la mezcla, el fraguado, la resistencia mecánica y el módulo elástico, las cuales controlan la evolución del material y su respuesta frente al corte (Figura 6). Por ejemplo, Baral & Roesler (2023) reportaron retrasos significativos en el fraguado de pavimentos con FA, lo que desplaza la ventana de corte hacia tiempos mayores. Por tanto, el uso de valores de tiempo fijos puede generar cortes prematuros, provocando *raveling*, o cortes tardíos, favoreciendo la formación de fisuras aleatorias. A continuación, se presentan los principales enfoques reportados en la literatura para la determinación de la ventana de corte.

**Figura 6**

*Determinación de la ventana de corte*



### Enfoques basados en tiempo de fraguado

El tiempo de fraguado ha sido identificado como un parámetro clave para la estimación del momento adecuado de corte, ya que marca la transición del concreto desde un estado plástico a uno sólido, asociado al inicio de su comportamiento mecánico. Baral & Roesler (2023) demostraron que este parámetro está fuertemente influenciado por la composición de la mezcla, especialmente en sistemas con altos contenidos de materiales cementicios suplementarios (*supplementary cementitious materials*, SCM), prolongando el periodo en el cual el material es vulnerable al daño superficial y desplazando la ventana de corte hacia tiempos mayores. De manera complementaria, Tran & Roesler (2020) establecieron una relación cuantitativa entre el tiempo de fraguado final ( $t_f$ ) y el momento óptimo de inicio de corte ( $t_s$ ), proponiendo que el corte debe realizarse después del fraguado final, pero dentro de un intervalo controlado que minimice el *raveling* sin favorecer la formación de fisuras aleatorias. Sin embargo, el uso del tiempo de fraguado como criterio único presenta limitaciones, ya que no incorpora directamente el desarrollo de la resistencia ni la rigidez del material, lo que restringe su capacidad para representar completamente el estado mecánico del concreto en el momento del corte.

La Tabla 2 presenta una síntesis comparativa de datos experimentales reportados en ambos estudios, incluyendo tiempos de fraguado, tiempos de corte recomendados y, cuando está disponible, el momento real de corte ejecutado en campo. Se observa una relación consistente entre  $t_f$  y  $t_s$ , donde el corte se realiza prematuramente respecto a los valores recomendados, generando daños superficiales.



**Tabla 2***Ventana de corte basada en el tiempo de fraguado del concreto*

| Mezcla                      | tf<br>(h) | Ts recomendado<br>(h) | ts<br>(min) | Corte<br>real (h) | Referencia             |
|-----------------------------|-----------|-----------------------|-------------|-------------------|------------------------|
| Control (campo)             | 4.2       | 6.11                  | 367         | 4.4               | Baral & Roesler (2023) |
| HVFAC (campo)               | >7.0      | >9.75 (~10)           | >585        | 5.6–6.3           | Baral & Roesler (2023) |
| Control (lab, UTS)          | 5.4       | 7.7                   | 462         | —                 | Baral & Roesler (2023) |
| Control (lab, calorimetría) | 5.7       | 8.06                  | 484         | —                 | Baral & Roesler (2023) |
| HVFAC (lab, UTS)            | 14        | 18.85                 | 1131        | —                 | Baral & Roesler (2023) |
| HVFAC (lab, calorimetría)   | 15.2      | 20.41                 | 1225        | —                 | Baral & Roesler (2023) |
| C-39                        | 4.6       | 6.63                  | 398         | —                 | Tran & Roesler (2020)  |
| C-45                        | 5.52      | 7.82                  | 469         | —                 | Tran & Roesler (2020)  |
| C-50                        | 6.73      | 9.4                   | 564         | —                 | Tran & Roesler (2020)  |
| C-FA-39                     | 4.33      | 6.28                  | 377         | —                 | Tran & Roesler (2020)  |
| C-FA-45                     | 6.6       | 9.23                  | 554         | —                 | Tran & Roesler (2020)  |
| C-FA-50                     | 7.4       | 10.27                 | 616         | —                 | Tran & Roesler (2020)  |

**Enfoques basados en resistencia mecánica**

A medida que el concreto desarrolla resistencia mecánica, aumenta su capacidad para resistir tanto las tensiones inducidas como el daño superficial asociado al corte. Yami *et al.* (2024) propusieron rangos de resistencia entre 5 y 8 MPa como condiciones óptimas para la ejecución del corte, basándose en el método de madurez. Estos valores representan un equilibrio en el cual el material presenta suficiente cohesión interna para evitar el *raveling*, sin favorecer la formación de fisuras no controladas. Por su parte, Kosar *et al.* (2023a) demostraron que la resistencia a edades tempranas puede presentar alta variabilidad dentro del pavimento, lo que implica que el momento óptimo de corte no es uniforme en toda la superficie del pavimento. Por lo que el uso de valores promedio puede conducir a decisiones no representativas del estado real del material. En este sentido, Kosar *et al.* (2023b) evidenciaron que la combinación de métodos no destructivos, como el método de madurez y el ultrasonido, mejora significativamente la estimación de la resistencia mecánica en campo, integrando tanto la capacidad predictiva como la evaluación local.

La Tabla 3 presenta un resumen de los parámetros utilizados, los rangos o umbrales propuestos y los métodos de estimación asociados en los enfoques basados en resistencia mecánica. Esta comparación permite evidenciar la transición desde criterios basados en resistencia directa hacia enfoques indirectos e integrados, así como las limitaciones inherentes a cada metodología en la determinación del momento óptimo de corte.

**Tabla 3**

*Enfoques basados en resistencia mecánica para la determinación de la ventana de corte en pavimentos de concreto*

| Tipo de resistencia                 | Umbral (MPa)                        | Método de estimación                | Variable asociada                                         | Criterio de corte / ventana                                                                                            | Referencia                  |
|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Inferida mediante método de madurez | 5–8                                 | Madurez + resistencia a penetración | $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$                           | 670–760 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ (20 $^{\circ}\text{C}$ )<br>1130–1754 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ (baja T) | Yami <i>et al.</i> (2024)   |
| Compresión                          | 8.2–24.1                            | Ensayo destructivo (normativo)      | Edad (h)                                                  | Apertura cuando se alcanza resistencia mínima                                                                          | Kosar <i>et al.</i> (2023a) |
| Compresión / flexión                | $\approx 20.7$ (caso de aplicación) | Ultrasonido + madurez               | Velocidad de onda (m/s) + $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ | Corte basado en resistencia estimada en campo                                                                          | Kosar <i>et al.</i> (2023b) |

### Enfoques basados en el módulo elástico

Song *et al.* (2022) demostraron que el módulo elástico del concreto a edades tempranas puede estimarse mediante técnicas ultrasónicas sin contacto, estableciendo una relación directa entre la velocidad de propagación de ondas tipo *leaky Rayleigh* y la rigidez del material. A partir de ensayos experimentales y análisis del daño superficial, los autores identificaron que el corte óptimo se alcanza cuando el módulo elástico del concreto se encuentra aproximadamente en el rango de 10.5 a 12.2 GPa, con un valor óptimo cercano a 11.5 GPa, asociado a un índice de daño inferior al 1%. En particular, se observó que valores cercanos a 10.5 GPa corresponden al inicio de la propagación de ondas (inicio de rigidez efectiva), donde aún existe aproximadamente un 5% de daño por *raveling*, mientras que a 11.3–11.6 GPa se identifica un punto de inflexión en el comportamiento del daño, marcando una transición hacia condiciones seguras de corte. Este enfoque se diferencia de aquellos basados únicamente en el tiempo, ya que el módulo elástico integra el estado mecánico global del material, incluyendo la evolución de la rigidez, la capacidad de transmisión de esfuerzos y el desarrollo de la cohesión interna. Sin embargo, su aplicación en campo depende de la disponibilidad de técnicas de medición especializadas y de una adecuada calibración de la relación entre velocidad de onda y propiedades mecánicas, lo que puede limitar su implementación práctica como criterio único.

### Influencia de las condiciones ambientales

Shafiee & Maadani (2022) demostraron que las condiciones ambientales son determinantes en la definición de la ventana de corte, siendo la temperatura ambiente el factor dominante en la generación de tensiones tempranas en el concreto. A partir de un análisis de sensibilidad basado en modelos mecanísticos (HIPERPAV), los autores identificaron que la temperatura del aire presenta el mayor impacto sobre el riesgo de fisuración, con un índice de sensibilidad cercano al 49%, superando significativamente a otras variables como la humedad, la velocidad del viento o la cobertura nubosa. Por otro lado, se observó que incrementos en la temperatura máxima diaria (HDT) conducen a un aumento simultáneo de la resistencia temprana y de las tensiones inducidas, lo que puede resultar en un incremento del riesgo de fisuración a edades tempranas. Por ejemplo, bajo escenarios de cambio climático, el riesgo de fisuración se incrementa de aproximadamente 49.2% en condiciones históricas a 53.2% en escenarios futuros, evidenciando la fuerte dependencia del comportamiento del concreto con las condiciones térmicas. En este contexto, la ventana de corte no puede definirse como un intervalo fijo, sino como una función dependiente de variables ambientales como la temperatura, la humedad, la radiación solar y las condiciones de viento. Estas

variables controlan simultáneamente el fraguado, el desarrollo de la resistencia mecánica y la generación de tensiones térmicas y de retracción, determinando así el equilibrio crítico entre cohesión interna y riesgo de fisuración en el concreto.

### Métodos de evaluación en campo

Un aspecto que se resalta para la determinación adecuada del momento óptimo de corte de juntas es la evaluación del estado del concreto en condiciones reales de obra, una vez que los enfoques basados en tiempo transcurrido o en laboratorio representan varias limitaciones. Por ello, se han desarrollado diversos métodos de evaluación en campo que permiten estimar el desarrollo de propiedades mecánicas a edades tempranas, cuyos detalles se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 4**

*Métodos de evaluación en campo*

| Método             | Propiedades evaluadas                        | Tipo      | Variabilidad espacial | Información en tiempo real | Facilidad de implementación | Costo |
|--------------------|----------------------------------------------|-----------|-----------------------|----------------------------|-----------------------------|-------|
| Madurez            | Resistencia mecánica                         | Indirecto | Baja                  | Parcial                    | Alta                        | Bajo  |
| Ultrasónico        | Resistencia mecánica (módulo de elasticidad) | Directo   | Alta                  | Inmediata                  | Media                       | Medio |
| Monitoreo/sensores | Temperatura, deformación, etc.               | Directo   | Alta                  | Continua                   | Media - baja                | Alto  |

### Método de madurez

El método de madurez es una de las técnicas más utilizadas para estimar el desarrollo de la resistencia del concreto en función del comportamiento térmico del material. Este enfoque permite relacionar la evolución de la temperatura con el incremento de la resistencia mecánica, proporcionando una herramienta práctica para la toma de decisiones en obra. Yami *et al.* (2024) demostraron que la madurez puede emplearse para definir rangos de resistencia adecuados para la ejecución del corte. Mahmood *et al.* (2025) también validaron la aplicabilidad del método en condiciones reales de campo, mostrando una precisión del orden de  $\pm 10\%$  en la predicción de la resistencia mecánica. Sin embargo, los autores indicaron que el método de madurez presenta limitaciones importantes, ya que proporciona una estimación promedio del comportamiento del material y no captura la variabilidad espacial, lo que puede afectar la precisión en la determinación del momento óptimo de corte.

### Técnicas ultrasónicas

Las técnicas ultrasónicas permiten evaluar de forma no destructiva el estado del concreto a edades tempranas mediante la propagación de ondas cuya velocidad se relaciona con sus propiedades mecánicas. Kosar *et al.* (2023a) mostraron que la velocidad ultrasónica se correlaciona directamente con el desarrollo de la resistencia mecánica, destacando además su capacidad para detectar variaciones espaciales dentro del pavimento. Por su parte, Song *et al.* (2022) demostraron que estas técnicas permiten estimar el módulo elástico del concreto y establecer condiciones

adecuadas para la ejecución del corte. Adicionalmente, Baral & Roesler (2023) y Tran & Roesler (2020) evidenciaron que el uso de ultrasonido sin contacto permite identificar el tiempo de fraguado y evaluar el *raveling*, proporcionando información clave para definir la ventana de corte de manera objetiva.

### **Sistemas de monitoreo y sensores en tiempo real**

Algunos estudios han propuesto el uso de sistemas de monitoreo en tiempo real basados en sensores internos en el concreto, capaces de registrar variables como temperatura, deformaciones y evolución de propiedades mecánicas, características importantes para la determinación de la ventana de corte. Mahmood *et al.* (2025) demostraron que el uso de sensores integrados permite monitorear simultáneamente la temperatura y las deformaciones, facilitando la estimación de la resistencia mediante el método de madurez en condiciones reales de servicio. Song *et al.* (2022) evidenciaron que sistemas inalámbricos y sin contacto pueden proporcionar información en tiempo real sobre el estado mecánico del material, mejorando la toma de decisiones en obra. En general, este enfoque permite implementar estrategias de control más precisas y adaptadas a las condiciones reales del pavimento.

A pesar de los avances en los métodos de evaluación en campo, aún existen desafíos importantes para su implementación. Kosar *et al.* (2023b) señalaron que ningún método por sí solo es suficiente para caracterizar completamente el comportamiento del concreto a edades tempranas, recomendando la combinación de técnicas para mejorar la precisión y confiabilidad de las estimaciones. Entre las principales limitaciones se encuentran la necesidad de calibración previa de los modelos, especialmente en el método de madurez, la sensibilidad de los resultados a las condiciones ambientales, la dependencia de equipos especializados en técnicas ultrasónicas y la dificultad para capturar simultáneamente la variabilidad espacial y temporal del material.

### **Activación de juntas y control de fisuración**

El objetivo principal del corte de juntas en pavimentos de concreto es inducir la formación de fisuras en ubicaciones predeterminadas, permitiendo controlar su espaciamiento, orientación y apertura. Sin embargo, la efectividad de este mecanismo no depende únicamente del momento de corte, sino de la activación real de la junta, es decir, de la formación efectiva de una fisura debajo del corte. El corte de juntas actúa como una discontinuidad geométrica que genera concentraciones de tensiones, promoviendo la iniciación de fisuras en su ubicación. La Figura 7 presenta el detalle reportado en la literatura sobre la activación de juntas y el control de fisuración.

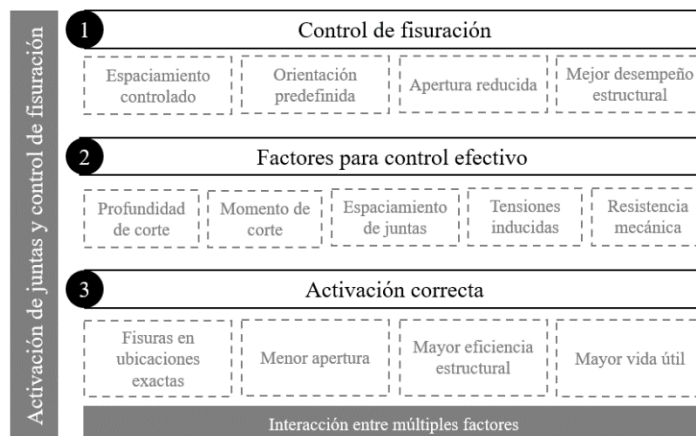
Kashif *et al.* (2021) demostraron que los cortes superficiales parciales (*partial saw-cuts*) inducen fisuras mediante la reducción de la sección efectiva del material, generando un punto preferencial de falla. Igualmente, la profundidad del corte se identifica como un parámetro importante, ya que mayores profundidades incrementan la probabilidad de inducir fisuras en la ubicación deseada, mejorando el control del patrón de fisuración. Por tanto, el corte no solo controla la localización de las fisuras, sino que también participa activamente en su formación.

A pesar de la ejecución del corte, no todas las juntas se activan correctamente. DeSantis *et al.* (2023), a partir de evaluaciones en pavimentos reales, evidenciaron que una proporción significativa de juntas no presenta fisuración efectiva, lo que conduce a la aparición de fisuras aleatorias. Este comportamiento indica que la presencia de una junta no garantiza su funcionamiento, siendo necesario que las tensiones inducidas superen localmente la resistencia del concreto. En consecuencia, una junta no activada se comporta como una sección continua, incrementando el tamaño efectivo del elemento y las tensiones internas. Por otro lado, Chen *et al.* (2022) demostraron que espaciamientos excesivamente cortos pueden reducir la probabilidad de activación, debido a que las tensiones generadas por contracción no son suficientes para inducir fisuras en cada junta. Este resultado evidencia que un

mayor número de juntas no necesariamente mejora el control de fisuración. Por el contrario, un espaciamiento inadecuado puede disminuir la eficiencia del sistema y favorecer la formación de fisuras no controladas.

**Figura 7**

*Activación de juntas y control de fisuración*



En ausencia de corte, las fisuras se desarrollan de manera natural, con espaciamientos significativamente mayores. Sok *et al.* (2020) reportaron que, en pavimentos de concreto compactado con rodillo (*roller-compacted concrete*, RCC), el espaciamiento de fisuras puede alcanzar valores entre 15 y 23 m, lo que incrementa la apertura de fisura. Este fenómeno afecta directamente la eficiencia de transferencia de carga (*load transfer efficiency*, LTE), reduciendo la capacidad estructural del pavimento. En contraste, el corte de juntas permite controlar el espaciamiento y la apertura de fisuras, mejorando el desempeño estructural.

En general, los estudios muestran que el control de fisuración no depende únicamente de la ejecución del corte, sino de la interacción entre múltiples factores, incluyendo la profundidad y el momento de corte, el espaciamiento entre juntas y la capacidad del sistema para inducir la fisura en la ubicación deseada. Por tanto, el control efectivo de fisuración está condicionado por la correcta inducción y activación de las juntas, así como por su impacto en el desempeño estructural del pavimento.

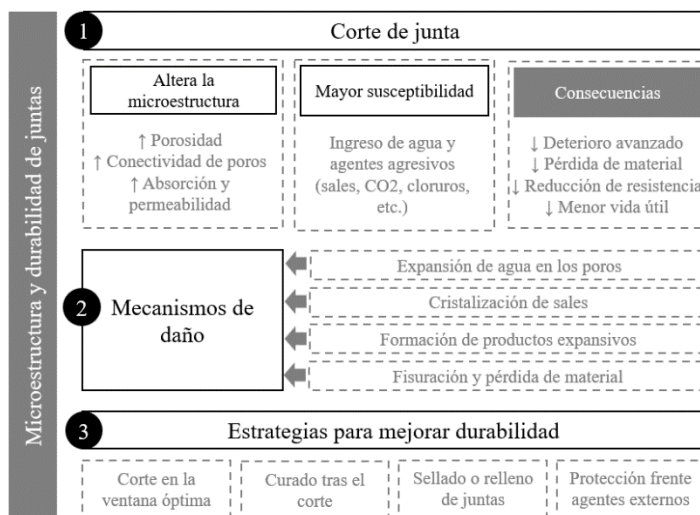
### Microestructura y durabilidad de juntas

Las juntas en pavimentos de concreto constituyen una de las zonas más críticas desde el punto de vista de durabilidad, debido a su exposición directa al ambiente y a las modificaciones microestructurales inducidas por el proceso de corte. A diferencia del material interno, las superficies generadas presentan mayor porosidad, absorción y susceptibilidad al ingreso de agentes agresivos. La Figura 8 resume los mecanismos y estrategias respecto a la durabilidad de juntas reportadas en la literatura.

Tiznobaik & Bassuoni (2019) demostraron que estas zonas presentan una microestructura más porosa debido a la pérdida de humedad posterior al corte, favoreciendo la formación de una red de poros más conectada y la exposición de la zona de transición interfacial (*interfacial transition zone*, ITZ). Como consecuencia, las juntas presentan mayor absorción y permeabilidad, facilitando el ingreso de agua y agentes agresivos. En particular, las juntas sin tratamiento muestran valores de absorción significativamente superiores respecto a aquellas con curado o sellado.

adecuado, lo que las convierte en puntos críticos de deterioro. En contraste, el uso de compuestos de curado o relleno de juntas permite reducir la porosidad y mejorar la densidad del material en esta región.

**Figura 8**  
*Durabilidad de juntas*



Por otra parte, Elbakari & Shehata (2022) demostraron que la acumulación de sales descongelantes, combinada con ciclos de congelamiento y deshielo (*freeze-thaw*), intensifica significativamente el deterioro en las zonas de junta. Los mecanismos de daño incluyen la expansión del agua en los poros, la cristalización de sales y la formación de compuestos expansivos como el oxiclورو de calcio, lo que conduce a fisuración, pérdida de material y reducción de la resistencia mecánica. Además, la combinación de ciclos de congelamiento y deshielo y humedecimiento y secado (*wet-dry*) produce un deterioro más severo que el congelamiento aislado, evidenciando la importancia de considerar condiciones ambientales combinadas.

Este comportamiento también ha sido observado en condiciones reales de servicio. Por ejemplo, DeSantis *et al.* (2023) reportaron deterioro prematuro en zonas de junta, asociado tanto a problemas de activación como a la exposición ambiental. Si bien el proceso de corte es necesario para el control de fisuración, introduce una heterogeneidad microestructural que puede comprometer la durabilidad del pavimento si no se implementan estrategias adecuadas de protección y mantenimiento.

### Influencia de materiales sostenibles

El uso de SCMs y cementos de bajo impacto ambiental ha ganado relevancia en pavimentos de concreto debido a sus beneficios en desempeño y reducción del consumo de cemento Portland. No obstante, estos materiales modifican significativamente el comportamiento a edades tempranas, afectando directamente la determinación de la ventana de corte. Baral & Roesler (2023) demostraron que mezclas con altos contenidos de FA presentan incrementos significativos en el tiempo de fraguado, prolongando el periodo en el cual el concreto mantiene baja cohesión interna. Esto extiende el intervalo de vulnerabilidad frente al daño superficial y desplaza la ventana de corte hacia tiempos mayores, lo que hace inadecuada la aplicación de criterios basados en tiempos predefinidos para mezclas convencionales. En contraste, cementos alternativos como los sulfoaluminatos de calcio belítico (*belitic calcium sulfoaluminate*, BCSA) presentan un desarrollo acelerado de propiedades mecánicas. Mahmood *et al.*



(2025) evidenciaron que estos sistemas pueden alcanzar resistencias adecuadas en pocas horas, reduciendo significativamente los tiempos de intervención. Además, presentan menores deformaciones por contracción en etapas tempranas, lo que puede disminuir el riesgo de fisuración. Sin embargo, la rápida evolución de sus propiedades genera una ventana de corte más estrecha, que requiere un control más preciso en tiempo real. Por tanto, la ventana de corte no puede definirse de manera independiente del material, sino que debe adaptarse a su cinética de hidratación y al desarrollo de sus propiedades mecánicas.

### 3. Discusión general

El análisis de los estudios muestra que la determinación de la ventana de corte en pavimentos de concreto ha sido tradicionalmente abordada mediante enfoques parciales, basados en variables individuales como el tiempo, la resistencia mecánica o el fraguado. Sin embargo, los resultados obtenidos en la revisión muestran que estos enfoques son insuficientes cuando se consideran de manera aislada, ya que no capturan la complejidad del comportamiento del concreto a edades tempranas. En particular, se ha demostrado que las condiciones ambientales, especialmente la temperatura, controlan simultáneamente el desarrollo de deformaciones y tensiones en el concreto (Lin *et al.*, 2020; Shafiee & Maadani, 2022), mientras que la composición de la mezcla influye directamente en la cinética de hidratación y el tiempo de fraguado (Baral & Roesler, 2023). Esta interacción define el contexto inicial en el cual evoluciona el material, condicionando la ventana de tiempo disponible para la ejecución del corte. Por tanto, los criterios empíricos basados únicamente en el tiempo transcurrido desde la colocación no constituyen un indicador confiable para la definición de la ventana de corte, debido a la limitación de representar el estado real del concreto. El fraguado marca el inicio del comportamiento mecánico del concreto, pero no es suficiente para garantizar un desempeño adecuado durante el corte. Se ha demostrado que el momento óptimo de intervención ocurre después del fraguado final, dentro de un intervalo en el cual se minimiza el *raveling* y se evita la formación de fisuras aleatorias (Tran & Roesler, 2020). Este comportamiento está directamente relacionado con el desarrollo de la resistencia y la rigidez del material, parámetros que evolucionan de manera no lineal durante las primeras horas (Yami *et al.*, 2024; Song *et al.*, 2022). Igualmente, se ha evidenciado que la resistencia a edades tempranas presenta variabilidad espacial dentro del elemento, lo que implica que el estado del concreto no es uniforme en toda la superficie del pavimento (Kosar *et al.*, 2023a). En este sentido, el uso de métodos de evaluación en campo, como la combinación de técnicas no destructivas, permite mejorar la estimación del estado real del material y, por tanto, la definición de la ventana de corte (Kosar *et al.*, 2023b; Mahmood *et al.*, 2025). La revisión muestra que la integración de técnicas ultrasónicas, métodos de madurez, sensores embebidos y sistemas de monitoreo en tiempo real constituye actualmente el enfoque más completo para la toma de decisiones en campo, al permitir capturar simultáneamente la evolución temporal y la variabilidad espacial del concreto.

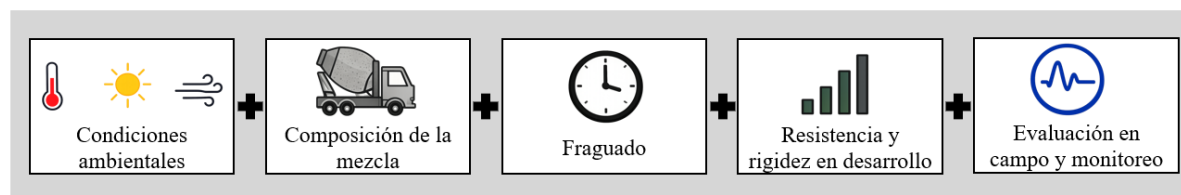
Por otro lado, el corte de juntas no garantiza por sí solo el control de la fisuración. La literatura muestra que la efectividad del sistema depende de la activación real de las juntas, es decir, de la formación efectiva de fisuras en las ubicaciones deseadas. En ese sentido, factores como la profundidad del corte (Kashif *et al.*, 2021), el espaciamiento entre juntas (Chen *et al.*, 2022) y la adecuada ejecución en obra (DeSantis *et al.*, 2023) son determinantes en el comportamiento del pavimento. Adicionalmente, el proceso de corte introduce modificaciones en la microestructura del concreto, generando zonas con mayor porosidad y susceptibilidad al ingreso de agentes agresivos (Tiznobaik & Bassuoni, 2019). Estas condiciones, combinadas con la exposición a sales y ciclos de congelamiento y deshielo, pueden acelerar el deterioro de las juntas y afectar la durabilidad del pavimento (Elbakari & Shehata, 2022). En consecuencia, la influencia de la ventana de corte no se limita al control de las tensiones y la

fisuración temprana, ya que también condiciona la evolución microestructural y el desempeño durable de las zonas de junta durante la vida útil del pavimento.

La ventana de corte de forma global es una función del estado progresivo del concreto, condicionada por la interacción entre las condiciones ambientales, la composición de la mezcla y el desarrollo de sus propiedades mecánicas. Por tanto, la toma de decisiones debe basarse en el uso de técnicas de monitoreo en tiempo real y la combinación de métodos de evaluación que permitan mejorar la precisión en la determinación del momento óptimo de corte (Figura 9), facilitando la adaptación de las decisiones constructivas a las condiciones específicas de cada proyecto.

**Figura 9**

*Factores importantes para la determinación de la ventana óptima de corte*



Finalmente, puede establecerse una relación conceptual directa entre la determinación de la ventana de corte y los factores que la condicionan. En el primer caso (Figura 6), se muestra que la ventana de corte está controlada por la interacción entre el fraguado, las propiedades mecánicas, las condiciones ambientales y la composición de la mezcla, mientras que la Figura 9 muestra cómo estas variables pueden integrarse en la práctica mediante métodos de evaluación en campo y monitoreo continuo. En este sentido, la transición desde un enfoque teórico hacia una aplicación efectiva en obra depende de la capacidad de evaluar el estado real del concreto mediante técnicas no destructivas, sensores y sistemas de adquisición de datos en tiempo real. Por tanto, el monitoreo in situ constituye una relación fundamental entre la comprensión de los mecanismos que gobiernan la ventana de corte y la toma de decisiones constructivas bajo condiciones reales de servicio.

## 4. Conclusión

La presente RSL evidencia que la determinación de la ventana de corte en pavimentos de concreto no puede basarse únicamente en criterios empíricos, como el tiempo transcurrido desde la colocación, debido a la complejidad del comportamiento del material a edades tempranas. Los resultados muestran que los enfoques basados exclusivamente en el tiempo son insuficientes para representar el estado real del concreto y, por tanto, no constituyen una base confiable para la definición del momento óptimo de corte. En particular, se identificó que la evolución del concreto, en términos de fraguado, resistencia mecánica y rigidez, condiciona directamente su respuesta frente al corte y el control de la fisuración.

Adicionalmente, el desempeño del sistema de juntas depende no solo del momento de corte, sino de su activación efectiva y de parámetros de diseño como la profundidad y el espaciamiento, los cuales influyen en la formación y localización de fisuras. El proceso de corte introduce modificaciones microestructurales que pueden comprometer la durabilidad, evidenciando un compromiso entre el control de fisuración y el desempeño a largo plazo. En este sentido, la revisión demuestra que la ventana de corte debe ser entendida no solo como una herramienta para

controlar tensiones y fisuras tempranas, sino también como un factor que influye directamente en la evolución microestructural y la durabilidad futura de las juntas.

Finalmente, los resultados destacan la importancia de emplear parámetros medibles en campo y herramientas de monitoreo para mejorar la precisión en la determinación del momento de corte. La integración de técnicas no destructivas, sensores y sistemas de monitoreo en tiempo real representa actualmente el enfoque más completo para la toma de decisiones en obra, al permitir capturar la variabilidad espacial y temporal del concreto. Además, se identifica como una línea prioritaria de investigación futura el desarrollo de metodologías integradas que permitan transferir estos criterios a condiciones reales de servicio y a mezclas con materiales sostenibles.

**Conflicto de intereses:** Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

## 5. Referencias bibliográficas

- Abadin, M. J., Kadir, A., Roy, S. K., Wei, Z. Z., & Rahman, M. W. (2025). First experiences with continuously reinforced concrete pavement in national highway of Bangladesh. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 18(1), 114-141.
- Baral, A., & Roesler, J. R. (2023). Early age monitoring of high cement replacement mixtures for pavement. *Transportation Research Record*, 2677(1), 1646-1657.
- Bautista, F. E., & Basheer, I. (2008). Jointed plain concrete pavement (JPCP) preservation and rehabilitation design guide. California Department of Transportation.
- Chen, Y. A., Taylor, P. C., Ceylan, H., & Wang, X. (2022). Evaluation of joint activation and joint spacing in concrete overlays. *Road Materials and Pavement Design*, 23(12), 2914-2923.
- Chigbu, U. E., Atiku, S. O., & Du Plessis, C. C. (2023). The science of literature reviews: Searching, identifying, selecting, and synthesising. *Publications*, 11(1), 2.
- Darnell, M., & Vandenbossche, J. (2026). Impact of Fatigue Exposure on Extensibility Performance of Standard Joint Reservoir and Sealant Designs for Jointed Plain Concrete Pavements. *Transportation Research Record*, 03611981261425974.
- DeSantis, J. W., Roesler, J., & Cantu, R. M. (2023). Assessing Premature Cracks in Urban Concrete Pavements. *Transportation Research Record*, 2677(5), 367-375.
- Elbakari, R., & Shehata, M. H. (2022). A proposed laboratory method to evaluate the durability of concrete pavement joints against freezing in the presence of deicer salts. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 49(8), 1351-1365.
- Hong, M., Lei, D., Hu, F., & Chen, Z. (2023). Assessment of void and crack defects in early-age concrete. *Journal of Building Engineering*, 70, 106372.
- Jamieson, S., & White, G. (2023). Review of rigid aircraft pavement joint types, effectiveness, distress, maintenance, and analysis. In *Airfield and Highway Pavements 2023* (pp. 9-21).
- Kashif, M., Naseem, A., Iqbal, N., De Winne, P., & De Backer, H. (2021). Evaluating the early-age crack induction in advanced reinforced concrete pavement using partial surface saw-cuts. *Applied Sciences*, 11(4), 1659.
- Kosar, K., de Salles, L. S., Sharifi, N. P., Vandenbossche, J., & Khazanovich, L. (2023a). Onsite strength determination for early-opening decision making of high early strength concrete pavement. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 10(2), 291-303.
- Kosar, K., Khazanovich, L., & Salles, L. (2023b). Evaluation of early age concrete pavement strength by combined nondestructive tests. *Applied Sciences*, 13(4), 2240.
- Lin, W., Yi, J. H., Hwang, H. S., Jabonero, C., Ryu, S. W., & Cho, Y. H. (2020). Early age behavior of jointed plain concrete pavement inside tunnel. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24(4), 1159-1168.

- Lu, L., Zhao, D., Fan, J., & Li, G. (2022). A brief review of sealants for cement concrete pavement joints and cracks. *Road Materials and Pavement Design*, 23(7), 1467-1491.
- Mahmood, A. H., Hampton, I., Bescher, E., Pang, L., & Castel, A. (2025). On-site strain and temperature monitoring of belitic calcium sulfoaluminate cement concrete airport slabs: feasibility of maturity method. *International Journal of Pavement Engineering*, 26(1), 2518153.
- Qu, Z., Zhang, Y., Liu, Z., Si, R., & Wu, J. (2024). A review on early-age cracking of concrete: Causes and control. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03848.
- Raoufi, K., Radlinska, A., Nantung, T., & Weiss, J. (2008). Methodology for determining the timing of saw cutting in concrete pavements. *Transportation Research Record*, 2081(1), 110-117.
- Safiuddin, M., Kaish, A. A., Woon, C. O., & Raman, S. N. (2018). Early-age cracking in concrete: Causes, consequences, remedial measures, and recommendations. *Applied Sciences*, 8(10), 1730.
- Shafiee, M., & Maadani, O. (2022). Investigation of climate change impacts on early-age cracking of jointed plain concrete pavements in Canada. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 49(7), 1121-1127.
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of business research*, 104, 333-339.
- Sok, T., Hong, S. J., Kim, Y. K., & Lee, S. W. (2020). Saw cutting (or not) of joint spacing in roller-compacted concrete pavement. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Transport*, 173(3), 195–206.
- Song, H., Hong, J., Yoon, Y. G., Choi, H., & Oh, T. (2022). Application of a Wireless and Contactless Ultrasonic System to Evaluate Optimal Sawcut Time for Concrete Pavements. *Sensors*, 22(18), 7030.
- Tiznobaik, M., & Bassuoni, M. T. (2019). Investigation into enhancing and evaluating curing efficiency of joints in concrete pavements. *Road Materials and Pavement Design*, 20(3), 639-655.
- Tran, Q., & Roesler, J. R. (2020). Noncontact ultrasonic and computer vision assessment for sawcut initiation time. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 146(3), 04020055.
- Yami, Y. A., Lin, W., Hwang, H., Roh, S., & Cho, Y. (2024). An Improved Approach for Determining Joint Cutting Window Integrating Penetration Resistance-Maturity and Strength-Maturity Relationships. *Construction and Building Materials*, 444, 137613.
- Zhang, J., Zhang, G., Wang, Y., & Yuan, J. (2022). Mechanical behavior of doweled joints in concrete pavements: A review. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 148(4), 03122002..



*Artículos de*

*Divulgación*

---





# Análisis energético y exergético de un caldero pirotubular de dos pasos

## Energetic and exergetic analysis of a two-step fire tube boiler

Vanessa Bautista<sup>1,\*</sup>, Andres Mirko Morales<sup>2</sup>, Félix Rustan Roca<sup>3</sup>, Aderli Torrico<sup>4</sup>

\*Correo de correspondencia: [v.bautista@umss.edu](mailto:v.bautista@umss.edu)

### Resumen

El mercado de las calderas pirotubulares ha requerido cada vez más diseños personalizados por parte de los fabricantes. El objetivo principal de este trabajo es el desarrollo y la validación de un simulador numérico para realizar un análisis energético y exergético del caldero pirotubular ubicado en el Laboratorio de Refrigeración Y Aire Acondicionado de la UMSS en estado estacionario de 150 [kg/hr] de capacidad de producción, con presión de trabajo de 1.1 [bar] y alimentada con gas natural. Se evaluó el impacto en el perfil de temperatura a lo largo de cada paso. También se realizó un diseño compuesto central para evaluar simultáneamente el impacto de cinco parámetros de diseño u operación (diámetro de los tubos; longitud de la caldera; número de tubos en el segundo paso; exceso de aire en la mezcla) y obtener un modelo polinómico empírico de segundo orden con el fin de maximizar las eficiencias energética y exergética de la caldera. También se realizó una sensibilidad malla y se validó el modelo con los datos obtenidos experimentalmente. Con los modelos polinómicos dados por el enfoque de diseño de experimentos, fue posible definir los parámetros más significativos, tanto para las eficiencias energética y exergética. En orden decreciente de importancia de los impactos lineales, exceso de aire; longitud de la caldera; el número y el diámetro de los tubos en el segundo paso y el diámetro del tubo en la cámara de combustión fueron significativos mediante contribuciones lineales y algunos términos de interacción.

**Palabras clave:** eficiencia térmica, irreversibilidades, producción de vapor, sistemas de combustión.

### Abstract

The fire tube boiler market has increasingly required custom designs from manufacturers. The main objective of this work is the development and validation of a numerical simulator to perform an energetic and exergy analysis of the fire tube boiler of the Refrigeration and Ammonia Laboratory of UMSS in a steady state of 150 [kg/hr] of production capacity, with a working pressure of 1.1 [bar] and fed with natural gas. The impact on the temperature profile was evaluated throughout each step. A central composite design was also carried out to simultaneously evaluate the impact of five design or operating parameters (tube diameter; boiler length; number of tubes in the second pass; excess air in the mixture) and obtain a polynomial model. second-order empirical analysis in order to maximize the energy and exergetic efficiencies of the boiler. A mesh test was also carried out and the model was validated with the data obtained experimentally. With the polynomial models given by the design of experiments approach, it was possible to define the most significant parameters, both for the energy and exergetic efficiencies. In decreasing order of importance of linear impacts, excess air; boiler length; the number and diameter of tubes in the second pass and the tube diameter in the combustion chamber were significant through linear contributions and some interaction terms.

**Keywords:** thermal efficiency, irreversibilities, steam generation, combustion systems.

<sup>1</sup> Laboratorio de Energía, Departamento de Mecánica/Electromecánica, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0005-5814-2153>

<sup>2</sup> Laboratorio de Energía, Departamento de Mecánica/Electromecánica, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0004-9678-8695>

<sup>3</sup> Programa de Energía, Sostenibilidad y Eficiencia Energética, Departamento de Mecánica/Electromecánica, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0001-1302-3311>

<sup>4</sup> Programa de Energía, Sostenibilidad y Eficiencia Energética, Departamento de Mecánica/Electromecánica, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0008-5715-2458>

## 1. Introducción

La optimización de la eficiencia energética de las calderas ha sido objeto de diversas investigaciones, particularmente en el uso de simulaciones para predecir y mejorar su rendimiento. Diversos estudios han explorado la influencia de parámetros operativos como el exceso de aire, la distribución de temperatura, las características del combustible y el tipo de diseño de los intercambiadores de calor. Modelos avanzados como los propuestos por Sepehr y Ali (2021), Gómez y Sánchez (2022), Li y Zhou (2021), y Fernández y Martínez (2023), han demostrado mejoras significativas en la eficiencia térmica de las calderas pirotubulares mediante simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD) y modelos numéricos de transferencia de calor.

Gómez y Sánchez (2022) realizaron un análisis detallado para optimizar la eficiencia energética en calderas pirotubulares utilizando gas natural. Su investigación se centró en evaluar el exceso de aire y la distribución de temperatura en los tubos mediante simulaciones CFD, utilizando ANSYS Fluent. Los resultados mostraron que el ajuste del exceso de aire reduce significativamente las pérdidas energéticas y mejora la eficiencia térmica en un 8%. Li y Zhou (2021) desarrollaron un modelo numérico avanzado para la transferencia de calor en calderas industriales, considerando las variaciones de las propiedades térmicas de los gases y la geometría de los tubos. El análisis incluyó cómo los gradientes de temperatura y las propiedades de los materiales afectan el rendimiento térmico. La metodología se basó en el método de volúmenes finitos utilizando OpenFOAM y fue calibrada con datos experimentales de una planta de procesamiento térmico. Los resultados indicaron que las pérdidas de calor disminuyen en un 12% cuando se optimizan las propiedades de los materiales de los tubos, y un incremento en la eficiencia térmica global de un 10%.

Fernández y Martínez (2023) llevaron a cabo un estudio exhaustivo para optimizar la combustión en calderas pirotubulares mediante simulaciones de Aspen Plus y ANSYS Fluent. Los resultados de su estudio indicaron que, con un exceso de aire del 15%, se mejora la eficiencia térmica en un 7% y se reduce la emisión de NO<sub>x</sub> en un 20%, manteniendo el rendimiento térmico.

Men, Liu y Zhang (2021) desarrollaron modelos avanzados de recuperación de calor para mejorar la eficiencia de calderas pirotubulares. Los resultados mostraron una mejora significativa en la eficiencia térmica de las calderas, alcanzando eficiencias superiores al 80% mediante la integración de tecnologías de recuperación de calor que optimizan las condiciones operativas y reducen el consumo de combustible.

Rahmani (2008) alcanzó una alta concordancia entre los datos simulados y operativos, empleando modelos numéricos para simular el comportamiento térmico de las calderas pirotubulares. Esta simulación fue clave para entender cómo optimizar la transferencia de calor y minimizar las pérdidas energéticas, alcanzando una concordancia del 90%.

Sepehr y Ali (2021) demostraron que las calderas pirotubulares son más económicas y eficientes que las acuotubulares. Utilizando un algoritmo genético para la optimización multiobjetivo, los investigadores evaluaron el rendimiento de diferentes tipos de calderas en plantas de cogeneración. Los resultados indicaron que la caldera pirotubular no solo es más eficiente, sino también más rentable.

Zhang et al. (2018) investigaron las emisiones y la eficiencia de combustión en calderas pirotubulares, proponiendo un modelo que optimiza la relación aire-combustible. Los resultados indicaron que una optimización adecuada de esta relación mejora significativamente la eficiencia de combustión y reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>.

Beyne (2019) centró su estudio en el diseño de calderas pirotubulares, subrayando la importancia de la mejora de la transferencia de calor y la durabilidad estructural. Su investigación demostró que cambios en el diseño de los tubos de la caldera podrían resultar en mejoras significativas en la eficiencia operativa.

Rajic et al. (2018) abordaron el diseño de calderas con foco en la optimización de los flujos térmicos y la capacidad de recuperación de calor, lo que permitió un aumento notable en la eficiencia general de las calderas pirotubulares. A pesar de los avances significativos en la optimización de la eficiencia energética y térmica de las calderas mediante simulaciones y modelos numéricos, la mayoría de los estudios previos no han considerado una evaluación detallada del impacto de ciertos parámetros clave sobre las eficiencias energética y exergética. En particular, se observa que el efecto del diámetro de los tubos, la longitud de la caldera, el número de tubos en el segundo paso, el diámetro de los tubos en el primer paso, y el exceso de aire en la mezcla no ha sido suficientemente investigado en el contexto de la optimización del rendimiento térmico y exergético de las calderas. A través de una revisión bibliográfica exhaustiva, se ha identificado que, aunque algunos estudios, como los de Gómez y Sánchez (2022), Li y Zhou (2021), y Fernández y Martínez (2023), abordan aspectos operativos y geométricos de las calderas, ninguno de ellos profundiza en cómo estos cinco parámetros específicos afectan el desempeño global de las calderas pirotubulares. Además, se observa que ninguno de estos estudios realiza un análisis exergético detallado, lo que limita la comprensión completa de las pérdidas de exergía en el sistema. Este vacío en la literatura representa una oportunidad clave para aplicar Métodos Experimentales, que permitirán explorar de manera más profunda cómo estos parámetros impactan la eficiencia térmica y exergética de las calderas.

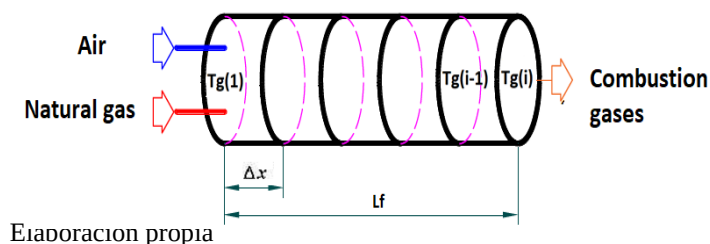
El objetivo de este estudio es llenar esta brecha en la investigación, desarrollando y validando un simulador numérico capaz de analizar los efectos de estos cinco parámetros clave en la eficiencia energética y exergética de las calderas pirotubulares. La validación del modelo se llevará a cabo mediante la comparación entre los resultados simulados y los datos experimentales obtenidos en un laboratorio de calderas pirotubulares de la Universidad Mayor de San Simón. Este enfoque no solo busca generar una comprensión más profunda de cómo los parámetros geométricos y operativos influyen en el rendimiento térmico y exergético de las calderas, sino también proporcionar una base sólida para futuras mejoras en su diseño, operación y optimización energética.

## 2. Modelo numérico de la transferencia de calor

Se desarrolla un modelo matemático en estado estacionario para la transferencia de calor en la cámara de combustión y el segundo paso de un caldero pirotubular de dos pasos. El proceso de generación de vapor, obteniéndose vapor saturado, es isobárico. La cámara de combustión se modela como un intercambiador de calor, sumergido en un volumen uniforme de agua saturada. Una zona bifásica de agua/vapor, una zona metálica y una zona de gas respectivamente. La zona de gas dentro la cámara de combustión se subdivide en secciones elementales, para cada sección se establece un balance energético considerando la potencia generada y transferida en el control volumétrico de longitud  $\Delta x$  en la dirección del flujo de gas, como se muestra en la Figura 1. La temperatura, la presión y la composición de los gases son uniformes en los volúmenes de control. Además, se asume que tanto los reactivos como los productos son gases ideales.

**Figura 1**

*Representación del esquema de subdivisión de la cámara de combustión*



## Modelado del proceso de combustión

El combustible estudiado es gas natural boliviano (92,10% de CH<sub>4</sub>, 4,56% de C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, 1,23% de C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, 0,15% de C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, 0,32 de C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, 0,10% de C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>, 0,10% de C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>, 0,22% de C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>, 0,73% de N<sub>2</sub> y 0,48% de CO<sub>2</sub>), (YPFB 2016). Se considera el proceso de combustión completo, produciendo solo dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y vapor de agua (H<sub>2</sub>O). Se utiliza un modelo de combustión gradual a lo largo de la cámara de combustión. La longitud de la llama se supone aproximadamente igual al 70% de la longitud del caldero (Badcock-Wanson, 2012). El patrón de liberación de calor a lo largo de la llama (es decir, el progreso de la reacción y, en consecuencia, la proporción de gas quemado),  $F$ , se puede describir exponencialmente (Rhine & Tucker, 1991), parabólica (Roesler, 1997) o uniformemente. En el presente trabajo, se usó la forma parabólica propuesta por Roesler (1967) se aplica de acuerdo con la ecuación Ec.(1)

$$F = \frac{6}{L_f} \cdot \left( \frac{x}{L_f} - \frac{x^2}{L_f^2} \right) \quad \text{for } 0 \leq x \leq L_f; F = 0 \quad \text{for } x > L_f \quad (1)$$

Donde  $L_f$  es la longitud de llama[m] y  $x$  es la longitud del volumen de control. [m]

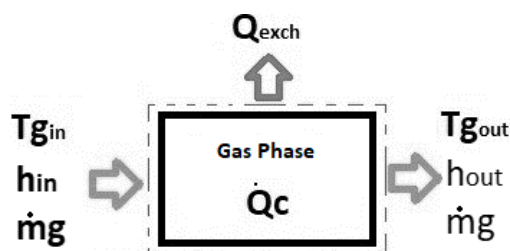
La composición química de los gases de combustión varía en cada volumen de control en función del patrón de combustión gradual.

## Ecuaciones de conservación

Para cada volumen de control, se establece un balance energético considerando el calor liberado por la reacción de combustión y el calor transferido al agua. La Figura 2 ilustra el balance energético de un volumen de control genérico.

**Figura 2**

*Esquema simplificado de fenómenos de transporte en un volumen de control*



Elaboración propia

La ecuación de conservación de energía en estado estacionario para un volumen de control viene dada por la Ec.(2) que puede ser positiva, nula o negativa.

$$\dot{m}_g \cdot (h_{g:out} - h_{g:in}) = \dot{Q}_c - \dot{Q}_{exch} \Leftrightarrow T_{out} = \frac{\dot{Q}_c - \dot{Q}_{exch}}{\dot{m}_g \cdot c_{p_g}} + T_{in} \quad (2)$$

Donde  $\dot{m}_g$  es el flujo masico de los gases de combustión  $\left[ \frac{kg}{s} \right]$ ,  $h_{g:out}$  es la entalpía específica de salida  $\left[ \frac{J}{kg} \right]$ ,  $h_{g:in}$  es la entalpía específica de entrada  $\left[ \frac{J}{kg} \right]$ ,  $\dot{Q}_c$  es la tasa de liberación de calor por la combustión  $[W]$ ,  $\dot{Q}_{exch}$  es la tasa

de transferencia de calor de los gases de combustión al metal  $[W]$ ,  $T_{out}$  es la temperatura de salida de los gases de combustión  $[K]$  y  $T_{in}$  es la temperatura de entrada de los gases de combustión  $[K]$ .

La tasa de transferencia de calor entre la zona de gas y metal que ocurre por radiación y convección se modela como se muestra en la Ec.(3).

$$\dot{Q}_{exch} = g_{rad} \cdot \sigma \cdot S_{Fi} \cdot [T_{out}^4 - T_{int}^4] + h_g \cdot S_{Fi} \cdot [T_{out} - T_{int}] \quad (3)$$

Donde  $g_{rad}$  es el coeficiente de transferencia de calor por radiación  $[-]$ ,  $\sigma$  es la constante de radiación de Stefan Boltzmann  $5,669 \cdot 10^{-5} \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right]$ ,  $S_{Fi}$  es el área interna de la cámara de combustión  $[m^2]$ ,  $T_{int}$  es la temperatura interna en la pared de la cámara de combustión  $[K]$  y  $h_g$  es el coeficiente de transferencia de calor de convección  $\left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$ .

### Ecuaciones de transferencia de calor

El coeficiente de transferencia de calor por radiación bajo el supuesto de un tubo infinitamente largo sin radiación axial se puede escribir como la Ec.(4) el cual es la emisividad de la llama, definida por Talmor (Talmor, 1982) y se correlaciona con el tipo de combustible, en este caso gas natural para gases combustibles con una relación de masa entre 3,5 y 5,0.

$$g_{rad} = \left[ \frac{1}{\varepsilon_m} + \frac{1}{\varepsilon_{gas}} - 1 \right]^{-1} \quad \text{con} \quad \varepsilon_{gas} = \sqrt{0,2 \cdot \left( \frac{LHV}{900} \right)} \quad (4)$$

Donde  $\varepsilon_m$  es la emisividad del acero al carbono SAE 1010, asumida igual a 0,8  $[-]$  (Rahmani & Dahia, 2009),  $\varepsilon_g$  es la emisividad de los gases de combustión  $[-]$  y  $LHV$  es el menor valor calorífico del gas natural  $\left[ \frac{Btu}{ft^3} \right]$ .

Para el coeficiente de transferencia de calor por convección interna  $h_g$ , la literatura presenta la correlación de Gnielinski (2009). La temperatura de la pared se encuentra más cerca de la temperatura del agua que de la temperatura del gas debido al alto coeficiente de transferencia de calor del lado del agua (Huang, 1988), la temperatura de la pared metálica solo varía ligeramente a lo largo de la longitud de la cámara de combustión en comparación con la temperatura del gas. Por otro lado, la variación de la temperatura del gas tiene un impacto directo en la transferencia de calor. Por lo tanto, la condición límite de temperatura uniforme de la pared se adopta de la Ec.(5) y se utiliza para determinar el número de Nusselt en condiciones de flujo laminar  $Nus_{Lam}$ . En el régimen turbulento, el número de Nusselt en flujo interno turbulento,  $Nus_{Turb}$ , se puede obtener por la Ec.(6). En la región de transición, se considera una interpolación lineal entre los valores calculados para los números de Reynolds iguales a 2300 y 4000, respectivamente, basada en el valor del número de Reynolds.

$$Nus_{Lam} = \left[ 3,66^3 + \left( 1,615^3 \cdot \left[ Re_{int} \cdot Pr_g \cdot \frac{D_{Fi}}{\Delta x} \right]^{1/2} \right)^3 + \left( \frac{2}{1 + 22 \cdot Pr_g} \right)^{1/6} \cdot \left( Re_{int} \cdot \frac{Pr_g}{\Delta x} \right)^{1/2} \right]^3 \quad (5)$$

$$Nus_{Turb}(\text{Gnielinski}) = \frac{\frac{\xi_{nu}}{8} \cdot [Re_{int} - 1.000] \cdot Pr_g}{\left[ 1 + 12,7 \cdot \left[ \frac{\xi_{nu}}{8} \right]^{1/2} \cdot [Pr_g^{2/3} - 1] \right]} \quad (6)$$

Donde  $Re_{int}$  es el número de Reynolds interno  $[-]$ ,  $T_b$  es la temperatura de los gases de combustión  $[K]$ ,  $\xi_{nu}$  es el factor de fricción para flujo turbulento en tubos cilíndricos lisos  $[-]$ ,  $Pr_g$  es el número de Prandtl de los gases de

combustión [-],  $D_{Fi}$  es el diámetro interno de la cámara de combustión [m],  $\Delta x$  es la longitud de cada volumen en la cámara de combustión [m],  $d$  es el diámetro del tubo [m] y  $L$  la longitud del tubo [m].

Para el coeficiente de transferencia de calor por convección externa, la literatura presenta la correlación de Gorenflo para el paso de la cámara de combustión (tubo único).

La correlación de ebullición del nucleada de Gorenflo (Baehr, 2006), para la cámara de combustión viene dada por la Ec.(7).

$$h_o = 5600 \cdot \left[ 1,73 \cdot Pr_2^{0,27} + \left[ 6,1 + \frac{0,68}{1 - Pr_2} \right] \cdot Pr_2^2 \right] \cdot \left[ \frac{\dot{Q}_{exch}}{S_{to} \cdot 20000} \right]^{0,9-0,3 \cdot Pr_2^{0,15}} \quad (7)$$

Donde  $Pr_2$  es la presión reducida [-].

### Análisis exergetico

La exergía es una propiedad que permite establecer el potencial de trabajo útil de una cantidad de energía en un estado determinado en relación con su entorno (Kotas, 1995). La exergía total se deriva de las formas desordenadas de energía en un dispositivo idealizado en el que la corriente pasaría por procesos físicos y químicos al interactuar con el entorno. Sin embargo, es conveniente separar la exergía física de la exergía química, lo que permite calcular los valores de exergía utilizando tablas estándar de exergía química (Kotas, 1995). Así, la tasa de exergía específica  $\varepsilon \left[ \frac{J}{mol} \right]$  es:

$$\varepsilon = \varepsilon_k + \varepsilon_p + \varepsilon_{ph} + \varepsilon_0 \quad (8)$$

Donde  $P_g$  es la presión de los gases de combustión [kPa] y  $R$  es la constante universal de los gases considerada igual a  $8,314472 \left[ \frac{J}{mol.K} \right]$ .

La sustancia estudiada consiste en una mezcla de gases, considerados ideales, mezclas de gas natural, aire y productos de combustión. La exergía química específica de la mezcla de gases viene dada por la siguiente Ec. (9). (Kotas, 1995).

$$\varepsilon_0 = \sum_i x_i \cdot \tilde{\varepsilon}_i + R \cdot T_0 \cdot \sum_i x_i \cdot \ln(x_i) \quad (9)$$

Donde  $\tilde{\varepsilon}_i$  es la exergía molar de cada compuesto de la mezcla gaseosa [J/mol] (Kotas, 1995) y  $x_i$  es la fracción molar cada compuesto de los reactantes y del comburente [mol].

Para calcular la exergía química específica molar estándar para el combustible gaseoso ( $\varepsilon_{fuel}$ ) en [J/mol], se utiliza la expresión general dada por la Ec. (10) (Kaushik & Singh, 2014).

$$\varepsilon_{fuel} = -\Delta G + \sum n_p \cdot \varepsilon_{Ch,P} - \sum n_R \cdot \varepsilon_{Ch,R} \quad (10)$$

Donde  $\Delta G$  es el cambio en la función estándar de Gibbs (calculada igual a  $-1.778 \times 10^6 \left[ \frac{J}{mol} \right]$ ),  $\varepsilon_{Ch,P}$  es la exergía química específica molar de los productos de la combustión [J/mol] y  $\varepsilon_{Ch,R}$  es la exergía química específica molar de los reactantes de la combustión [J/mol]. (Kotas, 1995).

## 3. Metodología

### Descripción del caldero

En este trabajo se analizó un caldero pirotubular de dos pasos, ubicado en el Laboratorio de Refrigeración y Aire Acondicionado de la Universidad Mayor De San Simón figura 3 el cual cuenta con los siguientes parámetros de



funcionamiento: capacidad de producción de vapor de 150 [kg/h], presión de trabajo 1.1 [bar], temperatura del agua de alimentación de 20 [°C], flujo de combustible de gas natural igual a 0.004 [kg/s] y exceso de aire igual a 19 [%]. Además, el caldero cuenta con un hogar de 0.24 [m] de diámetro interno y un haz de 23 tubos de 0.044 [m] diámetro interno. La longitud tanto del hogar como de los tubos es de 1.2 [m].

**Figura 3**

*Caldero estudiado.*



Elaboración propia

Con base en las condiciones meteorológicas y climáticas de Cochabamba – Bolivia, en este análisis se considera  $T_o=20$  [°C] como la temperatura ambiente y  $P_o=75$  [kPa] como la presión atmosférica.

### Sensibilidad de malla

Para la sensibilidad de malla se probaron mallas regulares con hasta 350 divisiones de volúmenes en la cámara de combustión y segundo paso para verificar el comportamiento de la temperatura.

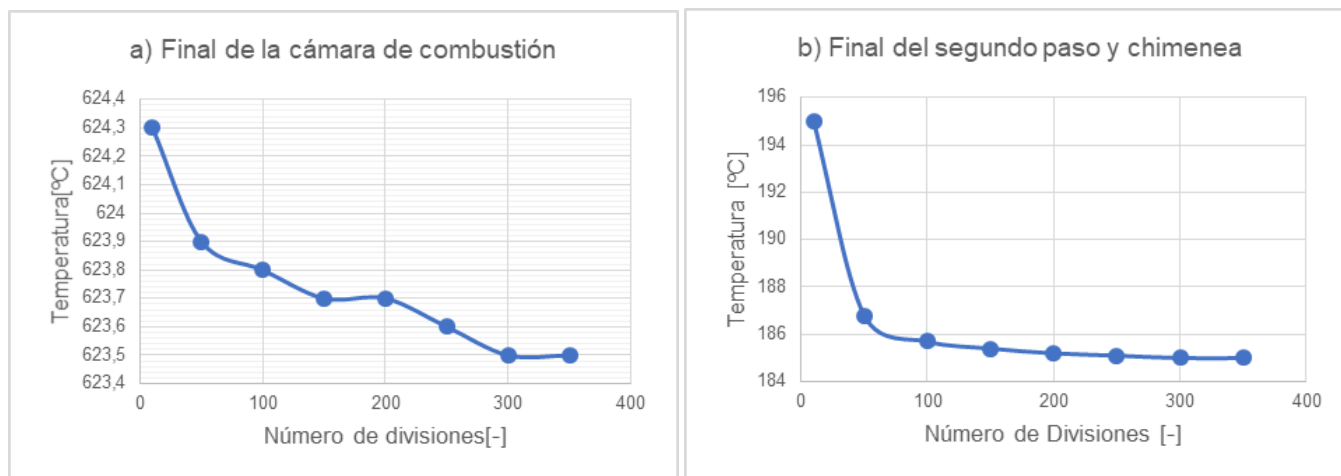
Se realizó una sensibilidad de malla de malla utilizando el programa Engineering Equation Solver (EES) para verificar el comportamiento de la temperatura al final de la llama para la cámara de combustión con el fin de definir la longitud del volumen de control.

En la figura 4, se muestran los resultados obtenidos del teste de mallas realizado para el caldero.



**Figura 4**

*Sensibilidad de malla realizado para el caldero*



Elaboración propia

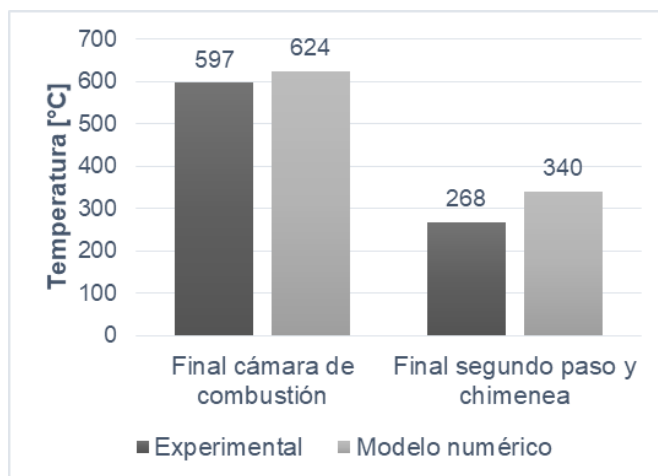
Como se puede observar, el comportamiento de las temperaturas empieza a estabilizarse y a mantener un valor constante cuando la malla cuenta con 300 divisiones regulares. Por lo tanto, las simulaciones en el modelo matemático fueron realizadas utilizando una malla conformada por 300 volúmenes regulares, de 0.004 [m] de longitud cada uno.

## Datos experimentales

Para la obtención de datos de temperatura experimentales Se instalaron sensores de temperatura en la salida de la cámara de combustión y en el segundo paso del flujo de gases. Durante el proceso de operación, la caldera fue llevada a su estado de régimen permanente, manteniendo una presión de trabajo de 1,1 bar, condiciones bajo las cuales se procedió con la recolección de datos de temperatura. Las mediciones fueron realizadas simultáneamente para garantizar la consistencia y precisión de los datos obtenidos. Para la validación del modelo se comparan las temperaturas calculadas en el modelo numérico con las medidas experimentalmente. Dichas temperaturas se muestran en la figura 5.

**Figura 5**

*Resultados obtenidos para el caldero operando en régimen estacionario*



Como se puede observar, la diferencia entre las temperaturas, medida y calculada, al final de la cámara de combustión, tiene un valor de 27 [°C], por lo que la aproximación del modelo numérico con los datos experimentales es adecuada. Por otra parte, la diferencia entre las temperaturas, medida y calculada, al final del segundo paso, tiene un valor de 72 [°C]. Esta mayor diferencia de temperaturas se debe a que el modelo numérico no considera las pérdidas de calor en la caja de giro del caldero (entre el primer y segundo paso), por lo tanto, se puede esperar una mayor temperatura de los gases de combustión en esta zona. De esta manera, se puede comprobar que el modelo numérico simula adecuadamente la operación del caldero.

Paralelamente se realizó un análisis de sensibilidad variando cinco parámetros para ver el impacto que tienen en la eficiencia energética y exergética del caldero.

### Diseño de experimentos

Un diseño de experimentos es una serie de pruebas en las que los parámetros de entrada se modifican según una regla determinada, con el fin de identificar las razones de los cambios en la respuesta de salida. Los objetivos del experimento incluyen: determinar qué parámetros influyen más en la respuesta, determinar dónde fijar los parámetros influyentes controlables para que la respuesta se aproxime casi siempre al valor ideal deseado, para que la variabilidad de la respuesta sea pequeña, para que se minimice el efecto de los parámetros no controlables (Cavazzuti, 2013).

En este estudio, se realizó un Diseño Central Compuesto (DCC), también conocido como Planificación Central Compuesta de Box-Wilson (Anthony, 2014). El modelo matemático con análisis de regresión múltiple en un modelo ajustado polinómico de segundo orden se expresa en la Ec. (11).

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ii} X_i^2 + \sum \beta_{ij} X_i \cdot X_j \quad (11)$$

Donde Y es la respuesta esperada,  $\beta_0$  es el coeficiente de intercepción o término constante,  $\beta_i$  es el coeficiente del efecto lineal de la variable i,  $\beta_{ii}$  es el coeficiente del efecto cuadrático de la variable i y  $\beta_{ij}$  es el coeficiente del término de interacción (o rectangular) entre las variables i y j. Para cada variable, se estudia la influencia de todos los factores y sus relaciones lineales. Los parámetros investigados y sus respectivos niveles figuran en la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Parámetros geométricos parámetros y valores de los parámetros CCD (5 parámetros)*

| Symbol | Variable                                | Unit | -1    | 0     | +1     |
|--------|-----------------------------------------|------|-------|-------|--------|
| $X_1$  | $D_{Fo}$ Diámetro del tubo en el paso 1 | [m]  | 0.75  | 0.85  | 0.95   |
| $X_2$  | $D_{To}$ Diámetro del tubo en el paso 2 | [m]  | 0.045 | 0.044 | 0.0465 |
| $X_3$  | $L_F$ Longitud de la caldera            | [m]  | 1     | 1.25  | 1.5    |
| $X_4$  | $N_{tub2}$ Número de tubos en el paso 2 | [-]  | 18    | 23    | 28     |
| $X_5$  | % Exceso de aire                        | [%]  | 9     | 19    | 29     |

Fuente. Elaboración propia

## Análisis paramétrico con el objetivo de optimizar el rendimiento de la caldera

Para el análisis paramétrico en el modelo matemático de la caldera, se analizan los impactos respectivos de 5 parámetros en las eficiencias energética y exergetica mediante la ejecución de un CCD. Los resultados para la caldera estudiada presentan valores entre 70,49% y 80,18% para la eficiencia energética y entre 16,42% y 19,70% para la eficiencia exergetica.

**Tabla 2**

*Coefficiente de regresión, prueba de Student y valor p para la eficiencia energética y exergetica*

| Factor       | Energy efficiency [%] |           |          | Exergetic Efficiency [%] |           |          |
|--------------|-----------------------|-----------|----------|--------------------------|-----------|----------|
|              | Coefficient           | Test-t    | p-value  | Coefficient              | Test-t    | p-value  |
| Mean/Interc. | 75.77844              | 34,563.18 | 0.000000 | 18.10178                 | 5,370.629 | 0.000000 |
| (1)X1 (L)    | 0.05176               | 45.27     | 0.000000 | 0.01559                  | 8.868     | 0.000000 |
| X1 (Q)       | 0.00172               | 0.40      | 0.696351 | 0.00304                  | 0.457     | 0.653539 |
| (2)X2 (L)    | -0.21794              | -190.61   | 0.000000 | -0.07147                 | -40.659   | 0.000000 |
| X2 (Q)       | 0.01672               | 3.86      | 0.001243 | 0.00304                  | 0.457     | 0.653539 |
| (3)X3 (L)    | 1.88618               | 1,649.60  | 0.000000 | 0.64471                  | 366.771   | 0.000000 |
| X3 (Q)       | -0.19328              | -44.69    | 0.000000 | -0.05196                 | -7.815    | 0.000001 |
| (4)X4 (L)    | 0.28500               | 249.25    | 0.000000 | 0.09824                  | 55.886    | 0.000000 |
| X4 (Q)       | -0.01328              | -3.07     | 0.006919 | -0.00196                 | -0.295    | 0.771500 |
| (5)X5 (L)    | -2.13029              | -1,863.10 | 0.000000 | -0.72559                 | -412.784  | 0.000000 |
| X5 (Q)       | 0.02672               | 6.18      | 0.000010 | 0.03304                  | 4.969     | 0.000117 |
| X1(L)-X2 (L) | 0.00000               | 0.00      | 1.000000 | -0.00187                 | -1.035    | 0.315245 |
| X1(L)-X3(L)  | -0.00625              | -5.30     | 0.000058 | -0.00375                 | -2.070    | 0.054034 |
| X1(L)-X4(L)  | -0.00188              | -1.59     | 0.130062 | -0.00250                 | -1.380    | 0.185535 |
| X1(L)-X5(L)  | -0.00250              | -2.12     | 0.048912 | -0.00312                 | -1.725    | 0.102711 |
| X2(L)-X3(L)  | 0.00875               | 7.42      | 0.000001 | 0.00062                  | 0.345     | 0.734367 |
| X2(L)-X4(L)  | 0.00938               | 7.95      | 0.000000 | 0.00437                  | 2.415     | 0.027307 |
| X2(L)-X5(L)  | -0.03250              | -27.58    | 0.000000 | -0.00500                 | -2.760    | 0.013397 |
| X3(L)-X4(L)  | -0.03187              | -27.04    | 0.000000 | -0.00375                 | -2.070    | 0.054034 |
| X3(L)-X5(L)  | 0.11500               | 97.57     | 0.000000 | 0.00312                  | 1.725     | 0.102711 |
| X4(L)-X5(L)  | -0.00875              | -7.42     | 0.000001 | -0.00500                 | -2.760    | 0.013397 |

Fuente. Elaboración propia

*Nota.* Los parámetros significativos aparecen en rojo

**Tabla 3***Resultados de las eficiencias en la literatura*

| Capacidad de producción de vapor [t/hr] | Eficiencia energética [%] | Eficiencia exergética [%] | Referencia                     |
|-----------------------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| 3                                       | 72.46                     | 24.89                     | Saidur et al. (2010)           |
| 637.8                                   | 85                        | 41                        | Pattanayak and Ayyagari (2014) |
| No identificado                         | 82                        | 33                        | Terhan and Comakli (2017)      |
| No identificado                         | 65                        | No identificado           | Zeng et al. (1999)             |
| 10-11.6                                 | 83.79-85.29               | 13.41-27.97               | Zhang et al. (2018)            |
| <b>0.15</b>                             | <b>70.49 – 80.18</b>      | <b>16.42 – 19.70</b>      | <b>Este Estudio</b>            |

Fuente. Elaboración propia

Comparando con los datos de la bibliografía Tabla 3, resultados de la simulación tuvieron el mismo orden de magnitud, la diferencia se debe a que la capacidad de la caldera del estudio es menor, y la geometría es diferente.

A partir de los valores de simulación de la eficiencia energética y exergética, se calcularon los coeficientes del modelo polinómico. La Tabla 2 muestra los coeficientes del modelo polinómico y los coeficientes de la t-student en los que mayor del 5% significa que la variable o combinación es significativa están marcados.

### **Eficiencia energética**

Mediante el método de mínimos cuadrados, este modelo presento un coeficiente de determinación  $R^2$  y un coeficiente ajustado  $R_{\text{ajustado}}$  iguales a 1 y 0,99999, respectivamente. De la Tabla 2 se observa que todos los parámetros son significativos, al menos por su término lineal. Sin embargo, los parámetros más influyentes en la eficiencia energética son exceso de aire (X5), la longitud de la caldera (X3); el número de tubos en el segundo paso (X4); el diámetro de los tubos en el segundo paso (X2). La longitud de la caldera (X3) (esta directamente) relacionada con el área de intercambio térmico, favoreciendo así una mejor transferencia de calor al agua. Lo mismo ocurre con el diámetro del tubo en la cámara de combustión (X1), que influye en el perímetro mojado. Las interacciones positivas entre X5 con X3 y X4 reflejan como el exceso de aire una mayor superficie de intercambio térmico. Mejoran la eficiencia (asimismo las combinaciones entre X2 y X4, X3 y X5 también muestran un incremento en el área de intercambio y su efecto variable) área de intercambio y su efecto favorable.

En conjunto estos resultados muestran compromiso entre aumentar el área de intercambio térmico y evitar una reducción significativa en la velocidad del flujo.

### **Eficiencia exergética**

Del mismo modo, a partir de los valores de simulación de la eficiencia exergética, los coeficientes del modelo polinómico fueron ajustados por el método de los mínimos cuadrados, que presenta un valor de  $R^2$  igual a 0,99988 y  $R_{\text{ajustado}}$  igual a 0,99983. Se puede observar que todos los parámetros estudiados son significativos de forma similar a la eficiencia energética. Sin embargo, los principales parámetros significativos son, en orden decreciente de importancia: el exceso de aire (X5), la longitud de la caldera (X3); el número de tubos en el segundo paso (X4); el diámetro de los tubos en el segundo paso (X2) y el diámetro del tubo en el primer paso (X1). Estos cuatro últimos factores sólo aportan un efecto lineal. En comparación con el modelo de eficiencia energética, se ha añadido una contribución cuadrática del exceso de aire.

## Optimización

A partir del análisis paramétrico basado en los modelos matemáticos de la caldera, se realizó una optimización de los principales parámetros operativos con el objetivo de maximizar eficiencia térmica y exergética considerando las mejores condiciones de funcionamiento.

La búsqueda de los puntos óptimos se enfocó en escenarios fuera del dominio experimental. Bajo estas condiciones, se alcanzaron los siguientes resultados: una eficiencia energética máxima de 80,18% y una eficiencia energética máxima de 19, 70%. Las condiciones óptimas obtenidas son:

- Diámetro del tubo en la cámara de combustión de 0,95 [m].
- Longitud de caldera de 1,5 [m].

Estos dos parámetros son clave para mejorar el intercambio de calor con el agua.

Respecto al diámetro de los tubos en el segundo paso, se encontró que el valor óptimo corresponde al más pequeño, evaluado 0,045 [m]. Este valor elección incrementa la velocidad de los gases, lo que reduce en el número de Reynolds y aumenta la turbulencia. Aunque esta configuración disminuye el caudal másico, se compensa con un mayor número de tubos en el segundo paso, con un valor óptimo en 28 tubos.

Además, se identificó que, es fundamental reducir el exceso de aire en la combustión, estableciéndolo un valor óptimo del 9%. Este es el único parámetro que puede ajustarse sin modificar la geometría de la caldera. Estos resultados coinciden con estudios previos, los cuales indican que la eficiencia energética como la exergética disminuye cuando se incrementa el exceso de aire (Saidur, Ahamed, & Masjuki, 2010).

## 4. Resultados y discusiones

Se realizó una prueba de sensibilidad de malla en el programa Engineering Equation Solver (EES) utilizando datos operativos de campo, se evaluó el comportamiento de la temperatura al final de cada paso. La caldera determinando que modelo se estabiliza utilizando 300 volúmenes de control de 0,004 [m]. En la validación se observó que las temperaturas simuladas son ligeramente menores que las reales debido a la omisión de pérdidas térmicas en las cajas de descarga.

Para el análisis de parámetros operativos y geométricos más influyentes, se utilizó el método de Planificación Central Compuesta, considerando cinco variables: el diámetro de tubos (en ambos pasos), longitud de la caldera, número de tubos en el segundo paso y exceso de aire. Se ajustó un modelo polinómico de segundo orden que permitió identificar tanto efectos individuales como interacciones significativas sobre las eficiencias energética y exergética.

Los resultados del modelo fueron validados con datos experimentales obtenidos en el campo.

La longitud de la caldera (X3) resultó ser una de las variables más determinantes, ya que está directamente relacionada con el área de intercambio térmico. Sin embargo, no actúa de forma aislada. El análisis de regresión mostró que el exceso de aire (X5) y el número de tubos en el segundo paso (X4) influyen significativamente, tanto de forma directa como a través de sus interacciones. Por ejemplo, la interacción entre (X5-X3), mejora el intercambio térmico en calderas más largas, y la combinación de X2 y X4 resalta la importancia de la geometría en la transferencia de calor.

Estos resultados muestran que la eficiencia no depende únicamente de un parámetro, sino de un equilibrio entre múltiples variables.

Este enfoque coincide con estudios previos (2014), Zhang et al. (2018), pero aporta una visión más integral al considerar simultáneamente los efectos geométricos y operativos. Así, se amplía el conocimiento sobre la optimización de calderas pirotubulares de baja capacidad mediante un análisis multifactorial.

## Agradecimientos

Los autores desean expresar su más sincero agradecimiento a la Universidad Mayor de San Simón por su apoyo institucional y los recursos proporcionados durante el desarrollo de esta investigación. Nuestro agradecimiento también al Laboratorio de Refrigeración y Aire Acondicionado por el acceso a sus instalaciones y equipos, y por el

apoyo técnico ofrecido, que ha sido crucial para la ejecución de los experimentos y la obtención de los resultados presentados en este artículo. Además, extendemos nuestro agradecimiento al Programa de Energía, Sostenibilidad y Eficiencia Energética – PESEE, cuya colaboración ha sido esencial para el éxito de nuestro trabajo.

## 5. Referencias bibliográficas

- Anthony. (2014). *Design of Experiments for Engineers and Scientists*. Butterworth Heinemann.
- Badcock-Wanson. (2012). Badcock-Wanson. Obtenido de [www.babcock-wanson.es/calderas\\_aceite\\_termico](http://www.babcock-wanson.es/calderas_aceite_termico)
- Baehr, H. (2006). *Heat and mass transfer*. Berlín, Alemania: Springer-Verlag.
- Beyne. (2019). Design improvements in pirotubular boilers. *Applied Thermal Engineering*.
- Beyne. (2019). Dynamic and steady state performance model of fire tube boilers with different turn boxes. *Applied Thermal Engineering*.
- Cavazzuti. (2013). *Optimization Methods - From Theory to Design*. Springer Berlin Heidelberg.
- Cortez, & Gomez. (1998). Method For Exergy Analysis Of Sugarcane Bagasse Boilers. *razilian Journal of Chemical Engineering*.
- Einstein, D., & Ernst, K. (2001). *Steam systems in industry: energy use and energy efficiency improvement potentials*. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Fernández, & Martínez. (2023). Simulación y análisis de combustión en calderas pirotubulares. *Fuel Processing Technology*.
- Ganapathy, V. (2002). *Industrial boilers and heat recovery steam generators: design, applications, and calculations*. CRC Press.
- Gómez, & Sánchez. (2022). Optimización energética en calderas pirotubulares mediante simulación CFD. *Journal of Thermal Engineering*.
- Gonzalez, & M. A. (1998). Improved Boiler performance through thermodynamic modeling. Tesis de Maestria - Texas A&M University-Kingsville.
- Huang. (1988). A Steady-State Thermal Performance Model of Fire-Tube Shell Boilers. *Engineering for Gas Turbines and Power*, 173-179.
- Kaushik, & Singh. (2014). Estimation of chemical exergy of solid, liquid and gaseous fuels used in thermal power plants. *J Therm Anal Calorim*, 903–908.
- Kaya, D., & Eyidogan, M. (2010). Energy conservation opportunities in an industrial boiler system. *J Energy Eng*, 18–25.
- Kotas, T. J. (1995). *The Exergy Method pf Thermal Plant Analysis*. Oxford, Inglaterra: Butterworths.
- Li, & Zhou. (2021). Modelado numérico de la transferencia de calor en calderas industriales. *Energy Conversion and Management*.
- Mansir, Mansour, & Habib. (2021). Numerical modeling of heat transfer characteristics in a two-pass oxygen transport reactor for fire tube boilers under oxy-fuel combustion. *Applied Thermal Engineering*.
- Men, & Liu. (2021). Advanced heat recovery models for boiler efficiency improvement. *Energy*.
- Men, Y., Liu, & Zhang. (2021). A review of boiler waste heat recovery technologies in the medium low temperature range. *Energy*.
- Rahmani. (2008). Thermodynamic performance optimization of pirotubular boilers. *Energy and Buildings*.
- Rahmani, & Trabelsi. (2014). Numerical investigation of heat transfer in 4-Pass fire-tube boiler. *American Journal of Chemical Engineering*.
- Rahmani, A., & Dahia, A. (2009). Thermal-hydraulic modeling of the steady-state operating conditions of a fire-tube boiler. *Nuclear Technology and Radiation Protection*, 29-37.
- Rajic. (2018). Construction optimization of hot water fire-tube boiler using thermomechanical finite element analysis. *Thermal Science*.
- Rajic. (2018). Thermal flow optimization in pirotubular boilers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
- Rhine, J., & Tucker, R. (1991). *Modeling of Gas-Fired Furnace* (1st Edition ed.). Londres, Inglaterra: British Gas Publication.
- Roesler, F. (1997). Theory of radiative heat transfer in co-current. *Chemical Engineering Science*, 1325-1336.

- Saidur, R., Ahamed, J. U., & Masjuki, H. H. (2010). Energy use, energy savings and emission analysis in the Malaysian rubber producing industries. *Appl Energy*, 87(8):2746–58.
- Sepehr, & Ali. (2021). Modeling, multi objective optimization and comparison of fire and water tube heat recovery steam generators for gas engine cogeneration plants. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*.
- Sepehr, & Ali. (2021). Pirotubular versus acuotubular boilers in gas engine-based cogeneration. *Energy*.
- Talmor, E. (1982). *Combustion Hot Spot Analysis for Fired Process Heaters*. Gulf Publishing.
- Zhang. (2018). Emission and combustion efficiency optimization in pirotubular boilers. *Energy & Fuels*.
- Zhang. (2018). Energy-Exergy analysis and energy efficiency improvement of coal-fired industrial boilers based on thermal test data. *Applied Thermal Engineering*.



## 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](mailto:cyt@fcyt.umss.edu.bo).



