



# Journal

Boliviano de Ciencias

- VOL. 19 -  
NÚMERO 54  
JULIO A DICIEMBRE 2023  
ISSN Digital: 2075-8944  
ISSN Impreso: 2075-8936





# Journal

Boliviano de Ciencias

## **Editor en Jefe**

Pablo Arce Maldonado, PhD  
Universidad Privada del Valle, Bolivia

## **Editor de sección: Ingeniería Civil**

MSc. María Elena Sahonero Saravia  
Universidad Privada del Valle, Bolivia  
MSc Joaquín Humberto Aquino Rocha  
Universidade Federal de Rio de Janeiro, Brasil

## **Editor de sección: Industrias**

Ing. Daysi Lidia Ñiguez Calveti,  
Universidad Privada del Valle, Bolivia

## **Editor de sección: Electromecánica**

Ing. Edson Gastón Montaña Bautista  
Universidad Privada del Valle, Bolivia

## **Editor de sección: Petróleo y energías**

Ing. Ximena Uscamayta Urizacari  
Universidad Privada del Valle, Bolivia

Ing. Ivailo Peña Treneva,  
Servicios Integrales de Ingeniería SIE S.A.,  
Bolivia

## **Editor de sección: Sistemas, Electrónica y Biomédica**

MSc. Eynar Calle Viles  
Universidad Privada del Valle, Bolivia

## **Editor de sección: Ingeniería de alimentos**

Tania Araujo Burgos, PhD  
Universidad Privada del Valle, Bolivia  
Melissa Miranda Durán, PhD  
Organización Panamericana de la Salud, Bolivia

## **Editor de sección: Arquitectura**

MSc. Marcelo Pérez Mercado  
Universidad Privada Boliviana, Bolivia

## **Comité de revisores**

MSc. Alejandro Bustillos Vega,  
Universidade Federal de Lavras, Brasil

Ing. Marina Pacara Copa,  
Fundación "Aguatuya", Bolivia

MSc. Eliana Cáceres Torrico,  
Universidad Privada del Valle, Bolivia

MSc. Gerber Nina Chuquimia,  
Universidad Privada del Valle, Bolivia

MSc. Walter Antonio Abujder Ochoa,  
Universidad Católica Boliviana "San Pablo",  
Bolivia

MSc. Arturo Echeverría Zenteno,  
Universidad Privada del Valle, Bolivia

Ing. Nahúm Gamalier Cayo Chileno,  
Universidade Federal de Lavras, Brasil

MSc. Edgar Calatayud Ríos,  
Universidad Privada del Valle, Bolivia

MSc. Miguel Angel Pinedo,  
Universidad Privada del Valle, Bolivia

Carlos Gonzalo Acevedo Peña, PhD,  
Universidad Mayor de San Simón, Bolivia

MSc. Gonzalo Guzmán Orellana,  
Fundación de Investigación e Innovación de  
Bolivia, Bolivia

## **Autoridades Universitarias**

MSc. Gonzalo Ruiz Ostria

### **Rector**

PhD Diego Villegas Zamora

### **Vicerrector Académico**

MSc. Sandra Ruíz Ostria

### **Vicerrectora de Interacción Social**

Lic. Daniela Zambrana Grandy

### **Secretaria General**

MSc. Franklin Néstor Rada

### **Vicerrector Académico Subsede La Paz**

MSc. Ana Cárdenas Angulo

### **Vicerrector Académico Subsede Santa Cruz**

MBA. Carlos Torricos Mérida

### **Vicerrector Académico Subsede Sucre**

MSc. Miguel Añez Saneshima

### **Vicerrector Académico Subsede Trinidad**

MSc. Jorge Ruíz de la Quintana

### **Director Nacional de Investigación**

## **Equipo técnico**

MSc. Esther Ivonne Rojas Cáceres

### **Coordinadora de Publicaciones y Difusión**

#### **Científica**

Lic. Luis Marco Fernández Sandoval

### **Coordinador de Producción Audiovisual**

Depósito Legal N° 2-3-66-09  
La reproducción parcial o total de los  
artículos está permitida en tanto las  
fuentes sean citadas.

Es parte de:



Universidad Privada del Valle  
Telf: (591) 4-4318800 / Fax: (591) 4-4318886.  
Campus Universitario Tiquipaya.  
Calle Guillermina Martínez, s/n, Tiquipaya.  
Casilla Postal 4742.  
Cochabamba – Bolivia.

# ÍNDICE

Páginas

## Editorial

*Editorial*

**Pablo Arce Maldonado, PhD**.....5

## Tecnologías 4.0 involucradas en las startups de base tecnológica en Latinoamérica

*Technologies 4.0 involved in technology-based startups in Latin America*

**Melody Daiana Gutiérrez Merida, Lucas Mateo Villafuerte Mercado,**

**Adriana Gabriela Rosales Ramos, Jhoel Ariel Espíndola Pérez**.....6-19

## Sistema de gestión de mantenimiento basado en el modelo de 8 fases para una empresa de servicios de instrumentación y control en la ciudad de Santa Cruz, Bolivia

*Management System based on the 8-phase model for an instrumentation and control services company in Santa Cruz, Bolivia.*

**Carlo Andre Peinado Bazán**.....20-39

## Plan de Inspección Basado en Matriz de Criticidad y Frecuencia de Fallos para Equipos en la Producción de Lácteos

*Inspection Plan Based on Criticality Matrix and Failure Frequency for Dairy Production Equipment*

**Abel Benjamín Humacata Castrillo**.....40-60

## Dispositivo electrónico para apoyar el aprendizaje inicial de lectura Braille

*Electronic device to support the initial learning of Braille Reading*

**Yamil Condarco Calderón**.....61-76

## Análisis y cálculo de los caudales de evento extremo mediante tormentas estocásticas en la cuenca de Misicuni – Cochabamba, Bolivia

*Analyses and calculation of the extreme event discharges with stochastic storms in the Misicuni basin – Cochabamba, Bolivia*

**Andrés Cardoso Velasco, Claude Le Noir**.....77-114

## Análisis y proyección de la resistencia a compresión del concreto, utilizando agregados finos y gruesos de los residuos de construcción y demolición (RCD) de la planta piloto de EMAVERDE.

*Analysis and projection of the compressive strength of concrete, using fine and coarse aggregates of construction and demolition waste (CDW) from the EMAVERDE pilot plant.*

**Rodolfo Angel Aliaga Choque**.....115-131

## NOTA EDITORIAL

Apreciados lectores,

En un continuo esfuerzo por abordar los desafíos de la ingeniería, el Journal Boliviano de Ciencias se complace en presentar la edición del Volumen 19 Número 54, centrada mayormente en estudios de caso, aunque también deteniéndose un poco en las tecnologías asociadas a la Industria 4.0 empleadas en los startups tecnológicos en Latinoamérica y el aprendizaje de lectura braille apoyado por la tecnología.

Los artículos seleccionados ofrecen una visión de la gestión de mantenimiento en una empresa de servicios de instrumentación y la gestión de inspección de equipos para la producción de lácteos, pero también la incorporación en el hormigón de agregados, provenientes de residuos de construcción y demolición procesados en la planta piloto de transformación de EMAVERDE en La Paz, Bolivia, para proponer una fórmula que pueda predecir el comportamiento de dicho hormigón.

Se presenta una modelación estocástica de tormentas aplicada a la presa de Misicuni, comparada con métodos convencionales, como una alternativa para la predicción del comportamiento de los caudales involucrados. Además, también se presenta el diseño de un dispositivo electrónico para el apoyo del aprendizaje de lectura de caracteres braille, con la finalidad de apoyar a los instructores en el proceso de lectura de dichos caracteres mediante el uso de una aplicación móvil Android.

A través de estos trabajos, se invita a la comunidad científica a explorar los horizontes tecnológicos, con la motivación mutua de seguir avanzando hacia un futuro donde la innovación y la ingeniería convergen para mejorar la calidad de vida y el progreso local y global.



**Pablo Arce Maldonado, PhD**  
Editor en Jefe  
Journal Boliviano de Ciencias

Artículo de revisión bibliográfica

# Tecnologías 4.0 involucradas en las startups de base tecnológica en Latinoamérica

Technologies 4.0 involved in technology-based startups in Latin America

 Melody Daiana Gutierrez Mérida<sup>1</sup>,  Lucas Mateo Villafuerte Mercado<sup>2</sup>,  Adriana Gabriela Rosales Ramos<sup>3</sup>,  Jhoel Ariel Espíndola Pérez<sup>4</sup>.

1. Estudiante de Ingeniería Industrial. Universidad Privada del Valle. Cochabamba, Bolivia. Correo electrónico: [gmm0027560@est.univalle.edu](mailto:gmm0027560@est.univalle.edu)

2. Estudiante de Ingeniería Industrial y de Sistemas. Universidad Privada del Valle. Cochabamba, Bolivia. Correo electrónico: [vml2019795@est.univalle.edu](mailto:vml2019795@est.univalle.edu)

3. Estudiante de Ingeniería Industrial y de Sistemas. Universidad Privada del Valle. La Paz, Bolivia. Correo electrónico: [rra2022894@est.univalle.edu](mailto:rra2022894@est.univalle.edu)

4. Estudiante de Ingeniería Industrial y de Sistemas. Universidad Privada del Valle. Cochabamba, Bolivia. Correo electrónico: [epj1010155@est.univalle.edu](mailto:epj1010155@est.univalle.edu)

## RESUMEN

El objetivo del presente artículo de revisión bibliográfica es recopilar información sobre las tecnologías asociadas a la Industria 4.0 que han sido utilizadas en el crecimiento y/o funcionamiento de las startups de base tecnológica en Latinoamérica. Para ellos, se realizó una revisión sistemática mediante la plataforma Google Scholar, utilizando parámetros y conectores booleanos. La búsqueda inicial arrojó 189 resultados, de los cuales 7 estudios fueron incluidos en esta revisión. Varios de los documentos revisados presentan información del ecosistema de innovación y la importancia de la aplicación de tecnologías 4.0 en startups de diversos países. Se muestran como tecnologías más utilizadas la ciberseguridad y el cloud computing, siendo estas las pioneras en el crecimiento de las startups. De igual forma, se presentan estrategias como el cluster para el desarrollo de este tipo de empresas y la utilización de entidades o instituciones que apoyan la inserción de tecnología en estas. Es necesario saber cómo utilizar la información generada, al igual que como rentabilizarla, logrando que las empresas evolucionen y se adapten a la evolución industrial.

**Palabras claves:** Plataformas digitales. Evolución industrial. Innovación. Estrategias. Ciberseguridad.

## ABSTRACT

The objective of this bibliographic review article is to collect information on Industry 4.0 technologies that have been used in the growth and/or operation of technology-based startups in Latin America. A systematic review was carried out using the Google Scholar platform, using Boolean parameters and connectors. The initial search returned 189 results, of which 7 studies were included in this review. Several of the documents reviewed present information on the innovation ecosystem and the importance of applying 4.0 technologies in startups from various countries. The most widely used technologies are cybersecurity and

**Citar como:** Gutierrez Merida, M. D., Villafuerte Mercado, L. M., Rosales Ramos, A. G., & Espíndola Pérez, J. A. Tecnologías 4.0 involucradas en las startups de base tecnológica en Latinoamérica. *Journal Boliviano De Ciencias*, 19(54), 7-20 <https://doi.org/10.52428/20758944.v19i54.621>

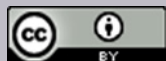
**Revisado:** 23/04/2023

**Aceptado:** 24/11/2023

**Publicado:** 20/12/23

**Declaración:** Derechos de autor 2023 Melody Daiana Gutierrez Merida, Lucas Mateo Villafuerte Mercado, Adriana Gabriela Rosales Ramos, Jhoel Ariel Espíndola Pérez, Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento.





cloud computing, these being the pioneers in the growth of startups. In the same way, strategies such as the cluster for the development of this type of companies and the use of entities or institutions that support the insertion of technology in them are presented. It is necessary to know how to use the information generated, as well as how to make it profitable, making companies evolve and adapt to industrial evolution.

**Keywords:** Digital platforms. Industrial revolution. Innovation. Strategies. Cybersecurity.

## 1. INTRODUCCIÓN

La Industria 4.0 ha utilizado las nuevas tecnologías relacionadas con la interconectividad, bases de datos, automatización en el diseño, manufactura y comercialización de los productos y/o servicios, manejando nuevos modelos de negocios donde se considera a las empresas, proveedores y clientes (Jacquez y López, 2018). Además, ha perseguido una transformación radical en la producción y entrega de bienes, incluyendo la colaboración y sinergia de varios activos físicos con tecnologías como internet de las cosas, inteligencia artificial, computación en la nube, blockchain, big data, nanotecnología, entre otros (UADIN, 2019). Las tecnologías de la industria 4.0, también conocidas como tecnologías 4.0, se refieren a sistemas que recopilan datos del entorno físico y posteriormente generan un archivo digital que se comparte en una red para su visualización en tiempo real (Gatica Neira y Ramos Maldonado, 2020).

La industria 4.0 se caracteriza por la fusión de tecnologías inteligentes con los procesos y métodos de manufactura tradicionales, lo que permite una interconexión completa de los sistemas y maquinaria. En este sentido, el software juega un papel fundamental como una pieza clave para la incorporación de diversas tecnologías en la práctica industrial. De acuerdo con Sampedro Guaman et al. (2021), la adopción de tecnologías en la industria es crucial para que las empresas sean consideradas líderes en el mercado y tengan una mayor demanda. Señalan que la industria 4.0 tiene un impacto significativo en la competitividad empresarial.

Asimismo, la industria 4.0 abre nuevas oportunidades para la mejora continua de la producción mediante la implementación de estrategias personalizadas. Las empresas que cuentan con sus propios sistemas pueden diseñar soluciones específicas que se adapten a sus necesidades particulares, lo que les permite acrecentar su alcance. La proyección de facilidades en el manejo de procesos y la eficacia en la implementación de tecnologías versátiles contribuyen a un aumento significativo de su integración en las cadenas industriales, tal como Sampedro Guaman et al. (2021) menciona en sus investigaciones.

A través de la literatura revisada se ha definido a las startups como aquellos emprendimientos que generan ingresos en las primeras semanas o meses, crecen sin estructura, son empresas formadas recientemente y mueven sus actividades de un segmento de mercado a otro en cuestión de días. Blank (2010) afirma “Organización temporal diseñada para buscar un modelo de negocio repetible y escalable”, con esto se dio una idea que la gran característica de una startup es la escalabilidad.

Las empresas de base tecnológica son aquellas que buscan diferenciarse por medio de actividades innovadoras en nuevos mercados o en el desarrollo e inserción de productos de base tecnológica (Maia, 2016), haciendo notar que las empresas con más éxito en adaptarse a la Industria 4.0 son aquellas que buscan implementar tecnología para mejorar todas las áreas de trabajo (CCOO Industria, 2017). Una startup normal a diferencia de una de base tecnológica difiere en el aspecto del uso de la tecnología como fuente principal para innovar, siendo un factor relevante en la economía del siglo XXI (Solís y Torres, 2022).

Global Lighthouse Network y McKinsey & Company argumentan que las empresas líderes se convertirán en modelos a seguir (fabricantes inmersos en nuevas tecnologías), demostrando resultados efectivos y acelerando las cadenas de valor exponencialmente, haciendo notar que las empresas que no invierten en nuevas tecnologías se vean en desventaja (CIDI Puebla, 2021). Este crecimiento está llevando rápidamente a las empresas al siguiente nivel, creando empleos directos, atrayendo inversiones de capital de riesgo, revitalizando las economías locales y nacionales y brindando tracción e ingresos con modelos comerciales basados principalmente en la tecnología y aumentando la confianza de los inversionistas (Rojas, 2022).

Dentro del top de países latinoamericanos con mayor cantidad de startups, Brasil lidera la lista (perteneciendo al top 10 mundial) con 1152 startups, seguido de Perú (682), México (533), Colombia (500), Argentina (440), Chile (372), Venezuela (89), Uruguay (73), Ecuador (72) y Bolivia (38). “Las startups concentradas en sectores tecnológicos representan poco más del 35% del registro global, ellas muestran una participación importante en la generación de productos, servicios o modelos de negocios innovadores por parte de este tipo de organizaciones. Asimismo, también se identifica la participación de las startup en sectores de tecnología de punta como las tecnologías limpias, la inteligencia artificial, robótica o ciberseguridad” (Solís y Torres, 2022, p.8).

Al realizar una revisión sistemática sobre las tecnologías 4.0 utilizadas, se busca identificar las tendencias en la adopción de las mismas, contribuyendo a la toma de decisiones estratégicas, el diseño de políticas y generar conocimiento sobre los resultados de la implementación en las empresas. En base a lo leído, el objetivo del presente artículo de revisión bibliográfica es obtener y recopilar información sobre las tecnologías de la Industria 4.0 que han sido utilizadas en el crecimiento y/o funcionamiento de las startups de base tecnológica en países de Latinoamérica, bajo una serie de palabras clave y criterios de selección para estudios realizados desde el 2015 hasta el 2023.

## 2. METODOLOGÍA

Los artículos utilizados en esta revisión sistemática fueron extraídos de las plataforma Google Scholar, escogida por ser una base bibliográfica de información interdisciplinaria bajo los siguientes parámetros y conectores booleanos: +“Industria 4.0” OR “cuarta revolución industrial” “startups” “base tecnológica” “aplicaciones” +“big data” OR “automatización” “nube” “internet” “digitalización” “inteligencia artificial” “herramientas digitales” “herramienta tecnológica”.

Todos los estudios relevantes fueron estudiados en título, resumen y consiguientemente eliminados siguiendo los criterios de inclusión predeterminados antes de revisar el documento completo.

Los siguientes criterios de inclusión fueron aplicados:

**Tabla N°1. Criterios de inclusión**

<b>1.</b>	El estudio se basó en startups de base tecnológica que brinden sus servicios en Latinoamérica.
<b>2.</b>	El estudio tuvo que contener información del ecosistema de innovación y las tecnologías de la industria 4.0 por aplicar o aplicadas en el contexto.
<b>3.</b>	El estudio tuvo que presentar información entre el periodo 2015-2022.
<b>4.</b>	El estudio tuvo que presentar alternativas para la mejora del ecosistema de innovación, en caso de no mencionar tecnologías 4.0.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

La recaudación de datos fue elaborada resumiendo los artículos por tipo de documento, objeto, principales hallazgos y conclusión. El análisis de los datos fue realizado en estilo narrativo.

### 2.1. Restricciones de idioma y fecha

El idioma de los artículos evaluados se limitó al español y portugués, ya que son los idiomas predominantes en la región geográfica estudiada, con el objetivo de analizar principalmente aquellos estudios realizados en países latinoamericanos. En la revisión, se utilizaron exclusivamente documentos académicos publicados a partir del año 2015. Este intervalo de tiempo abarcará un período de siete años, lo que permitirá obtener una visión más completa para comprender mejor la evolución y la situación actual de las tecnologías 4.0 que han sido utilizadas e involucradas en las startups de base tecnológica en Latinoamérica.

### 2.2. Evaluación de calidad

La calidad de los documentos incluidos fue evaluada calificando los mismos como débil, moderado o fuerte. Las calificaciones se otorgaron de acuerdo con los estándares establecidos en relación a la descripción del documento con respecto al objetivo del presente artículo, como se presenta en la tabla N°2.

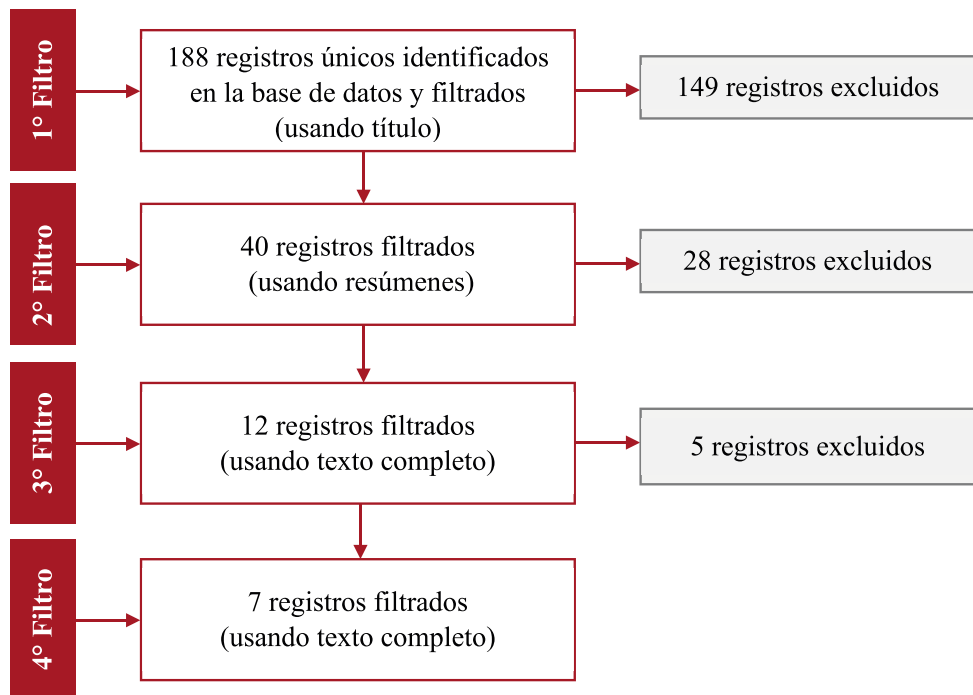
**Tabla N°2. Criterios para calificar la calidad de los estudios revisados**

Calificación	Definición	Descripción del estudio
*	Débil	Menciona aspectos del contexto relacionado a la importancia de innovación y/o tecnologías de la industria 4.0 en empresas latinoamericanas.
**	Moderado	Menciona aspectos del contexto relacionado a las tecnologías de la industria 4.0 y presenta al menos una tecnología empleada en empresas latinoamericanas.
***	Fuerte	Explica de forma detallada el contexto relacionado a las tecnologías de la industria 4.0 y presenta más de 3 tecnologías empleadas en empresas latinoamericanas.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

### 3. RESULTADOS

La búsqueda inicial en la base bibliográfica Google Scholar arrojó 189 resultados, de los cuales 149 fueron excluidos por el título, 28 fueron excluidos basados en los resúmenes y cinco fueron excluidos basados en la lectura del texto completo. Un total de siete estudios fueron incluidos en esta revisión (ver figura N°1).



**Figura N°1. Diagrama de flujo visualizando el filtrado sistemático y la exclusión de artículos**

Fuente: Elaboración propia, 2022.

A partir del filtrado de documento, se han obtenido siete títulos para revisión final, esto tomando en cuenta los criterios de inclusión, las restricciones de idiomas y las restricciones temporales, explicados en la metodología.

La mayoría de los estudios (n=4) fueron artículos publicados por revistas científicas de diversos rubros, los cuales hacen análisis de las empresas presentes en sus países de publicación bajo un criterio definido dentro de los conceptos presentes en la ejecución o desarrollo de la industria 4.0. Por su parte, los artículos restantes (n=3) fueron tesis de grado y un documento de proyecto, publicado por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), los cuales se abocaron en la identificación de programas, actores e iniciativas que contribuyen en el crecimiento empresarial (ver tabla N°3).

**Tabla N°3. Resumen de las características de cada estudio**

Autores	Tipo de documento	Objetivo	Descripción de la metodología
Jiménez y Martínez (2022)	Tesis de grado	Identificar programas, actores gubernamentales e iniciativas que hayan contribuido con el uso de los recursos de innovación entre micro, pequeñas y medianas empresas (MiPymes) y el ecosistema de ciencia, tecnología e innovación.	Se realizó un tipo de investigación cualitativo (DAC). Se dirigió el análisis a las iniciativas de innovación abierta en Bogotá. También se realizaron entrevistas bajo un cuestionario flexible con preguntas y contra preguntas. Por último, se indagó bajo las variables “conceptos sobre innovación e innovación abierta”, “factores internos y externos que inciden en los procesos de innovación abierta” y “elementos de la estrategia de innovación abierta”.
Ballesteros et.al., (2020)	Artículo de revisión bibliográfica	Analizar los diferentes estudios de industrias 4.0, economía y transformación digital, con el fin de implementar estrategias de superación y adquisición de las tecnologías 4.0 en las pymes cucuteñas de Colombia.	Se realizó una revisión bibliográfica usando revistas científicas, repositorios y artículos científicos. Se tomaron como palabras clave industria 4.0, componentes y transformación digital. Igualmente se utilizó información de la Cámara de Comercio de Cucuta, el IED y el DANE (instituciones colombianas).
Estrada (2021)	Artículo científico	Revisar la madurez tecnológica de las empresas en la ciudad de La Paz, Bolivia, para implementar procesos productivos en el marco de la cultura tecnológica.	Se realizaron encuestas a 35 industrias manufactureras en la ciudad de La Paz Bolivia, de una muestra de 139 empresas. Se preguntó de experiencias en el uso de tecnologías, estado de desarrollo tecnológico y tecnologías de relacionamiento con los clientes. También se utilizó un modelo econométrico con las variables: tecnologías utilizadas, áreas de aplicación, sistemas de relacionamiento con los clientes, etc.

<p>Agudelo y Henao (2019)</p>	<p>Artículo de revisión bibliográfica</p>	<p>Conocer los principales conceptos de la industria 4.0 y la importancia de los cluster como base para la implementación de este tipo de industria.</p>	<p>Se realizó un estudio cualitativo con un análisis bibliométrico con diferentes fuentes de información. De esta forma, los conceptos más relevantes fueron: industry, system, model, etc. Se consultaron bases de datos como Google Académico, Scopus, Science Direct, bases de datos públicas y páginas no estructuradas.</p>
<p>Almazán (2018)</p>	<p>Tesis de grado</p>	<p>Analizar la dinámica de crecimiento de startups en Argentina, con foco de análisis en la información generada a partir de opinantes calificados de quienes conducen algunas de ellas en la ciudad de La Plata.</p>	<p>Se tomó una muestra aleatoria de emprendedores argentinos que tienen o han tenido startups establecidas en Argentina desde el año 2000 en adelante. También se entrevistó a doce emprendedores participantes del programa Usina de Ideas. Los resultados fueron analizados bajo métodos cualitativos, describiendo los factores críticos de éxito dentro de las tecnologías de información.</p>
<p>Matus (2021)</p>	<p>Artículo científico</p>	<p>Analizar dos iniciativas sociotécnicas, una ciudadana y otra gubernamental, que se configuraron en México como respuesta al desabastecimiento y acaparamiento de dispositivos médicos durante la pandemia del COVID-19.</p>	<p>Se utilizó el monitoreo en línea del grupo de los makers en México, al igual que entrevistas públicas con miembros de la comunidad y revisión de fuentes secundarias, descubriendo la red de actores involucrados en el diseño, fabricación o impresión de dispositivos médicos.</p>
<p>Maggi et al., (2020)</p>	<p>Documento de proyecto (CEPAL)</p>	<p>Indagar directamente acerca de las motivaciones, beneficios y obstáculos de la introducción del desarrollo tecnológico dentro de la industria 4.0 en un conjunto de pymes manufactureras.</p>	<p>Se aplicaron entrevistas semiestructuradas conforme a la guía de los estudios de campo desarrollados en las diferentes regiones incluidas en el estudio. Se hace uso del método de análisis TOE (organización técnica-ambiente). En total de entrevistaron 20 empresas dentro del sector manufacturero.</p>

Fuente: Elaboración propia, 2023

**Tabla N°4. Principales hallazgos del estudio**

Autores	Calificación	Principales hallazgos	Conclusiones
Jiménez & Martínez (2022)	*	Se identificaron empresas y organizaciones privadas que realizan programas para el fomento de la innovación, emprendimiento y desarrollo, acelerando startups en Bogotá. A partir de estos, las conexiones entre startups y otras empresas innovadoras propician sinergias entre los actores, aplicando tecnologías como: cloud computing, ciberseguridad. Internet de las cosas.	Las empresas y organizaciones identificadas deben tomar iniciativas para el impulso de los modelos de innovación. Un factor clave para el desarrollo de la innovación abierta es la participación de agremiaciones,
Ballesteros et al., (2020)	***	En el 2017, las grandes empresas y mypimes adoptaron en un 1.5% inteligencia artificial; del 2.2% al 3.5% internet de las cosas; y el 2.7% robótica.  Dentro de la infraestructura empresarial se adoptaron: ciberseguridad y cloud computing. Para el procesamiento se adoptó: internet de las cosas, robótica, impresión 3D y realidad virtual. Por último, en la distribución se usaron: Big data, inteligencia artificial y blockchain. La aplicación de estas tecnologías busca flexibilizar la individualización de los procesos.	En total, 650 empresas de base tecnológica del departamento del Norte de Santander (Colombia) han implementado en sus procesos las tecnologías 4.0. La mayor implementación fue a nivel de infraestructura. Se deben fortalecer los procesos de evolución y enfocarse en la innovación sostenible.
Estrada (2021)	*	Las empresas pacañas usuarias de tecnología tienen mejor desempeño que aquellas empresas que no utilizan tecnología de manera activa.  Existe una correlación positiva y significativa entre el uso de tecnología y nivel de ventas para cualquier tamaño de establecimiento.  Las empresas de alimentos y fármacos utilizan la tecnología para ser competitivos.	La adopción de estrategias tipo industria 4.0. y agricultura 4.0 tienen la potencialidad de ofrecer a sus usuarios mayores saltos en beneficios y contribución a un medio ambiente más amigable.  Dentro de la cadena de valor de los procesos industriales, se utiliza mayor tecnología en producción y comercialización.
Agudelo y Henao (2019)	**	Los clusters promueven tanto la competencia empresarial como la cooperación entre las mismas.  La industria 4.0 no solo es aplicable al Cluster Hábitat Sostenible, sino que es transversal a todos los sectores económicos del territorio.	Las tecnologías de la industria 4.0 deben ayudar a los territorios a gestionarse como inteligente para solucionar problemas de la sociedad.  La estrategia Cluster debe propiciar el desarrollo de proyectos para la creación de startups tecnológicas en Medellín.



Almazán (2019)	*	<p>Las startups tecnológicas argentinas entrevistadas tienen un alto componente tecnológico pero no cuentan con un manejo de redes sociales, aunque en un 72,7% manejan sitio web.</p> <p>La antigüedad de las startups está relacionada con su crecimiento, las de mayor antigüedad están más desarrolladas.</p>	<p>Lograr escalabilidad, alcanzar la sostenibilidad en el tiempo y generar valor en los usuarios/clientes es una característica destacada para tener éxito con una startup.</p> <p>Las startups argentinas deben acceder a programas de aceleradoras de negocio, para consolidar su visión global de la empresa y generar influencia en el mercado.</p>
Matus (2021)	**	<p>Empresas en la industria automotriz, y empresas de autopartes desconocen la tecnología 3D y sus aplicaciones.</p> <p>La industria más familiarizada con el concepto de fabricación aditiva es la industria automotriz, pero esta participación solo alcanza el 40%. En industrias metalmeccánicas solo el 17% está desarrollando un proceso de compra de tecnología.</p> <p>Entre los expuestos a la tecnología, el 50 % citó dos razones para su adopción: 1) la necesidad de acelerar el desarrollo del producto y 2) la necesidad de ofrecer personalización y ediciones limitadas.</p>	<p>Se necesitan nuevos arreglos entre instituciones científicas tradicionales, gobiernos y fabricantes para garantizar que se mejoren las capacidades de estos últimos.</p> <p>A nivel individual, el uso de tecnologías de diseño y manufactura distribuida (CAD y CAM, siglas en inglés) es cada vez más común en México, tanto en colectivos maker como en otros espacios de producción digital.</p>
Maggi et al., (2020)	*	<p>Las empresas que adoptaron la tecnología no tienen como obstáculo el financiamiento, por lo tanto se mantienen actualizados y vigentes en el mercado.</p> <p>La incorporación de las tecnologías digitales 4.0 se centró en la oferta de productos, antes que en los procesos.</p> <p>Las empresas encuestadas tienen problemas de captación de talento técnico medio con competencias digitales y tecnológicas.</p>	<p>El financiamiento es importante en lo que se refiere a capacitación y conocimiento del mercado, así como apoyo para la provisión de bienes de capital y/o tecnologías de software. Las empresas líderes progresaron debido a la tecnología, provocando que no sea solo una cuestión de conocimiento sino también de cultura digital.</p>

Fuente: Elaboración propia, 2023.

#### 4. DESAROLLO

Según Jiménez (2022) se identificaron diversas startups dedicadas a la innovación, desarrollo y programas que fomentan a la creación de nuevos emprendimientos digitales. Sin embargo, Pérez (2019) sintetiza un conjunto de empresas que se encuentran en Cantabria (España), cuya actividad es la de prestar tecnologías de la industria 4.0, como ser inteligencia artificial, big data, blockchain, internet of things, cloud computing, entre otras. Comparando países como España y Colombia se puede evidenciar que existe un retraso en la forma de utilizar las tecnologías 4.0. Mientras en Cantabria existen empresas que prestan dichas herramientas tecnológicas, Bogotá únicamente usa plataformas que las contienen.

Según Ballesteros, Gómez y Mendoza (2020) existen 3 tipos de pilares presentes en las tecnologías: infraestructura, procesamiento y distribución. La más resaltante a nivel Colombia fue la ciberseguridad y el cloud computing. Basándose en estos resultados, la ciberseguridad es la tecnología más llamativa para las empresas grandes, pymes y micros. De acuerdo con los expertos de Information Systems Audit and Control Association, la ciberseguridad se define como “una capa de protección para los archivos de información” (Infosecurity, 2 de diciembre de 2022) dando a entender que para empezar en las tecnologías 4.0 es importante brindar seguridad en la información empresarial y de los clientes. Seguido de la introducción de la ciberseguridad y el cloud computing, el mismo estudio muestra la adopción a nivel procesamiento de Internet de las Cosas (IoT), Robótica, Impresión 3D y Realidad Virtual con porcentajes de adopción que van del 1% al 9%; según el estudio realizado por Leal Galvis et al. (2020). el uso del Internet de las cosas y la realidad aumentada son tecnologías con capacidad de reducción de costos y tiempos de producción, incrementando la productividad de las empresas del rubro textil a nivel mundial. Por su parte dentro del eje de distribución se procura la implementación de las tecnologías, Big Data, Inteligencia Artificial y Blockchain. El Big Data muestra diferentes beneficios dentro de las empresas, como ser la reducción de tiempos, optimización de recursos y mayor flexibilidad, de esta forma a partir del análisis de datos se desarrollan estrategias y soluciones reales al contexto de la industria aplicada (Hernández-Leal et al., 2017). Así como también, el uso del block chain muestra su auge en la gestión de ventas, incrementando los niveles de eficiencia de los mismos y dando a considerar la importancia de esta tecnología (Zeballos Umpiri, 2022).

¿Para qué sirve implementar las tecnologías 4.0 en las startups? “Hay una correlación positiva y significativa entre el uso de tecnología y nivel de ventas para cualquier tamaño de establecimiento” (Estrada, 2021). Por lo tanto una startup que implementa tecnología puede incrementar sus ventas u obtener una ventaja competitiva. Las empresas en La Paz (Bolivia) presentan mejor desempeño que las que no usan tecnología 4.0 de manera activa, notando la necesidad de empresas competitivas. Como menciona Valencia y Henao (2019) “aunque actualmente se cuenta con respaldo desde el gobierno nacional para la implementación de la industria 4.0 en las ciudades, es importante fortalecer el apoyo que desde lo público se da”. Además, se menciona que “la industria 4.0 no solo es aplicable al Cluster Hábitat Sostenible tomando como base las ciudades inteligentes, sino que la industria 4.0 es transversal a todos los sectores económicos del territorio, es decir que, de acuerdo a esto, todas las economías de la ciudad deben trabajar conjuntamente en promover la industria 4.0 al interior de las mismas”.

Si bien se señala que el crecimiento y desarrollo de las startups tecnológicas es posible si se tiene acceso a programas de aceleradoras de negocios, en el informe realizado por el Banco Interamericano de Desarrollo se menciona que promover la vocación por el emprendimiento, la ciencia y la tecnología ayuda a definir estrategias para impulsar el desarrollo de estas (Kantis, 2020).

Según los resultados del autor Matus (2021), la adopción de tecnologías relacionadas con impresión 3D y manufactura aditiva impulso la puesta en marcha de grandes proyectos. Sin embargo, no se prevé que esta producción sustituya a la producción en masa, sino que más bien se convierta en un proceso complementario a esta; aunque sí obligará, partiendo de la simplificación, a redefinir las actuales estrategias de fabricación y de la cadena de suministro de los startups (Lopez,

2018). Por otro lado, existe consenso en que, desde una perspectiva de las ciencias sociales, es bastante posible crear planes de negocios basados en tecnología que contribuyan en temas sociales y de sustentabilidad e innovación (Gomez, 2019).

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La revisión sistemática se centró en artículos escritos en español y portugués, que son los idiomas predominantes en la región estudiada. Además, se llevó a cabo una selección de documentos académicos desde el año 2015 hasta 2023, lo que permitió un análisis de siete años de la evolución de las tecnologías 4.0 en el entorno empresarial de la región. Según Jiménez (2022), se han identificado diversas startups dedicadas a la innovación y desarrollo de nuevos emprendimientos digitales. Sin embargo, existe una brecha en la adopción de estas tecnologías entre países como España y Colombia.

En Cantabria, España, existen empresas que prestan tecnologías de la industria 4.0, mientras que en Bogotá, Colombia, solo se utilizan plataformas que contienen estas tecnologías. Según Ballesteros, Gómez y Mendoza (2020), la ciberseguridad y el cloud computing son las tecnologías más destacadas en Colombia. Además, se están adoptando tecnologías como Internet de las Cosas (IoT), Robótica, Impresión 3D y Realidad Virtual.

En el eje de distribución, se busca implementar tecnologías como Big Data, Inteligencia Artificial y Blockchain. Estas tecnologías ofrecen beneficios como la reducción de tiempos, optimización de recursos y mayor flexibilidad. Según Estrada (2021), existe una correlación positiva y significativa entre el uso de tecnología y el nivel de ventas para cualquier tamaño de establecimiento.

En conclusión, la implementación de las tecnologías 4.0 en las startups y empresas es crucial para su crecimiento y desarrollo. No solo permite incrementar las ventas y obtener una ventaja competitiva, sino que también promueve la seguridad de la información empresarial y de los clientes. Sin embargo, es necesario un mayor apoyo y promoción de estas tecnologías en todos los sectores económicos para cerrar la brecha existente en su adopción.

Por su parte, también se identifican oportunidades de mejora para futuros documentos científicos, como la ampliación de la búsqueda a otras fuentes en diferentes idiomas relevantes para la región latinoamericana. De esta manera, se podrá obtener una perspectiva más amplia y enriquecedora de las tecnologías 4.0 en las startups y empresas de la región. Además, se sugiere incorporar estudios que abarquen un período más extenso, permitiendo así observar tendencias a largo plazo y una mejor comprensión de cómo estas tecnologías han sido adoptadas y transformadas a lo largo del tiempo.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Ing. Rosaluz Valda Romero, Directora del Departamento Académico de Industrias, la Ing. Deysi Iñiguez Calveti, Coordinadora del Departamento de Industrias y la estudiante Aracely Lorena Sandalio Choque, por su constante apoyo en el desarrollo del artículo científico, guiando a los autores en una correcta estructura y búsqueda de información.

## 7. REFERENCIAS

- Agudelo, A. & Henao, L. J. (2019). Industrias 4.0 en el contexto de la estrategia cluster de la ciudad de Medellín-Colombia. *Debates sobre Innovación*, 3(1), 1-22.
- Almazán, M. B. (2018). Start-ups tecnológicas en Argentina: Factores que impulsan su desarrollo (Tesis de maestría en dirección de empresas). Universidad Nacional de la Plata, Argentina.
- Ballesteros, P.E., Gómez, S. A. & Mendoza, V. J. (2020). Implementación de las Industrias 4.0 como Componente Digital Para La Transformación Digital de la Economía de Norte De Santander. *Journal of International Business and Borders*, 3(1), 19-30.
- Bedoya Olarte, T. (2019). Transformación digital y la Industria 4.0 (tesis de grado). Recuperado de: <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/17458>
- Blank S. (2010). What's A Startup? First Principles [Mensaje en un blog]. Recuperado de: <https://steveblank.com/2010/01/25/whats-a-startup-first-principles/>
- CCOO Industria. (2017). La digitalización y la Industria 4.0. Recuperado de: <https://goo.su/KjXlv>
- CIDI Puebla (2022). Las tecnologías innovadoras en la industria 4.0. Puebla, México. CIDI Puebla. Recuperado de: <https://www.cidipuebla.mx/industria-automotriz/las-tecnologias-innovadoras-en-la-industria-4-0/>
- Escartín, D., Marimon, À., Rius, A., Vilaseca, X., & Vives, À. (2020). Startup: Concepto y ciclo de vida. *Revista de Contabilidad y Dirección*, 30, 13-21.
- Estrada Cava, A. H. (2021). Cultura tecnológica en las empresas. *Revista PGI. Investigación, Ciencia y Tecnología en Informática*, (8), 18–21.
- Gatica Neira, F. E., & Ramos Maldonado, M. A. (2020). Public policies and networks for the development of 4.0 technologies in Chile. *PAAKAT: Revista de Tecnología y Sociedad*, 1–28. <https://doi.org/10.32870/Pk.a10n19.475>
- Gomez Zuluaga, M. E. (2019). Emprendimiento de base tecnológica: Un reto por cumplir. *Tec Empresarial*. 13(2), 33-44.
- Hernández-Leal, E. J., Duque-Méndez, N. D., & Moreno-Cadavid, J. (2017). Big Data: una exploración de investigaciones, tecnologías y casos de aplicación. *Tecnológicas*, 20(39).
- Infosecurity. (2022). Ciberseguridad: una guía completa del concepto, tipos, amenazas y estrategias. México. Recuperado de: <https://www.infosecuritymexico.com/es/ciberseguridad.html#:~:text=De%20acuerdo%20a%20los%20expertos,seguridad%20de%20la%20informaci%C3%B3n%20electr%C3%B3nica>
- Jacquez Hernández, M. V., & López Torres, V. G. (2018). Modelos de evaluación de la madurez y preparación hacia la Industria 4.0: una revisión de literatura. *Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*, 6(20), 61-78.
- Jimenez Hernandez, C. M. & Martinez Sandoval, R. F. (2022). Modelo de fomento para que las mipymes de Bogotá aprovechen las capacidades del ecosistema de Ciencia Tecnología e Innovación de la ciudad (Tesis de maestría en Estrategia, Innovación y Competitividad). Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá, Colombia.

- Kantis, H. & Angelelli, P. (2020). Emprendimientos de base científico-tecnológica en América Latina: Importancia, desafíos y recomendaciones para el futuro. Banco interamericano de desarrollo. <https://publications.iadb.org/es/emprendimientos-de-base-cientifico-tecnologica-en-america-latina-importancia-desafios-y>
- Leal Galvis, R., Orozco De Alba, L., & Romero-Conrado, A. R. (2020). Desarrollo, tendencias, aplicaciones y herramientas de la industria 4.0 en el sector textil. BILO, 2(1). <https://doi.org/10.17981/bilo.02.01.2020.15>
- Lopez Parada, J. (2018). Fabricación aditiva y transformación logística: la impresión 3D. OIKONOMICS: Revista de economía, ciencia y sociedad. (9), 58-69.
- Maia, M. M. (2016). Características dos emprendedores de startups brasileiras de base tecnológica. Revista de Empreendedorismo, Negócios e Inovação, 1(2), 52-69.
- Maggi Campos, C., Ramos Maldonado, M. y Vergara Guerra, R. (2020). Adopción de tecnologías digitales 4.0 por parte de pequeñas y medianas empresas manufactureras en la Región del Biobío (Chile) (Documentos de Proyectos (LC/TS.2020/133)). Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/46387/S2000734\\_es.pdf?sequence=4&isAllowed=y](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/46387/S2000734_es.pdf?sequence=4&isAllowed=y)
- Matus Ruiz, M. (2021). Respuestas socio-tecnológicas frente a la COVID-19 en México: Spin-offs, repositorios e impresión 3D. Revista de Ciencias Sociales, 31 (61), 68-88.
- Perez Marulanga, C. (2019). Retos y oportunidades del emprendimiento apalancado en tecnología digital. FEDESARROLLO. [https://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/3815/Repor\\_Agosto\\_2019\\_P%C3%A9rez.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/3815/Repor_Agosto_2019_P%C3%A9rez.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Rojas, R. (27 de abril de 2022). La Importancia de las Startups para las Economías Regionales, Nacionales y Globales. Recuperado de: <https://hubbog.com/la-importancia-de-las-startups-para-las-economias-regionales-nacionales-y-globales/>
- Sampedro Guaman, C., Palma Rivera, D., Machuca Vivar, S., & Villalta Jadan, B. (2021). Las perspectivas del software y su papel en la industria 4.0. Revista Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores. , 1(116), 1–24. <https://doi.org/https://doi.org/10.46377/dilemas.v9i.3029>
- Solís Tepexpa, S., & Torres Castañeda, K. (2022). Importancia de las startup en la economía del siglo XXI. Revista Gestión Y Estrategia, (61), 45-62.
- UADIN. (2019). ¿Qué es la Industria 4.0? España. UADIN Bussines School. Recuperado de: <https://www.uadin.com/noticias/que-es-la-industria-4-0/>
- Zeballos Umpiri, W. (2022). Blockchain y la innovación en las tecnologías I. Introducción. TecnoHumanismo., 2(2), 117–125.

Proyecto de ingeniería aplicada

# Sistema de gestión de mantenimiento basado en el modelo de 8 fases para una empresa de servicios de instrumentación y control en la ciudad de Santa Cruz, Bolivia

Management System based on the 8-phase model for an instrumentation and control services company in Santa Cruz, Bolivia.

 Carlo Andre Peinado Bazán.

Estudiante. Universidad Católica Boliviana. Santa Cruz, Bolivia. carlo.peinado@ucb.edu.bo.

## RESUMEN

El mantenimiento es esencial en cualquier organización o empresa, ya que desempeña un papel crucial en la preservación y optimización de sus activos. Al mantener adecuadamente maquinaria, equipos, instalaciones y otros recursos, se asegura su funcionamiento eficiente y prolongado a lo largo del tiempo. Este documento presenta un estudio sobre el diseño de un Sistema de Gestión de Mantenimiento (SGM) basado en el modelo de 8 fases para una empresa de servicios de instrumentación y control en Santa Cruz, Bolivia, la cual actualmente realiza el mantenimiento de sus activos de manera tercerizada y correctiva. Se analizan los elementos clave y las etapas recomendadas para lograr una implementación de un SGM, con el objetivo de planificar, controlar y optimizar eficientemente las actividades de mantenimiento, garantizando la disponibilidad y confiabilidad de los equipos de muy alta criticidad, reduciendo costos operativos y maximizando la vida útil de los activos. En el documento, se contextualiza la situación actual del mantenimiento en la empresa y se abordan las primeras cinco fases del modelo de 8 fases, que incluyen la definición de objetivos y responsabilidades, la jerarquización de los equipos, el análisis de puntos débiles, el diseño de planes de mantenimiento y la programación de estos planes. Además, se presenta la selección de un Sistema de Gestión de Mantenimiento Computarizado (CMMS).

**Palabras clave:** *Gestión. Mantenimiento. Modelo. Servicios.*

## ABSTRACT

Maintenance is essential in any organization or company, as it plays a crucial role in the preservation and optimization of its assets. By properly maintaining machinery, equipment, facilities, and other resources, efficient and long-term operation is ensured over time. This document presents a study on the design of a Maintenance Management System (MMS) based on an 8-phase model for an instrumentation and control services company in Santa Cruz, Bolivia, which currently outsources and performs corrective maintenance on its assets. Key elements and recommended stages are analyzed to achieve the implementation of an MMS, with the aim of efficiently planning, controlling, and optimizing

**Citar como:** Peinado Bazán, C. A. Sistema de gestión de mantenimiento basado en el modelo de 8 fases para una empresa de servicios de instrumentación y control en la ciudad de Santa Cruz, Bolivia *Journal Boliviano De Ciencias*, 19(54). 21-40 <https://doi.org/10.52428/20758944.v19i54.964>

**Revisado:** 13/07/2023

**Aceptado:** 20/09/2023

**Publicado:** 20/12/23

**Declaración:** Derechos de autor 2023 Carlo Andre Peinado Bazán. Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento.



maintenance activities, ensuring the availability and reliability of critical equipment, reducing operational costs, and maximizing the lifespan of assets. The document provides context for the current maintenance situation in the company and addresses the first five phases of the 8-phase model, including goal definition and responsibilities, equipment prioritization, weak point analysis, maintenance plan design, and plan scheduling. Additionally, the selection of a Computerized Maintenance Management System (CMMS) is presented.

**Keywords:** *Maintenance. Management. Model. Services.*

## 1. INTRODUCCIÓN.

El mantenimiento ha ido cambiando a lo largo de la historia. De acuerdo con Félix Pérez, la historia del mantenimiento se puede dividir en cuatro generaciones. La primera generación se mantuvo hasta el año 1950 y se caracteriza por acciones de mantenimiento puramente correctivo. Entre 1950 y 1980 surge el mantenimiento preventivo, es decir, reparaciones programadas. El monitoreo de condición aparece durante la época del 1980 al 2000, esta pertenece a la tercera generación la cual está marcada por la aplicación de mantenimientos predictivos. A partir del siglo XXI, la cuarta generación hace que las empresas involucren el mantenimiento de una manera integral. (Pérez Rondón, 2021)

En un entorno empresarial en crecimiento cada vez más competitivo y orientado hacia la eficiencia y la calidad, el mantenimiento adecuado de los equipos y sistemas es un aspecto fundamental para el correcto funcionamiento de las organizaciones de cualquier rubro (Nexus integra, 2023). En particular, las empresas que brindan soluciones especializadas en el ámbito de la instrumentación y el control de procesos industriales enfrentan el desafío constante de mantener un rendimiento óptimo y confiable de sus activos, a la vez que cumplen con los estándares de calidad y seguridad exigidos por sus clientes.

En este contexto, el diseño y la implementación de un sistema de gestión de mantenimiento (SGM) se convierte en una herramienta estratégica para estas empresas, permitiéndoles planificar, controlar y optimizar las actividades de mantenimiento de manera eficiente. Un sistema de gestión de mantenimiento efectivo no solo garantiza la disponibilidad y confiabilidad de los equipos, sino que también contribuye a reducir los costos operativos, minimizar los tiempos de inactividad no planificados y maximizar la vida útil de los activos. (Akhavan, P.; Shahin, A., 2019)

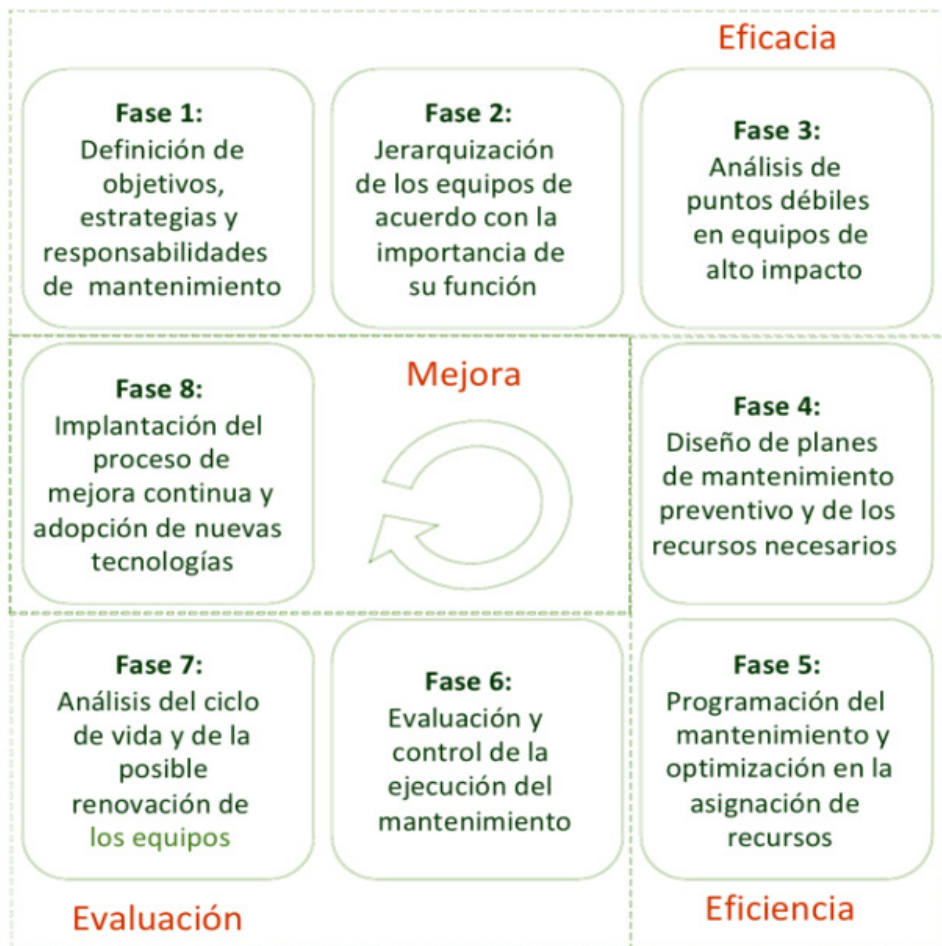
La empresa de servicios de instrumentación y control, desde ahora denominada como “INC”, es una empresa establecida en Santa Cruz, Bolivia desde hace más de 10 años en el rubro industrial. Actualmente, INC cuenta con proyectos en todo el país enfocados no solamente en el rubro del gas y petróleo (Oil & Gas) sino también en la industria minera y cementera. La empresa no se encuentra conforme con el incremento de los tiempos de inactividad y disminución de la confiabilidad de sus equipos, los cuales generan retraso en la prestación de sus servicios.

El objetivo de este documento es presentar un estudio centrado en el diseño de un sistema de gestión de mantenimiento para la empresa INC, basado en el modelo de 8 fases propuesto por Parra y Crespo, cubriendo las primeras cinco fases. Para lograr este objetivo, primero se proporciona un contexto que describe la situación actual del mantenimiento en la empresa INC. Luego, se procede a desarrollar cada

una de las 5 fases del sistema de gestión de mantenimiento (MGM), empleando técnicas como la jerarquización de equipos, análisis de criticidad y proyecciones. Finalmente, se concluye el estudio determinando el sistema más adecuado para el seguimiento de la información de mantenimiento que mejor se adapte a las necesidades de la empresa INC.

**2. METODOLOGÍA.**

El modelo de gestión de mantenimiento (MGM) de 8 fases, propuesto por Parra y Crespo, es una metodología estructurada diseñada para lograr una gestión eficaz de las actividades de mantenimiento en una organización. Este modelo ha demostrado ser una herramienta valiosa para optimizar las operaciones de mantenimiento (Parra y Crespo, 2012). La Figura N°1, a continuación, presenta de manera visual las ocho fases clave del modelo de gestión de mantenimiento de 8 fases.



**Figura N°1.** MGM 8 fases.

Fuente: Parra y Crespo, 2012.



A continuación, se ofrece un resumen conciso de las ocho fases clave del modelo.

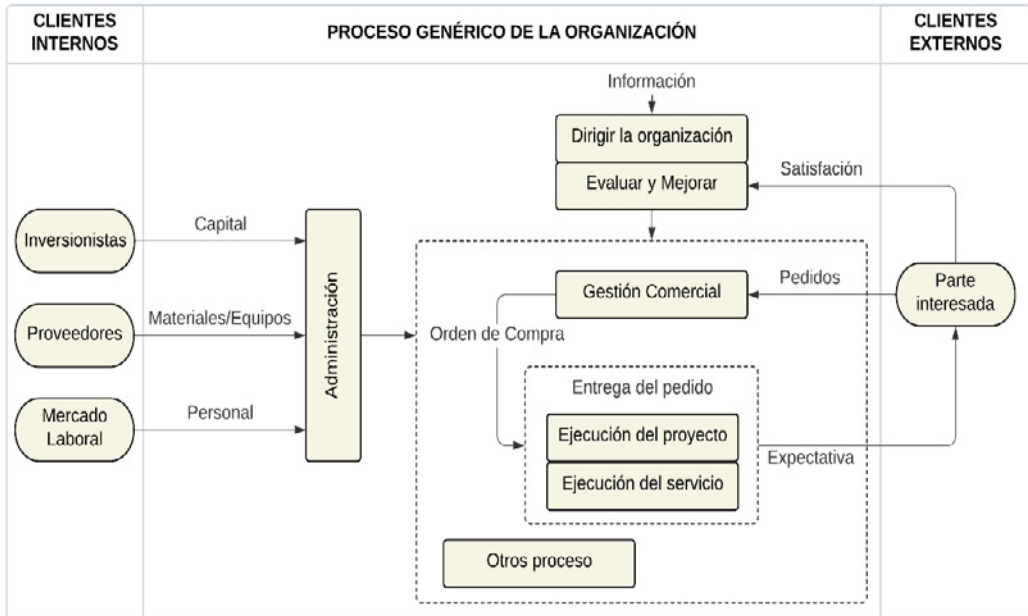
- 1) Fase 1: Definición de objetivos, estrategias y responsabilidades de mantenimiento. En esta fase, se establecen los objetivos específicos del departamento de mantenimiento, se definen las estrategias a seguir y se asignan las responsabilidades correspondientes.
- 2) Fase 2: Jerarquización de los equipos según su importancia y función. En esta etapa, se realiza una clasificación de los equipos en función de su relevancia y su contribución al funcionamiento general de la organización.
- 3) Fase 3: Análisis de los puntos débiles en equipos de alto impacto. En esta fase, se lleva a cabo un análisis exhaustivo de los equipos de mayor importancia para identificar y abordar sus puntos débiles y áreas de mejora.
- 4) Fase 4: Diseño de planes de mantenimiento preventivo de los recursos necesarios. En esta etapa, se desarrollan planes de mantenimiento preventivo detallados para garantizar el buen funcionamiento de los equipos, además de asignar los recursos necesarios para llevar a cabo dichas tareas.
- 5) Fase 5: Programación del mantenimiento y optimización en la asignación de recursos. En esta fase, se establece un cronograma para llevar a cabo las tareas de mantenimiento de manera eficiente, optimizando la asignación de recursos disponibles.
- 6) Fase 6: Evaluación y control de la ejecución del mantenimiento. En esta etapa, se monitorea y se evalúa la ejecución de las actividades de mantenimiento para asegurar su cumplimiento de acuerdo con los estándares establecidos y los objetivos planteados.
- 7) Fase 7: Análisis del ciclo de vida y de la posible renovación de los equipos. En esta fase, se realiza un análisis del ciclo de vida de los equipos y se evalúa la necesidad de renovación o reemplazo, considerando aspectos como su desempeño, obsolescencia y costo-beneficio.
- 8) Fase 8: Implantación del proceso de mejora continua y adopción de nuevas tecnologías. En esta etapa final, se establece un proceso de mejora continua para optimizar las operaciones de mantenimiento.

### **3. RESULTADOS**

#### **3.1 Situación actual de la empresa**

INC ofrece soluciones especializadas de alta calidad en sistemas de automatización, de control, y de seguridad a clientes en las industrias de Gas y Petróleo. Su enfoque va más allá de la simple integración de sistemas, ya que su objetivo principal es mejorar la rentabilidad, competitividad y productividad de los clientes, brindándoles soporte en diversas áreas como diseño, provisión de sistemas y equipos, desarrollo de aplicaciones, capacitaciones y otros recursos necesarios para el desarrollo de soluciones de última generación.

Además, INC ofrece el servicio de mantenimiento de instrumentación, equipos y sistemas, en plantas de la industria del gas y petróleo, asegurando un funcionamiento óptimo y confiable a lo largo del tiempo.



**Figura N° 2.** Proceso genérico de la empresa INC.

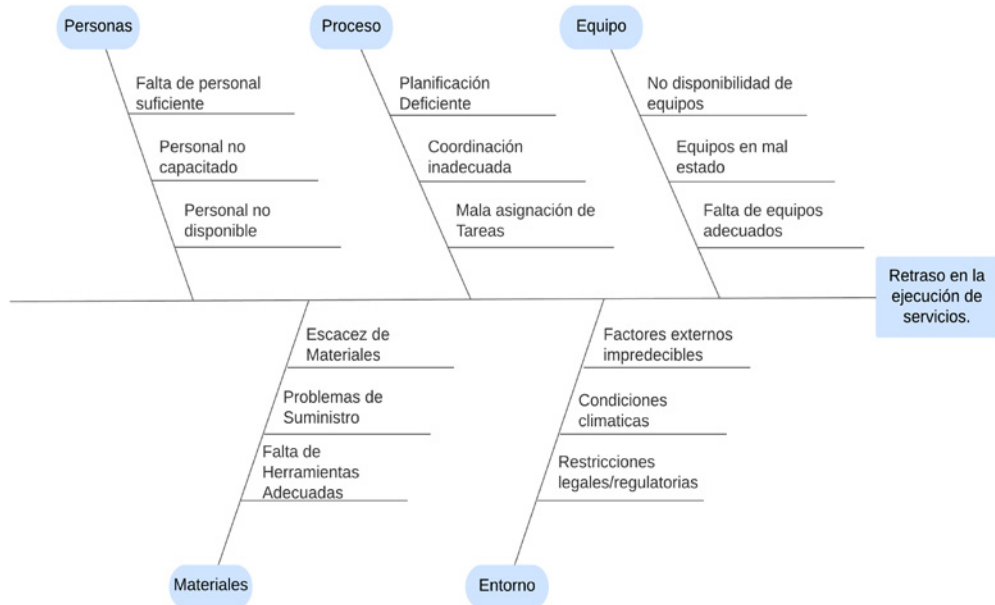
Fuente: Elaboración propia, 2023.

La empresa ha logrado obtener la certificación bajo el programa de *Rockwell Automation* denominado “*Recognized System Integrator (RcSI)*”. Dicho programa está diseñado para asesorar, resolver y ofrecer a los clientes la mejor solución con el menor riesgo posible (*Rockwell Automation, 2023*). Con el apoyo mutuo de *Rockwell Automation*, INC se destaca como una empresa de servicios de instrumentación y control en el sector de gas y petróleo.

La Figura N° 2 muestra el proceso genérico implementado por la empresa INC para la prestación de sus servicios. Este proceso describe las etapas y actividades involucradas en la entrega del servicio, brindando una visión general de cómo se lleva a cabo.

Existen varios factores que contribuyen al retraso en la ejecución de actividades en las empresas de servicios. En la Figura N°3 se presenta un diagrama de Ishikawa que muestra las causas más comunes de demoras en los trabajos de la empresa INC.

Se observa que algunas de estas causas están relacionadas con la gestión del mantenimiento de los activos, como por ejemplo la falta de disponibilidad de equipos y el estado deficiente de los mismos. Según lo informado por el personal de la empresa, estas son las principales causas que han generado retrasos significativos en la ejecución de servicios, aunque no son las únicas.



**Figura N°3.** Diagrama de Ishikawa. Retrasos en la ejecución de servicios en INC.

Fuente: Elaboración propia, 2023

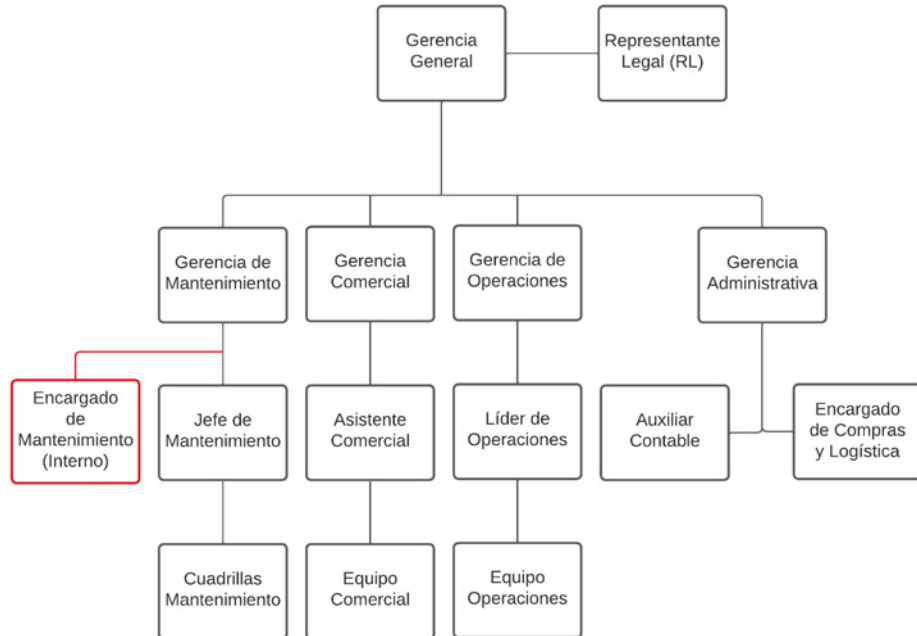
### 3.1.1 Estado del mantenimiento de activos

La empresa INC, como proveedora de servicios, dispone de un departamento de mantenimiento encargado de brindar dicho servicio a terceros. Sin embargo, carece de un responsable específico para el mantenimiento de los activos internos de la empresa.

El mantenimiento de sus activos se externaliza a otras empresas y no se mantiene un registro centralizado de todos los activos. Además, existen diferentes áreas responsables de distintos activos, y algunos activos no tienen una asignación clara a ninguna área en particular.

### 3.1.2 Organigrama

A continuación, se muestra el organigrama proporcionado por la empresa INC, que ha sido actualizado para incluir el nuevo puesto de encargado de mantenimiento. Este puesto será responsable de supervisar y controlar las actividades de mantenimiento interno de la empresa. Los elementos resaltados con color en la Figura N°4 han sido adicionados al organigrama original como parte del desarrollo del proyecto.



**Figura N°4.** Organigrama de la empresa INC. (Modificado)

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Como se puede evidenciar en la Figura N° 4, en la empresa existe un jefe de mantenimiento el cual se encarga de supervisar y coordinar las cuadrillas que prestan el servicio de mantenimiento a los clientes de la empresa. Por otro lado, el futuro puesto de encargado de mantenimiento tendrá el rol de gestionar las actividades de mantenimiento a los activos de la empresa y garantizar su disponibilidad.

### 3.2 Desarrollo del sistema de gestión de mantenimiento

En la siguiente sección se desarrolla el sistema de gestión de mantenimiento para la empresa INC desglosando cada una de las 5 fases del MGM de 8 fases propuesto por Parra y Crespo.

#### 3.2.1 Fase 1: Definición de indicadores, estrategias y responsables de mantenimiento

Los indicadores, estrategias y responsabilidades fueron analizados y acordados en una reunión interna y confidencial que contó con la participación de los gerentes de cada área de la empresa y el jefe de mantenimiento. Durante esta reunión, se discutieron y definieron los indicadores clave, las estrategias a implementar y se asignaron los responsables correspondientes.

### 3.2.1.1 Elección de indicadores KPI

Después de llevar a cabo la reunión previamente mencionada, se acordó que se utilizarán los siguientes indicadores de rendimiento:

- ◆ Backlog: Acumulación de trabajo pendiente.
- ◆ TMEF: Tiempo medio entre fallas.
- ◆ TMPR: Tiempo medio para reparar
- ◆ Disponibilidad.

Estos indicadores se consideran relevantes porque abordan aspectos fundamentales del mantenimiento, como la gestión de tareas pendientes, la confiabilidad de los activos y la capacidad de respuesta ante las averías. Además, su implementación no implica una carga excesiva de recursos, lo que los hace viables para monitorear y mejorar el desempeño del nuevo departamento de mantenimiento de manera efectiva.

### 3.2.1.2 Selección de estrategias

Se implementará la centralización de los activos de la empresa en un único sistema de gestión, ya que actualmente se encuentran dispersos en diferentes áreas y carecen de un sistema integrado.

Se emplearán estrategias de mantenimiento preventivo en los activos cuyo análisis de criticidad indique un nivel de riesgo muy alto. Esto permitirá anticiparse a posibles fallas y minimizar el impacto en la operatividad de la empresa.

Se mantendrá la tercerización de los servicios de mantenimiento para los activos en los cuales la empresa no cuenta con personal capacitado para realizar dichas tareas. De esta manera, se asegurará que se realice un mantenimiento adecuado y se optimizará el funcionamiento de dichos activos.

### 3.2.1.3 Designación de responsables

Se designa a una persona específica para desempeñar el rol de encargado de mantenimiento. Entre las funciones clave de este puesto se incluyen:

- ◆ Supervisar y coordinar las actividades de mantenimiento de los activos de la empresa.
- ◆ Planificar y programar las labores de mantenimiento preventivo y correctivo.
- ◆ Gestionar el registro y seguimiento del mantenimiento realizado en los activos, asegurando un adecuado historial.
- ◆ Coordinar con proveedores externos en caso de requerir servicios especializados para ciertos activos.
- ◆ Participar en reuniones de coordinación con otros departamentos para asegurar una gestión eficiente de los activos y minimizar tiempos de inactividad.
- ◆ Garantizar el cumplimiento de normativas de seguridad y regulaciones relacionadas con el mantenimiento de los activos.
- ◆ Evaluar y proponer mejoras en los procesos y procedimientos de mantenimiento, buscando la optimización de recursos y la eficiencia operativa.

Estas funciones permitirán al encargado de mantenimiento desempeñar un papel fundamental en la gestión efectiva de los activos de la empresa, asegurando su correcto mantenimiento y contribuyendo al óptimo funcionamiento de la organización.

### 3.2.2 Fase 2: Clasificación y codificación de equipos de la empresa

De acuerdo con el modelo de gestión de mantenimiento de 8 fases, una vez establecidos los objetivos del sistema, es necesario proceder a la clasificación de los equipos. Para llevar a cabo esta clasificación, se llevó a cabo un relevamiento de todos los activos de la empresa, los cuales se detallan en la tabla N°1. Este relevamiento se realizó mediante la solicitud de información a los encargados correspondientes de los equipos asignados, y se verificó visualmente su existencia física siempre que fue posible. Asimismo, se recopilaron los datos de aquellos activos que no estaban asignados a ningún responsable y no existía información de ellos.

**Tabla N°1.** Cantidad de activos de la empresa INC.

Tipo de equipo	Código equipo	Cantidad
Aire Acondicionado	AAC	14
Analizador de baterías	ABA	5
Balanza Electrónica	BEL	2
Bomba de Prueba	BPR	17
Calibrador de Proceso	CPR	8
Calibrador de Temperatura	CTE	3
Camioneta	CAM	12
Comunicador HART	CHA	5
Detector Multi Gas	DMG	8
Impresora	IMP	11
Laptop	LAP	52
Medidor de Aislación	MAI	1
Medidor de Aterramiento	MAT	3
Medidor de Caudal	MCA	2
Módulo de Presión	MPR	21
Multímetro	MUL	11
Pinza Amperimétrica	PAM	9
Plotter	PLO	1
Servidor	SER	2
Tablero de Control	TCO	1
Tablero de Distribución Eléctrica	TDE	1
Torquímetro	TOR	2

**Fuente:** Elaboración propia, 2023

### 3.2.2.1 Taxonomía de Activos de mantenimiento

La codificación de los equipos se realizó utilizando como base la norma ISO 14224 (2016) la cual clasifica los ítems de acuerdo con factores comunes en niveles de grupos genéricos.

Adaptando la norma a la situación de la empresa INC, se definen 5 niveles jerárquicos: empresa, unidad, sección, categoría y tipo de equipo. Ver Figura N°5.

**Figura N° 5.** Niveles de jerarquía para clasificación de activos.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

A cada activo se le asigna un código único basado en las categorías de la Figura N°6. Este código alfanumérico sigue una estructura de cuatro grupos separados por guiones, con tres caracteres en cada grupo. Además del código, cada equipo tiene un nombre compuesto por el tipo de equipo y un número, sin utilizar un guion para separarlos.

De esta forma, el código y nombre de una camioneta la cual pertenece a la empresa INC, unidad mantenimiento, sección campo, categoría mecánicos tendrá el siguiente código y nombre:

- ◆ **Código:** INC-MFM-CAM-001
- ◆ **Nombre:** CAM001



**Figura N°6.** Estructura del código de los activos de INC.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

### 3.2.3 Fase 3: Análisis de criticidad

Los equipos fueron clasificados según su nivel de riesgo. Para llevar a cabo este análisis, se inició determinando los valores de impacto en diferentes áreas y la puntuación asignada para cada caso, utilizando números enteros del 1 al 5. Estos criterios de evaluación fueron establecidos después de una reunión de coordinación con el personal pertinente. A continuación, se presentan los criterios derivados de dicha reunión:



**Tabla N°2.** Criterios de evaluación de riesgo.

Puntaje	Clasificación de criticidad				
	1	2	3	4	5
<b>Frecuencia</b>	Sumamente improbable: menos de 1 evento en 3 años	Improbable: 1 evento en 3 años	Probable: 1 evento por año	Muy probable: entre 1 y 3 eventos al año	Frecuente: más de 3 eventos por año
<b>Seguridad</b>	No existe lesiones	Lesiones que no requieren tratamiento médico	Lesión leve del personal	Lesión grave del personal	Pérdida de vidas
<b>Producción</b>	Personal fuera de servicio por un tiempo menor a 4 horas hombre	Personal fuera de servicio por un tiempo entre 4-12 horas hombre	Personal fuera de servicio por un tiempo entre 12-24 horas hombre	Personal fuera de servicio por un tiempo entre 24-48 horas hombre	Personal fuera de servicio por un tiempo mayor a 48 horas hombre
<b>Información / Calibración</b>	No existe pérdida de información / No se debe Calibrar	-	-	-	Pérdida completa de información / Se debe Calibrar
<b>Reserva</b>	Se cuenta con unidades de reserva para cumplir la función inmediatamente	-	Se cuenta con unidades de reserva para cumplir la función de manera no inmediata	-	No se cuenta con unidades de reserva
<b>Costos de Mtto.</b>	Costos de reparación debajo del 10% del valor del equipo (incluyendo materiales y personal)	Costos de reparación entre 10% y 24% del valor del equipo (incluyendo materiales y personal)	Costos de reparación entre 25% y 49% del valor del equipo (incluyendo materiales y personal)	Costos de reparación entre 50% y 74% del valor del equipo (incluyendo materiales y personal)	Costos de reparación encima del 75% el valor del equipo (incluyendo materiales y personal)

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Además de definir los criterios de evaluación, en dicha reunión se estableció utilizar el modelo de criticidad semicuantitativo de matriz de criticidad por riesgo (MCR) propuesto por Parra y Crespo en su nota técnica: “Métodos de análisis de criticidad y jerarquización de activos”. El modelo propuesto se fundamenta en la estimación del factor de riesgo mediante las siguientes expresiones:

$$Riesgo = FF * C \tag{3.1}$$

Donde:

*FF: Frecuencia de Fallas*

*C: Consecuencias*

Las consecuencias se determinan mediante la siguiente expresión:

$$C = (S + P + IC + RES + CM) * 0.2 \tag{3.2}$$

Donde:

*S: Calificación asignada en el área de seguridad.*

*P: Calificación asignada en el área de producción*

*IC: Calificación asignada en el área de Información o Calibración*

*RES: Calificación asignada en el área de Reserva*

*CM: Calificación asignada en el área de Costos de mantenimiento*

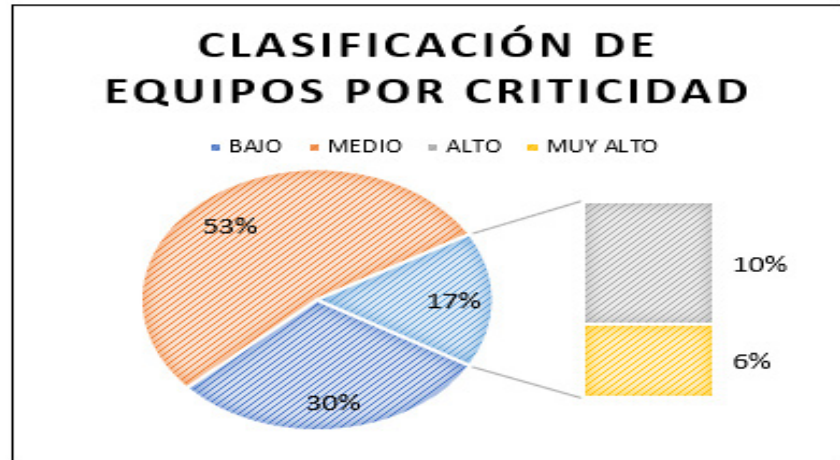
A continuación, se presenta la matriz de criticidad propuesta por el modelo MCR.

**Tabla N° 3.** Matriz de criticidad propuesta por el modelo MCR.

		<b>Matriz de criticidad</b>				
		Consecuencias				
		1	2	3	4	5
Frecuencia	#	1	2	3	4	5
	1	BAJO	BAJO	BAJO	MEDIO	MEDIO
	2	BAJO	BAJO	BAJO	MEDIO	MEDIO
	3	MEDIO	MEDIO	MEDIO	ALTO	MUY ALTO
	4	ALTO	ALTO	ALTO	ALTO	MUY ALTO
5	ALTO	MUY ALTO	MUY ALTO	MUY ALTO	MUY ALTO	

Fuente: Adaptado de Parra y Crespo, 2012.

Una vez establecidos los criterios de evaluación y el modelo de criticidad, se procede a asignar los valores correspondientes a cada uno de los activos. Esta asignación se lleva a cabo en colaboración con el personal que participó en la reunión mencionada anteriormente. A continuación, se presentan el resumen de los resultados de la clasificación de los equipos según su nivel de criticidad.



**Figura N°7.** Resultados de la clasificación de equipos de INC por Criticidad.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Los valores asignados a cada activo se basan en la evaluación realizada según los criterios establecidos, y reflejan la importancia y el nivel de riesgo asociados a cada equipo. La clasificación por criticidad nos indica que del total de activos de la empresa (191) el 30% son de un riesgo bajo, el 53% de un riesgo medio, el 10% alto y un 6% de riesgo muy alto.

### 3.2.4 Fase 4: Diseño del plan de mantenimiento preventivo de los equipos muy críticos

La fase 4 del MGM propuesto por Parra y Crespo se centra en el diseño de los planes de mantenimiento preventivo. Debido a las limitaciones planteadas, se desarrollan dichos planes únicamente para los activos que han sido clasificados con un factor de riesgo muy alto.

Según se muestra en la Tabla N° 4, las camionetas de la empresa INC son consideradas activos de alta criticidad, debido a que sus fallos representan un riesgo elevado para la seguridad del personal, implican costos elevados de reparación, generan demoras en la prestación del servicio y ocurren con una frecuencia alta. A continuación, se presenta una tabla con los equipos de la empresa INC clasificados como de muy alta criticidad.

**Tabla N°4.** Lista de activos de muy alto riesgo en la empresa INC.

<b>Equipo</b>	<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>	<b>Tipo de Equipo</b>	<b>Código</b>	<b>Riesgo</b>
CAM001	Toyota	Hilux	Camioneta	INC-MFM-CAM-001	MUY ALTO
CAM002	Toyota	Hilux	Camioneta	INC-MFM-CAM-002	MUY ALTO
CAM003	Toyota	Hilux	Camioneta	INC-MFM-CAM-003	MUY ALTO
CAM004	Toyota	Hilux	Camioneta	INC-MFM-CAM-004	MUY ALTO
CAM005	Toyota	Hilux	Camioneta	INC-MFM-CAM-005	MUY ALTO
CAM006	Mitsubishi	L200	Camioneta	INC-MFM-CAM-006	MUY ALTO
CAM007	Mitsubishi	L200	Camioneta	INC-MFM-CAM-007	MUY ALTO
CAM008	Mazda	BT-50	Camioneta	INC-MFM-CAM-008	MUY ALTO
CAM009	Toyota	Hilux	Camioneta	INC-MFM-CAM-009	MUY ALTO
CAM010	Toyota	Hilux	Camioneta	INC-MFM-CAM-010	MUY ALTO
CAM011	Toyota	Land Cruiser	Camioneta	INC-MFM-CAM-011	MUY ALTO
CAM012	Toyota	Hilux	Camioneta	INC-MFM-CAM-012	MUY ALTO

Fuente: Elaboración propia, 2023.

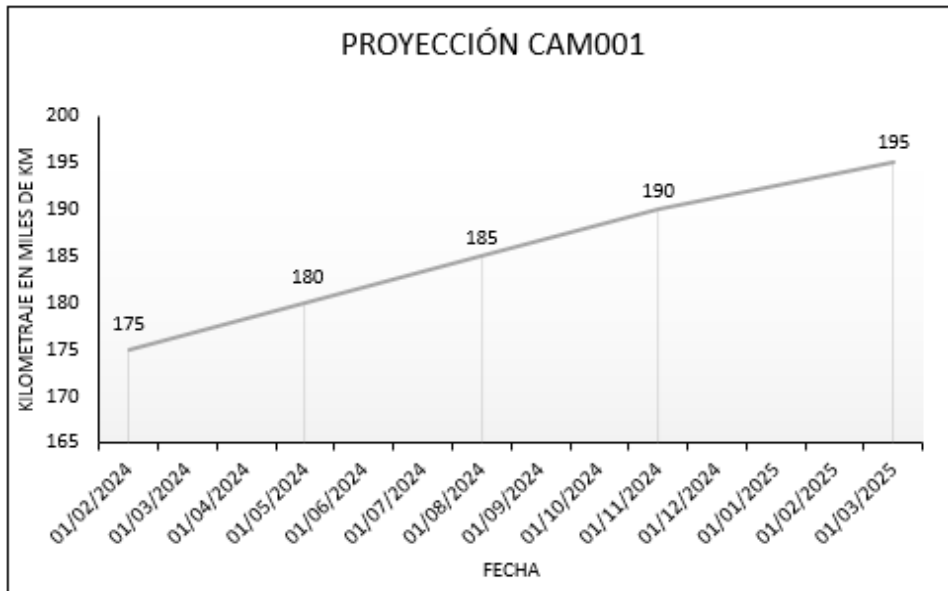
A partir de las recomendaciones e instrucciones proporcionadas por cada fabricante, se procede a elaborar los planes de mantenimiento preventivo para estos activos de muy alta criticidad.

Los planes de mantenimiento preventivo creados para los activos de muy alta criticidad implican la adaptación de la información contenida en los manuales de los fabricantes a los equipos específicos utilizados por la empresa INC, teniendo en cuenta también su forma de operación. Esto se realiza con el objetivo de proporcionar un plan de mantenimiento que se ajuste de manera adecuada a los activos de la empresa.

### **3.2.5 Fase 5: Programación del plan del plan de mantenimiento para la gestión 2024.**

Una vez que se han definido los planes de mantenimiento de acuerdo con el modelo de gestión de mantenimiento (MGM) de 8 fases, es necesario establecer la programación de las acciones de mantenimiento para cumplir con dicho plan. En este caso, se ha programado la gestión para el año 2024, abarcando desde el 1 de enero hasta el 31 de diciembre del mismo año.

Para llevar a cabo la programación de las actividades de mantenimiento para esta gestión, se ha evidenciado que los activos de muy alta criticidad corresponden al tipo de camionetas. Se recopilieron los datos de kilometraje de dichos activos, con el fin de realizar una proyección y estimar aproximadamente las fechas en las que se alcanzarán los kilometrajes que requieren mantenimiento, de acuerdo con los planes previamente diseñados. La Figura N° 8 muestra la proyección de uno de los activos de la empresa INC.



**Figura N° 8.** Proyección equipo CAM001.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

### 3.3 Sistema de gestión de mantenimiento computarizado

Se decidió implementar un sistema de gestión de mantenimiento computarizado (CMMS, por sus siglas en inglés) para mejorar la eficiencia y efectividad de las actividades de mantenimiento. El CMMS permitirá un seguimiento exhaustivo y la recopilación de datos precisos para evaluar y mejorar continuamente el sistema de mantenimiento. Al consolidar los datos en una plataforma centralizada, se facilitará la toma de decisiones basada en información sólida y se optimizarán la planificación, asignación de recursos y seguimiento de trabajos en curso. En resumen, el CMMS garantizará un mayor control y una mejora continua en el sistema de mantenimiento.

#### 3.3.1 Selección de CMMS

Se ha optado por utilizar el CMMS Fiix, desarrollado por Rockwell Automation, debido a una serie de características que lo hacen altamente conveniente para las necesidades de INC. En primer lugar, Fiix es un software basado en la nube, lo que proporciona flexibilidad y acceso fácil y seguro a los datos de mantenimiento desde cualquier ubicación. Además, cuenta con una aplicación móvil, la cual permite gestionar las actividades de mantenimiento desde el celular.

Otra ventaja destacada es que Fiix ofrece una opción gratuita sin límite de tiempo, lo cual brinda la oportunidad de utilizar activos y órdenes de trabajo de forma ilimitada y 3 usuarios activos al mismo tiempo. Esto permite a la empresa INC explorar y evaluar las funcionalidades del software, antes de optar por un plan mejor en caso de requerirlo. Además, la elección de Fiix se respalda en el hecho

de que INC trabaja brinda servicios de integración con productos de la marca Rockwell Automation y ya conoce los estándares de calidad y confiabilidad con los que trabaja la marca.

Sumado a esto, Fiix ofrece una amplia gama de herramientas adicionales que nos permiten realizar un seguimiento preciso de los indicadores de rendimiento de los activos. Algunos de estos indicadores clave incluyen el backlog, el TMPR (Tiempo Medio Para Reparar), el TMEF (Tiempo Medio Entre Fallos) y la disponibilidad. Estos datos esenciales nos facilitan la obtención de los KPI propuestos al inicio del documento.

Además, para facilitar aún más el monitoreo y análisis de estos indicadores, Fiix cuenta con un tablero de administrador intuitivo y configurable. Este tablero proporciona una vista visual y concisa de los indicadores clave, lo que nos permite acceder rápidamente a la información relevante y tomar medidas necesarias para mejorar el rendimiento y la eficiencia de nuestros activos. A continuación, se presenta una captura del tablero del administrador configurado para la empresa INC.



**Figura N°9.** Tablero del administrador Fiix de INC.

Fuente: Fiix, 2023.

### 3.3.2 Manejo de Activos

La información de los activos que se ha decidido incluir en Fiix abarca los siguientes datos clave:

- ◆ Nombre del activo
- ◆ Código de identificación único
- ◆ Nivel de criticidad del activo
- ◆ Descripción detallada del activo

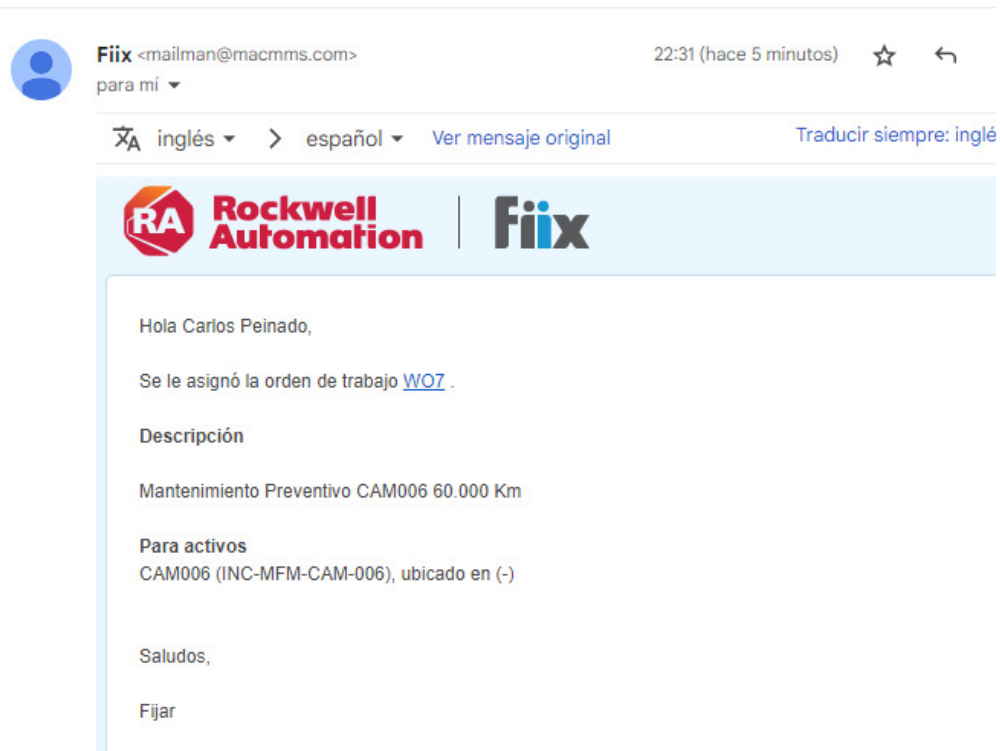
- ◆ Marca del activo
- ◆ Modelo del activo
- ◆ Número de serie del activo
- ◆ Precio de compra del activo
- ◆ Fecha de adquisición del activo

Si bien Fiix permite ingresar otros datos adicionales, se considera que estos datos permitirán tener un registro completo y estructurado de cada activo en el sistema Fiix, lo que facilitará la gestión y seguimiento eficiente de los mismos.

### 3.3.3 Orden de Trabajo

Las órdenes de trabajo se asignan al personal correspondiente, y se envía una notificación tanto a través del sistema Fiix (Figura 10). Estas órdenes de trabajo están vinculadas al activo específico y contienen información detallada, como la prioridad asignada, la fecha de inicio, el tiempo estimado para completar la tarea y la descripción de la tarea a realizar. De esta manera, se garantiza una comunicación eficiente y se proporciona al personal toda la información necesaria para llevar a cabo las tareas de mantenimiento de manera efectiva. A continuación, se muestra una captura de pantalla que ilustra una notificación recibida por correo electrónico para la ejecución de una orden de trabajo.

**Figura N°10.** Notificación de orden de trabajo por correo electrónico



Fuente: Fiix, 2023.

## 1. CONCLUSIONES

Se lleva a cabo una contextualización de las condiciones actuales de la gestión de mantenimiento en la empresa INC. Esto nos brinda una visión de la situación del mantenimiento en la empresa, es decir, el personal disponible, las operaciones de mantenimiento y los desafíos a los que se enfrenta. A partir de la recopilación de información, se identificaron los procedimientos y áreas que requerían mejoras, sentando así una base para el diseño del nuevo sistema de gestión.

Una vez adquirido un conocimiento de la empresa INC, se establecieron parámetros iniciales para el sistema de gestión de mantenimiento. Esto implicó definir criterios, estrategias e indicadores que guiarían las operaciones y la toma de decisiones relacionadas con el mantenimiento. En este punto fue de vital importancia colaborar con el personal relevante de la empresa, con el objetivo de ofrecer las mejores opciones para INC.

Con los criterios estrategias e indicadores definidos, se procedió a recopilar información sobre los activos de la empresa. Este proceso, que requirió un esfuerzo significativo, implicó la creación de un registro de cada uno de los 191 activos de la empresa, asignándoles un código en base a la norma ISO 14224.

A continuación, se realizó una evaluación de la criticidad (ACR) de los equipos y activos de mantenimiento en la empresa INC. Este análisis permitió identificar aquellos equipos y activos que tenían una importancia estratégica significativa y priorizar las acciones de mantenimiento en función de su impacto en la operación de la empresa. Para llevar a cabo este análisis, se utilizó el modelo MCR propuesto por Parra y Crespo el cual determina la criticidad en función a la frecuencia de fallo y el factor de consecuencia, cuyos valores se determinaron mediante un análisis realizado en colaboración con el personal pertinente de la empresa.

Como parte del modelo de gestión de mantenimiento de ocho fases, que fue la base del trabajo desarrollado, se diseñaron los planes de mantenimiento para los activos de muy alta criticidad. Estos planes se estructuraron siguiendo las recomendaciones de los fabricantes de cada activo que haya obtenido el resultado de criticidad muy alta en el ACR.

Para completar el proceso, se programaron los planes de mantenimiento para el año 2024, utilizando proyecciones para estimar cuándo sería apropiado llevar a cabo las actividades de mantenimiento en los equipos altamente críticos.

Se seleccionó el sistema de gestión de mantenimiento computarizado Fiix para realizar el seguimiento de las tareas de mantenimiento en la empresa INC.

En resumen, el proceso de diseño del sistema de gestión de mantenimiento cumplió con los objetivos establecidos, brindando una visión clara de la situación actual, cumpliendo con las primeras 5 fases del MGM de 8 fases y determinando el sistema de seguimiento de información más adecuado para optimizar la gestión del mantenimiento en la empresa INC.



## 5. REFERENCIAS.

Akhavan, P., & Shahin, A. (2019). Assessing the impact of maintenance management practices on operational performance of manufacturing companies.

Fiix. (2023). Fiix. Recuperado el 10 de 07 de 2023, de <https://www.fiixsoftware.com/>

Ishikawa, K. (2013). Diagrama de Ishikawa. Obtenido de [http://www.academia.edu/download/45800691/Diagrama\\_de\\_Ishikawa.pdf](http://www.academia.edu/download/45800691/Diagrama_de_Ishikawa.pdf)

ISO 14224. (2016). Industrias de petróleo, petroquímica y gas natural - recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos.

Nexus integra. (2023). La importancia del mantenimiento industrial en las fábricas inteligentes. Recuperado el 26 de 06 de 2023, de Nexus integra: <https://nexusintegra.io/es/la-importancia-del-mantenimiento-industrial-en-las-fabricas-inteligentes/#:~:text=Beneficios%20del%20mantenimiento%20industrial%20para%20las%20empresas&text=Evita%20y%20disminuye%20p%C3%A9rdidas%20por,vida%20%C3%BAtil%20de%20los>

Parra, C., & Crespo, A. (2012). Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicada a la Gestión de Activos. INGECON.

Parra, C., & Crespo, A. (2012). Métodos de Análisis de Criticidad y Jerarquización de Activos.

Pérez Rondón, F. A. (2021). Conceptos generales en la gestión del mantenimiento industrial. Bucaramanga.

Rockwell Automation. (2023). System Integrators. Recuperado el 07 de 07 de 2023, de RockwellAutomation.com: <https://www.rockwellautomation.com/en-us/company/partnernetwork/system-integrator-partners.html>

Estudio de caso – Proyecto de Ingeniería Aplicada

# Plan de inspección basado en matriz de criticidad y frecuencia de fallos para equipos en la producción de lácteos

Inspection Plan Based on Criticality Matrix and Failure Frequency for Dairy Production Equipment

 Abel Benjamín Humacata Castrillo

Ing. Mecatrónico. Universidad Católica Boliviana “San Pablo”. Santa Cruz de la Sierra. Bolivia.  
[Abel.humacata@ucb.edu.bo](mailto:Abel.humacata@ucb.edu.bo)

## RESUMEN

El presente artículo se enfocó en el diseño de un plan de inspección para la “Planta 1” de una empresa de productos lácteos en Santa Cruz. El mantenimiento industrial es esencial para la eficiencia y calidad en esta industria. Para evitar interrupciones costosas, es crucial mantener operativos los equipos. Sin embargo, se identificó una alta proporción de mantenimientos correctivos, dificultando la implementación de acciones preventivas.

El objetivo de la investigación fue desarrollar un plan de inspección basado en la matriz de criticidad y frecuencia de fallos para los equipos críticos de la “Planta 1”. Se aplicaron metodologías como RCM y Optimización con Mantenimiento Proactivo, con el fin de mejorar la gestión de mantenimiento.

Los resultados incluyeron un plan detallado para los 10 equipos críticos más propensos a fallos. Se definieron actividades, equipos, personal y se estimaron tiempos. Se utilizaron las metodologías DMAIC y PDCA para la planificación y ejecución.

La matriz de criticidad y el análisis de frecuencias permitieron una identificación precisa de los equipos críticos, priorizando según su importancia operativa. El diseño del plan consideró los modos de fallo históricos, asegurando una detección efectiva de problemas. El plan fue validado para garantizar su viabilidad y adaptación a las necesidades del área de mantenimiento.

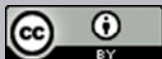
Este estudio proporciona un enfoque integral y riguroso para el desarrollo de un plan de inspección efectivo en la Planta 1 de la empresa de productos lácteos en Santa Cruz, contribuyendo a la eficiencia y calidad en la producción. Este proyecto destaca la importancia de una gestión proactiva del mantenimiento en la industria láctea.

**Palabras clave:** Gestión, Mantenimiento, Industrial, Inspección, Criticidad, Frecuencia de fallas.

**Citar como:** Humacata Castrillo, A. B. (2023). Plan de Inspección Basado en Matriz de Criticidad y Frecuencia de Fallos para Equipos en la Producción de Lácteos *Journal Boliviano De Ciencias*, 19(54), 41-61 <https://doi.org/10.52428/20758944.v19iEspecial.973>

**Revisado:** 17/07/2023  
**Aceptado:** 20/09/2023  
**Publicado:** 20/12/23

**Declaración:** Derechos de autor 2023 Abel Benjamin Humacata Castrillo, Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento.



---

## ABSTRACT

The present article focused on the design of an inspection plan for “Plant 1” of a dairy products company in Santa Cruz. Industrial maintenance is crucial for efficiency and quality in this industry. To avoid costly disruptions, it is crucial to keep the equipment operational. However, a high proportion of corrective maintenance was identified, making the implementation of preventive actions challenging.

The research objective was to develop an inspection plan based on the criticality matrix and failure frequency for the critical equipment of “Plant 1”. Methodologies such as RCM and Proactive Maintenance Optimization were applied to enhance maintenance management.

The results included a detailed plan for the 10 most failure-prone critical equipment. Activities, equipment, personnel, and estimated times were defined. DMAIC and PDCA methodologies were used for planning and execution.

The criticality matrix and frequency analysis allowed for precise identification of critical equipment, prioritizing based on operational importance. The plan’s design took into account historical failure modes, ensuring effective problem detection. The plan underwent validation to ensure its feasibility and adaptation to maintenance area needs.

This study provides a comprehensive and rigorous approach to developing an effective inspection plan in Plant 1 of the dairy products company in Santa Cruz, contributing to efficiency and quality in production. This project underscores the importance of proactive maintenance management in the dairy industry.

**Keywords:** Management, Maintenance, Industrial, Inspection, Criticality, Failure frequency.

## 1. INTRODUCCIÓN

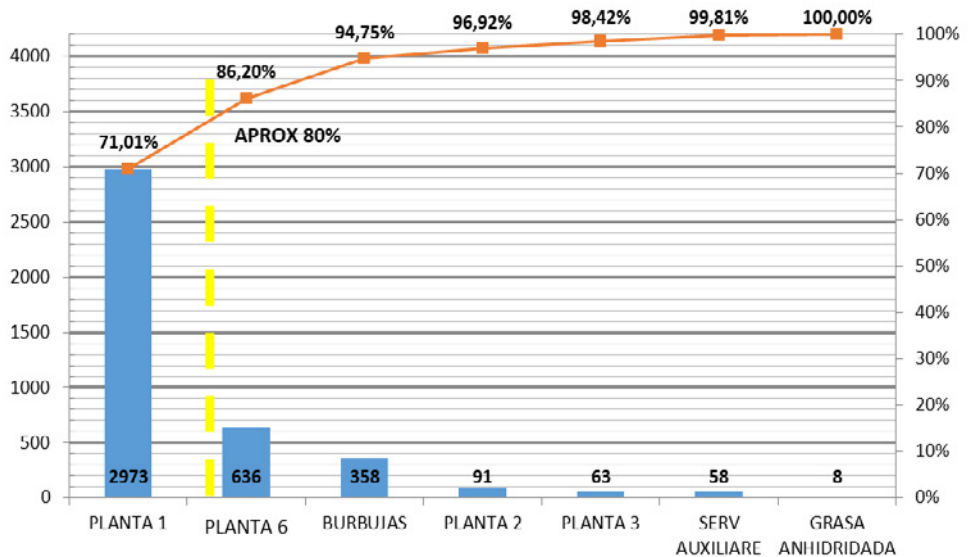
El mantenimiento industrial juega un papel crucial en la eficiencia operativa, la seguridad y la calidad de los productos en la industria láctea. Es de suma importancia garantizar que las máquinas y equipos no se detengan, ya que la capacidad de almacenamiento en la planta de producción es limitada y la parada de un equipo representa un impacto económico para la empresa. Además, las averías en equipos de alto impacto pueden generar retrasos significativos, afectando tanto la eficiencia operativa como la seguridad de los operadores y la calidad de los productos lácteos. (Pilataxi, 2020)

Uno de los inconvenientes específicos que enfrenta la empresa interesada es que la mayoría de los avisos generados durante el último año han sido del tipo correctivo, incluso aquellos clasificados como programados. En su mayoría, estos avisos se presentan en el área de la empresa conocida como Planta 1, que se ha determinado a través de un análisis de Pareto y la recopilación de datos del periodo 2022 a 2023. Esta alta proporción de avisos correctivos deja poco espacio para realizar actividades de mantenimiento preventivo, lo que impide una gestión más proactiva y eficiente del mantenimiento.

En el presente documento, da una propuesta para el desarrollo de un plan de inspección basado en las metodologías de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (en adelante referida como RCM) y Optimización con Mantenimiento Proactivo, con el objetivo de mejorar la gestión de mantenimiento en la empresa interesada. Este plan de inspección tiene como propósito abordar de manera más efectiva los modos de falla, reducir los tiempos de parada no planificados y optimizar los recursos de mantenimiento, contribuyendo así a la eficiencia operativa, la seguridad y la calidad de los productos lácteos.

Por medio de una entrevista a los supervisores de mantenimiento de la empresa productora de lácteos interesada, se comprende que los interesados reconocen contratiempos al momento de implementar técnicas de mantenimiento preventivo, la falta de una metodología estructurada para identificar y priorizar los puntos críticos de inspección ha llevado a una asignación no apropiado de recursos y a una falta de enfoque, en áreas de mayor riesgo.

La empresa reconoce que no cuenta con una herramienta efectiva para determinar los problemas más significativos que requieran de atención inmediata. Ante esta problemática, la dirección de mantenimiento de la empresa interesada en Santa Cruz cuenta con la necesidad de desarrollar un plan de inspección basada en un enfoque más estratégico.

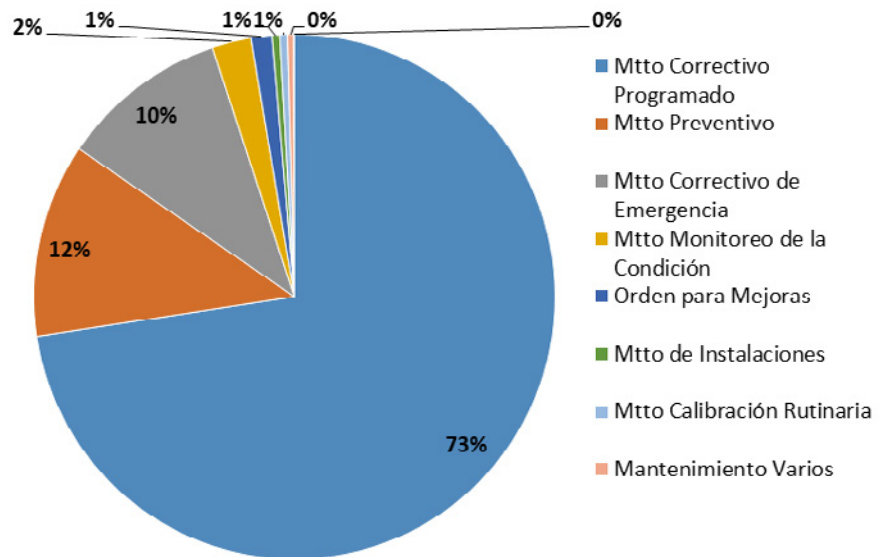


**Figura N°1.** Análisis de Pareto por áreas según el número de avisos

**Fuente:** Adaptado de la empresa interesada (2023)

En la Figura N°1 se aprecia que la “Planta 1” de la empresa interesada en su centro operativo de Santa Cruz presenta una serie de dificultades con el alto porcentaje de avisos generados en comparación con otras áreas de la empresa. De acuerdo con el análisis de Pareto realizado por la empresa del periodo 2022 a 2023, se ha identificado que esta planta representa más del 70% de los avisos anuales, lo cual ha generado preocupación en cuanto a la eficiencia operativa, la seguridad de los operadores y la calidad de los productos lácteos.

Se puede observar en la Figura N°2 que la mayoría de las órdenes de trabajo generadas durante el periodo 2022-2023 son de naturaleza correctiva programada, y que las órdenes de trabajo son creadas después de detectar una falla o avería. Esto implica que algunos equipos presentan fallas o averías que requieren una reparación programada e incluso provocan la interrupción de la línea de producción. Esta situación no solo afecta la eficiencia operativa, sino que también representa un riesgo para la seguridad de los operadores y puede comprometer la calidad de los productos lácteos según los datos proporcionados por la empresa.



**Figura N°2.** Porcentajes de tipos de órdenes de trabajo de mantenimiento

**Fuente:** Adaptado de la empresa interesada (2023)

## 2. METODOLOGÍA

Por medio del trabajo de García y otros (2019), se puede inferir que las metodologías de mantenimiento se refieren a enfoques estructurados y sistemáticos que se utilizan para mejorar y gestionar el mantenimiento en el sector industrial tales como el mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM), el mantenimiento productivo total (TPM) entre otros, estas metodologías tienen como objetivo mejorar la disponibilidad, eficiencia y productividad de los equipos, así como el identificar y prevenir fallos o modos de fallo.

Ardila y Otros (2016) menciona que entre las metodologías aplicadas a la gerencia del mantenimiento se pueden encontrar evaluaciones a estados del arte, uso de encuestas y diferentes técnicas de recopilación de datos, así como el uso de técnicas estadísticas para el tratamiento y análisis de los datos obtenidos. De esta forma las metodologías de mantenimiento se refieren a los enfoques, técnicas y procesos utilizados para gestionar y mejorar la eficiencia del mantenimiento en una organización.

### Matriz y análisis de criticidad

Por Parra y otros (2012), se reconoce que la matriz de criticidad es una herramienta utilizada para identificar y jerarquizar la importancia de los activos de una instalación. Según los autores, la matriz ayuda a determinar la importancia y las consecuencias de los posibles eventos de fallos de los sistemas de producción dentro del contexto operacional en el que se encuentran. Esta matriz permite subdividir los elementos en secciones que pueden ser manejadas de manera controlada y auditable, y ayuda a dirigir los recursos (humanos, económicos y tecnológicos) hacia los activos más críticos.

A su vez por Ramírez y otros (2017) puede llegar a decir que una matriz de criticidad es una herramienta que permite identificar y evaluar el nivel de riesgo asociado a la importancia de un sistema, equipo o instalación. Se utiliza para determinar la prioridad de atención y la necesidad de acciones de mantenimiento. Además, se menciona que la matriz de criticidad utiliza un código de colores para identificar la intensidad de riesgo relacionado con el valor de criticidad.

CRITICIDAD																						
FRECUENCIA (FF)	5	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125
	4	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60	64	68	72	76	80	84	88	92	96	100
	3	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60	63	66	69	72	75
	2	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50
	1	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
CONSECUENCIAS (CO)																						
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	

Figura N°3. Matriz de Criticidad

Fuente: Ramírez *et al.* (2017)

Como se observa en la Figura N°3. Ramírez y otros, se basan en la frecuencia y las consecuencias de los fallos registrados. Es importante recalcar que ambos autores mencionan más criterios que pueden ser evaluados al realizar el análisis de criticidad de los equipos de una instalación, y que los mencionados son los más destacados por cada autor.

### Frecuencia de fallos

Para Flores *et al.* (2020) la frecuencia de fallas se refiere a la cantidad de veces que ocurre una falla en un equipo en un periodo de tiempo determinado. Es importante conocer este dato porque nos permite evaluar la frecuencia con la que se presentan problemas en un equipo y nos ayuda a determinar la criticidad del mismo. Conocer la frecuencia de fallas permite tomar decisiones informadas sobre el tipo de mantenimiento que se debe aplicar, ya que equipos con una alta frecuencia de fallas requerirán un mantenimiento más frecuente y riguroso para evitar interrupciones en la operación. (Flores, Medina, Vargas, & Remache, 2020)

A través de Nuno y Otros (2020) se puede entender que la frecuencia de fallos se refiere a la cantidad de veces que ocurre un fallo en un componente o sistema durante un período de tiempo determinado. Es un indicador importante en la gestión de mantenimiento, ya que permite identificar patrones de fallos y determinar la necesidad de realizar acciones de mantenimiento preventivo o predictivo. Conociendo la frecuencia de fallos, se pueden establecer estrategias de mantenimiento más eficientes y optimizar los recursos disponibles. De igual forma, la frecuencia de fallos también puede utilizarse para calcular la confiabilidad de un componente o sistema y evaluar su desempeño en términos de disponibilidad y tiempo de inactividad. (Nuno, Lopes, & Braga, 2020)

### **Planificación de inspecciones**

La norma UNE- EN 13306:2018 define inspección como: “examen de la conformidad mediante medición, observación o ensayos de las características relevantes de un elemento” (UNE - Asociación Española de Normalización, 2018)

La norma DIN 31051 define la inspección “como todas las tareas para determinar y evaluar el estado real de un objeto técnico, incluida la identificación de la causa del desgaste y la deducción de las tareas necesarias para garantizar su uso futuro.” (DIN - Deutsches Institut für Normung, 2019)

Liebstücke (2011) menciona las siguientes tareas como parte del mantenimiento después de realizar las inspecciones:

- ◆ Ajustar
- ◆ Reemplazar
- ◆ Suplemento
- ◆ Lubricar
- ◆ Preservar
- ◆ Limpio
- ◆ Pruebas de función

### **SAP PM**

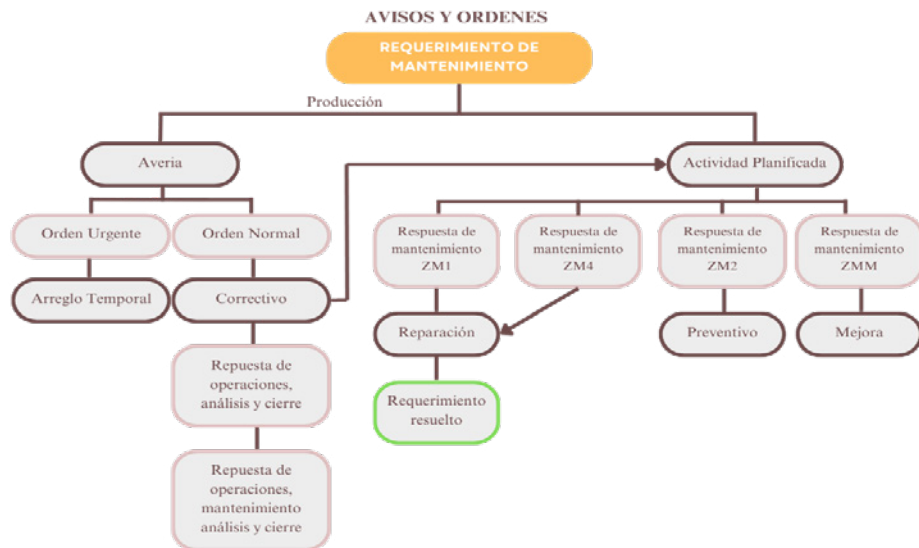
Desde la perspectiva de Sulca (2021), se genera la siguiente idea de (Figura 4), es un módulo de Mantenimiento de Planta dentro del sistema ERP SAP. Tiene como objetivo maximizar los tiempos de producción y mantener la disponibilidad de los equipos mediante un mantenimiento efectivo de la planta. Este se utiliza para gestionar y planificar los procesos de mantenimiento, mejorar el diagnóstico de problemas eléctricos, mecánicos o de instrumentación, y optimizar la vida útil de los activos.



**Figura N°4.** SAP Plant Maintenance

**Fuente:** Optimizer (2023)

Para entender de mejor manera el flujo de órdenes y avisos se muestra la Figura N°5. donde se puede observar cómo funcionan los avisos y órdenes en función de los requerimientos de mantenimiento, y cómo se relacionan con los diferentes tipos de actividades en SAP PM.



**Figura N°5.** Avisos y tipos de órdenes

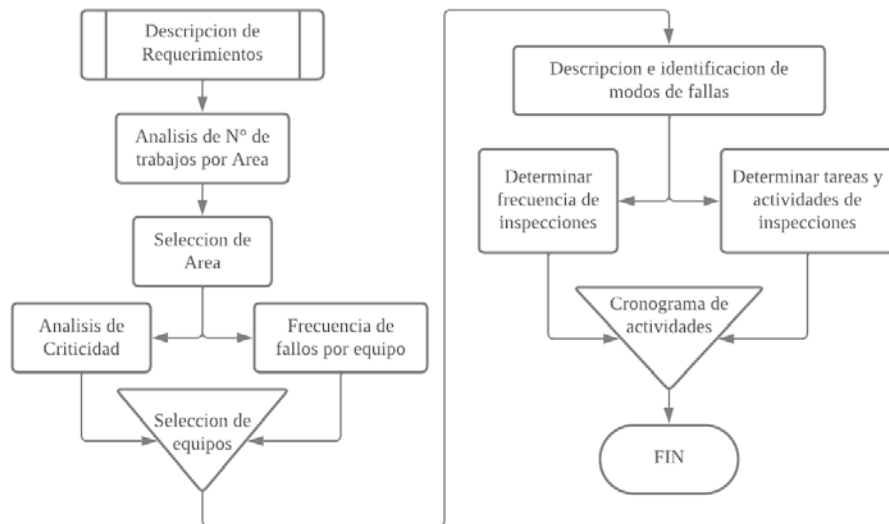
**Fuente:** Adaptado de Orekait (2018)

### 3. DESARROLLO

Para el desarrollo del plan de inspección se usan como base la metodología DMAIC, mencionada por Lynch y otros (2003), que se basa en principios Six Sigma y Lean, tomando un enfoque basado en datos para definir, medir, analizar mejorar y controlar problemas en un proceso; y la metodología PDCA o conocida también como el ciclo de Deming mencionada por Dudin y otros, basado en cuatro etapas Planificar, Hacer, Verificar y Actuar, ambas metodologías contribuyen a la



metodología final que se usa en el presente proyecto con el fin de encaminar el desarrollo del proyecto al cumplimiento de los objetivos formulados. En la Figura N°6 se observa el flujograma que describe el desarrollo del plan de inspección, basándose en la interpretación de las metodologías mencionadas



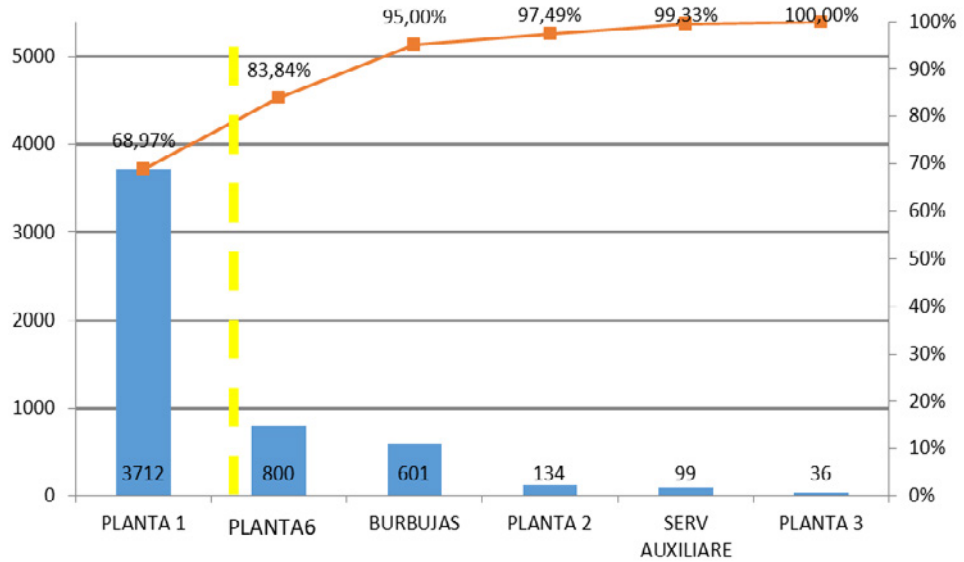
**Figura N° 6.** Flujograma del desarrollo del plan de inspección

**Fuente:** Elaboración propia (2023)

### 3.1 Selección de Área

Como se muestra en la Figura N° 7, la mayor parte de las órdenes realizadas durante el periodo 2022 a 2023 se refieren a actividades de mantenimiento correctivo, siendo este el 73% de las actividades realizadas por el departamento de mantenimiento. El análisis de Pareto ayuda a determinar la planta la cual se debe dar prioridad al momento de implementar técnicas y metodologías de mantenimiento preventivo, esto debido al gran número de equipos que existen en las instalaciones.

A continuación, se muestra un gráfico de Pareto que a diferencia de la Figura N°1, se basa en el número de órdenes realizadas por áreas del periodo especificado, este grafico basa su importancia en que las órdenes están directamente relacionadas a las actividades realizadas en los equipos.



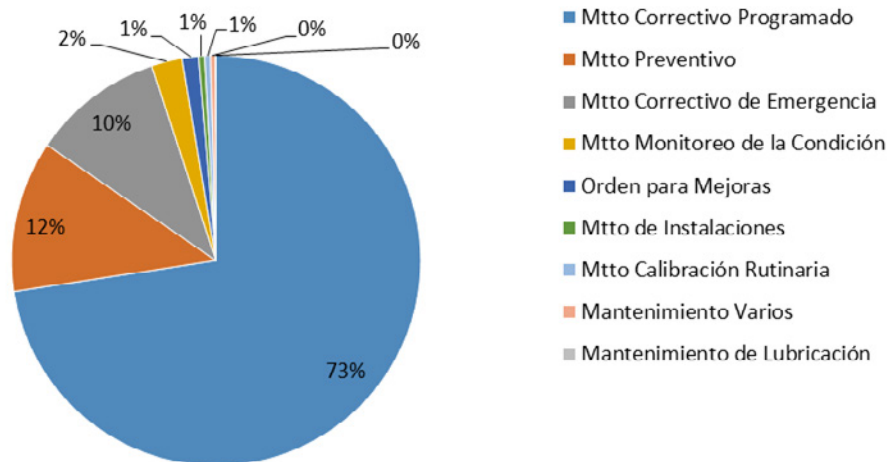
**Figura N° 7.** Análisis de Pareto en base al número de órdenes por área

**Fuente:** Elaboración propia en base a datos recopilados de la empresa interesada (2023)

Como se aprecia en la Figura N° 7, “Planta 1” representa cerca del 70% de todas las órdenes generadas, debido a esto se establece “Planta 1” como prioridad al momento de diseñar el plan de inspección de equipos.

De esta forma, enfocándose en la “Planta 1” referida en adelante como P1, se puede conocer los tipos de tipos de actividades de mantenimiento que se realizan en el área.

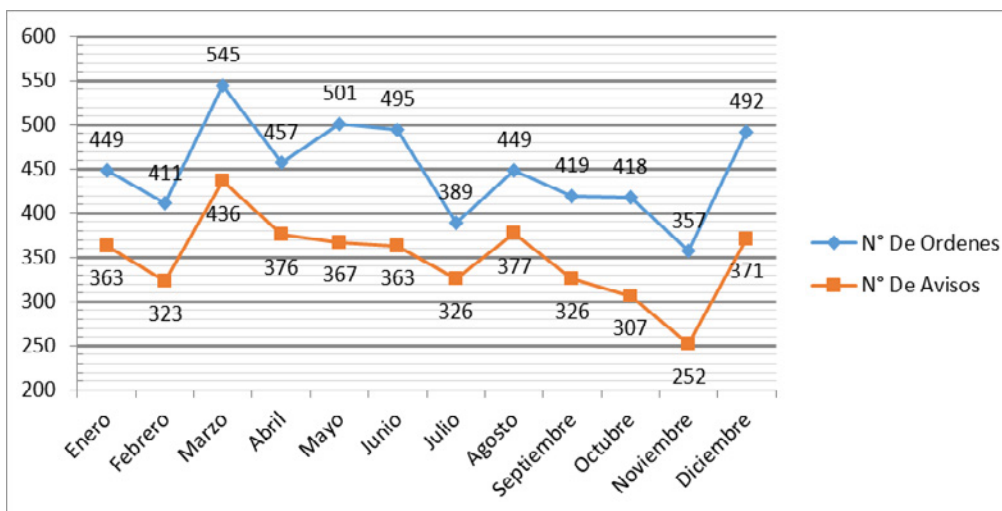
En la Figura N° 8 se puede apreciar que en P1 el 73% de las actividades realizadas por el departamento de mantenimiento son de carácter correctivo programado, el 12% de mantenimiento preventivo, el 10% en correctivos de emergencia y el restante se subdivide en varios más. Por ello se confirma la importancia y la necesidad de desarrollar un plan de inspección en esta área específica de las instalaciones.



**Figura N° 8.** Actividades de mantenimiento en Planta 1

**Fuente:** Elaboración Propia en base a datos recopilados de la empresa interesada(2023)

Para comprender de mejor manera el comportamiento de las órdenes y avisos en el transcurso de los meses se plantea la Figura N° 9, donde se puede ver como la generación de órdenes y avisos varían según los meses, identificando el pico más alto durante el mes de marzo, y el mes con menos actividad ha sido noviembre, de igual forma se puede verificar cierta relación entre el número de órdenes y avisos generados cada mismo, llegando a parecerse en forma, pero no iguales.



**Figura N° 9.** Comportamiento de órdenes y avisos durante el periodo 2022-2023

**Fuente:** Elaboración propia en base a datos recopilados de la empresa interesada (2023)

### 3.2 Matriz de Criticidad

A continuación, se muestra el procedimiento que se aplica para realizar la matriz de criticidad de cada uno de los equipos de la empresa en Santa Cruz. En la Figura N°10 se pueden ver cada uno de los criterios evaluados en los equipos.

FF		IO		FCNV		FO		CM		SST		MA		CA	
Factor de frecuencia #Avisos		Impacto Operacional Parada Correc(dias)		Factor capacidad no vendida TTD		Flexibilidad Operacional Unico/StandB y		Costos de Mantenimiento Bs.		Seguridad y Salud en el Trabajo		Medio Ambiente PTE y Residuos		Calidad e inocuidad	
>91 fallos/año	4	>72	4	Alto 0-10	5	Unico	3	>=100K	3	Muy Alto	5	Significativa	3	PCCs afectados	5
61-91	3	48-72	3	Medio 10-30	3	By Pass	2	<100K	1	Alto	3	Menor	2	Afecta calidad	3
30-61	2	24-48	2	Bajo 30-50	1	Stand By	1	-	-	Medio	2	No significativa	1	No afecta, solo costos	1
0-30	1	0-24	1	Muy Bajo 50-100	0	-	-	-	-	Bajo	1	-	-	-	-
Peso relativo 4	Impacto	Peso relativo 4	Impacto	Peso relativo 5	Impacto	Peso relativo 3	Impacto	Peso relativo 3	Impacto	Peso relativo 5	Impacto	Peso relativo 3	Impacto	Peso relativo 5	Impacto

**Figura N°10.** Criterios de evaluación en la matriz de criticidad

**Fuente:** Elaboración propia (2023)

Como se observa en la anterior figura los criterios se basan en:

- ◆ Factor de frecuencia de avisos: relacionada principalmente al número de fallos que tiene un equipo en un año
- ◆ Impacto operacional: o en este caso el número de paradas correctivas que afectan las operaciones durante un año.
- ◆ Factor de capacidad no vendida: evalúa el impacto potencial de la falla de un equipo en la capacidad de producción de la empresa.
- ◆ Flexibilidad Operacional: evalúa si el equipo es único, by-pass o stand-by.
- ◆ Costos de Mantenimiento: mano de obra, repuestos, materiales y otros.
- ◆ Seguridad y salud en el trabajo: se refiere a los riesgos asociados a la salud y seguridad de los trabajadores.
- ◆ Medio Ambiente PTE y residuos: se refiere a la evaluación del impacto ambiental de un elemento o componente en particular.
- ◆ Calidad e inocuidad: se refiere a la evaluación del impacto que tiene la falla o deterioro de un equipo en la calidad y seguridad de los productos o servicios ofrecidos.

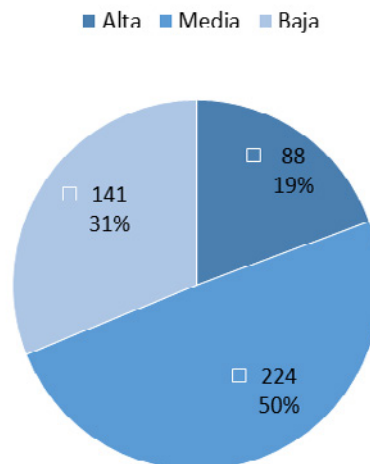
Los resultados obtenidos luego de la evaluación de cada uno de los criterios se pueden clasificar en 3:

- ◆ Criticidad alta (A): cuando el puntaje resultante sea mayor a 99 puntos .
- ◆ Criticidad media(B): cuando el puntaje obtenido este en los rangos de 67 a 99 puntos.
- ◆ Criticidad baja(C): cuando el puntaje obtenido sea menor a 67 puntos.

### 3.2.1 Criticidad de equipos en “Planta 1”

La matriz completa de los equipos no es presentada debido a la sensibilidad de los datos que esta puede representar y al extenso número de equipos que se tienen evaluados.

De esta forma al evaluar los equipos de P1 con los criterios mencionados se puede conocer por medio de la Figura N° 11 que: de 453 equipos evaluados el 19% son de criticidad alta, el 50% son catalogados como equipos de criticidad media, y el 31 % son de criticidad baja.



**Figura N° 11.** Porcentaje de equipos en “Planta 1” por criticidad

**Fuente:** Elaboración Propia (2023)

### 3.3 Selección de Equipos

Por medio del uso de los históricos de mantenimiento se puede observar que 223 equipos fueron atendidos bajo órdenes de mantenimiento correctivo programado durante el periodo analizado, y que, por medio de análisis de criticidad y frecuencia de órdenes de trabajo de cada uno de los equipos, los siguientes equipos son postulados para realizar en base a estos el plan de inspección. En otras palabras, los equipos que presentan mayor número de órdenes de trabajo y son de criticidad alta (A) dentro de la “Planta 1” son listados en la Tabla N° 1.

**Tabla N°1.** Equipos calificados para el plan de inspección por número de órdenes y criticidad alta.

NOMBRE DEL EQUIPO	Nº de órdenes	Criticidad
ENVASADORA UHT THIMONNIER 1	225	A
ENVASADORA UHT THIMONNIER 9	216	A
ENVASADORA UHT THIMONNIER 3	200	A
ENVASADORA UHT THIMONNIER 4	193	A
ENVASADORA UHT THIMONNIER 7	168	A
ENVASADORA UHT THIMONNIER 5	116	A
PROCESADOR UHT TETRAFLEX	87	A
ERCA - TERMOFORMADORA DE YOGURT BATIDITO	85	A
TRANSPORTES FILA 1 + CONTADOR	54	A
PROCESADOR UHT REDA 2	52	A
EMPAQUETADORA MANTEQUILLA 200 GR	50	A
TRANSPORTES FILA 2 + CONTADOR	46	A
TRANSPORTES FILA 3 + CONTADOR	44	A
LAVADORA AUTOMATICA DE CAJAS (NUEVA)	43	A
TRANSPORTES FILA 5 + CONTADOR	39	A
HOMOGENIZADOR DE BEBIDA LACTEA	30	A
PASTEURIZADOR DE JUGOS	19	A
ENVASADORA VOLPAK II	18	A
PASTEURIZADOR DE YOGURT 10000	18	A
TRANSPORTES FILA 4 + CONTADOR	18	A
PASTEURIZADOR DE LECHE TRETRE PAK 40000	17	A

**Fuente:** Elaboración propia (2023)

Como se aprecia en la Tabla N°1, se identificaron 21 equipos de “Planta 1” que han sido calificados como seleccionables debido a su historial de fallos y su alta criticidad. Sin embargo, debido a los límites que representa el tipo de documento que se realiza, se decide tomar en cuenta un subconjunto de los primeros 10 equipos para el desarrollo del plan de inspección. Es importante destacar que, aunque este documento presenta el plan de inspección para 10 equipos, se reconoce la importancia de incluir los 21 equipos en un plan de inspección completo para abordar de manera integral los aspectos de mantenimiento y gestión de riesgos en la “Planta 1”.

A continuación, se describen los equipos seleccionados para la realización del plan de inspección, es importante aclarar que las envasadoras UHT THIMONNIER son un grupo de máquinas con características similares por lo que su análisis se llevara a cabo como un grupo.

### 3.3.1 Envasadoras Thimonnier M4200 AS

Este grupo de equipos son los encargados de envasar los productos UHT (ultra pasteurización), consiste de diversos subsistemas, como la alimentación de film que es el envase de los productos, alimentación de producto, sistemas de limpieza y otros que son detallados en la siguiente lista obtenida a través del manual presente en la empresa. (Thimonnier, 2004)

- ◆ Desenrollado. - subsistema donde se cargan las bobinas de film y se va desenrollando conforme se envase el producto.
- ◆ Impresión film & Guía de orillo del film. – encargado de imprimir la fecha de vencimiento y el lote de los productos envasados.
- ◆ Esterilización del Film. - depósito de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> interno por donde se sumerge el film para esterilizarlo.
- ◆ Escurrimiento y Secado. - conjunto de raspares y ligero suministro de aire cálido que escurren y secan el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> del film antes de envasar el producto.
- ◆ Sistema de tensión constante del film. – un conjunto de rodillo y batidor que suministran y mantienen una tensión constante del film antes de ser envasado.
- ◆ Conformador. – permite formar una funda de film a lo largo del tubo de la cánula de dosificación.
- ◆ Soldadura longitudinal. - permite formar un tubo de film soldando los bordes de este.
- ◆ Tirado del film. - rodillos que tiran el film hacia la soldadura transversal.
- ◆ Dosificación. - Cánula de dosificación que llena de producto UHT de manera continua a la funda del film.
- ◆ Célula estéril. - es realizada por un flujo luminoso de aire puro caliente y presión positiva en el armario, de reconocer zona estéril y semi estéril.
- ◆ Soldadura Transversal. – se realiza en el área semi estéril y entrega el producto ya envasado.

Entre las fallas más comunes detectadas según los históricos se encuentran la siguiente lista, en la cual se basan las tareas de inspección junto a los subsistemas mencionados anteriormente:

- ◆ Sistema de Soldadura, tanto longitudinal como transversal presentan fallas de mal sellado, relacionados con el mecanismo de apriete de las mordazas como el estado de las resistencias de las mismas.
- ◆ Rodillos, tanto del desenrollado como de tensión constante del film presentan fallas relacionadas con los rodamientos, arandelas y el desgaste de los mismos.

- ◆ Fugas, se presentan fallas en fugas de aire en el sistema neumático, vapor y el suministro de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.
- ◆ Raspadores, el mayor si no el único desperfecto que tienen se relaciona con el desgaste de los mismos
- ◆ Fallas eléctricas y electrónicas, de distintos tipos relacionados con la respuesta de los equipos, alarmas y las paradas inesperadas.
- ◆ Fallas mecánicas, en su mayoría notificadas como “ruidos extraños” se catalogan como fallas mecánicas hasta conocer su origen.

Como las órdenes de mantenimiento correctivo programado tienen relación directa con las fallas detectadas en los equipos se puede conocer la frecuencia de fallos de cada uno de los equipos siendo para el grupo Thimonnier los siguientes:

- ◆ **Envasadora UHT Thimonnier 1:** 225 Fallas al año.
- ◆ **Envasadora UHT Thimonnier 9:** 216 Fallas al año.
- ◆ **Envasadora UHT Thimonnier 3:** 200 Fallas al año.
- ◆ **Envasadora UHT Thimonnier 4:** 193 Fallas al año.
- ◆ **Envasadora UHT Thimonnier 7:** 168 Fallas al año.
- ◆ **Envasadora UHT Thimonnier 5:** 116 Fallas al año.

Debido a la alta frecuencia de fallos registrados por estos equipos, y la consulta con el encargado del departamento de mantenimiento se llega a la frecuencia de inspección semanal de cada uno de los equipos mencionados.

### 3.3.2 Procesador UHT Tetraflex

Basado en el manual de Tetra pak (2004), la función principal del procesador UHT es realizar la ultra pasteurización de los productos lácteos, lo que implica calentar rápidamente el producto a altas temperaturas para eliminar los microorganismos y prolongar la vida útil de los productos, manteniendo la calidad nutricional de los mismos. A continuación, se muestra de manera general los subsistemas que conforman este equipo y las fallas comunes que se puede presentar en estos.

- ◆ **Sistema de precalentamiento**, se detectan obstrucciones o depósitos del producto en el intercambiador de calor como fugas y sobre calentamientos en la caldera.
- ◆ **Sistema de homogeneización**, obstrucciones, fugas y problemas de sellado, en los tubos y válvulas.
- ◆ **Sistema de procesamiento UHT**, bloqueos, incrustaciones, obstrucciones en el intercambiador de calor, y problemas de suministro y en pocos casos contaminación, en el sistema de enfriamiento.



- ◆ **Sistema de control y monitoreo**, descalibraciones, daños, lecturas incorrectas, mal funcionamiento y fluctuaciones inadecuadas en los sensores y controladores de presión y temperatura.
- ◆ **Sistema de limpieza y esterilización**, Se pueden presentar problemas del flujo de los químicos, mal sellado entre las válvulas.

La frecuencia de fallos del equipo determinada según el histórico es de 87 fallos por año.

### 3.3.3 ERCA - Termo formadora de yogurt

En el manual de ERCA (2004) se describe la función principal del equipo, producir los envases plásticos para el yogurt en vasos pequeños a partir de láminas de material plástico, calentando las láminas y dándoles la forma requerida usando multes, cortar los vasitos, dosificar el producto y sellarlo. A continuación, se mencionan los subsistemas del equipo y las fallas por las que se pueden ver afectados.

- ◆ **Sistema de alimentación de lámina**, el subsistema se puede ver afectado por atascos, y problemas de tensión que causan arrugas o deformaciones a las laminas
- ◆ **Sistema de termoformado**, puede ser afectado por calentamiento desigual o insuficiente, al igual que el desgaste o daño de los moldes que ocasiona mal formaciones en los vasos.
- ◆ **Sistema de llenado**, válvulas de dosificación dañadas o defectuosas que pueden ocasionar una mala dosificación.
- ◆ **Sistema de sellado**, sellado incompleto, generado por temperatura o presión incorrectas.
- ◆ **Sistema de expulsión y recolección**, bloques o errores en el transportador de salida.
- ◆ **Sistema de control y monitoreo**, descalibraciones, daños, lecturas incorrectas, mal funcionamiento y fluctuaciones inadecuadas en los sensores y controladores de temperatura.

La frecuencia de fallos del equipo es de 85 fallas por año, dato que se relaciona directamente con la frecuencia de inspecciones que se propone.

### 3.3.4 Transportes Fila 1 + Contador

En la empresa este equipo consiste en una cinta transportadora que cuenta y lleva los productos recién envasados al área de empaquetado para su posterior almacenaje, en base al manual de cintas transportadoras de Javu (2016), y el historial de fallas del equipo se pueden reconocer los siguientes componentes y las fallas en las que se basa el plan de inspección.

- ◆ **Rodillos**: Desgaste o daño en los rodillos y rodamientos.
- ◆ **Correa transportadora**: Roturas, desgaste y desalineaciones.
- ◆ **Sensor de conteo**: Fallas o sensibilidad alterada

- ◆ **Contador: problemas de alimentación:** conectividad o controladores.
- ◆ **Controlador de velocidad de cinta:** Desajuste de controlador, velocidades irregulares, fallas electrónicas.
- ◆ **Motor eléctrico:** sobrecalentamientos, fallas eléctricas, reductores y otros.

La frecuencia de fallos atendidos en el presente equipo es de 54 fallos al año.

### 3.3.5 Procesador UHT REDA 2

Basado también en el manual de Tetra Pak (2004) cumple la misma función que el procesador UHT mencionado anteriormente y cuentan con sistemas similares entre sí, y a su vez los tipos de fallas que se presentan, diferenciándose en la frecuencia de fallos que tiene cada equipo, para este equipo la frecuencia de fallos es de 52 fallos al año.

## 3.4 Frecuencia de inspecciones

Como lo sugieren los conocimientos generales respecto a la determinación de las frecuencias de inspección, estas se ven definidas por distintas pautas, como la criticidad que ya fue evaluada en el documento, el tipo de equipo, los recursos disponibles y la frecuencia de fallas halladas a partir de los históricos de cada equipo. Por ello a pesar que la frecuencia de fallas puede indicar realizar varias inspecciones semanales al mismo equipo, se procedió a validar la frecuencia de inspección de los equipos seleccionados con el supervisor encargado de planificación en el área de mantenimiento, resultando en inspecciones semanales para cada uno de los equipos seleccionados debido a los recursos disponibles de la empresa y el gran porcentaje de mantenimiento correctivo presente.

### 3.4.1 Tareas y actividades de inspección

En esta sección se debe describir cada una de las tareas de inspección que se debe realizar en cada equipo, las actividades que las tareas suponen, que personal estará a cargo dependiendo de la actividad realizada y los equipos mínimos necesarios para realizar inspecciones en los equipos.

Las tareas son propuestas en función a los sistemas o componentes que pueden verse afectadas por posibles fallas, el personal consiste en técnicos mecánicos, electricistas y según los recursos de la empresa se sugiere personal especializado para algunos equipos, los equipos señalados pueden ser: lupas, linternas, multímetros, termómetros, calibradores, cámaras de inspección y las herramientas más específicas como cámaras termograficas, sensores de vibración y ultrasonido están sujetas a la disponibilidad técnica de la empresa.

**Tabla N° 2.** Tareas, Asignación de Personal, Herramientas y Actividades de Inspección Propuestas para las Envasadoras Thimonnier.

Equipo	Tarea	Encargado y herramientas	Actividades
<b>Envasadoras Thimonnier</b>	Inspección en los sistemas de sellado	Tec. Mecánico y Tec. Electricista; Lupa, Cámara de inspección; Multímetro	Verificar la calidad de sellado y Medir resistencias de las mordazas
	Inspección de Rodillos y elementos relacionados	Tec. Mecánico; Linterna, lupa y estetoscopio o detector de vibraciones	Evaluar visualmente desgaste de rodamientos y arandelas, verificar condición de rodamientos con estetoscopio u otro
	Inspección de fugas, en tuberías y válvulas	Tec. Mecánico o Electricista; Linterna y detector de fugas	Inspección Visual, identificar y localizar posibles fugas, de vapor, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> o el sistema neumático
	Inspección de desgaste en raspadores	Tec. Mecánico; Linterna y Lupa	Examinar visualmente el estado de los raspadores
	Inspección de conexiones Electrónicas y control	Tec. Electricista; Multímetro y Cámara Termograficas(según disponibilidad)	Verificar conexiones, buscando posibles conexiones inadecuadas o dañadas, buscar puntos de calor
	Inspección Mecánica general, para ruidos y vibraciones	Tec. Mecánico; Linterna y herramientas de diagnóstico de vibraciones	Evaluación auditiva y visual, de ruidos y vibraciones inusuales

**Fuente:** Elaboración propia en base a los análisis realizados (2023)

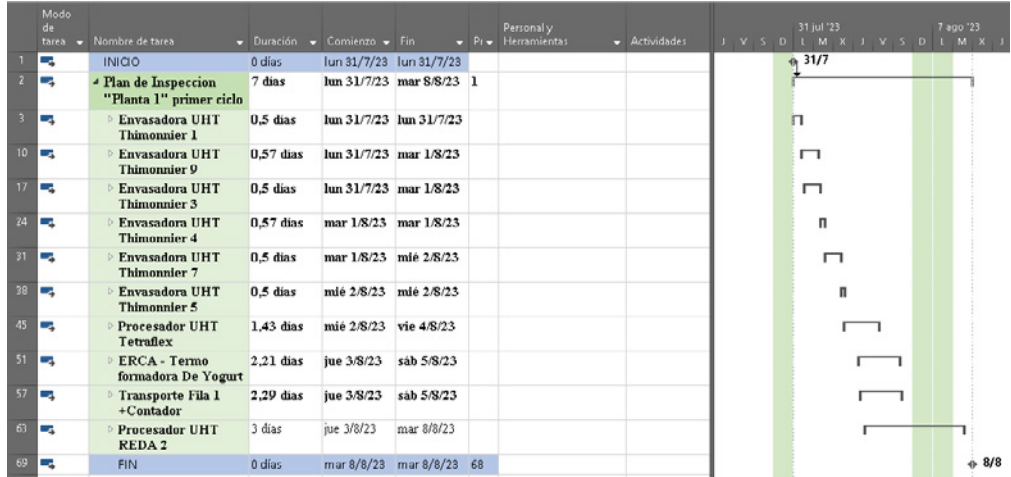
En la Tabla N° 2 se puede ver la asignación de tareas y actividades de inspección para las envasadoras Thimonnier, relacionadas con las herramientas y el personal recomendado. La tabla completa con los equipos restantes se encuentra adjunta en los apéndices.

### 3.5 Plan de Inspección

A continuación, se presenta parte del plan de inspección propuesto donde se puede observar las tareas y actividades de inspección para cada uno de los equipos seleccionados, a la vez con los recursos sugeridos para cada una de las actividades y tareas.

El cronograma para el plan de inspección se basa en los horarios de trabajo conocido por los técnicos, que marcan 8 horas, pero 7 son de trabajo, de lunes a sábado durante el turno de la mañana, en la Figura N°12 se puede observar el plan de inspección contraído.

En la Figura N°12 se aprecia la vista general del plan de inspección viendo su fecha inicial propuesto el lunes 31 de julio, suponiendo que se destinan dos técnicos para realizar las tareas de inspección, se puede apreciar que el primer ciclo de inspección toma siete días de trabajo de siete horas laborales por día, por lo que las tareas de inspección del primer ciclo concluyen el 8 de agosto.



**Figura N°12.** Vista general del primer ciclo de inspección para los equipos seleccionados en “Planta 1”

**Fuente:** Elaboración Propia (2023)

#### 4. CONCLUSIONES

En conclusión, el proyecto ha logrado cumplir con los objetivos planteados. A través del análisis de la matriz de criticidad y la frecuencia de fallos, se ha identificado de manera precisa los equipos críticos de la planta productiva de la empresa interesada en Santa Cruz, esta identificación se basó en un minucioso examen de los registros históricos de mantenimiento, lo que proporcionó una comprensión profunda de los modos de fallo y sus respectivas frecuencias, enfocándose principalmente en la “Planta 1” gracias a los resultados obtenidos, se ha logrado establecer los modos de fallo y sus respectivas frecuencias mediante el análisis exhaustivo de los registros históricos de mantenimiento.

Esta identificación se basó en un minucioso examen de los registros históricos de mantenimiento, lo que proporcionó una comprensión profunda de los modos de fallo y sus respectivas frecuencias.

La definición de los criterios de criticidad ha permitido clasificar y priorizar de forma adecuada los equipos en función de su importancia operativa y el impacto que generan sus fallos en el proceso de producción. Esto ha facilitado la toma de decisiones estratégicas en cuanto a las actividades de mantenimiento y la asignación de recursos.

El diseño del plan de inspección detallado ha sido realizado de manera minuciosa, considerando la frecuencia, las tareas y los procedimientos de inspección específicos para cada equipo crítico. Se tuvo en cuenta la información recopilada en los registros históricos de fallos, garantizando así una cobertura exhaustiva y eficaz en la detección de posibles problemas.

Finalmente, el plan de inspección propuesto ha sido validado mediante una revisión exhaustiva para asegurar su viabilidad y ajuste a los requerimientos del área de mantenimiento en la empresa interesada. Esto ha garantizado que el plan se adecue de manera óptima a las necesidades y recursos disponibles, asegurando su implementación exitosa.

## 5. RECOMENDACIONES

Como resultado a los resultados del proyecto y en base a la experiencia obtenida a lo largo de su desarrollo, se realizan las siguientes recomendaciones relacionadas al plan de inspección presentado a la empresa interesada:

1. Establecer capacitaciones para el personal encargado de llevar a cabo las tareas de inspección, asegurando que cuenten con los conocimientos y habilidades necesarios para realizar las actividades de manera eficiente y segura. Esto contribuirá a garantizar la correcta ejecución del plan de inspección y la optimización de los recursos humanos.
2. Establecer un sistema de monitoreo y seguimiento continuo del plan de inspección, para evaluar regularmente su efectividad y realizando los ajustes necesarios en función de los resultados obtenidos. Esto permitirá mantener la mejora continua y la actualización del plan de inspección en respuesta a posibles cambios en los equipos, tecnologías o condiciones operativas.
3. Fomentar una cultura de prevención y seguridad en la empresa, promoviendo la participación activa y el compromiso de todos los empleados en la implementación del plan de inspección.
4. Realizar evaluaciones periódicas del desempeño del plan de inspección, mediante indicadores clave de rendimiento y métricas establecidas previamente. Esto permitirá medir el impacto del plan en la eficiencia operativa, la reducción de fallas y averías, y los costos asociados al mantenimiento.
5. Realizar una revisión exhaustiva de la propuesta del plan de inspección, verificando su viabilidad y adaptabilidad a los recursos disponibles y a las necesidades específicas de la “Planta 1”. Además, se sugiere el añadir los equipos seleccionables que fueron excluidos.

## 5. REFERENCIAS

- DIN - Deutsches Institut für Normung. (2019). *DIN 31051:2019-06: Fundamentals of maintenance*.
- Flores, M., Medina, D., Vargas, D., & Remache, B. (2020). *Asignación de Modelos de Mantenimiento Basada en la Criticidad y Disponibilidad del Equipo*. Quito: Ciencia America.
- Marrero, R., Martinez, E., Vilalta, J., Garcia, V., & Basile, M. (2022). *La planificación del mantenimiento, su importancia en la gestión de los activos*. La Habana, Artemisa, Cuba: Ingeniería Industrial.
- Moubray, J. (2004). *Mantenimiento centrado en confiabilidad*. Gran Bretaña: Aladon ltda.
- Muganyi, P., & Mbohwa, C. (2018). *Proactive Maintenance Strategic Application to Advance Equipment Reliability*. Paris: IEOM society International.
- Mulford, E., Carrasquilla, J., & Moreno, G. (2019). *Mantenimiento proactivo en la propulsión naval-minimiza costos maximiza la confiabilidad*. Colombia: CIDIN.
- Nuno, H., Lopes, I., & Braga, A. (2020). *Condition-based maintenance implementation: a literature review*. Guimarães: Procedia Manufacturing.
- Pesántez, A., & Rodrigo, S. (2009). *Elaboración de un plan de mantenimiento predictivo y preventivo en función de la criticidad de los equipos del proceso productivo de una empresa empaedora de camarón*. Guayaquil.
- Pilataxi, D. (2020). *Gestión del Mantenimiento y su relación con la eficiencia en las líneas de producción de las empresas lácteas de guayaquil*. Guayaquil: Universidad Politécnica Salesiana.
- Sulca, V. (2021). *Implantación del sistema ERP SAP R/3 modulo PM (mantenimiento de planta) en centrales hidroeléctricas*. Lima: Universidad Nacional Federico Villarreal.
- Thimonnier. (2004). *Manual de Instrucciones M4200AS*. Francia.
- UNE - Asociación Española de Normalización. (2018). *Mantenimiento. Terminología del Mantenimiento*. Madrid: EN 13306:2018.
- Viveros, P., Stegmaier, R., Kristjanpoller, F., Barbera, L., & Crespo, A. (2012). *Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento*. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*,.

Proyecto de Ingeniería Aplicada

# Dispositivo electrónico para apoyar el aprendizaje inicial de lectura Braille

Electronic device to support the initial learning of Braille Reading

 Yamil Condarco CalderónTitulado en Ingeniería Electrónica. Universidad Privada del Valle. La Paz. Bolivia. [ccy2018577@est.univalle.edu](mailto:ccy2018577@est.univalle.edu)

## RESUMEN

En este artículo se presenta el diseño de un dispositivo electrónico para el apoyo del aprendizaje de lectura de caracteres braille. El sistema de lectoescritura braille permite a las personas con discapacidad visual interactuar con su entorno sin la necesidad de un externo. La finalidad del dispositivo es apoyar a los instructores en el proceso de lectura de los caracteres braille mediante el uso de una aplicación móvil Android que permita aprender los caracteres braille de manera secuencial y también practicar lo aprendido, una base de datos para realizar el seguimiento y un dispositivo simulador de caracteres braille. El dispositivo simulador braille fue diseñado mediante impresión 3D y se comunica con el dispositivo móvil inalámbricamente, se utilizó una base de datos con acceso mediante web y conexión fuera de la red de área local LAN (en inglés: 'Local Area Network', conocido como LAN) mediante el uso de una red privada virtual VPN (en inglés: 'Virtual Private Network', conocido como VPN) para lograr registrar y dar seguimiento del uso del dispositivo. Se logró diseñar un dispositivo que permita apoyar en el proceso de aprendizaje de lectura braille, se realizaron prueba y en coordinación con la regional La Paz del Instituto Boliviano de la Ceguera se obtuvieron recomendaciones que permitirán mejorar el desempeño del dispositivo braille a futuro.

**Palabras clave:** Aplicación Android. Dispositivo Electrónico. Impresión 3D. Lectura Braille. Discapacidad Visual.

## ABSTRACT

This article presents the design of an electronic device to support learning to read braille characters. The braille literacy system allows visually impaired people to interact with their environment without the need for an outsider. The purpose of the device is to support instructors in the process of reading braille characters through the use of an Android mobile application that allows learning braille characters sequentially and also practicing what has been learned, a database to track and a braille character simulating device. The braille simulator device was designed by 3D printing and communicates wirelessly with the mobile device, a database with web access and connection outside the local area network LAN (in English: 'Local Area Network', known as LAN) was used by using a VPN virtual private network (in English: 'Virtual Private Network', known as VPN) to achieve record and track the use of the device. It was possible to design a device

**Citar como:** Condarco Calderon, Y. Dispositivo electrónico para apoyar el aprendizaje inicial de lectura Braille *Journal Boliviano De Ciencias*, 19(54). 62-77 <https://doi.org/10.52428/20758944.v19i54.990>

**Revisado:** 18/09/2023

**Aceptado:** 04/12/2023

**Publicado:** 20/12/23

**Declaración:** Derechos de autor 2023 Yamil Condarco Calderon, Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento.



that allows support in the braille reading learning process, tests were carried out and in coordination with the regional La Paz of the Bolivian Institute of Blindness, recommendations were obtained that will improve the performance of the braille device in the future.

**Keywords:** Android Application. Braille Reading. Electronic Device. Visual Disability. 3D Printing.

## 1. INTRODUCCIÓN

El sistema de lectoescritura braille permite a las personas con discapacidad visual realizar una comunicación con la sociedad y su entorno sin la necesidad de un externo, el braille se puede encontrar en muchos sitios con mayor frecuencia, por ejemplo, en: ascensores, tarjetas de recarga de saldo, puertas de ingreso o incluso billetes dependiendo el país. Conocer, practicar y fomentar el sistema de lectoescritura braille es importante para una adecuada integración de las personas con discapacidad visual en la sociedad. La alfabetización braille es leer, comprender y escribir en braille (Braille Works, 2022). El braille es un medio de comunicación para las personas con discapacidad visual como se refleja en el artículo 2 de la Convención sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad y es esencial para la educación, la inclusión y la cultura. (NACIONES UNIDAS, 2006).

“Todas las personas, si viven lo suficiente, experimentarán en su vida al menos una enfermedad ocular que requerirá la atención adecuada. En todo el mundo, por lo menos 2.200 millones de personas padecen deficiencia visual o ceguera”. (Organización Mundial de la Salud, 2020). En Bolivia, según el último censo realizado en 2012 por el Instituto Nacional de Estadística, INE, se tiene que la totalidad de personas con alguna dificultad permanente es de 342.919 (INE, 2012), del cual un 47% pertenece a las personas con limitaciones para ver (ceguera o baja visión).

“El braille es esencial para la alfabetización y el aprendizaje permanente de los ciegos, para su libertad de expresión y opinión, así como para su inclusión social”. (Unión Mundial de Ciegos, 2021). El sistema de lectoescritura braille permite que las personas con discapacidad visual puedan desarrollar la lectoescritura por medio del tacto y de este modo poder acceder a las posibilidades que brinda el conocimiento. “El sistema de lectoescritura braille es el medio más directo y seguro para acceder a la comunicación escrita y, en consecuencia, a las tecnologías y a la información en distintas áreas del conocimiento”. (Ministerio de Educación, 2013)

“El braille es indispensable para las personas con discapacidad visual (no olvidemos que, entre otras cosas, hace posible el acceso a las nuevas tecnologías). Es conveniente matizar que es posible que las propiedades del tacto limiten la velocidad lectora, pero no la comprensión. Hay muchas personas ciegas que declaran que cuando quieren de verdad entender algo y profundizar en ello, prefieren leerlo directamente por el tacto.” (Martínez-Liévana & Polo Chacón, 2004). La lectura táctil es un proceso de síntesis, va de lo significativamente más simple, letra, número, símbolo, sílaba, a lo más complejo, palabra, frase. (Alonso, y otros, 2015). Es importante que el estudiante del sistema de lectoescritura braille comience aprendiendo los caracteres de este, gracias a ello se podrá tener la base para un aprendizaje a mayor profundidad.



Se diseñó y construyó un dispositivo electrónico que permite apoyar en el proceso inicial del aprendizaje de sistema de lectoescritura braille, para ello se realizó un mecanismo que permite desplegar los caracteres del sistema de lectoescritura braille utilizando servomotores que son controlados mediante un microcontrolador, este último obedece las órdenes dadas por una aplicación móvil previamente diseñada, la comunicación entre ambas es de manera inalámbrica. Se cuenta también con una base de datos donde se almacena el fecha y hora del inicio de sesión.

## **2. METODOLOGÍA**

La metodología desarrollada en el presente proyecto es experimental debido a que se hizo un análisis de prototipo por fases tomando en consideración el diseño y rediseño del dispositivo en relación con los resultados del prototipo logrando así una simulación experimental. Se realizó el diseño del mecanismo braille utilizando el software Autodesk Fusion 360 y en base a las dimensiones recomendadas en el Documento técnico B1: Parámetros dimensionales del braille de la Organización Nacional de Ciegos Españoles. Utilizando el software UltiMaker Cura se aumentó el tamaño de las piezas a una escala 3:1 para su posterior impresión en 3D. La aplicación Android fue desarrollada en Android Studio utilizando Java como lenguaje de programación.

### **2.1 ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS**

Para que el proyecto se pueda comunicar con la persona con discapacidad visual es necesario contar con un medio auditivo que permita dicha comunicación, el proyecto contempla letras y signos de puntuación para el aprendizaje. Se cuenta con un modo que permite a la persona con discapacidad visual practicar lo aprendido. Se registra en una base de datos la fecha y hora del último ingreso a la aplicación, se realiza el registro bajo cualquier condición de red con acceso a internet.

### **2.2 DISEÑO DE ALTO NIVEL**

Se tiene un servidor (Base de Datos, Web y VPN) que se comunica de manera inalámbrica con la aplicación Android para que esta pueda cargar y descargar datos del servidor. La aplicación Android, utilizando Bluetooth, se comunica inalámbricamente con el microcontrolador que controla el mecanismo de despliegue de caracteres braille como se observa en la Figura N°1.

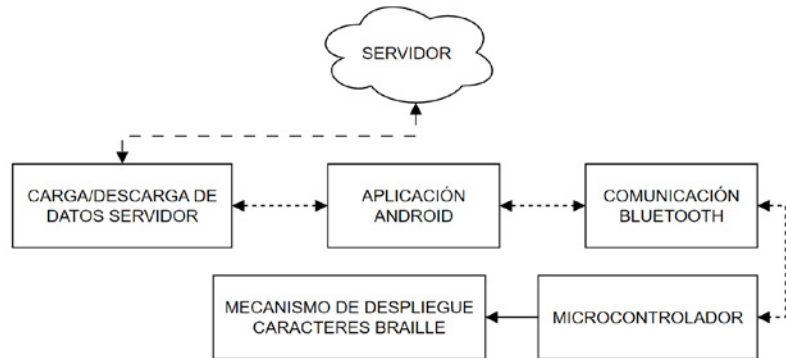
**Figura N° 1**

Diagrama de bloques del proyecto  
Fuente: Elaboración Propia, 2023.

### 2.2.1 SERVIDOR

Se realizó el diseño de un servidor base de datos que permite registrar y almacenar la información de la persona con discapacidad visual. Para consultar mediante una página web los datos almacenados se realizó un servidor web. Es necesario que el servidor base de datos y web permita una conexión con usuarios fuera de la red local, para ello se utilizó un servidor VPN.

### 2.2.2 APLICACIÓN ANDROID

La aplicación Android puede comunicarse con el servidor de datos para verificar que solamente personas cuyo usuario y contraseña sean correctas, tengan acceso a los recursos de la app. También permite una comunicación con el microcontrolador para el control del mecanismo de despliegue de caracteres braille.

### 2.2.3 MICROCONTROLADOR

El microcontrolador puede controlar los actuadores del mecanismo braille a solicitud de la aplicación Android.

### 2.2.4 MECANISMO DE DESPLIEGUE CARACTERES BRAILLE

El mecanismo de despliegue braille permite cualquier combinación posible del símbolo generador braille. Dicho mecanismo toma como base las dimensiones recomendadas para los caracteres.

## 2.3 DISEÑO DE BAJO NIVEL

### 2.3.1 SERVIDOR

#### 2.3.1.1 VPN: ZeroTier

Para realizar una conexión remota fuera de la red LAN (Local Area Network), fue necesario el uso de una red VPN (Virtual Private Network). Para este propósito se seleccionó la VPN ZeroTier debido a que no necesita apertura de puertos de red en comparación a otras alternativas como One VPN.

##### 2.3.1.1.1 Creación de red ZeroTier

Para la creación de la red VPN mediante ZeroTier, es necesario contar con una cuenta en su plataforma, se debe crear una cuenta y registrarla utilizando un correo electrónico en su página web <https://www.zerotier.com/>. Realizado el registro, se procedió a la creación de la red mediante el botón “Create A Network”.

##### 2.3.1.1.2 Instalación de ZeroTier en Raspberry Pi 4

Para la instalación de la VPN ZeroTier en la Raspberry, se selecciona la página de descarga de ZeroTier (<https://www.zerotier.com/download/>). Para la Raspberry es necesario buscar el apartado LINUX (DEB/RPM) y copiar la línea de código correspondiente a GPG. Una vez finalizado el proceso, se ingresa el comando “sudo systemctl enable zerotier-one” para habilitar la VPN. Se vuelve a la página de ZeroTier donde se tiene nuestra red y se copia el ID. Para unirse a la red VPN, se deberá ingresar el siguiente código con la ID de la red “Sudo zerotier-cli join ID RED VPN”. Se debe autorizar el acceso a la red mediante el centro de control de la red ZeroTier. Para verificar, con la conexión establecida mediante PuTTY se ingresa el siguiente código “sudo zerotier-cli listnetworks”.

##### 2.3.1.1.3 Instalación de ZeroTier en dispositivo Android

Se instaló la aplicación ZeroTier One en los dispositivos Android para que también puedan acceder a la red VPN. Una vez instalada la aplicación, se añadió y activó la red VPN del proyecto, se debe autorizar la conexión en el centro de control ZeroTier. Una vez concedido los permisos y activada la red VPN, se debe realizar una configuración adicional para permitir que la red VPN también funcione mediante el uso de datos móviles, para ello se debe hacer clic en “Use Cellular Data”. Para habilitar la comunicación entre dispositivos con conexión de datos móviles, se debe activar la opción “ZeroTier RFC4193(/128 for each device)” en la web ZeroTier.

##### 2.3.1.1.4 Instalación de ZeroTier en ordenador (PC o Laptop)

Para la instalación de la VPN ZeroTier en ordenador, se debe descargar e instalar la aplicación desde la página web de ZeroTier. Con la aplicación abierta, se debe copiar el “Network ID” de ZeroTier y pegarlo en la casilla ubicada a la izquierda del botón “Join Network” para después pulsar sobre este último. En el centro de control de ZeroTier (Web), se autoriza el acceso, se ingresa su correspondiente descripción y nombre.

### 2.3.1.2 Servidor Web

Se eligió APACHE2 como servidor web, para proceder con la instalación de APACHE2, se debe ingresar el comando “sudo apt install apache2” en la Raspberry Pi mediante PuTTY. Para finalizar se instaló el lenguaje PHP, para ello se debe ingresar el comando “sudo apt install php” en la Raspberry Pi

### 2.3.1.3 Servidor Base de Datos

Para instalar el servidor de datos se debe ingresar el comando “sudo apt install mariadb-server php-mysql”, la ejecución de este comando inicia la instalación del Sistema de gestión de base de datos MariaDB. Se debe reiniciar el servidor APACHE2 para que se reflejen los cambios realizados, para ello se ingresa el comando “sudo service apache2 restart”. Posteriormente “sudo mysql\_secure\_installation”, este comando permite mejorar la seguridad de la instalación de MariaDB y a su vez la posibilidad de establecer una contraseña para la cuenta raíz. phpMyAdmin es una herramienta gratuita, que permite acceder a todas las funciones de la base de datos mediante una interfaz web, se procede a instalar phpmyadmin mediante el comando “sudo apt install phpMyAdmin”. En la base de datos creada anteriormente, se debe crear una nueva tabla e indicar el número de columnas. Una vez creada la tabla “usuarios”, se procede a dar propiedades a las columnas.

## 2.3.2 APLICACIÓN ANDROID

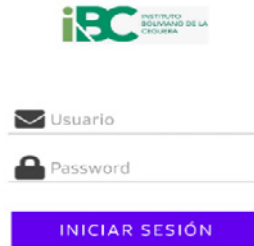
### 2.3.2.1 Creación de aplicación usando Android Studio

Se creó la aplicación utilizando un API 23 bajo el nombre de Dispositivo Braille. Se utilizó es el entorno de desarrollo integrado (IDE) oficial para el desarrollo de aplicaciones para Android (Google Developers, 2022). La primera Activity permite iniciar sesión y registrar la fecha y hora de ingreso. La segunda Activity permite seleccionar el dispositivo braille y elegir entre los 4 modos disponibles (secuencial letras, secuencial símbolos, práctica letras, práctica símbolos).

### 2.3.2.2 Primera Activity: Inicio de Sesión

La primera activity tiene como finalidad registrar en la base de datos el ingreso a la aplicación solamente para usuarios autorizados, en caso de intentar ingresar un usuario que no se encuentre en la base de datos “usuarios”, este no podrá ingresar a la aplicación y se emitirá una alerta mediante altavoz. Se debe emitir mediante parlantes indicaciones auditivas que indiquen el estado de autorización de ingreso. En caso de ingresar un usuario registrado en la base de datos “usuarios”, la aplicación inicia la segunda activity.

Proyecto Braille



**Figura N° 2**  
**Primera Activity**

Fuente: Elaboración Propia, 2022.

### **2.3.2.3 Segunda Activity: Conexión Bluetooth y Modos**

La segunda activity tiene como finalidad el establecer una comunicación entre el dispositivo móvil Android y el dispositivo braille utilizando la comunicación Bluetooth. Una vez establecida la comunicación, el código realizado permite la selección del modo a utilizar (Secuencial Abecedario, Secuencial Símbolos, Practica Abecedario, Practica Símbolos), también cuenta con un botón táctil para regresar al menú inicial de selección de modo. Para poder obtener los permisos y configuraciones necesarias para el objetivo de la activity es necesario modificar el archivo Android manifest.



**Figura N° 3**  
**Segunda Activity**

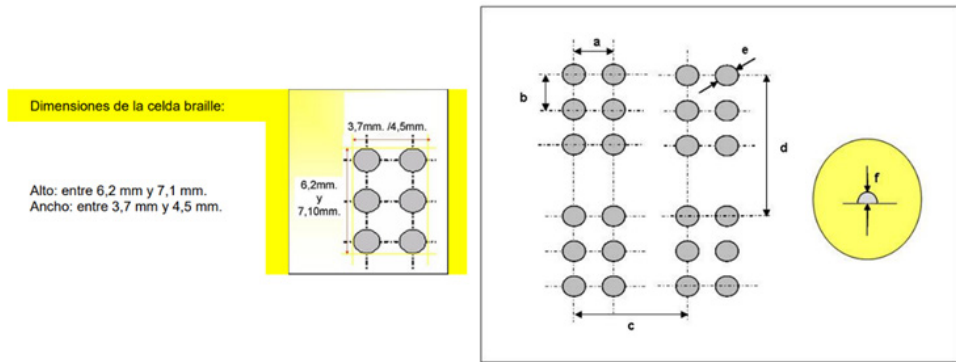
Fuente: Elaboración Propia, 2022.

### 2.3.3 MICROCONTROLADOR

El microcontrolador tiene como objetivo recibir datos del dispositivo móvil Android mediante comunicación Bluetooth, dependiendo el valor recibido se debe realizar una acción correspondiente utilizando los servomotores para emular los puntos altos y bajos de la celda braille. El código fue compilado bajo la plataforma Arduino IDE.

### 2.3.4 MECANISMO DE DESPLIEGUE CARACTERES BRAILLE

Para el diseño del mecanismo de despliegue braille se deberán tomar las dimensiones mencionadas en la Figura N° 4. La escala utilizada es de 3:1, esta escala está relacionada con las características de la impresora 3D (ancho de línea y altura de capa). Una menor escala implica mejores características de impresora 3D, mayor tiempo de impresión y mejor acabado.



**Figura N° 4**  
**Dimensiones caracteres braille**

Fuente: (Comisión Braille Española, 2014)

### 2.3.4.1 PIN BRAILLE

El pin braille tiene como objetivo principal el simular un carácter braille. Esta pieza tiene contacto directo con la persona con discapacidad visual.



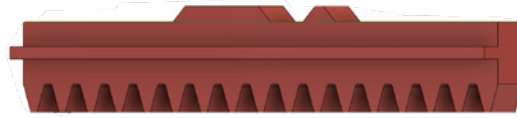
**Figura N° 5**  
**Diseño Pin braille Final**

Fuente: Elaboración Propia, 2022.

### 2.3.4.2 DESLIZANTE

#### 2.3.4.2.1 Deslizante izquierdo

El deslizante izquierdo permite modificar la altura de los 3 pines braille de la primera fila del carácter, esta pieza utiliza una cremallera para modificar su posición en relación con el movimiento giratorio del engranaje conducido.

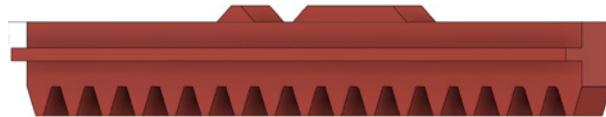


**Figura N° 6**  
**Diseño Deslizante Izquierdo Final**

Fuente: Elaboración Propia, 2022.

#### 2.3.4.2.2 Deslizante derecho

El deslizante izquierdo permite modificar la altura de los 3 pines braille de la segunda fila del caracter, esta pieza utiliza una cremallera para modificar su posición en relación con el movimiento giratorio del engranaje conducido.



**Diseño Deslizante Derecho Final**

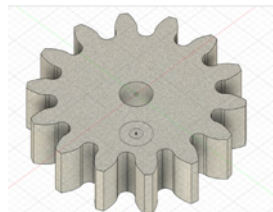
Fuente: Elaboración Propia, 2022.

#### 2.3.4.3 ENGRANAJES

Se usa la configuración tren de engranajes compuestos donde se tiene un engranaje conductor y engranaje conducido compuesto para aumentar el número final de vueltas que se puede obtener usando los grados del servomotor. Esta configuración se aplica para cada deslizante

##### 2.3.4.3.1 Engranaje conductor

El engranaje conductor se acopla al servomotor y permite realizar un movimiento giratorio en el engranaje conducido dependiendo los grados del servomotor.

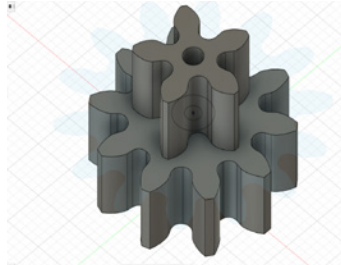


**Figura N° 8**  
**Diseño Engranaje Conductor**  
Fuente: Elaboración Propia, 2022.



### 2.3.4.3.2 Engranaje conducido

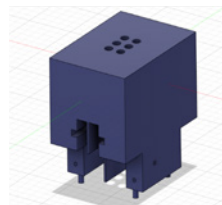
Se tiene un engranaje conducido compuesto que permite mantener el sentido de giro del engranaje conductor y aumentar el número de vueltas para transformar el movimiento giratorio a uno lineal utilizando al deslizante braille.



**Figura N° 9**  
**Diseño Engranaje Conducido**  
Fuente: Elaboración Propia, 2022.

### 2.3.4.4 CAJA DE CELDA BRAILLE

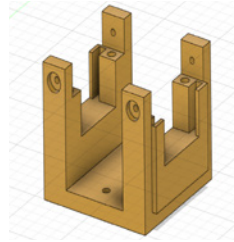
La celda braille permite tener los pines braille correctamente alineados y con las distancias entre si de acuerdo con los parámetros dimensionales del braille. Mediante los orificios laterales, permite añadir el eje para los engranajes y alinearlos con los deslizantes.



**Figura N° 10**  
**Diseño Caja de Celda braille Final**  
Fuente: Elaboración Propia, 2022.

### 2.3.4.5 PORTASERVO

El portaservo permite fijar el servomotor al dispositivo. Se diseñó esta pieza separada de la caja de celda braille de modo que permita utilizar esta última con otro actuador que no sea un servomotor sin la necesidad de rediseñar todo nuevamente.

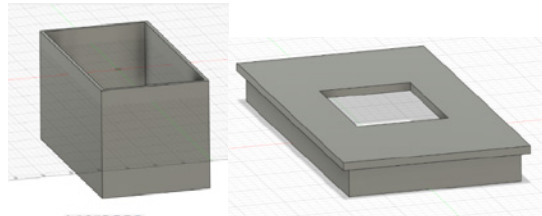


**Figura N° 11**  
**Diseño Portaservo Final**

Fuente: Elaboración Propia, 2022.

#### 2.3.4.6 CHASIS

El chasis del dispositivo permite tener en su interior: todas las piezas diseñadas, el microcontrolador, los servomotores y el conector de alimentación del dispositivo.

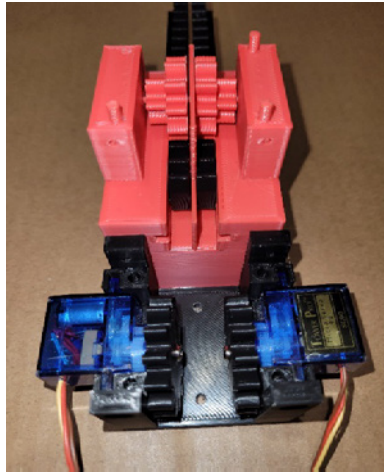


**Figura N° 12**  
**Diseño de Chasis Final**

Fuente: Elaboración Propia, 2022

### 3. RESULTADOS

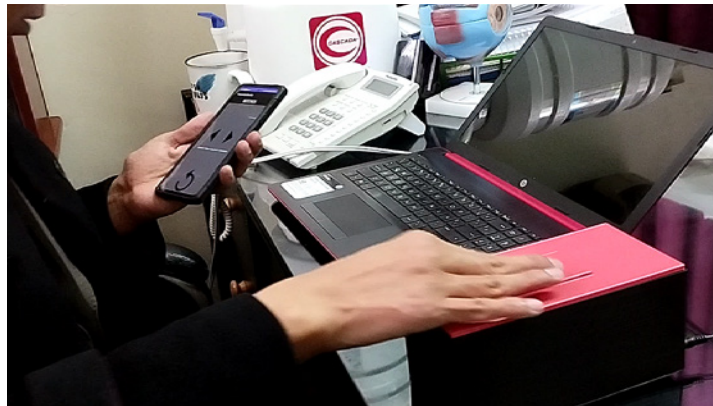
Sé logro diseñar un dispositivo electrónico que permita apoyar en el proceso inicial de aprendizaje de la lectura de los caracteres braille. Se tiene una página web donde se puede consultar los datos almacenados en la base de datos del Raspberry Pi 4. La aplicación Android controla al dispositivo braille utilizando la tecnología Bluetooth e interactúa con la persona con discapacidad visual a través del control táctil en la pantalla y mediante altavoz dando instrucciones. Las piezas fueron diseñadas utilizando el software Fusion 360 que nos permite garantizar la estética, la forma, el ajuste y la función. (Autodesk, 2021). En el repositorio <https://github.com/YamCC16/Project-Braille-Univalle> se tiene con mayor detalle los resultados del proyecto.



**Figura N° 13**  
**Dispositivo Braille Final**

Fuente: Elaboración Propia, 2022

Se realizaron pruebas con el director departamental La Paz del Instituto Boliviano de la Ceguera como se aprecia en la Figura N° 14. Posterior a las pruebas realizadas, se reciben las conclusiones y recomendaciones al proyecto por parte del Instituto Boliviano de la ceguera donde se resalta la utilidad del prototipo como se puede apreciar en la carta escaneada (Figura N°15).



**Figura N° 14**  
**Pruebas de uso del dispositivo con el Instituto Boliviano de la Ceguera**

Fuente: Elaboración Propia, 2023



**Figura N° 15**  
**Conclusiones y recomendaciones emitidas por el Instituto Boliviano de la Ceguera**

Fuente: Instituto Boliviano de la Ceguera, 2023

#### 4. CONCLUSIONES

Se logró diseñar un dispositivo electrónico IOT para el apoyo en el proceso del aprendizaje inicial de lectura de los caracteres del sistema de lectoescritura braille utilizando: servidores (web y base de datos) para el registro de actividad, una aplicación móvil Android que controle el dispositivo braille que recibe datos de acción a través de un microcontrolador mediante comunicación Bluetooth. Se realizó la evaluación de software y hardware para la elaboración del proyecto y se utilizaron tecnologías en base a estos criterios. Se diseñó el mecanismo de despliegue para los caracteres braille a una escala 3:1 en relación con las dimensiones recomendadas por el ONCE. Se desarrolló el software necesario que permita el uso de una aplicación móvil Android para el control del despliegue de los caracteres braille mediante comunicación inalámbrica Bluetooth entre el dispositivo móvil

y el dispositivo braille. En coordinación con el director del Instituto Boliviano de la Ceguera, se llegó a la conclusión de que cualquier dispositivo que tenga como finalidad el imitar caracteres braille debe presentar esencialmente: dimensiones relacionadas a normativas, permanencia de los distintos caracteres (deben ofrecer resistencia a la presión), superficie de contacto sin asperezas. El proyecto puede ser enfocado en infantes, el seguimiento de avance deberá ser realizado por el instructor en coordinación con el padre de familia, para ello es necesario que: el dispositivo cuente con bordes redondeados, la superficie de contacto debe ser suave y agradable, no deben existir ruidos que distraigan la atención del infante.

## **5. AGRADECIMIENTOS**

Agradecer a cada uno de mis docentes, que a lo largo de mi formación académica pudieron compartir sus conocimientos. Al director del Instituto Boliviano de la Ceguera por brindarme su apoyo y sabiduría.

## 6. REFERENCIAS

Alonso, A., Arangáiz, I., Blanco, J., Dolcet, A., Durán, M., Fernández, M., . . . Molina, A. (2015). Documento técnico B 11-1: La didáctica del braille más allá del código. Nuevas perspectivas en la alfabetización del alumnado con discapacidad visual. Obtenido de [www.once.es](http://www.once.es): <https://www.once.es/servicios-sociales/braille/documentos-tecnicos/documentos-tecnicos-relacionados-con-el-braille/documentos/b11-didactica-del-braille-v1.pdf>

Autodesk. (2021). ¿Qué es Fusión 360? Obtenido de [autodesk.com](http://autodesk.com): <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>

Braille Works. (13 de 01 de 2022). Why is Braille Literacy So Critical? Obtenido de [brailleworks.com](http://brailleworks.com): <https://brailleworks.com/braille-literacy-vital-academic-improvement-employment/>

Comisión Braille Española. (2014). Documento técnico B 1: Parámetros dimensionales del braille. Obtenido de Organización Nacional de Ciegos Españoles (ONCE): <https://www.once.es/servicios-sociales/braille/documentos-tecnicos/documentos-tecnicos-relacionados-con-el-braille/documentos/b1-parametros-dimensionales-del-braille-V1/download#:~:text=Dimensiones%20de%20la%20celda%20braille,4%20a%202%2C75%20mm.>

Google Developers. (2022). Introducción a Android Studio. Obtenido de [developer.android.com](http://developer.android.com): <https://developer.android.com/studio/intro>

INE. (2012). BOLIVIA: PERSONAS CON ALGUNA DIFICULTAD PERMANENTE Y TIPO DE DIFICULTAD, SEGÚN DEPARTAMENTO, PROVINCIA Y MUNICIPIO, CENSO 2012. Obtenido de [ine.gob.bo](http://ine.gob.bo): <https://nube.ine.gob.bo/index.php/s/YfosWo1Tj3MvhjT/download>

Martínez-Liévana, I., & Polo Chacón, D. (2004). Guía didáctica para la lectoescritura braille (Primera ed.). Madrid, España: IRC, S. L. Obtenido de [http://bibliorepo.umce.cl/libros\\_electronicos/diferencial/edtv\\_30.pdf](http://bibliorepo.umce.cl/libros_electronicos/diferencial/edtv_30.pdf)

Ministerio de Educación. (2013). Procesos educativos para el aprendizaje del Braille y enseñanza de las matemáticas utilizando el ábaco como principio lógico. Obtenido de [www.minedu.gob.bo](http://www.minedu.gob.bo): [https://www.minedu.gob.bo/files/publicaciones/veaye/dgee/jica8/APRENDIZAJE\\_DEL\\_BRAILLE-ABACO.pdf](https://www.minedu.gob.bo/files/publicaciones/veaye/dgee/jica8/APRENDIZAJE_DEL_BRAILLE-ABACO.pdf)

NACIONES UNIDAS. (2006). CONVENCIÓN SOBRE LOS DERECHOS DE LAS PERSONAS. Obtenido de [www.un.org](http://www.un.org): <https://www.un.org/esa/socdev/enable/documents/tccconvs.pdf>

Organización Mundial de la Salud. (2020). Informe mundial sobre la visión. Obtenido de [apps.who.int](http://apps.who.int): <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/331423/9789240000346-spa.pdf>

Raspberry Pi Foundation. (2021). Raspberry Pi 4. Obtenido de [raspberrypi.com](http://raspberrypi.com): <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>

Unión Mundial de Ciegos. (2021). Declaración de la UMC en el Día Mundial del Braille. Obtenido de [worldblindunion.org](http://worldblindunion.org): <https://worldblindunion.org/es/blog/news/wbu-statement-for-world-braille-day-4-january-2021/>

Artículo de revisión bibliográfica

# Análisis y cálculo de los caudales de evento extremo mediante tormentas estocásticas en la cuenca de Misicuni – Cochabamba, Bolivia

Analyses and calculation of the extreme event discharges with stochastic storms in the Misicuni basin – Cochabamba, Bolivia

Andrés Cardoso Velasco<sup>1</sup> y Claude Le Noir<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad del Valle, Tiquipaya, Bolivia, [andrescardoso35@gmail.com](mailto:andrescardoso35@gmail.com) <sup>2</sup> Universidad del Valle, Tiquipaya, Bolivia, [leclairclaude10@gmail.com](mailto:leclairclaude10@gmail.com)

## RESUMEN

El cálculo de los caudales máximos por medio de la generación estocástica de tormentas elípticas dentro de la cuenca Misicuni se realizó con los softwares especializados IT-LluviaNH y IT-Inundación del Banco Interamericano de Desarrollo desarrollado por la plataforma CAPRA, obteniendo las curvas PADF características y 300 escenarios de tormentas estocásticas evaluados en los modelos hidrológicos e hidrodinámicos resultando en hidrogramas a nivel de presa y de subcuencas para diferentes periodos de retorno. Se determinaron también caudales máximos por medio de metodologías convencionales relacionando las curvas IDF y tormentas de diseño.

La comparación gráfica y numérica de los hidrogramas a la salida de la cuenca permitió verificar la variación entre las metodologías aplicadas y el impacto en el aliviadero de la presa a través del tránsito de avenidas sobre el embalse. Los caudales máximos estocásticos resultaron inferiores a los determinados por las metodologías convencionales. Esto se debe a la no uniformidad de las intensidades de precipitación sobre el área de la cuenca. Sin embargo, contemplando la simultaneidad de escenarios de evento extremo independientes en cada subcuenca (aplicando porcentajes muy bajos a la probabilidad de excedencia) se tienen caudales máximos similares entre las metodologías. Asimismo, se calculó la proyección de los caudales con periodo de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años a periodos de retorno de 1000 y 10000 años para ambas metodologías. El impacto de los caudales estocásticos máximos laminados no representa un riesgo para el aliviadero de la presa al ser menores al caudal de diseño.

**Palabras clave:** PADF, estocástico, determinístico, hidrología, lluvia elíptica, presas

## ABSTRACT

The calculation of the maximum flows through the stochastic generation of elliptical storms within the Misicuni basin was realized with the specialized software IT-LluviaNH and IT-Inundación from the Inter-American Development Bank written by the platform CAPRA (Probabilistic Evaluation of Risks and

**Citar como:** LE NOIR, C., & Cardoso Velasco, A. Análisis y cálculo de los caudales de evento extremo mediante tormentas estocásticas en la cuenca de Misicuni – Cochabamba, Bolivia. *Journal Boliviano De Ciencias*, 19(54). 78-114 <https://doi.org/10.52428/20758944.v19i54.939>

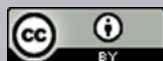
**Revisado:** 30/08/2023

**Aceptado:** 01/12/2023

**Publicado:** 20/12/23

**Declaración:** Derechos de autor 2023 Y Claude Le Noir, Andrés Cardoso Velasco, Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento.



Vulnerability) from the Andean University of Colombia, obtaining the characteristic PADF curves and 300 stochastic storm scenarios on the basin evaluated in the hydrological and hydrodynamic models resulting in hydrographs at the level of dam and sub-basins for different return periods. Maximum flows also were determined by conventional methodologies relating the IDF curves and design storms.

The graphic and numerical comparison of the hydrographs at the exit of the basin allowed to verify the variation between the methodologies applied and the impact on the spillway of the dam through the transit of floods on the reservoir. The maximum stochastic flow rates were lower than those determined by conventional methodologies. This is due to the non-uniformity of precipitation intensities over the basin area. However, considering the simultaneity of independent extreme event scenarios in each sub-basin (applying very low percentages to the probability of exceedance) the maximum flows between the methodologies are similar. In addition, projection of the flows with return period of 2, 5, 10, 20, 50 and 100 years to return periods of 1000 and 10000 years for both methodologies was calculated. The laminated maximum stochastic flows do not represent a risk for the spillway of the dam as they are lower than the design flows.

**keywords :** *PADF, stochastic, deterministic, hydrology, elliptical rain.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Los estudios hidrológicos de eventos extremos representan gran importancia para el diseño, operación y control de embalses (Aldana Flores et al., 2022). Estos estudios pueden resultar simple para cuencas pequeñas, ya que la modelación “convencional-agregado-determinístico”, posibilita analizar un comportamiento hidrológico homogéneo. Por el contrario, el análisis para cuencas de mayor área resulta más complejo (Shaman et al., 2004; Campos Aranda, 1992), debido a que las precipitaciones ocurren por sectores, de este modo, el comportamiento hidrológico resulta variable. Por lo que, para cuencas grandes se recomienda desarrollar estudios de carácter “semi distribuido o distribuido” y “determinístico o estocástico”.

No obstante, es prudente mencionar que toda cuenca presenta un comportamiento heterogéneo a consecuencia del relieve, la capacidad de drenaje, perfil altitudinal, orientación, climas, tipos de suelos, uso de suelo, entre otras. Por lo que diferenciarlas representa cierta dificultad. Ante ello, Chow (1994), distingue a una cuenca pequeña por la sensibilidad a las lluvias de alta intensidad y de corta duración, en la cual predominan las características físicas del suelo respecto a las del cauce y su tamaño puede variar de 4 hasta 130 km<sup>2</sup>. Por su parte, Campos Aranda (1992), por medio de la clasificación de I-Pai Wu y R. Springall, indica que una cuenca pequeña tiene una superficie de 25 a 250 km<sup>2</sup>. Mientras que, Sandoval Erazo y E. P. Aguilera Ortiz (2014), determinan un área máxima de 45 km<sup>2</sup> para una cuenca homogénea pequeña en terreno montañoso. No obstante, para un relieve plano en área tropical, el World Meteorological Organization (WMO) (1987) indica que una cuenca homogénea pequeña puede tener un área de hasta 600 km<sup>2</sup>.

En Bolivia, tres cuencas grandes ya fueron estudiados de forma positiva con la metodología BID-CAPRA. Río Grande (102.062 km<sup>2</sup>) (ITEC 2015), Río Rocha (3655 km<sup>2</sup>) (ITEC 2015) y Río Icona (2189 km<sup>2</sup>) (COCA 2021). Ahora la metodología BID-CAPRA será aplicado a la Cuenca del río Misicuni correspondiente al



Proyecto Múltiple Misicuni (PMM), de la ciudad de Cochabamba-Bolivia, (344 km<sup>2</sup>) y comparado los resultados con los resultados de un cálculo conforme el concepto de una cuenca pequeña.

Este estudio justifica su importancia debido a la magnitud de la demanda hídrica (agua potable y de riego) y energética existente en los municipios del valle central de Cochabamba (Lopez, 2015). Por lo que, compete analizar los estudios convencionales desarrollados para el diseño del PMM. En este sentido, la presente investigación tiene por objetivo calcular los hidrogramas de evento extremo de la cuenca Misicuni mediante la generación de tormentas estocásticas elípticas, comparar con resultados de estudios convencionales, y en caso de grandes diferencias, elaborar alternativas a las políticas de operación del embalse en ocurrencia de crecidas con niveles altos en el embalse.

## 1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Procesar y rellenar las series de precipitación diaria de las estaciones dentro de la cuenca Misicuni en el periodo 1967-2020.
- Determinar y procesar curvas PADF y escenarios estocásticos de tormenta para diferentes periodos de retorno por medio del software IT-LluviaNH del BID en base a series de precipitación diaria de las estaciones de la cuenca.
- Establecer un modelo hidrológico de la cuenca Misicuni mediante HEC-HMS.
- Procesar y generar hidrogramas de evento extremo por medio del software IT-Inundación del BID y HEC-HMS.
- Comparar gráfica y numéricamente, hidrogramas y caudales máximos de los eventos extremos en la cuenca determinados con lluvias estocásticas, con los eventos extremos determinados con tormentas de diseño (método convencional).
- Verificar la consecuencia de los caudales determinados en el nivel de seguridad de las actuales políticas de manejo del embalse Misicuni.

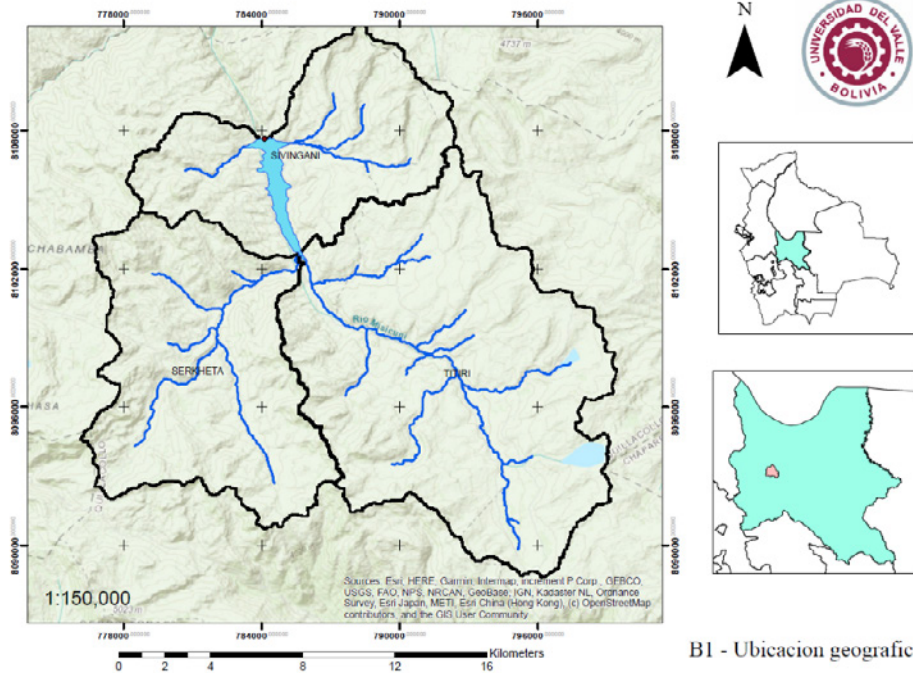
## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DEL ESTUDIO

La presa del embalse Misicuni se sitúa al noreste de la ciudad de Cochabamba (Figura 1) en las coordenadas 17°5'29.98" Sur y 66°19'48. 65" Oeste, la altura de la represa es de 120 m. El nivel de rebalse del vertedero, que proteja la represa vertedero, está en 3774 m s.n.m. El volumen del embalse creado en esta cota es de 180 millones de m<sup>3</sup>.

La cuenca resulta en la composición de 3 subcuencas (Figura 2). Cuyas características se presentan en la Tabla 1, Tabla 2 y Tabla 3. Su totalidad representa un área de 344.36 km<sup>2</sup>, un perímetro de 130.26 km, una pendiente media de 23.5%, una altura media de 4300 m s.n.m. (nivel más alto=5014 m s.n.m. – nivel más bajo=3692 m

s.n.m.) y, un tiempo de concentración de 4 horas. El área es característico de la zona andina, por lo que se destaca las altas cumbres cordilleranas, registro de bajas temperaturas (entre el día y la noche), nevadas en ciertas épocas del año, vientos y poca cobertura vegetal.



B1 - Ubicación geográfica

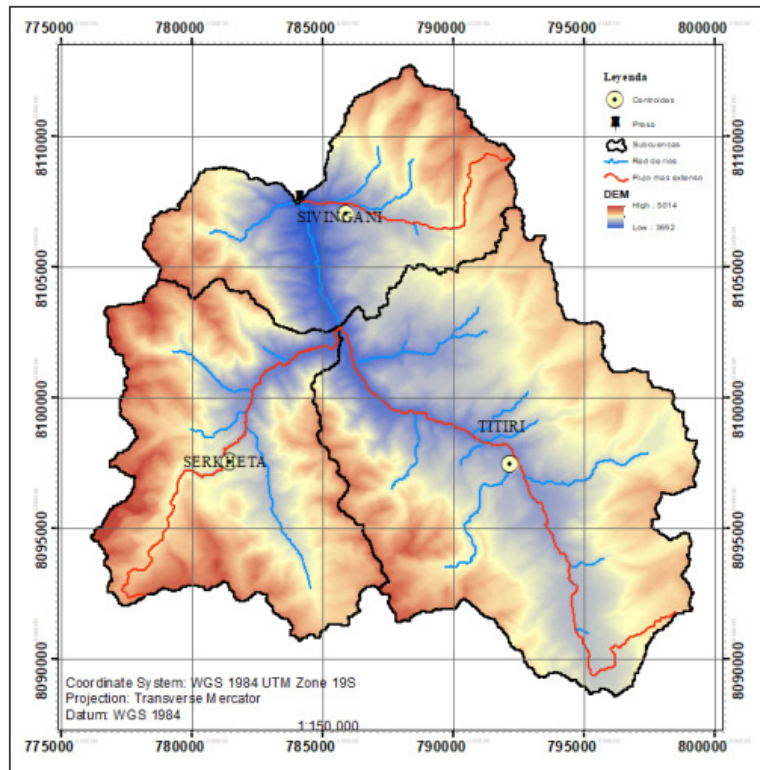
**Figura 1:** Ubicación geográfica – Cuenca Misisuni

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 1:** Superficies y perímetros por subcuencas

<b><u>Subcuenca</u></b>	<b><u>Área</u></b> <i>Km<sup>2</sup></i>	<b><u>Perímetro</u></b> <i>Km</i>
<i>Sivingani</i>	77.29	61.02
<i>Titiri</i>	167.44	86.70
<i>Serkheta</i>	99.63	69.54

Fuente: Elaboración propia



**Figura 2:** Subcuencas  
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2:** Clasificación del relieve del terreno por subcuenca

<b>Subcuenca</b>	<b>Clasificación del terreno</b>	
	<i>P (%)</i>	<i>Relieve</i>
<i>Sivingani</i>	32.57	Fuertemente accidentado
<i>Titiri</i>	24.55	Fuertemente accidentado
<i>Serkheta</i>	37.85	Muy fuertemente accidentado

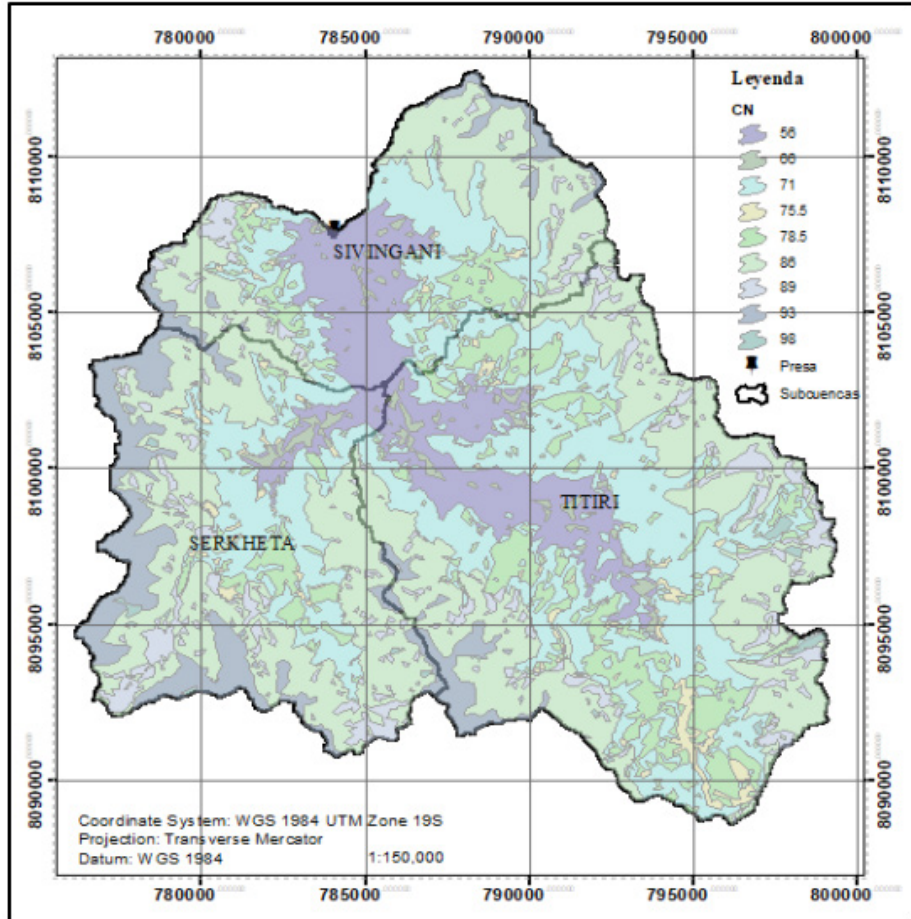
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3:** Tiempo de concentración por subcuenca

<b>Subcuenca</b>	<b>Promedio</b>	
	<i>Horas</i>	<i>Minutos</i>
<i>Sivingani</i>	1.91	114.80
<i>Titiri</i>	3.96	237.68
<i>Serkheta</i>	2.76	165.34

Fuente: Elaboración propia

Con respecto al modelo de infiltración se aplicó el modelo del Número de la Curva (CN) que fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de Estados Unidos [19], para la estimación del escurrimiento en estudios de determinación de caudales máximos sobre los mapas [14 y 15] y, mediante algebra de mapas en la plataforma SIG ArcGis 10.5, se elaboró el mapa  $CN_{II}$  de la Cuenca de Misticuni (Figura 3).



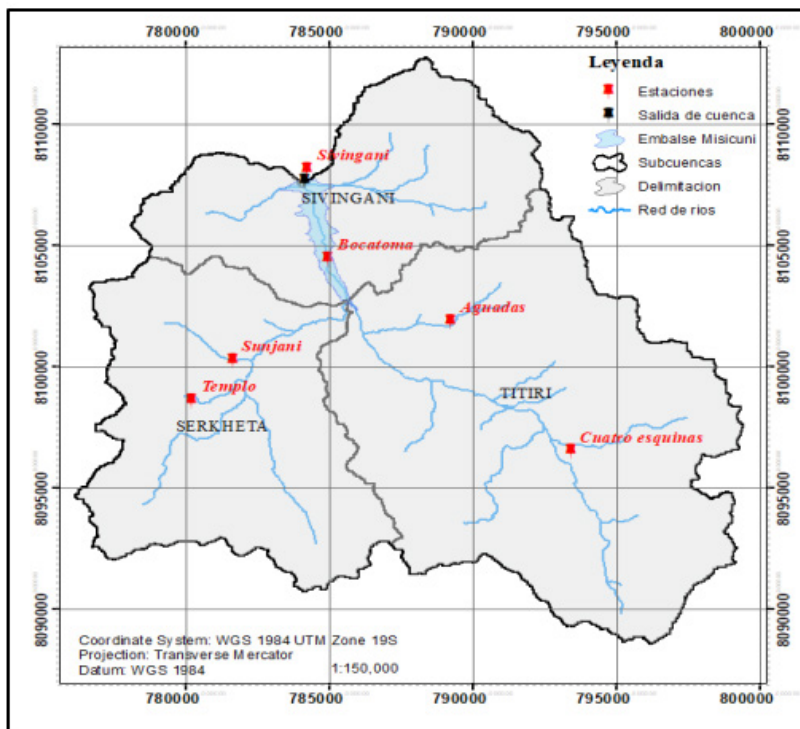
**Figura 3:** Mapa  $CN_{II}$  de la Cuenca Misticuni

Fuente: Elaboración propia

Se obtuvo el CN representativo para la totalidad de la cuenca Misticuni resultando en un  $CN_{III}$  igual a 78.20. De igual manera se determinó los números  $CN_{III}$  para las 3 principales subcuencas como son Titiri, Serkheta y Sivingani. Obteniendo valores similares para las subcuencas Sivingani y Titiri con valores de 76.51 y 76.10, para la subcuenca Serkheta se obtuvo un CN mayor resultando en 82.65.

## 2.2. PRECIPITACIONES EN EL ÁREA DE ESTUDIO

La ubicación de las estaciones del Proyecto Misicuni se presentan en la Figura 4, y su información general en la Tabla 4. La base de datos original con los registros de precipitaciones diarias de las estaciones fue proporcionada por parte de la empresa Misicuni. Los datos fueron procesados en planillas Excel para una oportuna identificación de la disponibilidad de datos. La fecha inicial de operación de las primeras estaciones de Misicuni es desde julio de 1967. Según el procesamiento de las series originales de datos, el registro de cada serie es discontinuo (Tabla 5).



**Figura 4:** Ubicación de las estaciones pluviométricas  
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4:** Información general de las estaciones

<u>Estación</u>	<u>Coordenadas UTM</u>		<u>Elevación</u>	<u>Tipo de datos</u>	<u>Periodo de registro</u>
	<i>Este</i>	<i>Sud</i>			
<b>Aguadas</b>	789243.69	8101867.21	3956	Precipitación	2006-2020
<b>Bocatoma</b>	784963.96	8104443.15	3756	Precipitación	2000-2016
<b>C-Esquinas</b>	793422.77	8096505.21	3986	Precipitación	1967-2020
<b>Sivingani</b>	784252.28	8108130.99	3780	Precipitación	1967-2021
<b>Sunjani</b>	781616.68	8100242.29	3964	Precipitación	1967-2022
<b>Templo</b>	780229.67	8098596.78	4278	Precipitación	1967-2023

Fuente: Elaboración propia



Para el análisis de la homogeneidad de las series rellenadas con periodos considerables con falta de datos, se aplicaron dos metodologías: análisis de las curvas doble masa a nivel de precipitaciones mensuales y un análisis de Outliers a nivel de precipitaciones máximas diarias anuales en las series rellenadas. Para el análisis de curvas doble masa, se tomó como base la estación Sivingani, por contar con el mayor periodo de registros respecto a las demás estaciones. Esta estación se relaciona con las cuatro otras estaciones obteniendo un comportamiento gráfico casi perfectamente lineal con coeficientes de determinación  $R^2$  que varían de 0.9973 a 0.999, indicando que para precipitaciones mensuales entre las estaciones existe consistencia.

De igual manera, se realizó el análisis de datos dudosos a nivel de las precipitaciones máximas diarias en el cual no se identificó ningún valor atípico sobre lo permitido.

### 2.3. ESTUDIO ESTOCÁSTICO

#### 2.3.1. IT-LluviaNH

##### 2.3.1.1. Generación de curvas PADF

Se realizó la construcción de las curvas PADF (Precipitación – Área – Duración – Frecuencia) por medio de la precipitación promedio de un área determinada para una duración y frecuencia de la tormenta. Esta fue determinada por curvas IDF de las estaciones de la cuenca, con ayuda de la duración y la frecuencia de ocurrencia (ERN, 2016).

Se aplicó el programa IT-LluviaNH (ITEC, 2018) bajo los parámetros de las estaciones y de la cuenca:

- El contorno de la cuenca en formato shape (\*.SHP) generado con la herramienta HEC-GeoHMS.
- Planilla Excel en formato 2003 que contenga la información específica de las estaciones y los registros por año en una hoja diferente como se puede observar el formato específico en Tabla 6 y Tabla 7.

**Tabla 6:** Planilla Excel – Información específica de las estaciones

CODIGO	LONGITUD	LATITUD	STATION NAME	COUNTRY	ELEVACION
1	-66.28133	-17.1500	Aguadas	BOLIVIA	3956
3	-66.24138	-17.1975	Cuatro esquinas	BOLIVIA	3986
4	-66.32901	-17.0094	Sivingani	BOLIVIA	3780
5	-66.35250	-17.1653	Sunjani	BOLIVIA	3964
6	-66.36555	-17.1803	Templo	BOLIVIA	4278

Fuente: Elaboración propia

Según las recomendaciones, para realizar un estudio hidrológico como tal, los registros históricos deben abarcar mínimamente 30 años de registro al igual de ser series analizadas y procesadas (ERN, 2016). Se tomó en cuenta para la generación de las curvas PADF las series de precipitación diaria de 53 años de longitud de 1968 a 2020 de las estaciones pluviométricas operadas por la Empresa Misticuni Aguadas, Cuatro Esquinas, Sivingani, Sunjani y Templo, previamente analizadas y subsanadas.

**Tabla 7:** Planilla Excel – Precipitación diaria (mm/día) por estación año 1968

<b>FECHA</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
1/1/1968	0.8	0.3	0.5	0.2	2.0
1/2/1968	0.0	0.0	5.1	20.3	4.0
1/3/1968	0.0	0.0	22.6	20.1	15.0
1/4/1968	0.0	0.0	13.5	19.1	20.0
1/5/1968	11.4	4.2	0.3	0.0	1.2
1/6/1968	1.6	0.6	0.3	0.0	4.0
1/7/1968	0.5	0.2	0.3	0.0	6.0
1/8/1968	0.8	0.3	0.0	1.5	7.0
1/9/1968	14.7	5.4	0.5	6.2	1.0
1/10/1968	6.0	2.2	0.8	3.1	5.0
1/11/1968	0.8	0.3	0.8	8.0	2.0
1/12/1968	2.2	0.8	0.5	0.0	9.0
1/13/1968	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0
1/14/1968	0.0	0.0	0.5	0.0	9.0
1/15/1968	0.0	0.0	1.0	0.0	3.0
...	...	...	...	...	...
12/31/1968	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Fuente: Elaboración propia

### 2.3.1.2. Parámetros y límites inferiores

Los parámetros para la identificación de eventos por parte del programa IT-LluviaNH evaluando los registros históricos son determinados mediante análisis estadístico de simultaneidad de los registros de precipitaciones entre las estaciones. Los límites inferiores son necesarios para identificar los eventos extremos.

El límite inferior promedio se determinó a partir de la precipitación promedio diaria por cada año de registro, posteriormente se toma la precipitación promedio máxima por estación y finalmente el promedio de las estaciones resultando un valor de 4.0 mm de precipitación diaria promedio. Para el límite inferior de las precipitaciones máximas se consideran las precipitaciones máximas registradas originales previo al relleno, se identifica la precipitación máxima promedio por estación y finalmente el mínimo de las estaciones resultando en una precipitación máxima (límite inferior) de 25.0 mm.

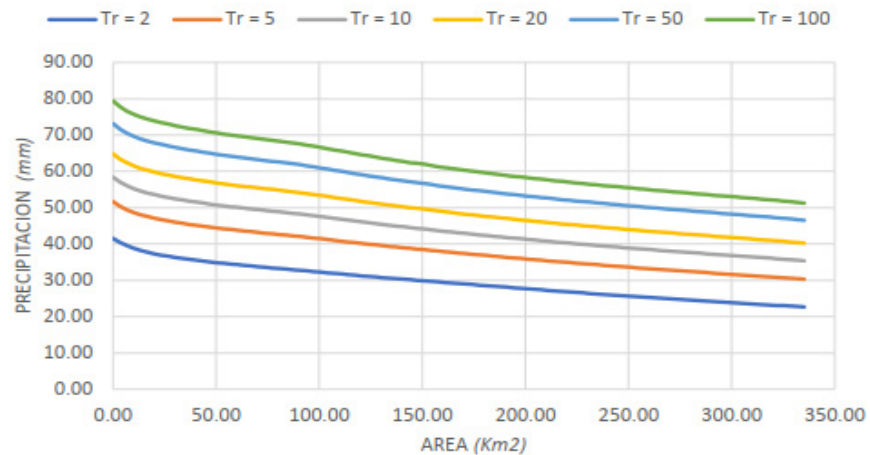


### 2.3.1.3. Periodo de retorno

Posteriormente en IT-LluviaNH se eligió los periodos de retorno 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años para la generación de las curvas PADF y los escenarios de tormentas estocásticas.

### 2.3.1.4. Generación de las curvas PADF

Con toda la información precedente la plataforma IT-LluviaNH mediante análisis de mapas de históricas de isoyetas, procedimientos estadísticos y álgebra de mapas procesa los eventos para los periodos de retorno seleccionados, genera una grilla de generación de tormentas y las curvas PADF para cada periodo de retorno Figura 6.



**Figura 6:** Curvas PADF – Cuenca Misicuni

Fuente: Elaboración propia

### 2.3.1.5. Generación de escenarios estocásticos de tormentas elípticas

Posteriormente a la determinación de las curvas PADF, IT-LluviaNH con los archivos generados de curvas y la grilla con la distribución espacial de las tormentas estocásticas, ejecuta el proceso de acuerdo a los parámetros definidos por el usuario.

El número de tormentas por periodo de retorno son de 50 escenarios determinados en 100 simulaciones por cada escenario, la resolución fue determinada en base a un reconocimiento de proporcionalidad al área de la cuenca resultando en un tamaño de celda de 500 x 500 metros. Mediante dicho proceso se obtuvo un total de 300 escenarios, en la Figura 7 se tiene la captura de diferentes escenarios durante proceso del software IT-LluviaNH en las cuales se observa el desarrollo de las tormentas elípticas. Los centros aleatorios de las tormentas elípticas se eligen dentro de los polígonos de eventos de precipitación máxima determinados dentro del análisis para las curvas PADF.

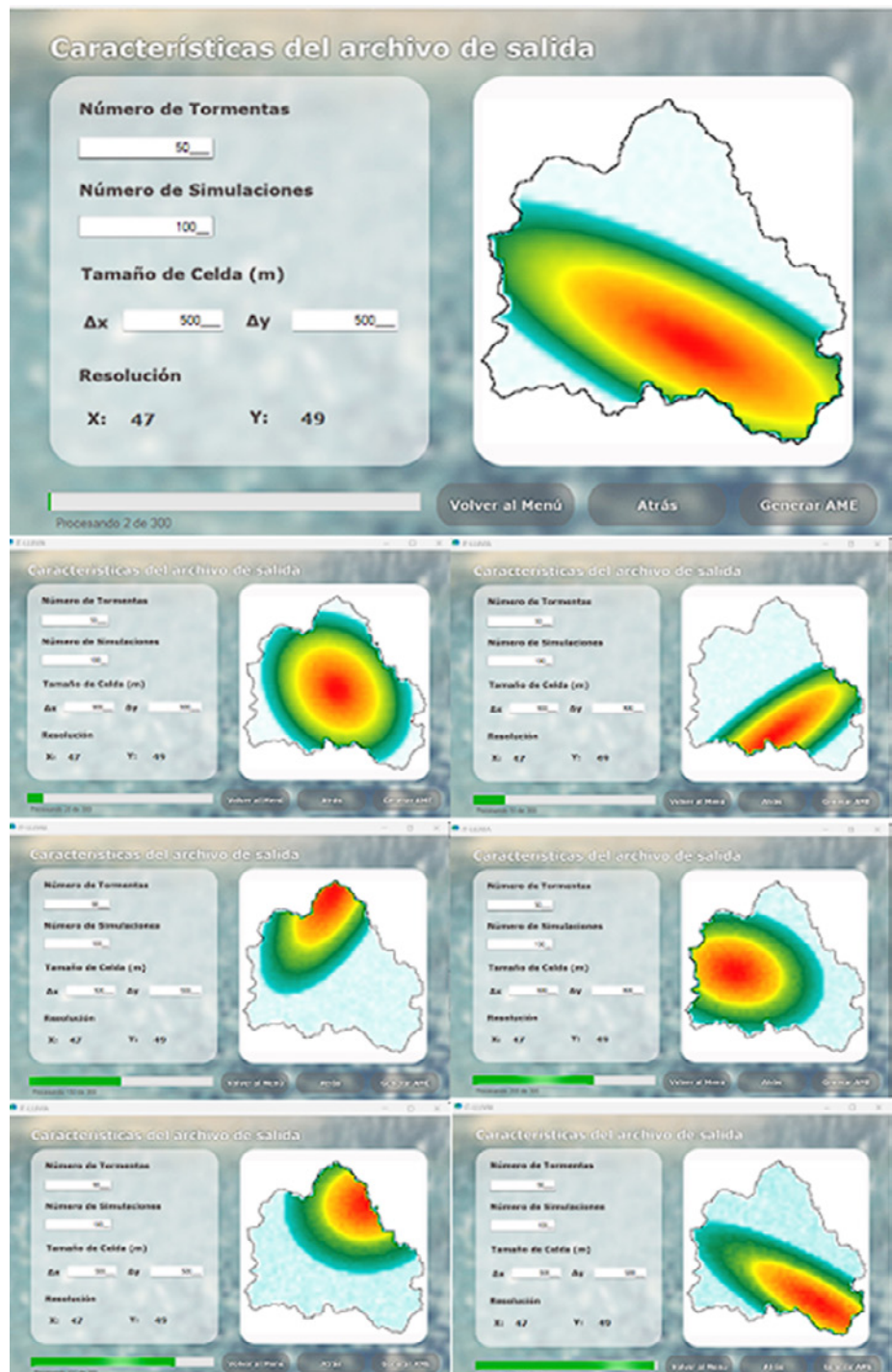
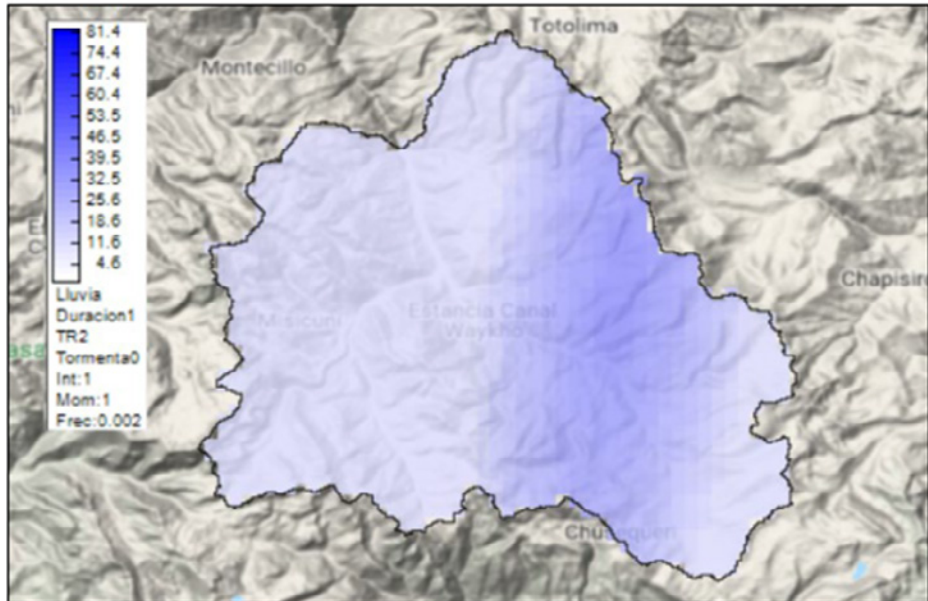


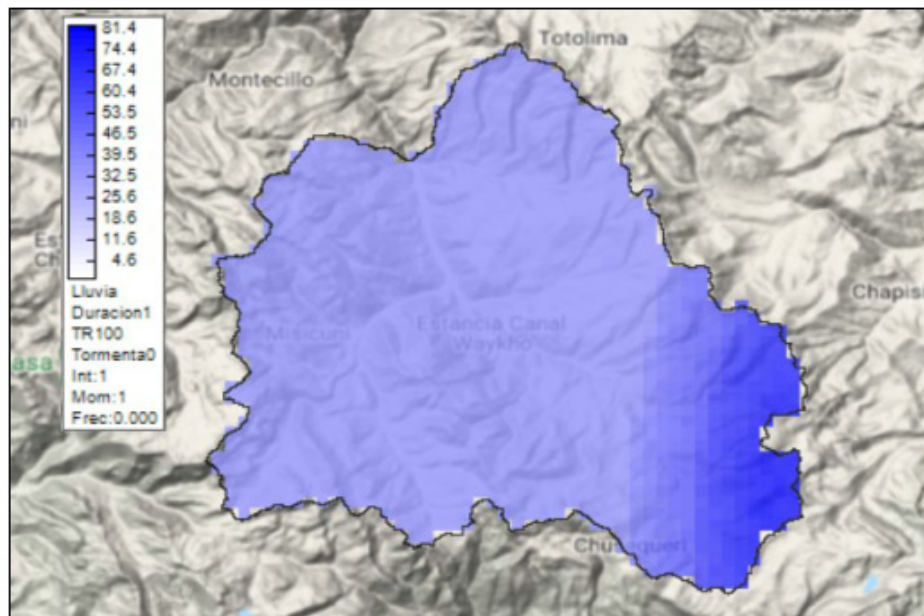
Figura 7: IT-LluviaNH – Procesamiento de escenarios.

Fuente: Elaboración propia



**Figura 8:** CAPRAGIS – Escenario # 1 para un periodo de retorno de 2 años

Fuente: Elaboración propia



**Figura 9:** CAPRAGIS – Escenario # 1 para un periodo de retorno de 100 años

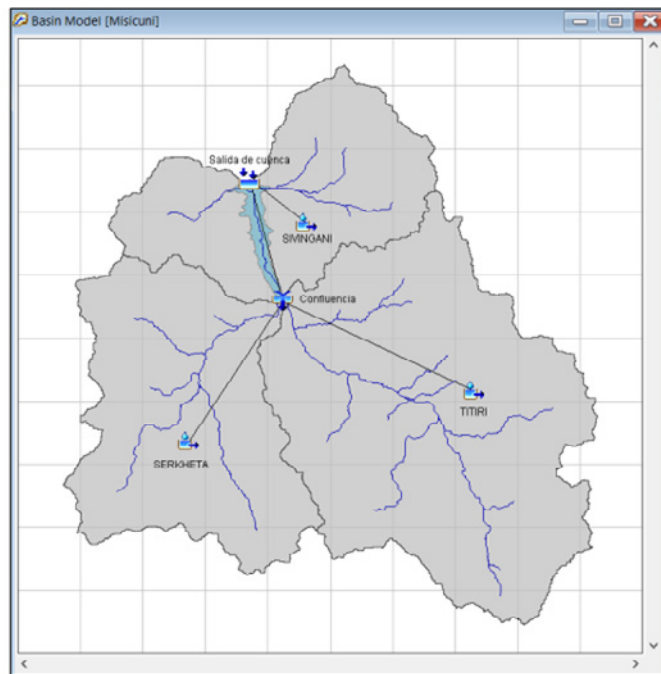
Fuente: Elaboración propia

Finalizando el procesamiento, el software IT-LluviaNH genera el archivo de amenazas con formato de salida (.AME). Este contiene la totalidad de escenarios en un mismo archivo. La visualización e interpretación es posible con el SIG desarrollado por CAPRA representado en la Figura 8 y Figura 9.

### 2.3.2. IT-Inundación

#### 2.3.2.1. Modelo Hidrológico – HEC-HMS

La implementación del modelo hidrológico de la cuenca Misticuni, se realizó con el programa HEC-GeoHMS y ArcGis, posteriormente exportar el modelo a HEC-HMS en la versión 4.0 como lo requiere para el procesamiento en IT-Inundación, en el cual se consideró el aporte de las 3 subcuencas principales, cuyo comportamiento será simulado para cada escenario. En la Figura 10 se presenta el esquema de la simulación.

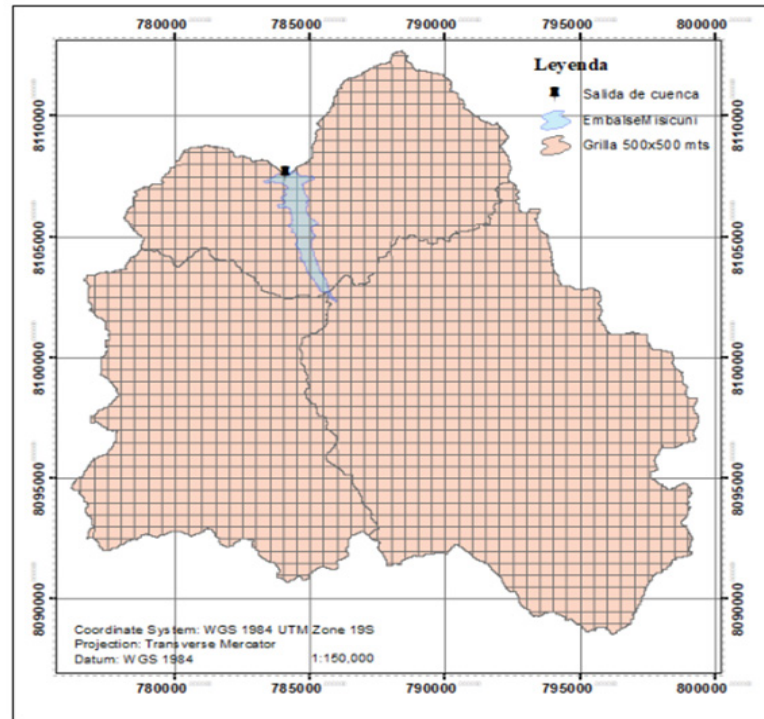


**Figura 10:** Esquema del modelo hidrológico en HEC-HMS-VER 4.0

Fuente: Elaboración propia 2023

Los parámetros hidrológicos son *exactamente los mismos en tanto a las metodologías de pérdidas por infiltración en el suelo y transformación de lluvia a caudal tomadas en cuenta en la metodología convencional descritas en la sección - 2.4, la precipitación es representada en grilla de resolución de 500x500 metros conjuntamente al archivo '.MOD' (Figura 11), determinada por HEC-GeoHMS y especificado en el modelo hidrológico HEC-HMS.*

La simulación es dada por la especificación de control en una fecha aleatoria con una duración de 24 horas, para la aplicación de cada escenario se especifica el archivo \*.DSS (siendo el sistema de almacenamiento de información de HEC-HMS y HEC-RAS) el cual contiene la información del evento respectivo.



**Figura 11:** Grilla generada para las precipitaciones para el modelo hidrológico

Fuente: Elaboración propia 2023

### 2.3.2.2. Modelo Hidrodinámico – HEC-RAS

Un modelo hidrodinámico de flujo no permanente unidimensional es necesario para el correcto procesamiento del software IT-Inundación sucesivamente después de la modelación hidrológica. Sin embargo, en el presente estudio al recaer la importancia en la generación de los eventos extremos de la cuenca Mísicuni por la metodología estocástica y su comparación con estudios convencionales, se utilizó un modelo básico en la salida de la Cuenca simulando un canal georreferenciado en el datum WGS-84 zona 19 sur.

### 2.3.2.3. Procesamiento en IT-Inundación

Se desarrolló el procesamiento del programa IT- Inundación, introduciendo los archivos con los parámetros generales correspondiente al mapa de referencia, el modelo hidrodinámico y el archivo con extensión AME con los escenarios de

precipitación. Posteriormente, se especifica la georreferenciación del proyecto en el Datum WGS-84 y zona 19 sur y la resolución final del archivo de salida en 500x500 metros.

A continuación se selecciona el modelo hidrológico para el procesamiento, especificando la corrida de la simulación, los puntos de entrada de caudal pudiendo resultar en 1 solo punto o más, el factor de tiempo estándar tomando en cuenta la variación de la tormenta dentro de las 24 horas afectado al valor recomendado por el software de 1.5, duración del evento de 1 día y la distribución temporal de tormentas en base a hietogramas de tormentas de diseño y su proporcionalidad en porcentaje de acuerdo a la duración de la tormenta.

Finalmente, el software IT-Inundación calcula para la totalidad de escenarios por periodos de retorno en el punto de interés correspondiente a la salida de la cuenca Misicuni los hidrogramas. De igual manera, se realizó el análisis a nivel de subcuenca para los diferentes periodos de retorno permitiendo la comparación individual.

#### **2.3.2.4. Hidrogramas estocásticos**

Posterior al proceso y análisis individual de los archivos \*.DSS con la información de los eventos de las tormentas elípticas generadas y evaluadas en el modelo hidrológico HEC- HMS, se tiene hidrogramas a nivel del sitio de la presa y a nivel de subcuencas para los diferentes periodos de retorno (50 escenarios por periodo de retorno), ver inciso 3.2.

### **2.4. ESTUDIO CONVENCIONAL**

#### **2.4.1. Distribuciones teóricas**

Se determinó la función de distribución que mejor se ajusta a las precipitaciones máximas diarias anuales de cada estación. En el punto 3.2 se tiene las precipitaciones máximas diarias anuales subsanadas.

Con la plataforma HIDROESTA 2 se han probado varias funciones de distribución. Por cada estación se ha retenido la distribución que mejor se ajusta conforme la prueba de bondad de ajuste según el criterio de Smirmov Kolomogrov (Tabla 8). Las precipitaciones máximas diarias conforme periodos de retorno según la mejor función de distribución se presentan en la Tabla 9. El criterio de Smirmov-Kolomogrov verifica solamente la máxima diferencia entre la probable función de distribución y la distribución de probabilidades empíricas, es decir, solamente en un punto. Viendo que se trata de series de 53 datos, se ha optado para realizar un control visual entre la (mejor) función teórica de distribución y la distribución empírica de los 53 años de datos. Se vio por conveniente ajustarse a la distribución de las probabilidades empíricas para determinar las precipitaciones máximas para cada periodo de retorno. En la Tabla 10 se presentan los ajustes optados para la determinación de las precipitaciones máximas por periodo de retorno y, el criterio visual para el mejor ajuste de distribuciones.

**Tabla 8:** Prueba de bondad de ajuste – Criterio Smirmov Kolomogrov

Estación	Mejor ajuste	$\Delta$ Máximo	$\Delta$ Tabular
Aguadas	<i>Log Pearson III</i>	0.0288	0.1851
C-Esquinas	<i>Gamma II</i>	0.0692	0.1851
Sivingani	<i>Gumbel</i>	0.0475	0.1851
Sunjani	<i>Log Normal II</i>	0.0844	0.1851
Templo	<i>Gamma III</i>	0.0817	0.1851

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 9:** Precipitaciones máximas diarias por periodo de retorno – Ajuste teórico

<u>Periodo de retorno</u>	<u>Estación</u>				
	<i>Aguadas</i>	<i>C-Esquinas</i>	<i>Sivingani</i>	<i>Sunjani</i>	<i>Templo</i>
<i>años</i>	<i>mm/día</i>				
<b>2</b>	29.73	33.88	32.51	30.46	26.93
<b>5</b>	38.52	46.26	41.47	41.47	36.95
<b>10</b>	44.45	53.77	47.41	48.73	43.81
<b>20</b>	50.24	60.53	53.10	55.68	50.37
<b>50</b>	57.91	68.75	60.48	64.69	58.75
<b>100</b>	63.83	74.59	66.00	71.49	64.93
<b>Distribución</b>	<i>Log Pearson III</i>	<i>Gamma II</i>	<i>Gumbel</i>	<i>Log Normal II</i>	<i>Gamma III</i>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 10:** Precipitaciones máximas diarias por periodo de retorno – Ajuste visual

<u>Periodo de retorno</u>	<u>Estación</u>				
	<i>Aguadas</i>	<i>C-Esquinas</i>	<i>Sivingani</i>	<i>Sunjani</i>	<i>Templo</i>
<i>Años</i>	<i>mm/día</i>				
<b>2</b>	28.70	33.03	32.51	30.46	26.36
<b>5</b>	37.32	46.56	41.47	41.47	35.23
<b>10</b>	44.42	55.72	47.41	48.73	42.70
<b>20</b>	52.49	64.63	53.10	55.68	51.35
<b>50</b>	65.15	76.37	60.48	64.69	65.18
<b>100</b>	76.61	85.35	66.00	71.49	77.95
<b>Distribución</b>	<i>Log Gumbel</i>	<i>Log Normal II</i>	<i>Gumbel</i>	<i>Log Normal II</i>	<i>Log Gumbel</i>

Fuente: Elaboración propia

## 2.4.2. Tormentas de diseño

### 2.4.2.1. Distribución de la precipitación media por subcuencas

Se aplicó la distribución de las precipitaciones para cada estación y, la metodología Thiessen según los factores de ponderación y su afectación dentro de cada subcuenca.

En la Tabla 11 se presentan las precipitaciones  $P_{24}$  horas máximas anuales. Estas fueron determinadas por medio de las precipitaciones máximas diarias, mismas que fueron afectadas por el factor de variación de tormentas, cuyo valor recomendado es 1.13.

**Tabla 11: Precipitaciones  $P_{24}$  máximas anuales por periodo de retorno**

<u>Periodo de retorno</u>	<u>Estación</u>				
	<i>Aguadas</i>	<i>C-Esquinas</i>	<i>Sivingani</i>	<i>Sunjani</i>	<i>Templo</i>
<i>Años</i>	<i>mm/día</i>				
<b>2</b>	32.43	37.32	36.74	34.42	29.79
<b>5</b>	42.17	52.61	46.86	46.86	39.81
<b>10</b>	50.19	62.96	53.57	55.06	48.25
<b>20</b>	59.31	73.03	60.00	62.92	58.03
<b>50</b>	73.62	86.30	68.34	73.10	73.65
<b>100</b>	86.57	96.45	74.58	80.78	88.08

Fuente: Elaboración propia

La distribución de precipitaciones según su localización y afectación son características para cada subcuenca. Por lo tanto, se realizó el cálculo de los factores según las áreas de los polígonos de Thiessen (Figura 12) y la influencia en las subcuencas también conocido como factores de ponderación (Tabla 12).

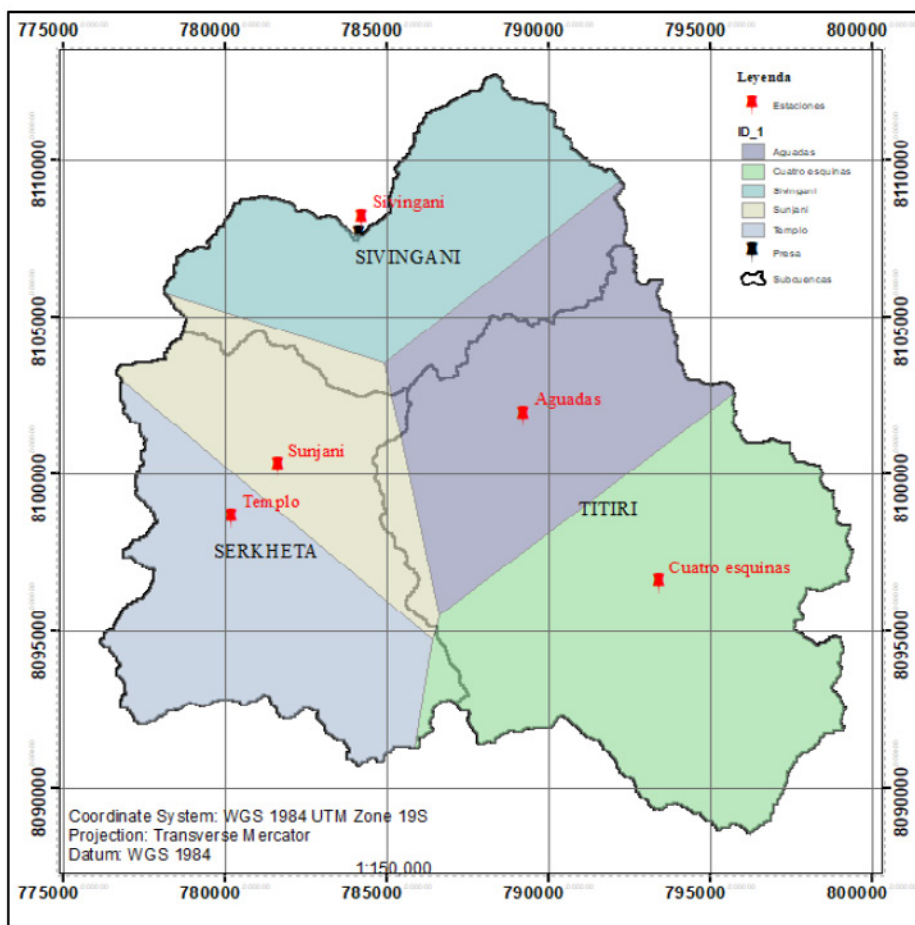
**Tabla 12: Factores de Ponderación de Thiessen por subcuencas**

<u>Estación</u>	<u>Subcuenca</u>		
	<i>Serkheta</i>	<i>Sivingani</i>	<i>Titiri</i>
<b>Aguadas</b>	0.005	0.194	0.339
<b>C-Esquinas</b>	0.023	0	0.632
<b>Sivingani</b>	0	0.729	0
<b>Sunjani</b>	0.362	0.077	0.029
<b>Templo</b>	0.61	0	0

Fuente: Elaboración propia

Aplicando los factores de ponderación de los polígonos de Thiessen (Tabla 12) a las precipitaciones  $P_{24}$  máximas (Tabla 11) se obtiene las precipitaciones  $P_{24}$  máximas anual promedio por cada subcuenca (Tabla 13).





**Figura 12:** Polígonos de Thiessen

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 13:** Precipitaciones P24 máximas anual promedio en función periodo de retorno por subcuencas

<u>Periodo de retorno</u>	<u>Subcuenca</u>		
	<i>Serkheta</i>	<i>Sivingani</i>	<i>Titiri</i>
2	31.65	35.72	35.58
5	42.67	45.95	48.91
10	51.07	53.03	58.41
20	60.15	60.09	68.09
50	73.74	69.73	81.62
100	85.63	77.38	92.64

Fuente: Elaboración propia

### 2.4.2.2. Generación de las tormentas de diseño

La generación de las tormentas de diseño pasa primero por convertir las precipitaciones  $P_{24}$  máximas a curvas PDF (Precipitación – Duración – Frecuencia) e IDF (intensidad – Duración – Frecuencia). Se ha usado 2 métodos: conforme (1) los coeficientes de desagregación de la estación AASANA de Cochabamba (Tabla 14) y (2) los coeficientes de desagregación determinadas con la fórmula de Grobe o Dick y Peschke.

Segundo se trabaja con el método de los bloques alternos del USBR para determinar los hietogramas de las tormentas de diseño.

**Tabla 14:** Coeficientes de desagregación estación AASANA Cochabamba

Duración	Coefficientes
5.00	0.17
15.00	0.31
30.00	0.40
45.00	0.45
60.00	0.49
120.00	0.58
180.00	0.64
360.00	0.79
720.00	0.96
1440.00	1.14

Fuente: Le Noir, 2017

La metodología Dick y Peschke permite un cálculo de tormentas menores a 24 horas, relacionando la duración de la tormenta con la precipitación máxima de 24 horas representado los coeficientes de desagregación mediante la siguiente ecuación 1:

$$P_d = P_{24} * \left(\frac{D}{1440}\right)^{0.25}$$

Donde:

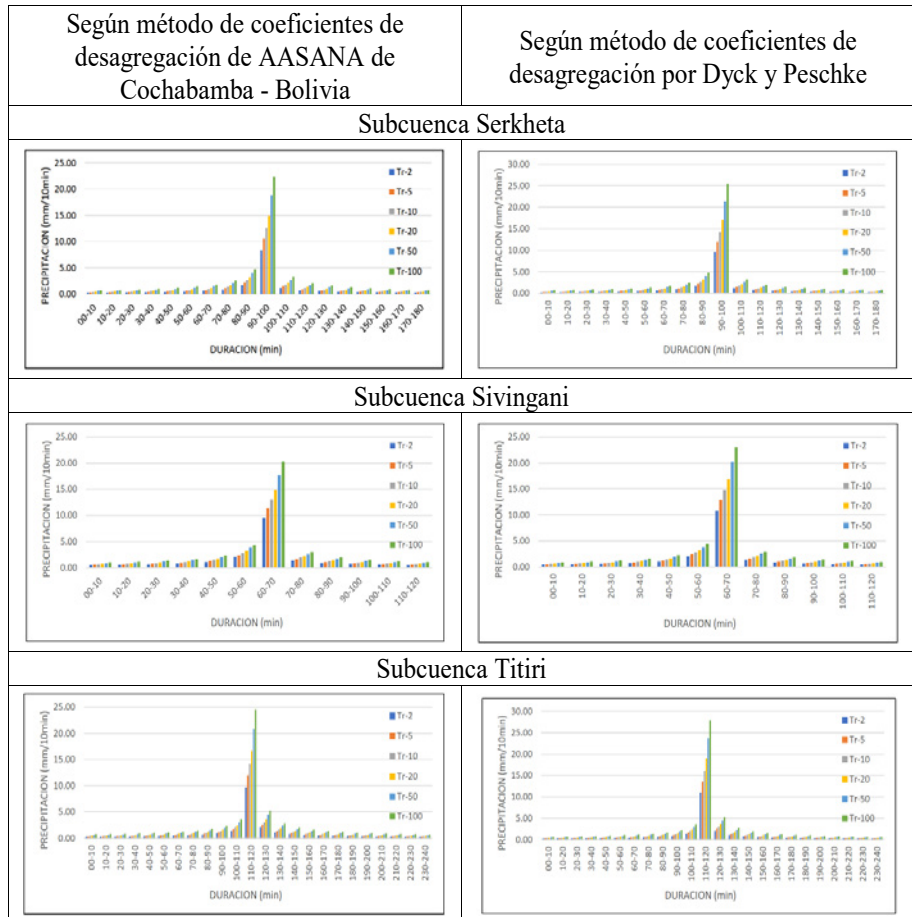
$P_d$  = Precipitación total en mm durante un tiempo de duración de la precipitación de D minutos.

$P_{24}$  = la precipitación máxima en 24 horas en mm (1.13  $P_{\text{diario máximo anual}}$ ).

En la Figura 13 se tiene los hietogramas de las tormentas de diseño para las tres subcuencas. El tiempo de duración del hietograma (Tabla 15) se ha ajustado a los tiempos de concentración de cada subcuenca (Tabla 3). La discretización de los hietogramas está por intervalos de 10 minutos.

Las tormentas de diseño para evento extremo calculados con el método de Dick y Peschke, resultan 3 a 5 % más fuerte en precipitación total y precipitación pico, en relación a las tormentas determinadas con el método de los coeficientes de desagregación (Tabla 17).

**Figura 13: Hietogramas de las tormentas de diseño según dos metodologías para el cálculo de eventos extremos con el método convencional**



Fuente: Elaboración propia 2023

**Tabla 15. Tiempos de duración de las tormentas de diseño**

<b>Subcuenca</b>	<b><i>Duración de tormenta</i></b>	
	<i>Horas</i>	<i>Minutos</i>
<b>Sivingani</b>	2.8	168
<b>Serkheta</b>	2	120
<b>Titiri</b>	4	240

Fuente: Elaboración propia 2023

Se determinó que el régimen de lluvias en las 3 subcuencas no es uniforme. Ya que por medio de la combinación de la Tabla 15 y Tabla 16, se demuestra que para el periodo de 100 años la intensidad promedio de la precipitación de la tormenta crítica que corresponde a la duración total para la cuenca Sivingani (20.4 mm/hora) es mayor que para la cuenca Serkheta (18.0 mm/hora) y para la cuenca Titiri (15 mm/hora). La intensidad pico para Titiri (167.4 mm/hora) es mayor que para la cuenca Serkheta (152.4 mm/hora) y cuenca Sivingani (138.6 mm/hora) (Tabla 17)

**Tabla 16.** Precipitación total y en el pico de las tormentas de diseño

<b>1. METODO COEFICIENTES DE DESAGREGACION - AASANA</b>						
<u>Subcuenca</u>	<u>Precipitación total por periodo de retorno (mm)</u>					
	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>50</b>	<b>100</b>
Serkheta	18.9	23.8	28.3	33.7	42.3	50.3
Sivingani	19.1	22.9	26.1	29.9	35.7	40.8
Titiri	23.5	29.3	34.6	40.8	50.8	59.9

<u>Subcuenca</u>	<u>Precipitación pico por periodo de retorno (mm)</u>					
	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>50</b>	<b>100</b>
Serkheta	8.4	10.6	12.6	14.9	18.8	22.3
Sivingani	9.5	11.4	13.0	14.9	17.7	20.3
Titiri	9.6	12.0	14.2	16.7	20.8	24.5

<b>2. METODO DE DYCK Y PESCHKE</b>						
<u>Subcuenca</u>	<u>Precipitación total por periodo de retorno (mm)</u>					
	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>50</b>	<b>100</b>
Serkheta	19.7	24.8	29.4	35.0	44.0	52.4
Sivingani	20.2	24.1	27.5	31.5	37.6	43.0
Titiri	24.3	30.2	35.7	42.1	52.4	61.8

<u>Subcuenca</u>	<u>Precipitación pico por periodo de retorno (mm)</u>					
	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>50</b>	<b>100</b>
Serkheta	9.6	12.0	14.3	17.0	21.4	25.4
Sivingani	10.8	12.9	14.8	16.9	20.2	23.1
Titiri	11.0	13.7	16.1	19.0	23.7	27.9

Fuente: Elaboración propia 2023

**Tabla 17:** Comparación del tiempo de duración, de la precipitación total y de las intensidades promedias y pico de las tormentas de diseño para evento crítico periodo de retorno T=100 años sobre las tres subcuencas

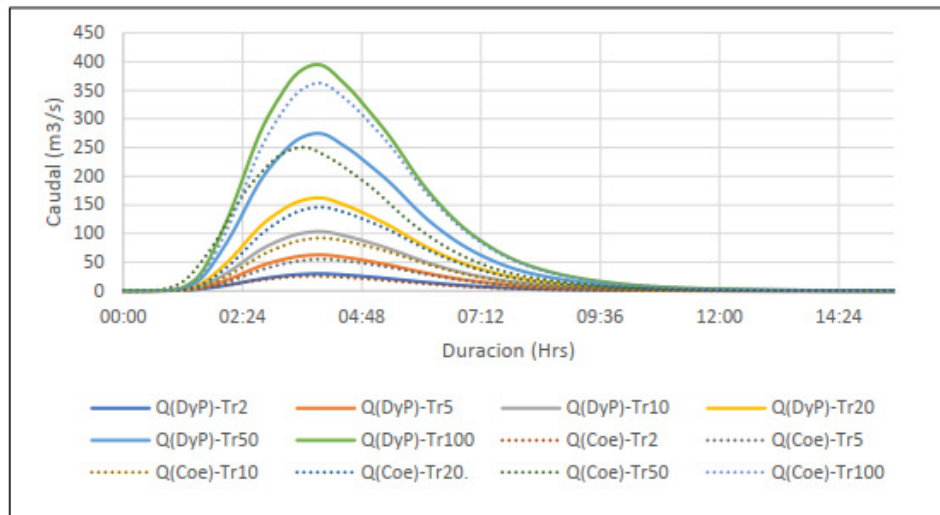
<u>Subcuenca</u>	<u>Duración</u>		<u>Intensidad promedio</u>		<u>Intensidad en el pico</u>	
	Horas	Minutos	mm	mm/hora	mm/min	mm/hora
Sivingani	2.8	168	50.3	18.0	2.54	152.4
Serkheta	2	120	40.8	20.4	2.31	138.6
Titiri	4	240	59.9	15.0	2.79	167.4

Fuente: Elaboración propia 2023

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. COMPARACIÓN HIDROGRAMAS DE MÉTODOS CONVENCIONALES

Por medio de las dos metodologías convencionales, se obtuvieron los hidrogramas para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años (Figura 14). El hidrograma resultante de la metodología por coeficientes de desagregación (Coe) presenta caudales inferiores al hidrograma resultante por el criterio de Dick y Peschke (D y P), en la Tabla 18 se presentan los caudales máximos por periodo de retorno y la diferencia correspondiente a las dos metodologías convencionales es de 8 a 13%.



**Figura 14: Comparación gráfica de hidrogramas a la salida de la cuenca Misicuni por metodologías convencionales**

Fuente: Elaboración propia

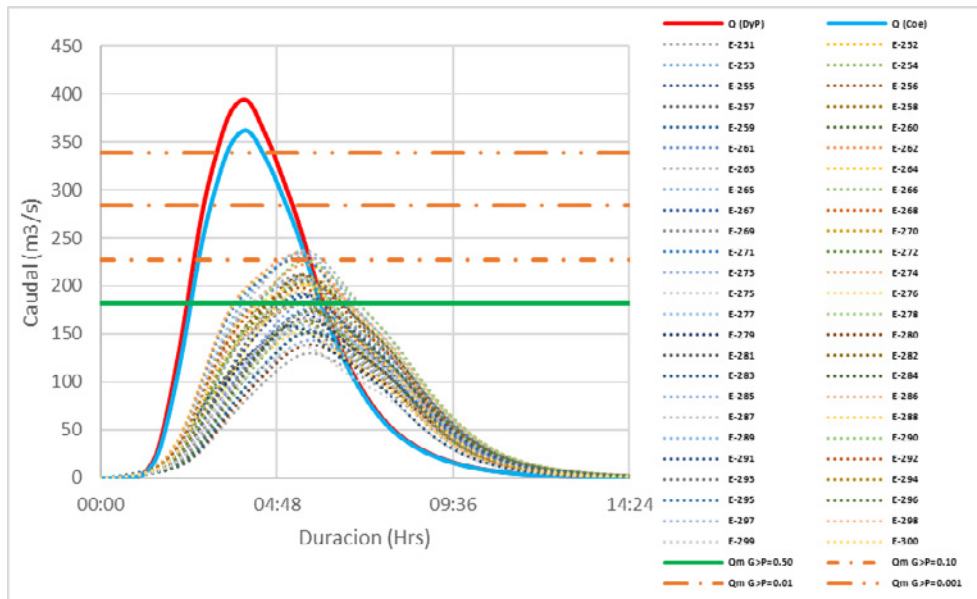
**Tabla 18: Comparación numérica de hidrogramas a la salida de la cuenca Misicuni por metodologías convencionales**

<b>Metodología</b>	<b>Caudales máximos por periodo de retorno (m<sup>3</sup>/s)</b>					
	<b>Tr-2 T</b>	<b>r-5</b>	<b>Tr-10</b>	<b>Tr-20</b>	<b>Tr-50</b>	<b>Tr-100</b>
<b>Dick y Peschke</b>	29.7	62.7	103.3	161.9	274.3	394.3
<b>Coeficientes</b>	25.7	55.2	92.1	146.0	250.3	362.0
<b>Variación (DyP - Coef.)</b>	4.0	7.5	11.2	15.9	24.0	32.3
	13%	12%	11%	10%	9%	8%

Fuente: Elaboración propia

### 3.2. COMPARACIÓN HIDROGRAMAS MÉTODOS CONVENCIONALES Y ESTOCÁSTICO

Los hidrogramas, según las limitaciones de los softwares IT-Lluvia e IT-Inundación, se determinaron 50 escenarios para cada periodo de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años. En la Figura 15, Figura 16 y Figura 17 se presenta la comparación de hidrogramas entre las metodologías convencionales y los 50 escenarios correspondientes a la metodología estocástica para el periodo de retorno de 100 años para las 3 subcuencas. En la Figura 18 se tiene el mismo análisis para la cuenca Misicuni (sitio actual de la presa del embalse de Misicuni). A cada serie de 50 caudales máximos de 50 escenarios estocásticas se ha ajustado una distribución Gumbel y determinado los caudales máximos con probabilidades de 50, 10, 1 y 0.1 % de excedencia. Estos caudales están anotados en las 4 figuras. En la Tabla 19 se tiene los valores numéricos de estos 16 caudales estocásticos y de los 8 caudales determinísticos de los dos métodos convencionales.



**Figura 15.** Comparación gráfica de hidrogramas subcuenca Titiri para un periodo de retorno 100 años (métodos convencional y estocástico)

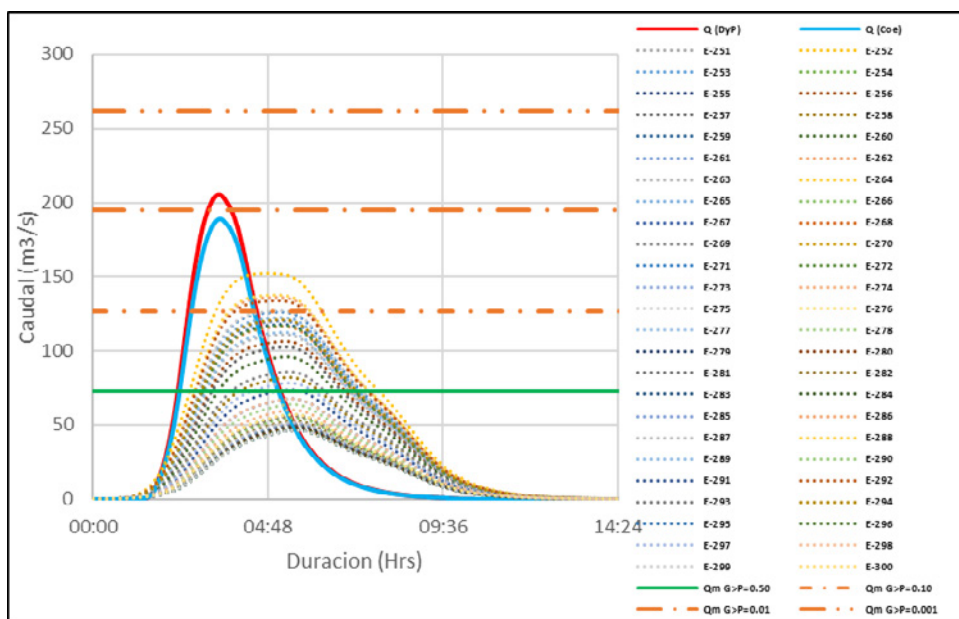
Fuente: Elaboración propia 2023

**Tabla 19:** Comparación numérica de caudales máximos por subcuencas y cuenca total para un periodo de retorno 100 años (métodos convencional y estocástico)

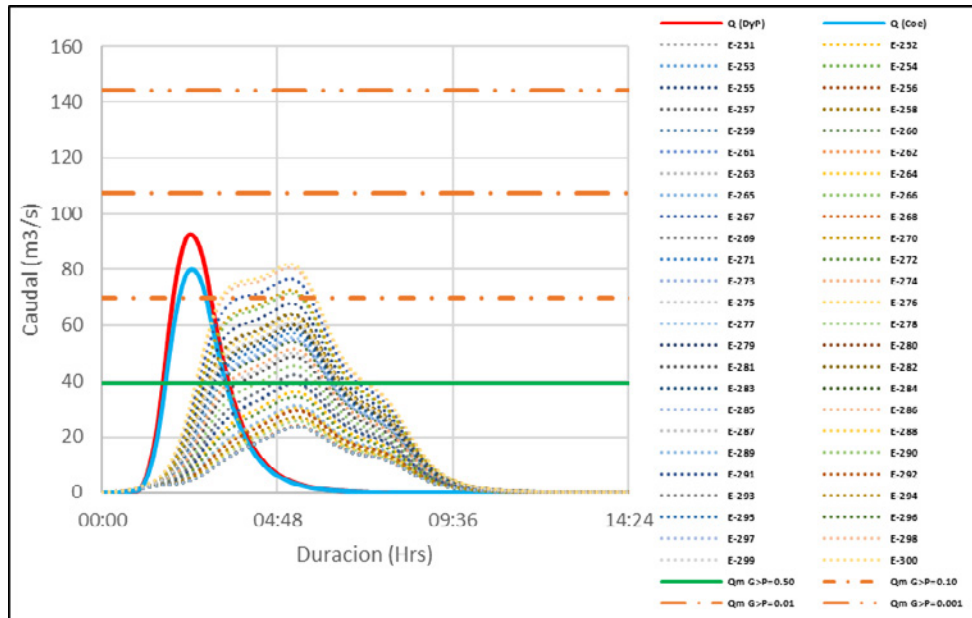
<u>Caudal Máximo</u>	<i>Sivingani</i>	<i>Serkheta</i>	<i>Titiri</i>	<i>Misicuni</i>
Qmax excedido con P=50%	69.6	127.0	112.8	227.2
Qmax excedido con P=10%	107.3	195.0	168.0	283.6
Qmax excedido con P=1%	144.3	261.7	223.3	338.9
Qmax excedido con P=0.1%	92.0	205.4	222.2	394.0
Qmax conv. (Dick y Peshke)	92.0	205.4	223.3	394.3
Qmax conv. (Coeficientes)	80.0	188.9	207.3	362.0

Fuente: Elaboración propia 2023

**Figura 16:** Comparación gráfica de hidrogramas subcuenca Serkhe-ta para un periodo de retorno 100 años (métodos convencional y estocástico)



Fuente: Elaboración propia 2023

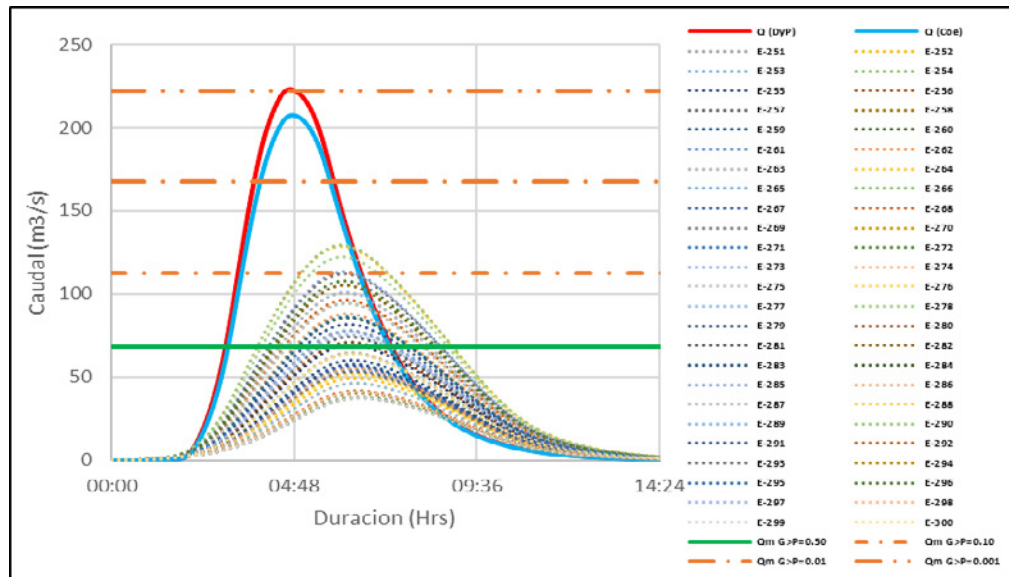


**Figura 17.** Comparación gráfica de hidrogramas subcuena Sivingani para un periodo de retorno 100 años (métodos convencional y estocástico)

Fuente: Elaboración propia 2023

Se observa en las 4 figuras y en la tabla que para las 3 subcuencas y para la cuenca en su totalidad que  $Q_{\max T=100 \text{ años}} \text{ excedido con } 50\%$  y  $Q_{\max T=100 \text{ años}} \text{ excedido con } 10\%$  están siempre inferior al máximo caudal simulado con los 50 escenarios  $T=100$  años.  $Q_{\max T=100 \text{ años}} \text{ excedido con } 1\%$  siempre está superior al máximo caudal simulado con los 50 escenarios para  $T=100$  años. Lo cual es correcto, en base a la aplicación de la función de distribución de Gumbel a series de 50 valores.





**Figura 18.** Comparación gráfica de hidrogramas cuenca Misticuni para un periodo de retorno 100 años (métodos convencional y estocástico)

Fuente: Elaboración propia 2023

Los caudales máximos determinísticos de los dos métodos convencionales para las subcuencas Sivingani (Figura 17) y Serkheta (Figura 16) son superiores a  $Q_{\max, T=100}$  años excedido con 10 % e inferior e igual a  $Q_{\max, T=100}$  años excedido con 1 %. Para la subcuenca Titiri (Figura 15) y la cuenca total (Figura 18), son superiores a  $Q_{\max, T=100}$  años excedido con 10 % e igual y superior a  $Q_{\max, T=100}$  años excedido con 0.1 %.

Los caudales máximos determinísticos para  $T=100$  años resultan superiores a los máximos caudales de los 50 escenarios estocásticos correspondientes. Esto se debe a que están calculados con la metodología Thiessen, la cual considera las máximas precipitaciones diarias en 5 estaciones y, una distribución uniforme de la precipitación conforme polígonos determinados con el criterio “del vecino más cercano” agregada a la salida de las subcuencas. Adoptar el criterio de simultaneidad de máximas precipitaciones entre todas las estaciones no es correcto para la cuenca de Misticuni. Por medio de la Tabla 20 se confirma que, en un periodo de 53 años de registros diarios de precipitación, solamente hubo 2 años donde las 5 estaciones se registraron la máxima precipitación de forma simultánea, 6 años con 4 estaciones, 11 años con 3 estaciones, 22 años con 2 estaciones y 12 años con ninguna simultaneidad entre las máximas precipitaciones diarias en las 5 estaciones.

**Tabla 20.** Número de eventos con simultaneidad entre las estaciones

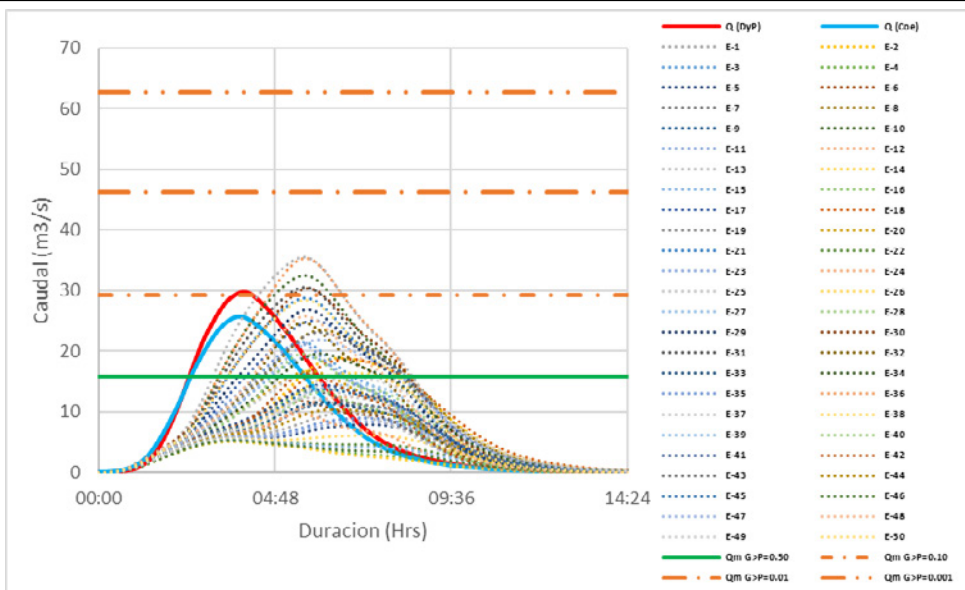
<u>Estaciones Simultaneas</u>	<u>Número de eventos</u>	<u>Años de registro en periodo de 1968 a 2020</u>
NS	12	1968-1969-1970-1976-1977-1979-1980-1983-1984-2009-2011-2018
2	29	1975-1973-1974-1975-1978-1981-1982-1985-1986-1987-1988-1989-1990-1993-1994-1996-1998-2000-2005-2006-2008-2019-2020
3	11	1988-1991-1992-1995-2001-2002-2004-2005-2007-2013-2014
4	6	1999-2003-2010-2015-2016-2017
5	2	1997-2012

Fuente: Elaboración propia 2023

Con la presente investigación se han procesado aparte del periodo de retorno 100 años también los periodos de retorno 2, 5, 10, 20 y 50 años para las 3 subcuencas y la cuenca total. En las Figura 19, Figura 20, Figura 21, Figura 22 , y Figura 23 se tiene los hidrogramas de la cuenca total para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20 y 50 años. Para 20 y 50 años de periodo de retorno, los hidrogramas tienen las mismas características ya mencionadas para un periodo de retorno de 100 años. Para pequeños periodos de retorno 2, 5 y 10 años los máximos caudales de los hidrogramas determinísticos se encuentran en la franja de caudales estocásticas  $Q_{\max T \text{ excedido con } 50 \%}$  y  $Q_{\max T \text{ excedido con } 10 \%}$ . Existiendo una mejor correspondencia entre los máximos caudales de los hidrogramas convencionales y estocásticos.

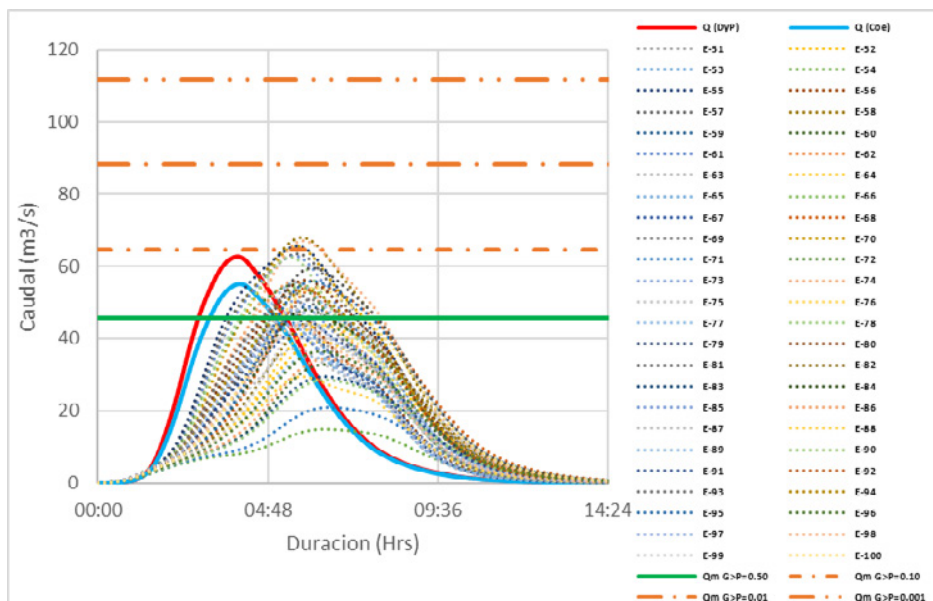
En la Tabla 21 se tienen para la cuenca de Misticuni y sus subcuencas por periodo de retorno los valores de los máximos caudales que corresponden a los hidrogramas determinísticos (metodologías convencionales) y estocásticos descritos y analizados anteriormente.

En la Figura 24 se tiene graficado para la cuenca de Misticuni curvas  $Q_{\max}$  en función del periodo de retorno de 2 años hasta 100 años de hidrogramas determinísticos (metodologías convencionales) y estocásticos descritos y analizados líneas arriba.



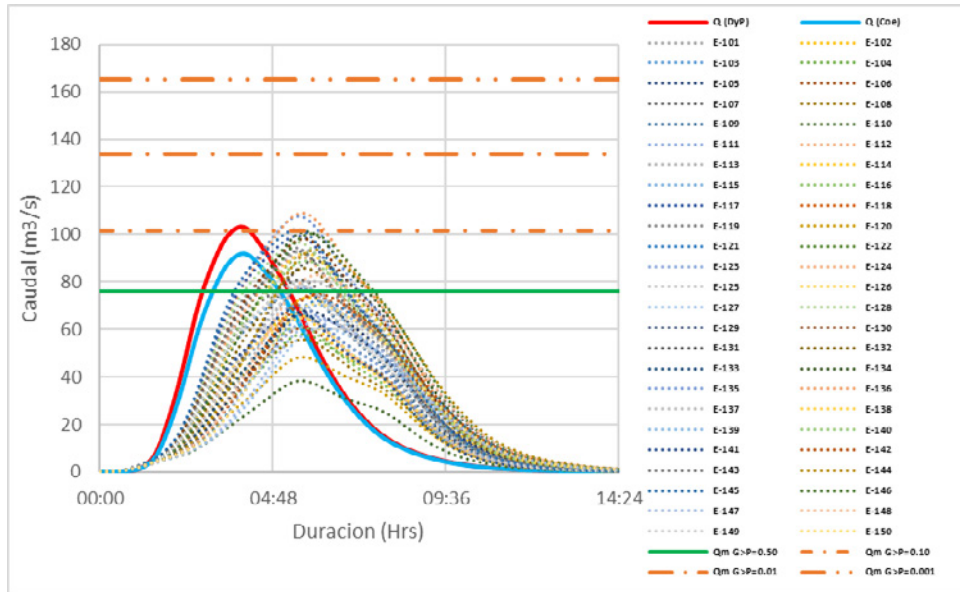
**Figura 19.** Comparación gráfica de hidrogramas cuenca Misicuni para un periodo de retorno 2 años (métodos convencional y estocástico)

Fuente: Elaboración propia 2023



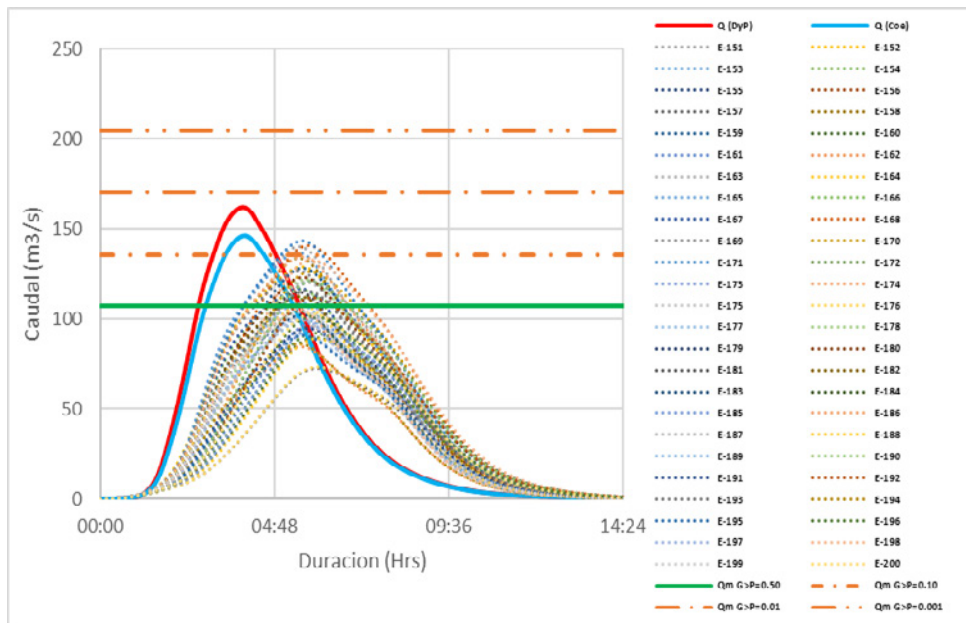
**Figura 20.** Comparación gráfica de hidrogramas cuenca Misicuni para un periodo de retorno 5 años (métodos convencional y estocástico)

Fuente: Elaboración propia 2023



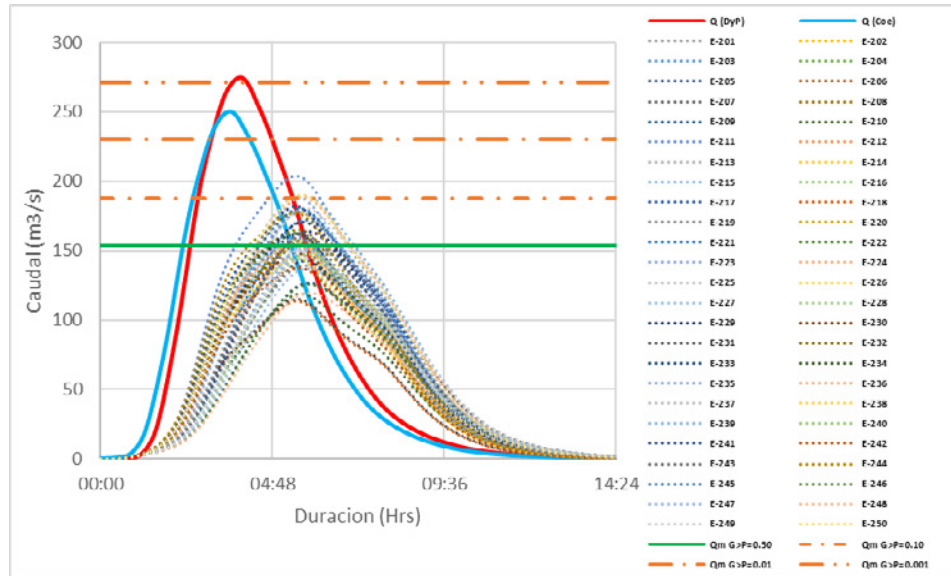
**Figura 21.** Comparación gráfica de hidrogramas cuenca Misicuni para un periodo de retorno 10 años (métodos convencional y estocástico)

Fuente: Elaboración propia 2023



**Figura 22.** Comparación gráfica de hidrogramas cuenca Misicuni para un periodo de retorno 20 años (métodos convencional y estocástico)

Fuente: Elaboración propia 2023



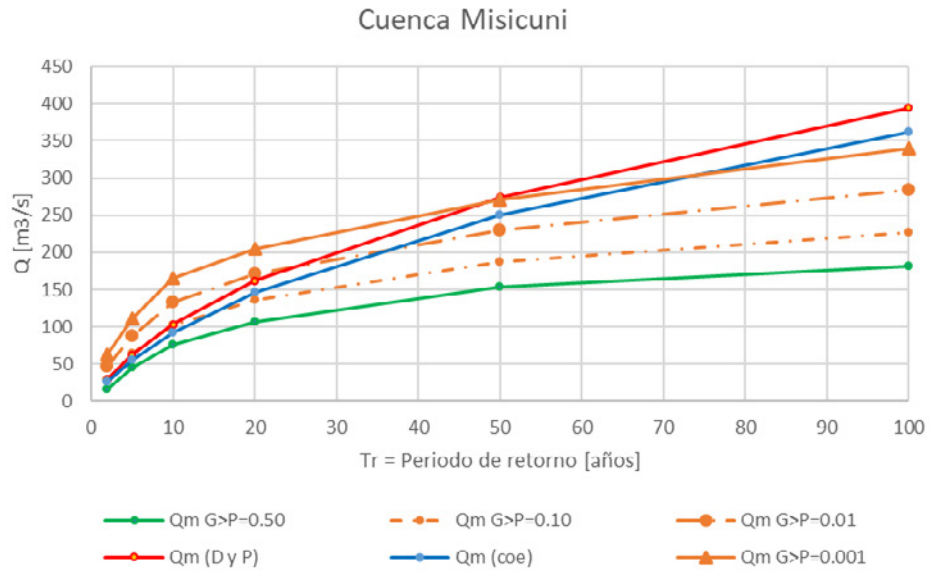
**Figura 23.** Comparación gráfica de hidrogramas cuenca Misisuni para un periodo de retorno 50 años (métodos convencional y estocástico)

Fuente: Elaboración propia 2023

**Tabla 21.** Valores de los caudales máximos estocásticos y determinísticos según periodos de retorno para la cuenca de Misicuni y sus subcuencas

<i>Caudales máximos a nivel de subcuencas y cuenca (m<sup>3</sup>/s)</i>						
<u>Periodo de retorno 2 años</u>	<u>P exc.</u> <u>(50%)</u>	<u>P exc.</u> <u>(10%)</u>	<u>P exc.</u> <u>(1%)</u>	<u>P exc.</u> <u>(0.1%)</u>	<u>Qmax.</u> <u>(DyP)</u>	<u>Qmax.</u> <u>(Coef)</u>
Subcuenca Sivingani	3	9	16	24	7	6
Subcuenca Serkheta	8	23	42	60	17	15
Subcuenca Titiri	5	11	18	25	13	15
Cuenca Misicuni	16	29	46	63	30	26
<u>Periodo de retorno 5 años</u>	<u>P exc.</u> <u>(50%)</u>	<u>P exc.</u> <u>(10%)</u>	<u>P exc.</u> <u>(1%)</u>	<u>P exc.</u> <u>(0.1%)</u>	<u>Qmax.</u> <u>(DyP)</u>	<u>Qmax.</u> <u>(Coef)</u>
Subcuenca Sivingani	11	29	51	73	15	12
Subcuenca Serkheta	19	43	73	103	35	31
Subcuenca Titiri	14	31	52	73	34	30
Cuenca Misicuni	46	65	88	111	63	55
<u>Periodo de retorno 10 años</u>	<u>P exc.</u> <u>(50%)</u>	<u>P exc.</u> <u>(10%)</u>	<u>P exc.</u> <u>(1%)</u>	<u>P exc.</u> <u>(0.1%)</u>	<u>Qmax.</u> <u>(DyP)</u>	<u>Qmax.</u> <u>(Coef)</u>
Subcuenca Sivingani	15	35	59	83	24	20
Subcuenca Serkheta	37	70	111	151	57	51
Subcuenca Titiri	22	48	81	114	56	51
Cuenca Misicuni	76	102	134	165	103	92
<u>Periodo de retorno 20 años</u>	<u>P exc.</u> <u>(50%)</u>	<u>P exc.</u> <u>(10%)</u>	<u>P exc.</u> <u>(1%)</u>	<u>P exc.</u> <u>(0.1%)</u>	<u>Qmax.</u> <u>(DyP)</u>	<u>Qmax.</u> <u>(Coef)</u>
Subcuenca Sivingani	22	47	78	108	38	32
Subcuenca Serkheta	48	85	130	175	88	79
Subcuenca Titiri	35	68	109	150	90	82
Cuenca Misicuni	107	135	170	205	162	146
<u>Periodo de retorno 50 años</u>	<u>P exc.</u> <u>(50%)</u>	<u>P exc.</u> <u>(10%)</u>	<u>P exc.</u> <u>(1%)</u>	<u>P exc.</u> <u>(0.1%)</u>	<u>Qmax.</u> <u>(DyP)</u>	<u>Qmax.</u> <u>(Coef)</u>
Subcuenca Sivingani	32	63	102	140	64	55
Subcuenca Serkheta	59	101	152	203	145	132
Subcuenca Titiri	104	159	154	212	154	142
Cuenca Misicuni	188	230	271	313	274	250
<u>Periodo de retorno 100 años</u>	<u>P exc.</u> <u>(50%)</u>	<u>P exc.</u> <u>(10%)</u>	<u>P exc.</u> <u>(1%)</u>	<u>P exc.</u> <u>(0.1%)</u>	<u>Qmax.</u> <u>(DyP)</u>	<u>Qmax.</u> <u>(Coef)</u>
Subcuenca Sivingani	70	107	144	92	92	80
Subcuenca Serkheta	127	195	262	205	205	189
Subcuenca Titiri	113	168	223	222	223	207
Cuenca Misicuni	227	284	339	394	394	362

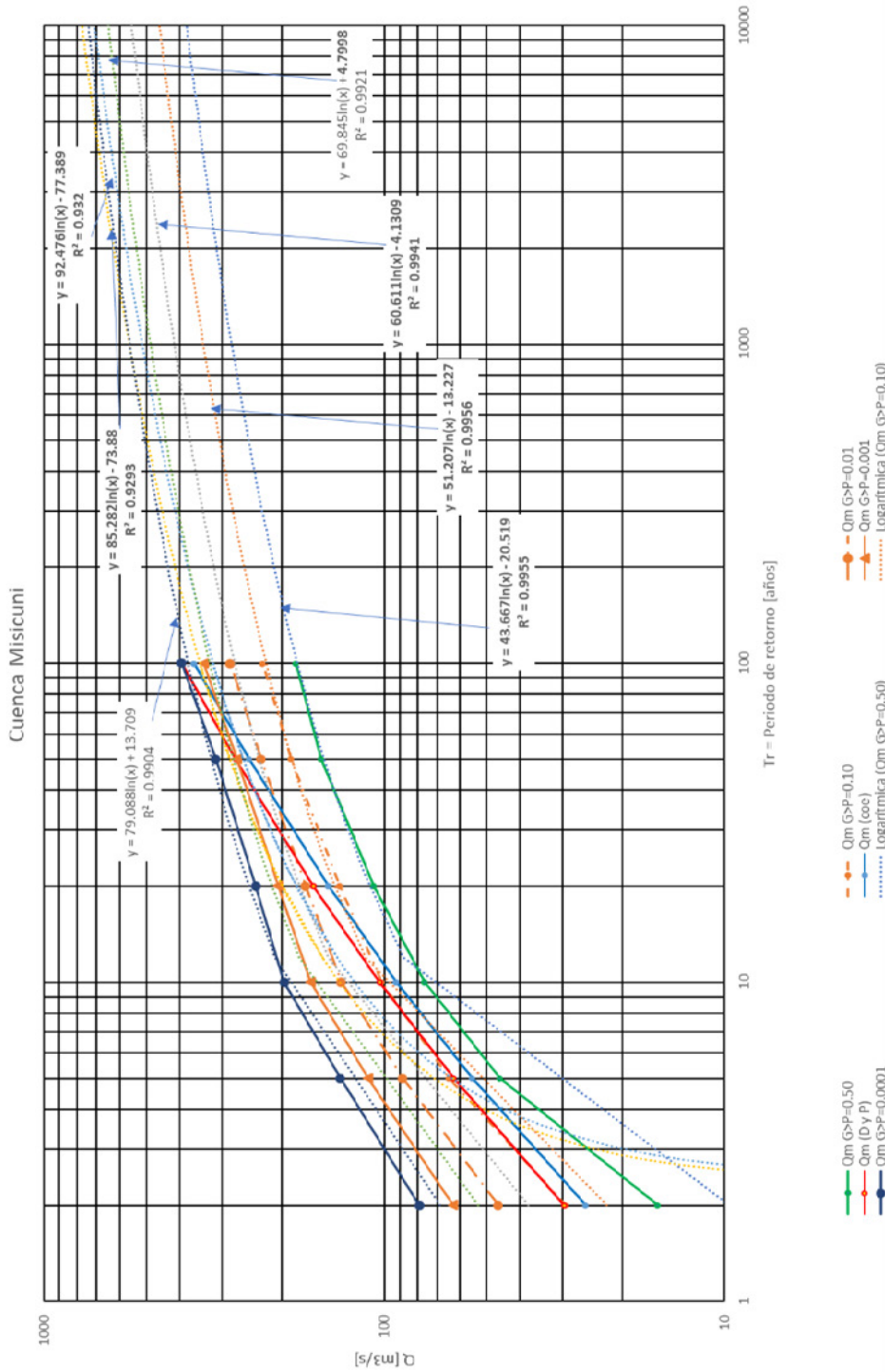
Fuente: Elaboración propia 2023



**Figura 24.** Relaciones  $Q_{\max}(T_r)$  para la cuenca total del Proyecto Misicuni métodos convencional y estocástico.

Fuente: Elaboración propia 2023

Las relaciones  $Q_{\max}(Tr)$  pueden dibujarse en ejes con escala logarítmica permitiéndose que los caudales estocásticos y convencionales puedan extrapolarse para estimar los caudales con periodos de retorno para 1000 y 10000 años (Figura 25 y Tabla 22).



**Figura 25.** Relaciones  $Q_{max}(T)$  para la cuenca total del Proyecto Misticuni proyectados hasta periodo de retorno 10000 años.

Fuente: Elaboración propia 2023



**Tabla 22.** Estimación de caudales centenario, milenario y decamilenaria proyecto Misicuni

<u>Caudal máximo</u> (m <sup>3</sup> /s)	<u>Periodo de retorno</u> (años)			<u>Caudal máximo probable</u> (m <sup>3</sup> /s)
	<b>100</b>	<b>1000</b>	<b>10000</b>	
Q <sub>max</sub> excedido con P=50%	182	280	380	-
Q <sub>max</sub> excedido con P=10%	227	340	470	-
Q <sub>max</sub> excedido con P=1%	284	410	560	-
Q <sub>max</sub> excedido con P=0.1%	339	490	640	-
Q <sub>max</sub> excedido con P=0.01%	394	560	750	-
Q <sub>max</sub> conv (Coeficientes)	362	510	710	-
Q <sub>max</sub> conv (Dick y Peshke)	394	560	780	-
Q <sub>max</sub> informe Misicuni	330	510	680	2306
Q <sub>max</sub> laminado Misicuni	65	119	178	800

Fuente: Elaboración propia 2023

Los caudales estocásticos se extrapolaron bien con coeficientes de determinación  $R^2$  mayor a 0.99 y con un control visual aceptable. Aunque los caudales convencionales se han extrapolados con coeficientes de determinación  $R^2$  mayor a 0.92 el control visual no demuestra un ajuste bueno con los datos base, pero la gráfica de los valores extrapolados parece aceptable.

En la Tabla 22, se tiene un resumen de los caudales máximos de las crecidas centenaria, milenaria y decamilenaria del PMM, en base a las 7 metodologías analizadas (5 metodologías estocásticas:  $Q_{\text{max excedido con } P=50\%}$ ,  $Q_{\text{max excedido con } P=10\%}$ ,  $Q_{\text{max excedido con } P=1\%}$ ,  $Q_{\text{max excedido con } P=0.1\%}$  y  $Q_{\text{max excedido con } P=0.01\%}$  y 2 metodologías determinísticas:  $Q_{\text{max conv (coe)}}$  y  $Q_{\text{max conv (D y P)}}$ ). En la misma tabla se tienen los caudales de entrada al embalse y de salida por el vertedero de excedencias del embalse: centenario, milenario, decamilenario y máximo probable que fueron usado para el diseño y ejecución del PMM, ENGEVIX CAEM 2015.

En la Tabla 22, se ve que el método determinístico convencional en base a coeficientes de desagregación  $Q_{\text{max conv (coe)}}$  da valores característicos muy similares a las que el PMM ha usado para diseño y ejecución. Es muy probable que el PMM ha debido realizarse en base a un estudio determinístico convencional con coeficientes de desagregación. El método estocástico que entrega valores cercanos a los valores característicos del PMM es el que considera la probabilidad de excedencia de 0.1 %  $Q_{\text{max excedido con } P=0.1\%}$ . Esta probabilidad es estricta y demuestra que la precipitación máxima diaria no es uniforme sobre la cuenca, ver líneas arriba. La aplicación de Thiessen activando todas las estaciones de forma simultánea no es correcto para el PMM. El método estocástico demuestra que las crecidas del PMM deben ser inferiores a las que el PMM ha considerado para el diseño, construcción y operación. El PMM podrá disminuir las medidas de seguridad que se toma para proteger el embalse y subir la rentabilidad del embalse. No es aconsejable realizar aquello sin haber realizado previamente campañas de aforos y determinado cuantitativamente en qué escenario se encuentra del método estocástico.

#### 4. CONCLUSIONES

- Se obtuvo series de precipitación diaria rellenadas y subsanadas de acuerdo a los análisis de homogeneización propuestos cumpliendo los parámetros establecidos y permitiendo la identificación de las estaciones a ser tomadas en cuenta en los análisis para la determinación de eventos extremos.
- La metodología estocástica en base a la generación de curvas PADF y escenarios de tormentas elípticas sobre la cuenca, permite tener una visión más característica y detallada sobre el comportamiento real en base a registros históricos de precipitaciones y la geomorfología de la cuenca. Sin embargo, donde más llega a destacar es en estudios de cuencas de gran superficie.
- La aplicación estocástica y los softwares especializados (IT-LluviaNH y IT-inundación) sobre la cuenca Misicuni, permitió obtener 300 escenarios de tormentas elípticas con diferentes distribuciones espaciales e intensidades que permiten hacer un control no solo de caudales máximos correspondientes a eventos extremos del PMM, sino también caudales máximos con la realización de estudios o proyectos dentro de la cuenca.
- Para las dos metodologías estocástica y convencional se ha logrado extrapolar los caudales con periodos de retorno,  $T_r = 2, 5, 10, 50$  y  $100$  años a caudales con periodo de retorno  $1000$  y  $10000$  años.
- Según la comparación de resultados de las diferentes metodologías y criterios optados, se obtuvieron caudales menores a las convencionales adoptadas para diseño del PMM cercano al 30%, debido a la distribución espacial del evento como tal, una metodología convencional que relaciona su distribución en la totalidad de la superficie de la cuenca no es lo más realista, pero si con más rango de seguridad y contra mayores costos económicos.
- El método estocástico demuestra que las crecidas del PMM deben ser inferiores a las que el PMM ha considerado para el diseño, construcción y operación. El PMM podrá disminuir las medidas de seguridad que se toma para proteger el embalse y subir la rentabilidad económica del embalse. No es aconsejable realizar aquello sin antes haber efectuado campañas de aforos y determinar cuantitativamente en qué escenario se encuentra del método estocástico, vale decir que previo se debe calibrar el método estocástico.
- El modelo hidrológico propuesto relaciona las tres subcuencas principales de aportación, se consideró un ruteo del río Misicuni con un tiempo de retardo, el cual fue descartado por la cobertura actual del embalse sobre el río Misicuni. Los caudales entran directamente al embalse, por lo cual son laminados y no son transportados.
- La metodología estocástica del CAPRA-BID está basado en un escaneo sobre las 5 estaciones de forma simultánea y una distribución de la precipitación conforme a las isoyetas procesadas mediante grilla y red de flujo, lo cual corresponde a un modelo distribuido.
- La metodología Thiessen es artificial, sencillo y menos precisa, pero con resultados al lado de la seguridad. La metodología estocástica es complicada aplicar, pero es basada sobre principios más correctos y entrega resultados que más se aproximan a la realidad.

## 5. RECOMENDACIONES

Según los análisis, resultados y conclusiones se plantean las siguientes recomendaciones para complementar el estudio: Diseñar, instalar y operar sobre los ríos Serkheta, Sivingani y Titiri estaciones hidrométricas con aforo continuo de los caudales líquidos que entran al embalse.

- Levantar mapas temáticos a detalle de suelos, vegetación y uso de suelos de la cuenca del PMM.
- Mejorar y subsanar las series de precipitación a nivel diario de las estaciones dentro y fuera de la cuenca para una mejor disponibilidad de datos pluviométricos y series representativas que cumplan los análisis de consistencia y homogeneidad para futuros estudios.
- Diseñar un nuevo modelo hidrológico HEC HMS a nivel de la cuenca del PMM con nuevos mapas temáticos y calibrar el modelo con los aforos realizados.
- Hacer el análisis estocástico con los softwares especializados (IT-LluviaNH e IT-Inundación) del BID, con el nuevo modelo hidrológico HEC HMS y con las nuevas series de precipitación diaria.
- Realizar una modelación convencional determinístico con la metodología de Thiessen con lluvias por sectores.
- En caso, las crecidas que el PMM ha tomado en cuenta para el diseño, construcción y operación resultan (suficientemente) superiores a las crecidas de los modelos actualizados estocástico y Thiessen con lluvias sectorizadas se puede suavizar los caudales característicos y disminuir las medidas de seguridad para proteger el embalse y subir la rentabilidad económica del embalse.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

A. Cardoso Velasco; “Cálculo de los Caudales de Evento Extremo en la Cuenca de Misicuni mediante Tormentas Estocásticas.”, Proyecto de Grado, presentado para optar al Diploma Académico de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Privada del Valle, Departamento Académico de Ingeniería Civil, Carrera de Ingeniería Civil, 2022.

Aldana Flores, D. A., & Leigue Fernández, M. A. (2022). Estudio hidrológico para determinación de caudales máximos en la cuenca del río San Pedro de la ciudad de Tarija, Bolivia.

C. Le Noir, (2017). Estudio Hidrológico Misicuni – Río Titiri, Informe de consultoría - contratación menor.

Coca Guzman R.; Análisis de eventos extremos por un método probabilístico con generación estocástica de tormentas – río Icona”. Proyecto de Grado, presentado para optar al Diploma Académico de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Mayor de San Simón, Carrera de Ingeniería Civil, 2021

D. Campos Aranda; “Procesos del Ciclo Hidrológico” (1992); Universidad Autónoma de San Luis Potosí, S.L.P. México.

ENGEVIX CAEM (2015). “Estudios y evaluaciones hidráulicas en el vertedero del Proyecto Múltiple Misicuni cambios generales” – informe de consultoría PROYECTO MULTIPLE MISICUNI 8990/US-3H-MC-0002

ERN; “Modelos de Evaluación de Amenazas Naturales y Selección”, Informe Técnico, Tomo 1 (Versión digital) (2016) Recuperado de <https://ecapra.org/sites/default/files/documents/ERN-CAPRA-R6-T1-3%20>

ITEC, (2015); BID Proyecto #: RG-T2416 Perfil de riesgo de desastres para Bolivia ante inundaciones y deslizamientos en cuencas seleccionadas (río Rocha y río Grande – Informe Final, Universidad de los Andes, Colombia. (Versión digital). Recuperado de <https://ewdata.rightsindevelopment.org/files/documents/07/IADB-BO-L1107.pdf>.

ITEC, (2018). “Manual de usuario del software IT-Flood V.2.2” (Manual). Universidad de los Andes, Colombia. (Versión digital). Recuperado de <https://ecapra.org/es/topics/it-flood>.

ITEC, (2018). “Manual de usuario del software IT-NHrain V.3.0.” Manual, Universidad de los Andes, Colombia. (Versión digital). Recuperado de <https://ecapra.org/topics/it-nhrain>

J. Shaman, M. Stieglitz y D. Burns; “Are big basins just the sum of small catchments”; Hydrol. Process. 18, 3195-3206 (2004); Published online in Wiley InterScience (0); DOI: [10.1002/hyp.5739](https://doi.org/10.1002/hyp.5739)

López, P. (2016). Informe modelo de operación inicial del embalse Misicuni. Informe de consultoría- contratación menor.

M. Villón Béjar, (2012). “HIDROESTA 2 Cálculos Hidrológicos – Manual de Usuario”, Tecnológico de Costa Rica, Lima Perú – Ediciones Villón – 10/2012.

Mapa de Cobertura vegetal y Uso actual de la tierra de Bolivia del 2010 desarrollado por el Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras (MDRyT) – Viceministerio de Tierras disponible en la página web de GeoBolivia (MDRyT, 2011).

Mapa de tipo de suelos de la cuenca Misicuni digitalizado en base a la imagen del mapa de suelos desarrollado por BioTerra para el plan de manejo integral de la cuenca de aporte del embalse Misicuni en 2004.

Rincón, D.; Velandia, J.F.; Tsanis, I.; Khan, U.T. Stochastic Flood Risk Assessment under Climate Change Scenarios for Toronto, Canada Using CAPRA. Water 2022, 14, 227. <https://doi.org/10.3390/w14020227>

V. T. Chow, D. Maidment, y L. Mays; “Hidrología Aplicada” (1994). (Versión digital). Recuperado de <https://www.libreriaingeniero.com/2017/12/hidrologia-aplicada-ven-te-chow.html>.

W. R. Sandoval Erazo y E. P. Aguilera Ortiz; “Determinación de Caudales en cuencas con poca información Hidrológica” (2014), pp.100 – 110, Revista Ciencia UNEMI.

National Engineering Hand Book; National Resources Conservation Service; NRCS part 630 (2004) chapter 9, “Hydrological Soil-Cover Complexes” and chapter 10 “Hydrology”. Recuperado de:

<http://www.wcc.nrcs.usda.gov/ftpref/wntsc/H&H/NEHhydrology/ch9.pdf> y


<http://www.wcc.nrcs.usda.gov/ftpref/wntsc/H&H/NEHhydrology/ch10.pdf>

World Meteorological Organization; “Tropical Hydrology” (1987) WMO – No. 655 – Geneva – Switzerland.

Tipo de artículo Proyecto de Ingeniería Aplicada

# Análisis y proyección de la resistencia a compresión del concreto, utilizando agregados finos y gruesos de los residuos de construcción y demolición (RCD) de la planta piloto de EMAVERDE

Analysis and projection of the compressive strength of concrete, using fine and coarse aggregates of construction and demolition waste (CDW) from the EMAVERDE pilot plant.

 Rodolfo Angel Aliaga Choque<sup>1</sup>

1. Ingeniero Civil, Docente Tiempo Completo. Universidad Privada del Valle, La Paz, Bolivia.  
[raliagac@univalle.edu](mailto:raliagac@univalle.edu)

## RESUMEN

En esta investigación se analiza los resultados de la incorporación de agregados provenientes de residuos de construcción y demolición (RCD) procesados en la primera planta piloto de transformación de RCD de Bolivia, ubicada en la ciudad de La Paz, y su incorporación a una nueva mezcla con agregados chancados naturales, además de su proyección a mayores porcentajes de sustitución, para proponer una fórmula que pueda predecir su comportamiento. El agregado natural fue sustituido en porcentajes de 0%, 30% y 60% por agregado grueso RCD, realizándose un total de 45 probetas, además se realizaron probetas sustituyendo parcialmente el agregado fino en proporciones de 0%, 25%, 50%, realizándose 51 probetas, los agregados naturales utilizados fueron caracterizados y verificados para su empleo en hormigones, las probetas realizadas fueron ensayadas a compresión a los 7, 14 y 28 días. Los resultados muestran que se puede alcanzar una resistencia a la compresión máxima de 25.35 MPa en caso de reemplazar un 13 % de agregado grueso RCD, y en caso de reemplazar el 23% de agregado fino RCD se puede llegar a una resistencia máxima de 22.8 MPa, por lo que con la presente investigación demostró la posibilidad de alcanzar valores mayores al de un diseño de resistencia característica (H21) y se recomienda realizar más estudios experimentales en la línea de investigación.

**Palabras clave:** RCD, Agregados reciclados. Medio Ambiente.

## ABSTRACT

This research analyzes the results of the incorporation of aggregates from construction and demolition waste (CDW) processed in the first pilot CDW transformation plant in Bolivia, located in the city of La Paz, and its incorporation into a new mixture. with natural crushed aggregates, in addition to its projection at higher substitution percentages, to propose a formula that can predict its behavior. The natural aggregate was replaced in percentages of 0%, 30% and 60% by RCD coarse aggregate, making a total of 45 specimens. In addition, specimens were made partially replacing the fine aggregate in proportions of 0%,

**Citar como:** Aliaga, R. A. Análisis y proyección de la resistencia a compresión del concreto, utilizando agregados finos y gruesos de los residuos de construcción y demolición (RCD) de la planta piloto de EMAVERDE. *Journal Boliviano De Ciencias*, 19(54). 115-131 <https://doi.org/10.52428/20758944.v19i54.1010>

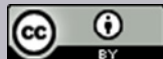
**Revisado:** 18/09/2023

**Aceptado:** 20/11/2023

**Publicado:** 20/12/23

**Declaración:** Derechos de autor 2023 Rodolfo Angel Aliaga Choque, Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento.



25%, 50%, making 51 specimens, the natural aggregates used were characterized and verified for their use in concrete, the specimens made were compression tested after 7, 14 and 28 days. The results show that a maximum compressive strength of 25.35 MPa can be achieved in case of replacing 13% of RCD coarse aggregate, and in case of replacing 23% of RCD fine aggregate a maximum strength of 22.8 MPa can be reached. , so with the present investigation the possibility of reaching values higher than that of a characteristic resistance design (H21) and it is recommended to carry out more experimental studies in the line of research.

**Keywords:** RCD, Recycled aggregates, Environment.

## 1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas el departamento de La Paz ha experimentado un crecimiento en la construcción de edificios altos, lo que requiere una constante demolición de casas, por lo que la generación de escombros es depositados en los lechos de los ríos (Swissinfo, 2021). Actualmente las ciudades de La Paz y El Alto – Bolivia, presentan un crecimiento en tamaño y población, por lo que su desarrollo implica que la tecnología y la construcción se encuentren vinculados para lograr un desarrollo adecuado. Debido al constante crecimiento, es preciso concientizar la explotación desmedida de los recursos naturales e impulsar una gestión de reciclaje, aprovechando los residuos de las construcciones y demoliciones que comúnmente son depositados en los ríos y quebradas de la ciudad, generando así un impacto ambiental negativo (Pereira, 2019).

Antes de la pandemia (COVID-19) se estimaba que la ciudad generaba alrededor de 1.400 toneladas de RCD a diario, ante lo cual, el municipio junto con el apoyo de la cooperación italiana (Cooperazione Internazionale), montó una planta piloto para tratar 60 toneladas por día (Swissinfo, 2021). Con estos alarmantes índices, la Secretaría Municipal de Gestión Ambiental (SMGA) consolidó el proyecto de una planta piloto de transformación de residuos de construcción y demolición, a través de una alianza estratégica con la cooperación italiana ‘Cooperazione Internazionale’ (AMUN, 2021). La planta se encuentra en el barrio de Aranjuez, en la zona sur paceña, en un espacio dentro del vivero municipal (Swissinfo, 2021). Este material producido por la planta es el material base de estudio para la presente investigación.

El objetivo de esta investigación es analizar y proyectar la resistencia a compresión del concreto reutilizando los residuos de construcción y/o demolición (RCD), producidos en la nueva planta de EMAVERDE de la ciudad de La Paz, con un reemplazo del 25 y 50 % para agregado fino además de un 30 y 60 % para el agregado grueso.

### Hipótesis

La resistencia a compresión de un hormigón convencional es la misma que un hormigón que tiene incorporación de RCD de agregado fino y grueso como reemplazo de agregado convencional.

### Hipótesis nula

La resistencia a compresión de un hormigón convencional no es la misma que un hormigón que tiene incorporación de RCD de agregado fino y grueso como reemplazo de agregado convencional.

### Hipótesis alternativa

La resistencia a compresión de un hormigón convencional es la misma que un hormigón que tiene incorporación de RCD para ciertos porcentajes de adición con agregado grueso y para otros porcentajes con agregado fino.

En el artículo “Revisión del estado del arte de las normas y especificaciones actuales relativas a los agregados reciclados de RCD” de Alberte & Handro (2021), se menciona que, si bien se tienen normativas para este procedimiento, el uso de RCD sigue siendo una técnica nueva en ese país, y se hace una recopilación de normativas de distintos países.

Estados Unidos también fue uno de los países pioneros en este tema. Según Alfonso (2005), después de 1982, las normas americanas para pavimentos y hormigones presentan ahora condiciones para el reciclaje de RCD.

En Brasil, la gestión de RCD comenzó unas seis décadas después de Europa (MELO, 2011). En 1991, fue implementado en São Paulo la primera planta de reciclaje de DMC en América Latina. Sin embargo, sus actividades se cerraron en 2002, sin el rango máximo de capacidad de producción.

Dentro de la revisión bibliográfica se observa el reciclaje y la recuperación en países, como Brasil, España, Japón y los Países Bajos, que presentaron valores de 6%, 14%, 81% y 98%, respectivamente. Tal variación se atribuye en el estudio a características particulares de cada país, tales como suministro de materiales de construcción y RCD, disponibilidad de lugares para la deposición y restricciones de las normas, entre otros factores (Alberte & Handro, 2021). En la investigación mencionada se analiza las normativas de otros países en cuanto al uso de RCD, en donde se puede resumir que existen normativas para el uso de este material en Países como: Brasil, Alemania, Austria, Australia, Bélgica, España, Estados Unidos, Holanda, China, Inglaterra, Japón y Suiza. Siendo un estudio publicado el 2021, se hace notar la relevancia de poder contar con una planta trituradora para poder realizar este tipo de investigaciones, se hace notar también que no se tiene aún normado el uso de este material RCD en países de Latinoamérica.

Con experiencias en Latinoamérica, Letelier en el artículo “Áridos reciclados de hormigón con captura de CO<sub>2</sub>” se menciona que a mayor porcentaje de reemplazo de áridos reciclados los estudios demuestran que el comportamiento mecánico o de durabilidad se ve afectado disminuyendo a medida que se aumenta el reemplazo sin embargo con la incorporación de CO<sub>2</sub> esto se puede absorber (Hormigón al día, 2023).

Para el presente artículo, dadas las condiciones de la nueva planta de EMAVERDE, resulta un aporte importante mostrar los resultados obtenidos en laboratorio y poder recomendar porcentajes óptimos de sustitución al usar el agregado grueso y fino de esta planta.

## 2. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la presente investigación se realizó una compilación de datos recabados de laboratorio que incluyen, la resistencia a compresión del concreto, pesos específicos de los agregados nuevos y los agregados RCD analizados.

### Lugar de estudio

Todas las probetas analizadas fueron elaboradas en ambientes de los laboratorios de Ingeniería Civil de la Universidad Privada Del Valle entre las gestiones 2021 y 2022, en la ciudad de La Paz, Bolivia.

PLANTA PILOTO. - La generación de RCD en la ciudad de La Paz llegó a ser de gran magnitud cuando la construcción estaba en mayor crecimiento, hoy en día, aunque la tasa de construcción se haya reducido, aún se generan RCD, donde en muchos casos no se cuenta con medidas de protección ambiental, el cual genera el manejo de este tipo de residuos.

“Hormigones y baldosas son algunos de los productos que se fabricarán en la primera planta de Bolivia de transformación de residuos de construcción y demolición que inauguró este jueves el alcalde Luis Revilla. Tendrá una producción de 64 toneladas por día y permitirá reciclar este tipo de materiales, reutilizarlos y coadyuvar a la mejora del medio ambiente” (AMUN, 2021).

Esta planta piloto fue consolidada por la secretaria municipal de gestión ambiental (SMGA), y la cooperación italiana “Cooperazione Internazionale” (COOPI), y fue financiado con un monto de Bs 1,662,000.00, y se encuentra ubicado en el vivero de Aranjuez (AMUN, 2021) (Figura 1).



**Figura 1.** Planta piloto de transformación de residuos RCD,

**Fuente:** AMUN, 2021



## PREPARACIÓN DE LOS AGREGADOS

El municipio coordina con empresas constructoras o constructores particulares interesados en entregarles los RCD que hubieran generado. El lugar recibe ladrillos, concreto, hormigón y cemento, nada de metales ni madera, ya que el tratamiento consiste básicamente en convertir los materiales en áridos. Una vez que llegan al lugar, los RCD pasan por minuciosas clasificaciones para separar todo lo que no sea escombros e ingresar luego a un molino de trituración. El material llega a otra cinta con un sistema de imanes para retirar los residuos metálicos más pequeños y avanza hacia un sistema de criba donde se vuelve a seleccionar el material para finalmente entrar a un molino de dientes. El resultado se separa en tres subproductos según el diámetro, los más grandes vuelven a ingresar a la planta y los otros dos están listos para su reuso (Swissinfo, 2021).

En entrevista con los responsables del funcionamiento de la planta de trituración de agregados (Oct, 2023), se constató que antes de procesar los agregados de RCD y recepcionar los materiales, se decide si este material a ser procesado es factible para su uso posterior o si este tiene muchas impurezas, los materiales procesados son acopiados según su origen y de esta manera pueden decidir en que tipos de obras se podrá utilizar.

### CEMENTO

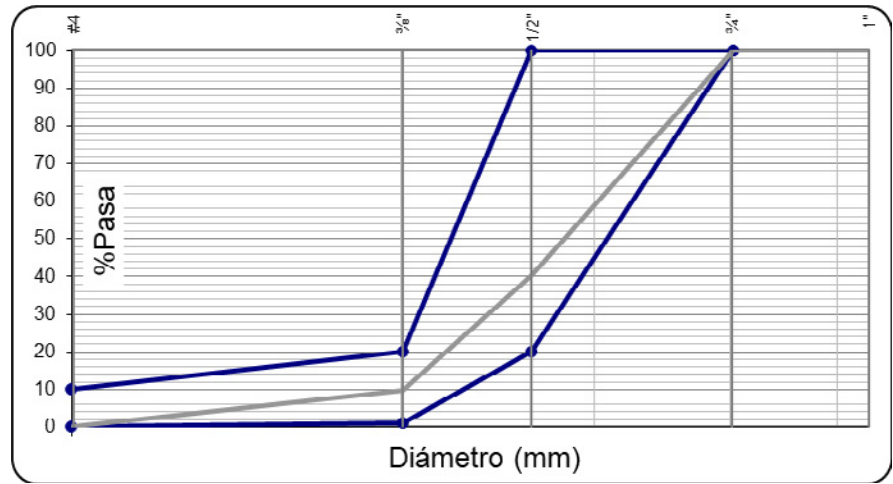
Para la presente investigación se empleó el cemento Viacha IP-40, este se caracteriza por tener Puzolana en un porcentaje máximo del 30%, y su resistencia mínima a los 28 días es de 40 MPa, este cemento fue utilizado para ambas etapas, tanto como cuando se reemplazó el agregado fino como el agregado grueso.

### MUESTRA

Se elaboraron en total 45 probetas cilíndricas de hormigón donde se reemplazó el agregado fino en un 25% y 50% por RCD, y por otro lado se elaboraron 51 probetas cilíndricas de hormigón donde se reemplazó el agregado grueso en un 30% y 60% por RCD. La resistencia característica proyectada en ambos casos fue de 21 MPa.

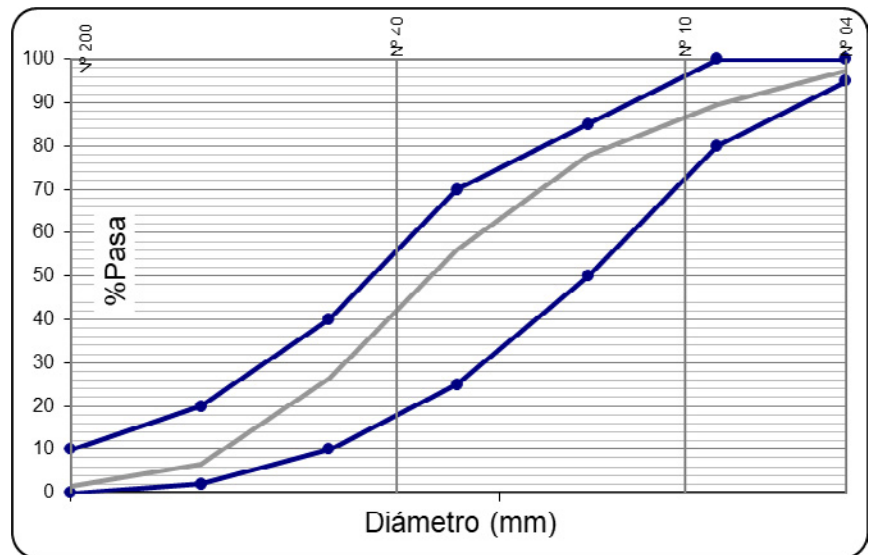
Para lograr una dosificación adecuada y llegar a la resistencia característica necesaria, se realizaron los ensayos de granulometría según la norma C136/C136M-19 (ASTM, 2020), donde se evidencia el cumplimiento tanto para el agregado grueso (TMN ½”) como para el agregado fino tal como se muestra en la Figura 2 y 3.

**Figura 2.** Curvas granulométricas del agregado virgen grueso



Fuente: Elaboración propia en base a resultados de Rodríguez y Aliaga (2023)

**Figura 2.** Curvas granulométricas del agregado virgen fino.



Fuente: Elaboración propia en base a resultados de Rodríguez y Aliaga (2023)

De la misma manera, para poder realizar la dosificación según la normativa 211.1-18 (ACI, 2018) de los materiales es necesario conocer los pesos específicos de la muestra, para los materiales analizados se obtuvieron los resultados presentes en la Tabla 1.

**Tabla N° 1.** Datos para Dosificación con RCD (3/4")

MATERIAL	Peso específico (g/m <sup>3</sup> )	%Hum	%Abs	Peso Unitario compactado (kg/m <sup>3</sup> )	Peso Unitario Suelto (kg/m <sup>3</sup> )
Agua	1.00				
Cemento	3.03				
Grava	2.21	0.294	1.36	1450	1352
Arena	2.54	3.248	3.95	1566	1361
RCD (3/4")	2.30	2.501	6.62	1208	1152

**Fuente:** Elaboración propia en base a resultados de Quispe y Aliaga (2022)

De la misma manera para lograr la dosificación de la mezcla RCD fino con agregado natural (Tabla 2).

**Tabla N° 2.** Datos para Dosificación con RCD (arena)

MATERIAL	Peso específico (g/m <sup>3</sup> )	% Humedad	% Absorción	Peso Unitario compactado (kg/m <sup>3</sup> )	Peso Unitario Suelto (kg/m <sup>3</sup> )
Agua	1.00				
Cemento	3.02				
Grava (1/2")	2.80	0.33	2.38	1456	1344
Arena	2.55	0.42	4.48	1685	1415
RCD (Arena)	2.82	0.15	5.46	1519	1372

**Fuente:** Elaboración propia en base a resultados de Rodríguez y Aliaga (2023)

Con los datos mostrados se procedió a dosificar la mezcla según los parámetros solicitados por la ACI 211. Las Tablas 3, 4 y 5 muestran los resultados de esta dosificación empezando con los materiales utilizados cuando se sustituye la grava por RCD.

**Tabla N° 3.** Cantidad en kg/m<sup>3</sup> para la dosificación utilizando RCD grava

Dosificación	Cemento	Arena	Grava	RCD (grava)
	Kg	Kg	Kg	Kg
H° Convencional	463.36	568.96	848.64	0
H° con 70% Agregado Natural y 30% RCD Grueso	463.36	568.96	594.49	264.5
H° con 40% Agregado Natural y 60% RCD Grueso	463.36	568.96	508.3	354.2

**Fuente:** Elaboración propia en base a resultados de Quispe y Aliaga (2022)

De la misma manera también se muestran los resultados cuando se sustituye la arena por RCD.

**Tabla N° 4.** Cantidad en kg/m<sup>3</sup> para la dosificación utilizando RCD arena

DOSIFICACION	Cemento Kg	Arena Kg	Grava Kg	RCD (arena) Kg
H° Convencional	463.36	765.76	863.41	0
H° con 75% Agregado Natural y 25% RCD fino	463.36	574.32	863.41	191.44
H° con 50% Agregado Natural y 50% RCD Fino	463.36	382.88	863.41	382.88

Fuente: Elaboración propia en base a resultados de Rodríguez y Aliaga (2023)

Debido a los requerimientos para dosificación de hormigones, también se presenta los resultados del ensayo de asentamiento para los 6 tipos de mezclas analizadas.

**Tabla N° 5.** Resultados de asentamiento y relación agua cemento adoptada

DOSIFICACION	Asentamiento	Relación a/c
Hormigón patrón 1	4	0.464
Hormigón con RCD ¾” al 30%	4	0.464
Hormigón con RCD ¾” al 40%	6	0.464
Hormigón patrón 2	4	0.464
Hormigón con RCD Arena al 25%	6	0.464
Hormigón con RCD Arena al 50%	6.7	0.464

Fuente: Elaboración propia.

### PROYECCION DE LOS RESULTADOS

La investigación presentada se desarrolló por medio del método deductivo, partiendo de hechos particulares o concretos para la obtención de conclusiones generales, así mismo para una conformación y aceptación de los valores experimentales se usará el análisis de varianzas ANOVA para la validación de los resultados.

### 3. RESULTADOS

A momento de realizar el vaciado y desencofrado de las estructuras, resulta de interés conocer cómo va evolucionando la resistencia del concreto a los 7 días, por ello se presentan en las Tablas 6 y 7 los resultados de la resistencia a compresión del concreto a esta edad.

**Tabla N° 6.** Resultados del ensayo de resistencia a compresión a 7 días sustituyendo el agregado fino con RCD

Tipo de hormigón	kg/cm <sup>2</sup>	Promedio (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio (MPa)	RCD
H° Convencional	167.09	166.15	16.3	0
	174.05			
	162.36			
	155.42			
	173.24			
	164.72			
	166.18			
H° con 75% Agregado Natural y 25% RCD fino	159.48	159.61	15.7	25
	170.95			
	148.63			
	164.54			
	147.86			
	200.19			
	168.91			
H° con 50% Agregado Natural y 50% RCD Fino	181.29	176.67	17.3	50
	163.34			
	168.34			
	177.97			

Fuente: Elaboración propia en base a resultados de Rodríguez y Aliaga (2023)

**Tabla N° 7.** Resultados del ensayo de resistencia a compresión a 7 días sustituyendo el agregado grueso con RCD

Tipo de hormigón	kg/cm <sup>2</sup>	Promedio (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio (MPa)	%RCD
H° Convencional	243.9	229.72	22.5	0
	215.68			
	229.57			
H° con 70% Agregado Natural y 30% RCD Grueso	185.67	191.44	18.8	30
	205.93			
	182.71			
H° con 40% Agregado Natural y 60% RCD Grueso	128.4	151.43	14.9	60
	184.15			
	141.73			

Fuente: Elaboración propia en base a resultados de Quispe y Aliaga (2022)

A momento de reemplazar el agregado chancado grueso por 30% y 60% de material RCD, y ensayando las probetas a compresión, se obtuvieron los resultados de la Tabla 8.

**Tabla N° 8** Resultados del ensayo de resistencia a la compresión a 28 días sustituyendo el agregado grueso con RCD

RCD 3/4"	Fecha de elaboración	Fecha de rotura	Edad	Diámetro (cm)	Altura H (cm)	H/D	Área (cm <sup>2</sup> )	Peso (g)	Carga de rotura (kg)	Resistencia en kg/cm <sup>2</sup>
Hormigón Convencional	11/10/2021	8/12/2021	28	15.30	30.50	1.99	183.85	12787	42120	229.1
	11/10/2021	8/11/2021	28	15.03	30.00	2.00	177.42	12263	48320	272.34
	11/10/2021	8/11/2021	28	15.25	30.40	1.99	182.65	12650	47030	257.48
Hormigón con 70% Agregado Natural y 30% RCD Grueso	13/10/2021	10/11/2021	28	14.97	30.10	2.01	176.01	12069	44790	254.48
	13/10/2021	10/11/2021	28	15.30	30.50	1.99	183.85	12508	46520	253.03
	13/10/2021	10/11/2021	28	15.00	30.50	2.03	176.71	12379	42420	240.05
Hormigón con 40% Agregado Natural y 60% RCD Grueso	13/10/2021	10/11/2021	28	15.20	30.60	2.01	181.46	12196	33050	182.14
	13/10/2021	10/11/2021	28	15.05	29.95	1.99	177.89	11678	33770	189.83
	13/10/2021	10/11/2021	28	15.25	30.40	1.99	182.65	12098	34420	188.44

Fuente: Elaboración propia en base a resultados de Quispe y Aliaga (2022)

A momento de reemplazar el agregado chancado fino por 25% y 50% de material RCD, y ensayando las probetas a compresión, siguiendo el ensayo ASTM C-39, se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 9.

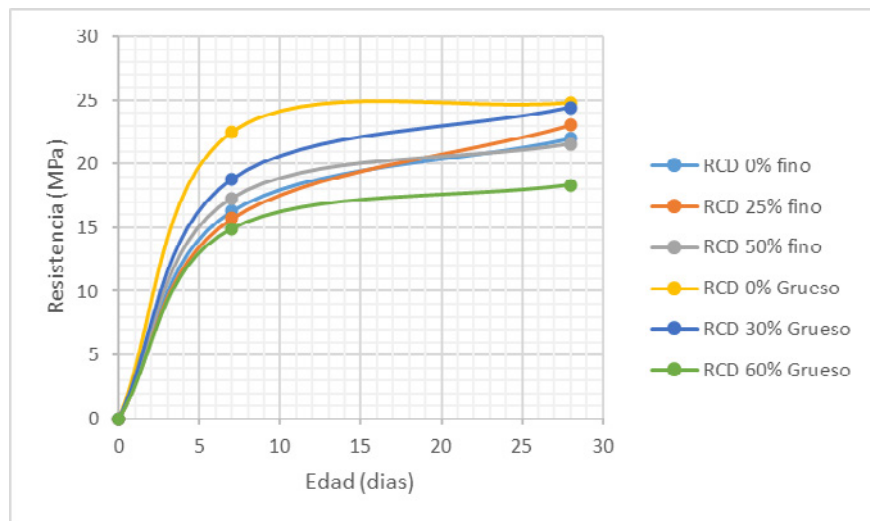
**Tabla N° 9** Resultados del ensayo de resistencia a la compresión a 28 días sustituyendo el agregado fino con RCD

RCD FINO	Fecha de elaboración	Fecha de rotura	Edad	Diámetro (cm)	Altura H (cm)	H/D	Área (cm <sup>2</sup> )	Peso (g)	Carga de rotura (kg)	Resistencia en kg/cm <sup>2</sup>
Hormigón Convencional	3/10/2022	31/10/2022	28	15.15	30.15	1.99	180.27	12453	37670	208.96
	3/10/2022	31/10/2022	28	15.20	30.20	1.99	181.46	12356	45550	251.02
	3/10/2022	31/10/2022	28	15.10	30.10	1.99	179.08	12545	39230	219.06
	3/10/2022	31/10/2022	28	15.30	30.30	1.98	183.85	12478	42850	233.07
	3/10/2022	31/10/2022	28	15.10	30.15	2.00	179.08	12256	37240	207.95
	3/10/2022	31/10/2022	28	15.10	30.25	2.00	179.08	12560	40560	226.49
Hormigón con 75% Agregado Natural y 25% RCD fino	5/10/2022	2/11/2022	28	15.10	30.15	2.00	179.08	12643	48620	271.50
	5/10/2022	2/11/2022	28	15.15	30.40	2.01	180.27	12653	45330	251.46
	5/10/2022	2/11/2022	28	15.10	30.10	1.99	179.08	12665	42420	236.88
	5/10/2022	2/11/2022	28	15.30	30.20	1.97	183.85	12626	37790	205.55
	5/10/2022	2/11/2022	28	15.10	30.10	1.99	179.08	12654	38970	217.61
	5/10/2022	2/11/2022	28	15.10	30.25	2.00	179.08	12459	40580	226.60

RCD FINO	Fecha de elaboración	Fecha de rotura	Edad	Diámetro (cm)	Altura H (cm)	H/D	Área (cm <sup>2</sup> )	Peso (g)	Carga de rotura (kg)	Resistencia en kg/cm <sup>2</sup>
Hormigón con 50% Agregado Natural y 50% RCD Fino	10/10/2022	7/11/2022	28	15.10	30.35	2.01	179.08	12524	38280	213.76
	10/10/2022	7/11/2022	28	15.20	30.30	1.99	181.46	11968	45550	251.02
	10/10/2022	7/11/2022	28	15.10	30.15	2.00	179.08	12075	35760	199.69
	10/10/2022	7/11/2022	28	15.15	30.25	2.00	180.27	11998	38170	211.74
	10/10/2022	7/11/2022	28	15.25	30.30	1.99	182.65	12067	37890	207.45
	10/10/2022	7/11/2022	28	15.15	30.10	1.99	180.27	12356	42540	235.98

Fuente: Elaboración Propia en base a resultados de Rodríguez, Aliaga 2023

Es necesario hacer notar que en la presente investigación para un análisis completo se realizaron la rotura de probetas también a 7 y 14 días, que no se muestran en tablas pero que sí ayudaron a validar la evolución de la resistencia a compresión a esas edades como se muestra en el Gráfico 1.



**Gráfico 1** Evolución de la resistencia a compresión usando RCD fino y grueso para 7 y 28 días

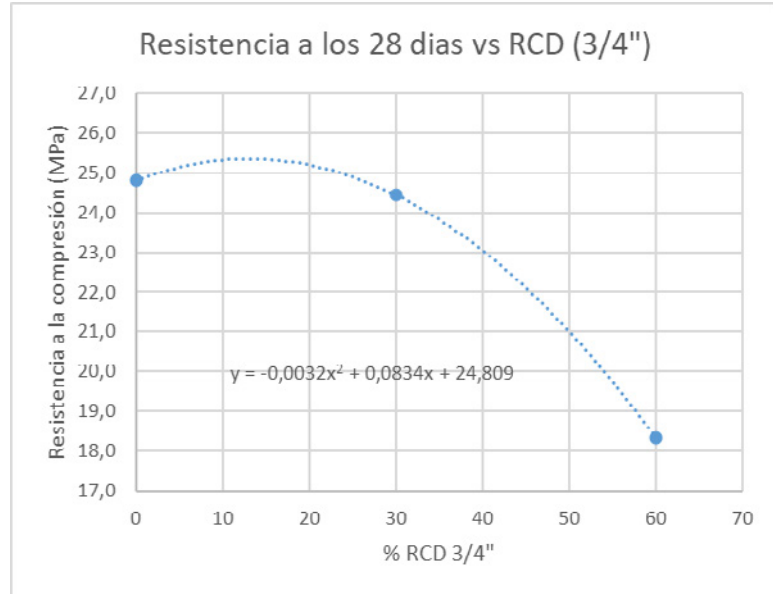
Fuente: Elaboración propia con resultados de Rodríguez y Aliaga (2023) y Quispe y Aliaga (2022)

#### 4. DISCUSIÓN, DESARROLLO Y ANÁLISIS

##### 4.1 Análisis del RCD proveniente del agregado grueso

En el Gráfico 2 se muestran las correlaciones encontradas:

**Gráfico 2.** Resistencia a la compresión a los 28 días vs %RCD (3/4")



Fuente: Elaboración Propia

Siendo que la resistencia de diseño buscada es de 21 MPa, a continuación se realiza un análisis para encontrar el porcentaje de RCD mínimo con el que se obtendría esta resistencia a partir de la ecuación de correlación.

$$y = -0.0032x^2 + 0.0834x + 24.809$$

siendo  $y$ : Resistencia ,  $x$ : %RCD

$$21 = -0.0032x^2 + 0.0834x + 24.809$$

Resolviendo la ecuación se obtiene que, para llegar a una resistencia de 21 MPa, el límite de incorporación de RCD sería de  $\approx 49.9\%$

Entonces si se desea incorporar el agregado grueso proveniente del , lo máximo que se podría utilizar es del RCD  $\approx 50\%$  para llegar a una resistencia de 21 MPa.

Con la misma ecuación encontrada, hallamos el porcentaje de RCD con el que se obtendría la máxima resistencia.



$$y = -0.0032x^2 + 0.0834x + 24.809$$

$$y' = -0.0064x + 0.0834$$

Igualamos a 0

$$-0.0064x + 0.0834 = 0$$

Y resolviendo la ecuación se tiene:

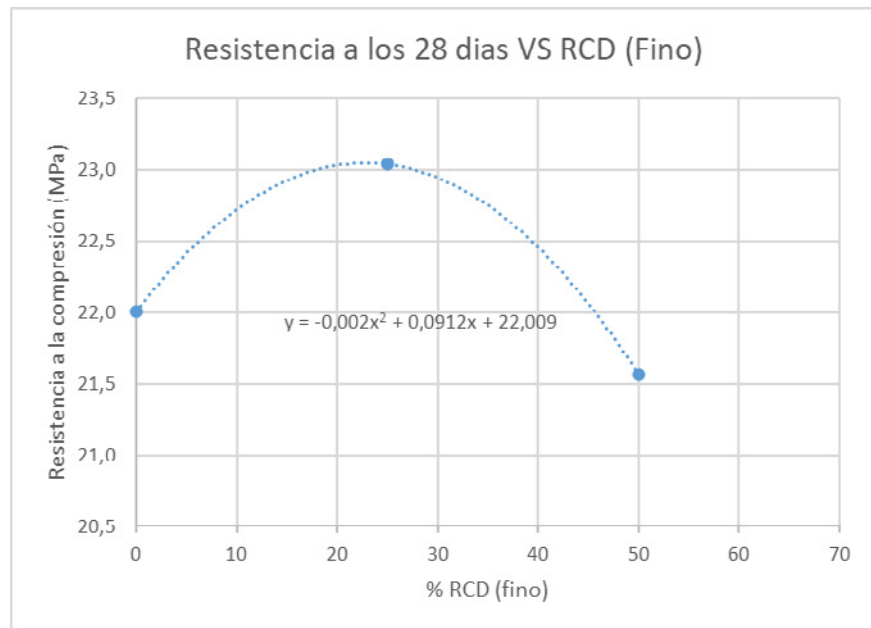
$$x = 13.03\%$$

Entonces para obtener la mayor resistencia a compresión, usando RCD como sustituto del agregado grueso es del 13%, al utilizar este porcentaje se obtendría una resistencia de 25.35 MPa.

#### 4.2 Análisis del RCD proveniente del agregado fino

Las correlaciones encontradas se presentan en el Gráfico 3.

**Gráfico 3.** Resistencia a la compresión a los 28 días vs %RCD (Fino)



Fuente: Elaboración Propia con datos de laboratorio

Siendo que la resistencia de diseño buscada es de 21 MPa, a continuación se hace un análisis para encontrar el porcentaje de RCD mínimo con el que se obtendría esta resistencia a partir de la ecuación de correlación.

$$y = -0,002x^2 + 0,0912x + 22,009$$

siendo  $y$ : Resistencia ,  $x$ : %RCD

$$21 = -0.002x^2 + 0.0912x + 22.009$$

$$x = 54.8\%$$

Se tienen mejores resultados al incorporar el agregado fino que el agregado grueso por lo que en este caso con la ecuación se tendrá una proyección para llegar a la resistencia mínima buscada.

En este caso para llegar a los 21 MPa, se podría utilizar hasta un porcentaje de RCD del 55%.

Analizamos la ecuación obtenida para obtener y aprovechar al máximo el material obtenido.

$$21 = -0.002x^2 + 0.0912x + 22.009$$

Derivamos e igualamos a "0"

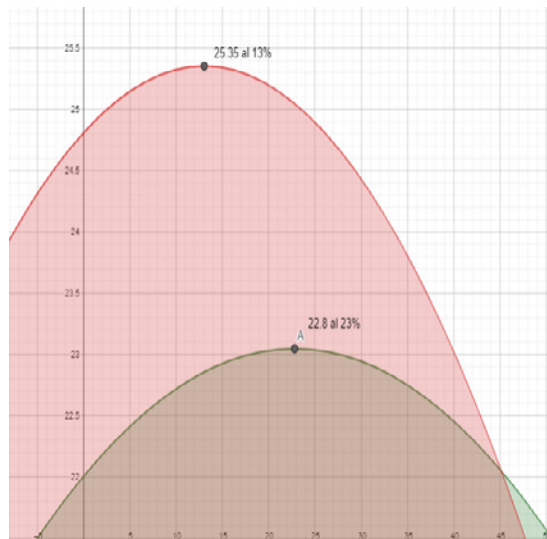
$$-0.004x + 0.0912 = 0$$

Resolviendo

$$x = 23\%$$

Entonces para obtener la resistencia máxima al utilizar el RCD como sustituto del agregado fino es del 23% y con este porcentaje de RCD, se obtendría una resistencia de 22.8 MPa. El Gráfico 4 presenta dicho análisis.

**Gráfico 4.** Calculo de la resistencia máxima (MPa) y % RCD óptimo

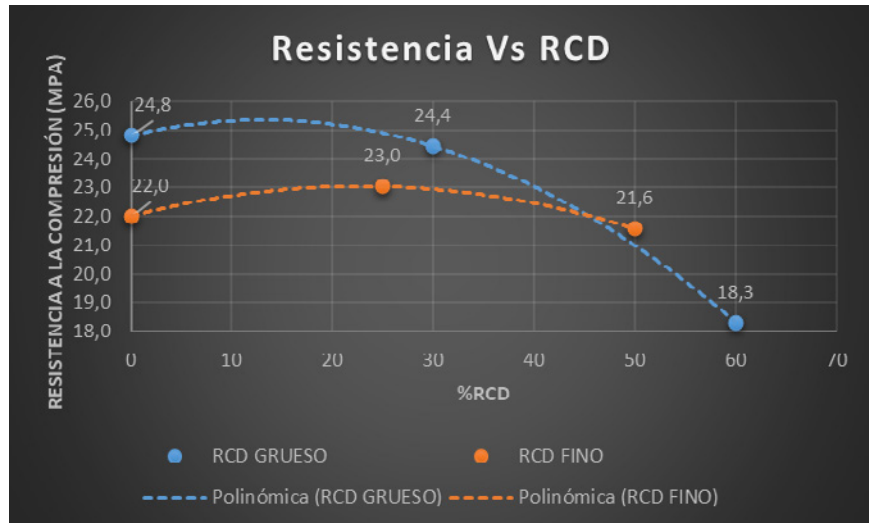


Fuente: Elaboración Propia con datos de laboratorio

### 4.3 Correlación entre análisis

Para realizar un análisis crítico se presenta en el Gráfico 5 ambas correlaciones.

**Gráfico 5.** Cálculo de la resistencia máxima y % RCD óptimo



Fuente: Elaboración propia

De la gráfica anterior y proyectando resistencias se puede obtener que el punto de intersección al 45% presentaría la misma resistencia (22.05) en caso de reemplazar el agregado fino RCD o el agregado grueso RCD, valido para los agregados y cementos estudiados en la presente investigación.

### 5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran la influencia en la resistencia a compresión del concreto con la incorporación de RCD proveniente de la trituración de los residuos de demolición que tiene agregado grueso (tamaño máximo nominal de 3/4 de pulgada) y arena (agregado fino), además se logra predecir su comportamiento ante la incorporación de mayor porcentaje de sustitución, los resultados obtenidos y mostrados en este artículo son aplicables para el RCD obtenido en las épocas de estudio y se recomienda seguir estudiando el comportamiento del hormigón ante distintos tipos de RCD, además que para que se tenga un uso masivo de este material, se sugiere que la planta que procesa los agregados, pueda realizar una clasificación de este material a momento de acopiarlo.

Se nota que con una incorporación de 45 %, de RCD ya sea proveniente del agregado fino o grueso, se llegaría a una resistencia de 22.05 MPa mayor a la media esperada (21 MPa), sin embargo dada la variabilidad de los áridos que procesa la planta se recomienda que para futuras investigaciones se comprueben estos resultados experimentalmente, basándose en porcentajes mayores al 10 % al sustituir el agregado grueso o fino RCD.

Para optimizar materiales se tienen las siguientes conclusiones.

- La mayor resistencia que se puede obtener al reemplazar RCD de agregado grueso es de 25.35 MPa sustituyendo el 13.03% de este material.
- La mayor resistencia que se puede obtener al reemplazar RCD de agregado fino es de 22.80 MPa sustituyendo el 23.00% de este material.

Los valores presentados en la presente investigación, permiten tomar decisiones al personal que opera la primera planta piloto de transformación de residuos de construcción y demolición del país ubicada en la ciudad de La Paz, y controlar su producción, debido a que este tipo de plantas, al igual que una chancadora convencional, puede regular la trituración para producir, ya sea más agregado fino o más agregado grueso, es necesario adicionar que resulta primordial el realizar siempre una caracterización de los agregados RCD a medida que se vayan produciendo, ya que para la dosificación de hormigones, es necesario conocer su granulometría, pesos específicos, absorción y porcentaje de humedad, como se mostró en esta investigación.

Dados los porcentajes bajos estudiados en la presente investigación, no se realizó el ensayo de desgaste los ángeles, los resultados de este ensayo tendrán mas relevancia en caso de incrementar los valores de RCD para lo cual se sugiere realizar este ensayo en el agregado reciclado.

En un inicio la administración de la planta piloto de RCD consideraba que los materiales recuperados fueran empleados en hormigones de baja resistencia. Sin embargo, la presente investigación demostró la posibilidad de alcanzar valores mayores al de un diseño de resistencia característica (H21). Por lo que, se recomienda realizar más estudios experimentales en la línea de investigación.

## **6. AGRADECIMIENTOS**

El presente artículo de investigación no hubiera sido posible sin el apoyo del encargado de laboratorio que apoyaron al desarrollo de los tesis durante su estancia en laboratorio y la ejecución de los ensayos en los periodos 2021 y 2022.

También se agradece el apoyo de la planta de Residuos de EMAVERDE por proporcionar el material base para el desarrollo de la presente investigación.

De la misma manera se agradece a las autoridades de la Facultad de Tecnología de la Universidad Privada del Valle por el compromiso con la publicación de artículos que son de interés a nivel nacional.

## 7. REFERENCIAS

ASTM (2020). ASTM C136/C136M-19: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. DOI: [https://doi.org/10.1520/C0136\\_C0136M-19](https://doi.org/10.1520/C0136_C0136M-19)

ACI 211.1(2018). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete.

AMUN, Agencia municipal de noticias (2021) La primera planta piloto de transformación de residuos de construcción y demolición del país está en La Paz Disponible en: La primera planta piloto de transformación de residuos de construcción y demolición del país está en La Paz | Agencia Municipal de Noticias

AFFONSO, F. J. A (2005). Caracterização de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para uso em camadas drenantes de aterros sanitários. Rio de Janeiro, 2005. (Tesis de maestría en Ingeniería Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Alberte, E. P. V., & Handro, J. B.. (2021). Estado do conhecimento acerca de especificações técnicas e normativas para agregados reciclados de RCD. Ambiente Construído, 21(3), 305–320. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000300553>.

MELO, A. V. S (2011). Diretrizes para a produção de agregado reciclado em usinas de reciclagem de resíduos da construção civil. Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

Rodríguez Ruiz, C.F., Aliaga Choque, R. A., (2023). Estudio de la resistencia a compresión del concreto con reemplazo parcial del agregado fino por residuos de construcción y/o demolición (RCD) [Proyecto de grado, Universidad Privada del Valle]. La Paz

Quispe Céspedes, A.G., Aliaga Choque, R. A., (2022). Análisis de la resistencia a compresión del concreto, reutilizando los residuos de construcción y/o demolición como agregado en distintos porcentajes de sustitución, con y sin aditivo. [Proyecto de grado, Universidad Privada del Valle]. La Paz.

Pereira R. (2019). La Paz inaugura la primera planta de transformación de residuos de construcción. Recuperado el 31 de Octubre de 2023 de: CADECOCRUZ • Cámara de la Construcción de Santa Cruz

Revista hormigón al día N°81 (Julio 2023) [https://issuu.com/ich\\_mkt/docs/had\\_81/10](https://issuu.com/ich_mkt/docs/had_81/10)

Swissinfo (2021). La economía circular se abre campo en La Paz con el reciclaje de escombros

Disponible en: La economía circular se abre campo en La Paz con el reciclaje de escombros - SWI swissinfo.ch



**SEDE CENTRAL COCHABAMBA**

Campus Universitario Tiquipaya  
c. Guillermina Martínez s/n  
Telf: (591 - 4) 4318800

**Torre Académica América**

Av. América N°165 entre Túpac Amaru y Av. Libertador Bolívar  
Telf: (591 - 4) 4150300

**Edif. Polifuncional Ayacucho**

Av. Ayacucho N°256  
Telf: (591 - 4) 4150200

**SEDE ACADÉMICA LA PAZ**

Campus Miraflores  
Av. Argentina N° 2083 esq. Nicaragua  
Telf: (591 - 2) 2246725/6/7

**SEDE ACADÉMICA SUCRE**

Campus Las Delicias  
Pasaje Guillermina de Ruiz N° 1 (Zona Bajo Delicias)  
Telf: (591 - 4) 6441664

**SEDE ACADÉMICA TRINIDAD**

Campus El Gran Paitití  
Av. Reyes s/n  
Telf: (591 - 3) 4621238

**SEDE ACADÉMICA SANTA CRUZ**

Campus Eco Smart  
Av. Banzer - Séptimo anillo y Av. Juan Pablo II