



Investigación aplicada e innovación

Volumen 19, 2025 Lima, Perú • ISSN: 1996-7551 - e-ISSN: 2707-9368

Sergio Rojas y Yorsel Mayhua

Neutralización y sulfuración del drenaje ácido de mina procedente de una unidad minera de Cerro de Pasco

Pág. 7

Jaime Gómez y Silvia Montoya

Implementación de un Skill de Alexa como asistente virtual por voz para la validación de la estructura de los cursos en LMS Canvas

Pág. 17

Tecsup®

Director: Antonio Lazo de la Vega, *Tecsup*

Editor en jefe: Hernando Prada, *Tecsup*.

Comité editorial: Aurelio Arbildo, *Inducontrol*; Carlos Hernández, *Alicorp*; Elena Flores, *UTEC*; Jack Vainstein, *Vainstein Ingenieros*.

Coordinador editorial: Diego Nishimazuruga Lima

Colaboradores: Alexis Luyo Gonzales, Alfredo Pacheco Effio, Brian Hernández Riva, Bruno Cárdenas Bullón, Carmen Flores Barreda, César Manyari Campos, Claudia Enríquez Rivera, Edwin Huerto Naupay, Evelyn Ruiz Castillo, Flor Balbín López, Jaime Gómez Marín, Jan Beeck Pepper, Javier de Rojas Iparraguirre, Jorge Pérez Villa, José Espinoza Melgarejo, Laurence Salmón Barrantes, Luis Huere Anaya, Luisa Turkowsky Vizcarra, Mauricio Surco Valenzuela, Raúl López Amésquita, Roberto León Leyva, Ruben Coágula Coágula, Silvia Montoya Saldaña, Walter Moncada Rubio, Willy Ramírez Quiroz, Wilson Saucedo León.

Correctora de estilo: Laura Gómez Rojas

Diagramación: Tarea Asociación Gráfica Educativa

Hecho el depósito legal en la Biblioteca Nacional del Perú: 2007-04706

Publicado en diciembre 2025

Tecsup:

Sede Norte:

Vía de Evitamiento s/n Víctor Larco Herrera. Trujillo, Perú.

Sede Centro:

Av. Cascanueces 2221 Santa Anita. Lima, Perú.

Sede Sur:

Urb. Monterrey Lote D-8 José Luis Bustamante y Rivero. Arequipa, Perú.

Publicación:

Tecsup se reserva todos los derechos legales de reproducción del contenido, sin embargo autoriza la reproducción total o parcial para fines didácticos, siempre y cuando se cite la fuente.

Publicación Indexada en Latindex



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

Suscripciones:

investigacioneinnovacion@tecsup.edu.pe

Página Web:

<https://revista.tecsup.edu.pe>

Nota: Las ideas y opiniones contenidas en los artículos son de responsabilidad de sus autores y no refleja necesariamente el pensamiento de nuestra institución.



Revisa todas las ediciones de la Revista I+i en versión digital

ÍNDICE

Neutralización y sulfuración del drenaje ácido de mina procedente de una unidad minera de Cerro de Pasco

..... Sergio Rojas
..... Yorsel Mayhua

7

Implementación de un Skill de Alexa como asistente virtual por voz para la validación de la estructura de los cursos en LMS Canvas

..... Jaime Gómez Marín
..... Silvia Mariana Montoya Saldaña

19

¿Los resultados financieros influyen en las cotizaciones? evidencias desde la BVL con Estudio de Eventos y Ciencia de Datos

..... Roberto León Leyva

31

Impacto de la gestión del MTBF y MTTR en el índice de disponibilidad de camiones mineros Caterpillar 785-793

..... Efraín Cirineo
..... Fernando Chahud

51

Análisis de datos de los procesos legales de alimentos para menores en una Corte Superior de Justicia del sur del Perú

..... Victor Andree Polar
..... Karin del Carpio
..... Jennifer Yessenia Polar

61

Armado de estructuras didácticas con movimiento para la enseñanza de la física realizado en Tecsups sede Arequipa durante 2024

..... Juan Peñaloza

75

Evaluación de contaminación y confort del peatón en Tecsups mediante mediciones en campo y modelamiento numérico con ENVI-met

..... Lourdes Díaz Espinoza
..... Daniel Horna Muñoz

87

Análisis comparativo de los modelos matemáticos de Fred Bond, Steve Morrell y Roddy Valle, sobre el consumo energético aplicado a la molienda de minerales

..... Luis Huere
..... José Sernaque
..... Caleb Carbajal

101

Mine to pad en minería aurífera: estudio de caso (1996-2008) sobre fragmentación para lixiviación sin chancado en Perú

..... Dino Yancachajlla Tito

117

Implementación de modelos de aprendizaje automático para predecir la deserción estudiantil en Tecsups, 2024

..... José Luis Espinoza Melgarejo

129

Recuperación sostenible de carragenina a partir de residuos de *Chondracanthus chamissoi* en Pisco, Perú

..... Laurence R. Salmon
..... Anderson J. Álvarez

143

Capacitaciones en seguridad y salud en el trabajo: análisis comparativo entre gamificación y métodos convencionales

..... Fernando Hugo Humpiri Montoya

151

Lego® Serious Play®: Una nueva forma de enseñanza

..... José Eduardo Rojas Gómez
..... Raúl Alexander Cayra Sutta

163



ABRIL

Apreciados lectores,

Con gran satisfacción les presentamos el volumen 19 de la revista I+i, reafirmando nuestro compromiso con la difusión de **investigaciones aplicadas que impulsan la innovación y generan soluciones concretas** a los desafíos que enfrenta nuestra sociedad y la industria. En esta edición anual, exploramos cómo la ingeniería, la tecnología y el análisis de datos se fusionan para crear un impacto significativo.

Este volumen reúne 13 artículos que son testimonio de la rigurosidad y el enfoque práctico de nuestra comunidad. Comenzamos con la **Transformación Educativa y la Inteligencia Artificial para el Futuro del Trabajo**. Resaltamos artículos que exploran el potencial de un Asistente virtual con IA basado en un modelo open source para el aprendizaje personalizado. Además, se presentan nuevas metodologías pedagógicas como Lego® Serious Play® y el uso de estructuras didácticas con movimiento para la enseñanza de la física, complementado con un análisis comparativo de la Gamificación en capacitaciones de Seguridad y Salud en el Trabajo.

A continuación, la **Ciencia de Datos y la Optimización de Procesos** ocupa un lugar central, demostrando el poder de la tecnología en la solución de problemas. Este enfoque se manifiesta en trabajos esenciales para la industria minera, como la optimización de la fragmentación para lixiviación de oro y el impacto de la gestión del MTBF y MTTR en camiones mineros. La Ciencia de Datos también se aplica a escenarios sociales y económicos con el Modelo de clasificación para predecir la deserción estudiantil y un estudio de resultados financieros y cotizaciones en la BVL. Además, se presenta una aplicación de Python y Google Colab para el análisis de datos en el sistema judicial, junto al análisis de modelos matemáticos sobre el consumo energético aplicado a la molienda de minerales.

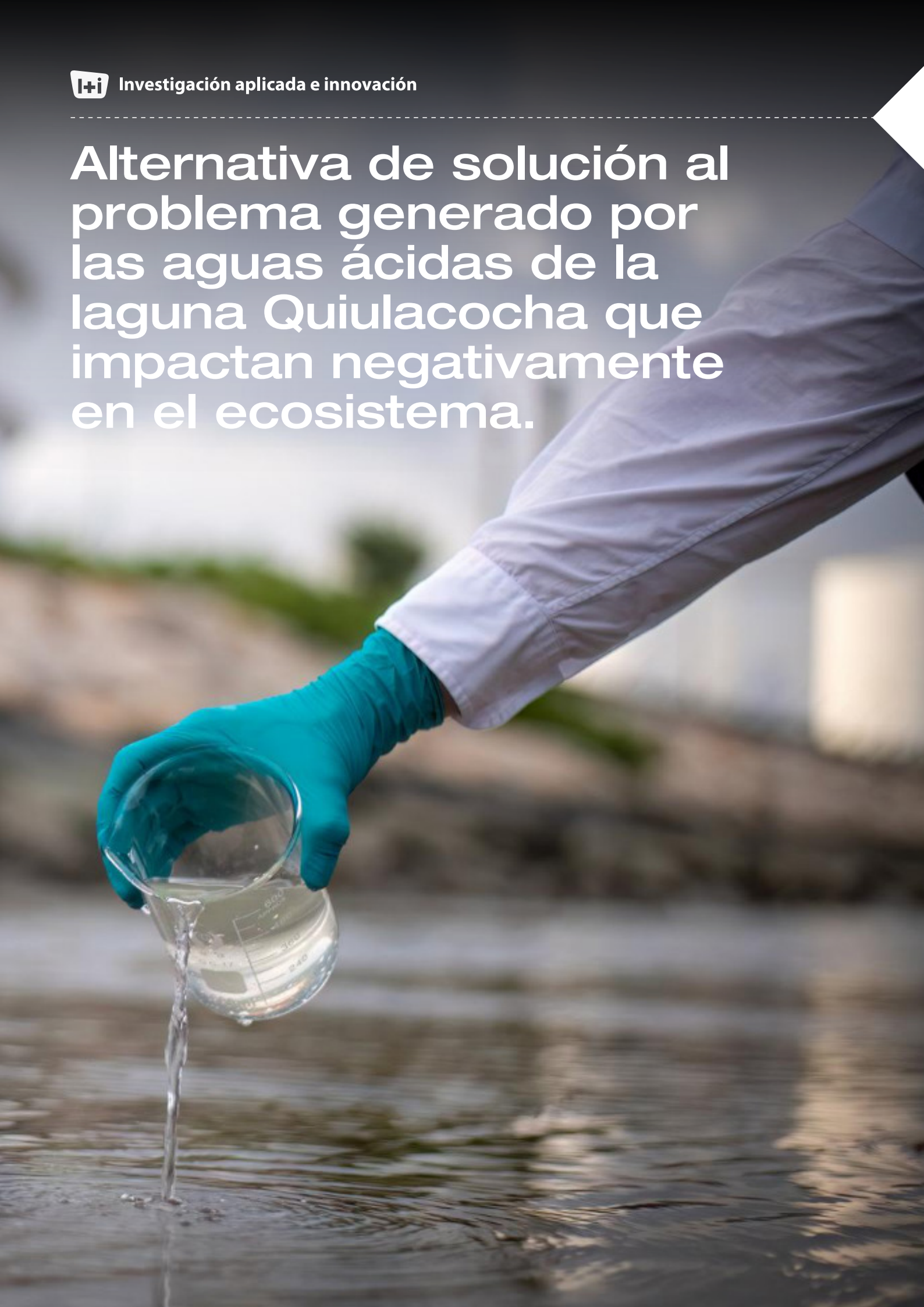
Finalmente, el tema de la **Sostenibilidad y la Gestión de Recursos** emerge con fuerza, posicionando la investigación al servicio del planeta. Destacamos investigaciones cruciales como la Neutralización y sulfuración del drenaje de ácido de mina, un aporte vital para la remediación ambiental. En esta misma línea, encontramos trabajos sobre la Carragenina de alga roja Yuyo para una optimización sostenible, y un análisis de Contaminación y Confort del Peatón en Tecsup mediante modelamiento numérico, reflejando una profunda responsabilidad con el medio ambiente y la salud pública.

Extendemos nuestro sincero agradecimiento a los autores, cuyo trabajo fundamenta la excelencia de I+i, y al equipo editorial por su dedicación. Los invitamos a sumergirse en estos hallazgos y, sobre todo, a **participar activamente en la siguiente edición** de nuestra revista, enviando sus valiosos trabajos de investigación aplicada para seguir enriqueciendo esta plataforma.

Sigamos utilizando la investigación y la innovación para construir un futuro más sostenible, eficiente e inteligente.

Atentamente,
Antonio Lazo de la Vega Velarde
Director Académico Nacional

Alternativa de solución al problema generado por las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha que impactan negativamente en el ecosistema.



Neutralización y sulfuración del drenaje ácido de mina procedente de una unidad minera de Cerro de Pasco

Neutralization and Sulfidation of Acid Mine Drainage from a Mining Unit in Cerro de Pasco

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo proponer una alternativa de solución al problema generado por las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha, que desembocan en el río San Juan e impactan negativamente en el ecosistema, principalmente en la población del distrito de Simón Bolívar, provincia de Pasco. La metodología aplicada tuvo un enfoque cuantitativo, de nivel explicativo y experimental; consistió en la toma de muestras compuestas de drenaje ácido de mina en un punto de la laguna Quiulacocha para su caracterización. Se encontró que los valores de los parámetros fisicoquímicos estaban por encima de los LMP, de acuerdo con el D. S. 010-2010-MINAM, y de los ECA, categoría 3, según el D. S. 004-2017-MINAM. Para el tratamiento se utilizó el método de alcalinización con una solución de cal al 10 % m/v, seguido de una etapa de sulfuración con una solución de sulfhidrato de sodio (NaSH) al 10 % m/v, con la finalidad de incrementar el porcentaje de remoción de los metales hierro, cobre, plomo y zinc. Los resultados del tratamiento en la etapa de alcalinización superaron ligeramente las normas ambientales para el hierro, el cobre y el zinc, pero no para el plomo. Con la etapa adicional de sulfuración, la remoción de los metales superó ampliamente lo exigido por las normas ambientales: para el hierro fue del 98,30 %, para el cobre del 99,83 %, para el plomo del 99,48 % y para el zinc del 66,59 %. En conclusión, las aguas de la laguna Quiulacocha tienen una alta carga de metales pesados, altamente contaminantes y muy peligrosos para la salud de la población. Asimismo, el método de alcalinización con cal al 10 % m/v, con una etapa adicional de sulfuración con NaSH al 10 % m/v, constituye una buena alternativa para neutralizar las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha y prevenir la contaminación de las aguas del río San Juan, en el distrito de Simón Bolívar, Pasco.

ABSTRACT

This study proposes an alternative solution to the environmental problems caused by the acidic waters of the Quiulacocha Lagoon, which discharge into the San Juan River and negatively affect the ecosystem, particularly the population of the Simón Bolívar district in the province of Pasco. A quantitative, explanatory, and experimental methodology was applied, consisting of collecting composite samples of acid mine drainage from a point in the Quiulacocha Lagoon for characterization. The physicochemical parameters were found to exceed the Maximum Permissible Limits (LMP) established in D.S. 010-2010-MINAM and the Environmental Quality Standards (ECA), Category 3, defined in D.S. 004-2017-MINAM.

For the treatment, an alkalization method using a 10% m/v lime solution was applied, followed by a sulfidation stage using a 10% m/v sodium hydrosulfide (NaSH) solution to increase the removal efficiency of iron, copper, lead, and zinc. In the alkalization stage, the results slightly exceeded environmental standards for iron, copper, and zinc, but not for lead. With the additional sulfidation stage, metal removal levels far surpassed regulatory requirements: 98.30% for iron, 99.83% for copper, 99.48% for lead, and 66.59% for zinc.

In conclusion, the waters of the Quiulacocha Lagoon contain high concentrations of heavy metals that pose serious risks to environmental and public health. The alkalization method with 10% m/v lime, combined with an additional sulfidation stage using 10% m/v NaSH, represents a viable alternative for neutralizing the acidic waters of the lagoon and preventing contamination of the San Juan River in the Simón Bolívar district, Pasco.



Palabras Claves

Drenaje ácido de mina, alcalinización, sulfuración.

Key words

Acid mine drainage, alkalization, sulfidation.

INTRODUCCIÓN

La minería es una de las actividades económicas más importantes de nuestro país y también a nivel mundial. Sin embargo, esta actividad genera una gran cantidad de residuos denominados pasivos ambientales, los cuales comprometen la calidad de vida de las futuras generaciones. Estos pasivos pueden ser botaderos, relaves, escorias o rípios, entre otros, que constituyen potenciales generadores de drenaje ácido de mina (DAM). Si no son tratados oportunamente, producen daños irreparables en el ecosistema.

Las actividades mineras generan DAM debido a la percolación del agua en los minerales estériles sulfurados que quedan después de la extracción de los metales y que son acumulados cerca de las minas. Estos, al combinarse con el oxígeno del aire, producen sulfatos y ácido sulfúrico. Como resultado, el DAM, por su acidez, lixivia los metales pesados presentes en las rocas. En consecuencia, el agua, además de su acidez, presenta contaminantes constituidos por metales pesados disueltos cuyas concentraciones se encuentran por encima de los límites exigidos por las normas ambientales.

La presente investigación tuvo el propósito de abordar el problema generado por el DAM, principalmente en las aguas del río San Juan, en el distrito de Simón Bolívar, provincia de Pasco, que actúan como receptoras de las aguas ácidas provenientes de la laguna Quiulacocha. Las aguas ácidas fueron neutralizadas con cal y, posteriormente, tratadas con sulfhidrato de sodio (NaSH), lo cual permitió una mayor eficiencia en la remoción de los metales pesados presentes. De esta forma se logró reducir la acidez y la cantidad de metales pesados contenidos en el drenaje ácido de mina y cumplir con las normativas vigentes: D. S. 010-2010-MINAM y D. S. 004-2017-MINAM, para su disposición final en el río San Juan.

Los objetivos de la presente investigación son los siguientes:

Objetivo general

- Evaluar el tratamiento mediante neutralización con una etapa adicional de sulfuración para el drenaje ácido de mina procedente de la unidad minera de Cerro de Pasco.

Objetivos específicos

- Determinar la dosis óptima de cal en la etapa de alcalinización para la remoción de los metales del drenaje ácido de mina procedente de la unidad minera de Cerro de Pasco.
- Determinar la dosis óptima de sulfhidrato de sodio (NaSH) en la etapa de sulfuración para la remoción de los metales del drenaje ácido de mina de la unidad minera de Cerro de Pasco.
- Determinar el gradiente de velocidad en la etapa de sulfuración para la remoción de los metales del drenaje ácido de mina de la unidad minera de Cerro de Pasco.

FUNDAMENTOS

Antecedentes

Las aguas ácidas de mina están estrechamente ligadas a la actividad minera, que data de miles de años atrás. El fenómeno natural de las aguas ácidas de mina puede ocurrir sin intervención humana, aunque su impacto ambiental significativo se inicia con

la minería a gran escala. Hace cientos de años se descubrieron numerosos yacimientos minerales por la presencia de agua de drenaje rojiza, que indicaba la existencia de minerales sulfurados; sin embargo, hace solo alrededor de veinte años se desarrolló una preocupación ambiental asociada con esta agua ácida, rica en metales disueltos. A estas aguas se les conoce como «drenaje ácido de mina» o DAM [2].

La importancia del estudio de sus impactos sobre el medio ambiente radica en que los drenajes ácidos son efluentes de trabajos mineros que contaminan fuentes hídricas superficiales y cuerpos de agua subterráneos, pues presentan valores de pH entre 1,5 y 6, aportan una gran cantidad de acidez debida a la formación de ácido sulfúrico y elevadas concentraciones de metales pesados como cobre, plomo o arsénico, entre otros, que son solubles a valores de pH bajos. Además, los DAM generan sedimentos de color rojo anaranjado debido a precipitados de hierro y sulfatos que ocupan los espacios destinados al desove de los peces, se introducen entre sus branquias y cubren los detritos que sirven de alimento. Por otra parte, la vegetación terrestre que entra en contacto con los DAM también se ve ampliamente afectada, ya que la acidez y la alta concentración de iones como sulfatos y cloruros impiden su crecimiento normal [5].

De lo expuesto líneas arriba, se desprende la importancia de tratar el drenaje ácido de mina antes de su disposición final en un cuerpo de agua, con el fin de prevenir el impacto negativo en el ambiente y en la salud de las personas.

Los drenajes ácidos de mina tratados pueden descargarse directamente en cuerpos de agua, como ríos o lagos; también pueden ser introducidos en los acuíferos de manera directa o indirecta con la finalidad de incrementar la disponibilidad de los recursos hídricos [7]. El drenaje ácido de mina tratado debe cumplir ciertos requisitos antes de ser descargado en los cuerpos receptores. En el Perú, dichos requisitos se establecen en las normas ambientales, como los Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas, definidos en el D. S. 010-2010-MINAM, y el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para el agua, regulado por el D. S. 004-2017-MINAM. En algunos países, como México y Estados Unidos, las aguas tratadas se disponen mediante su reinyección al manto acuífero a través de lagunas de recarga superficial a cielo abierto [3]. Para garantizar el cumplimiento de las normas ambientales y prevenir los impactos negativos en el ambiente, se realiza un monitoreo y muestreo periódico.

Bases teóricas

Tratamiento de drenaje ácido de mina

Se basan en la neutralización del DAM con sustancias alcalinas, generalmente cal, aunque también se emplean cal hidratada, caliza hidratada, sosa cáustica o carbonato sódico. En condiciones adecuadas de pH, los metales precipitan como hidróxidos insolubles: el ion ferroso (Fe^{2+}) se oxida a ion férrico (Fe^{3+}), luego se convierte en hidróxido férrico y precipita a un pH mayor de 8,5. Junto con el hierro, otros metales como plomo, cobre y zinc, entre otros presentes en el DAM, también tienden a precipitar como hidróxidos u otros compuestos. En la alcalinización del DAM se suele trabajar con un pH promedio de 9, debido a que, en condiciones de mayor basicidad, aumenta la solubilidad de algunos metales como el plomo y el zinc [5].

En general, el tratamiento del DAM se basa en la precipitación de

los metales como hidróxidos y se realiza en tres pasos: oxidación (para convertir Fe^{2+} en Fe^{3+}), adición de álcalis y sedimentación. A continuación, se describen las principales tecnologías activas para el tratamiento del DAM.

Alcalinización convencional del drenaje ácido de mina

También se le conoce como tratamiento convencional. Consiste en incrementar el pH del drenaje ácido de mina mediante la adición de sustancias alcalinas, acompañada de un proceso

de oxigenación a través de aireación. Las sustancias alcalinas más utilizadas para neutralizar el drenaje ácido de mina y lograr las condiciones apropiadas para la precipitación de los metales pesados son la cal, el carbonato de sodio y la sosa cáustica. La importancia del uso de la cal (CaO) radica en que, al combinarse con el agua, forma hidróxido de calcio, y este, al reaccionar con el drenaje ácido de mina, permite la precipitación de los sulfatos como sulfato de calcio (CaSO_4). Esto no ocurre con los hidróxidos aparentemente más limpios, como el hidróxido de sodio (NaOH) o el hidróxido de potasio (KOH), ya que estos forman sales solubles.

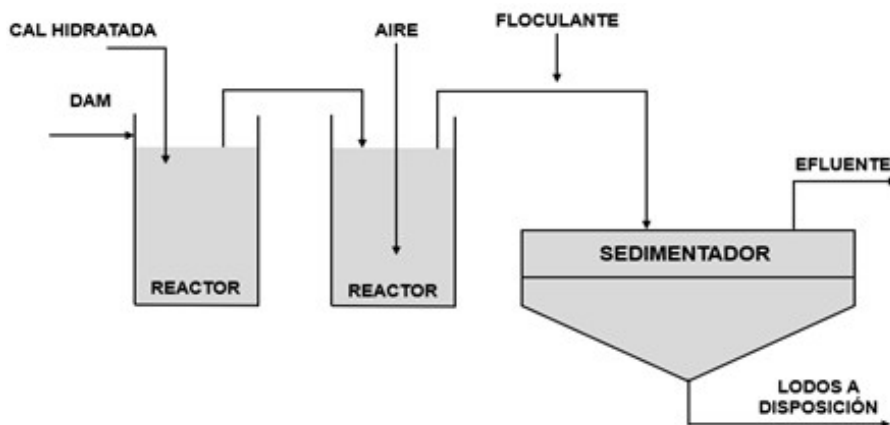


Figura 1. Esquema del tratamiento convencional de drenaje ácido de mina

Fuente: [8].

La oxigenación se realiza con la finalidad de oxidar los metales y obtener precipitados más estables. En la figura 2, se aprecia que el hierro, uno de los componentes del DAM, precipita como hidróxido insoluble en un rango de pH comprendido entre 8,5 y 10 [8].

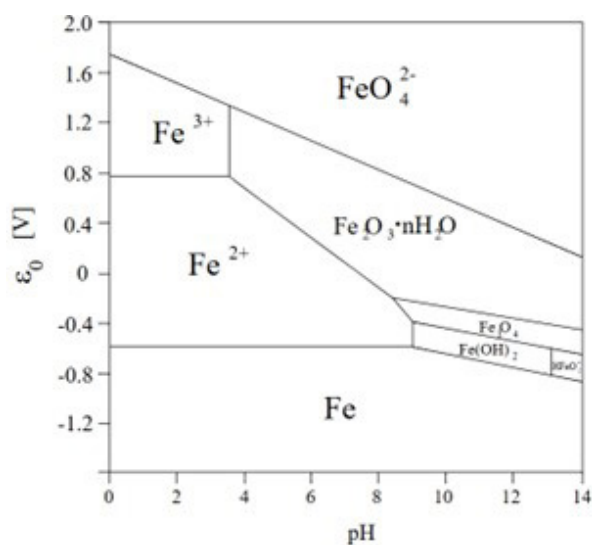
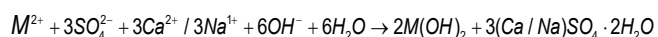
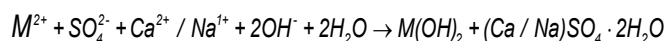


Figura 2. Diagrama de Pourbaix del hierro

Fuente: Elaboración propia.

En general, las reacciones de este método, considerando M como metal pesado son los siguientes:



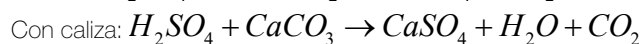
El proceso de alcalinización concluye con la coagulación-floculación y la separación sólido-líquido en un clarificador. Las fases del proceso de alcalinización convencional son las siguientes [8]:

• Homogenización

Se recolecta el DAM en grandes depósitos, donde se mantiene de 12 a 24 horas para su homogenización; después de este tiempo de retención, pasa a la planta de tratamiento.

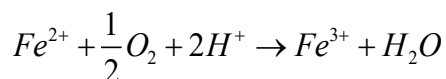
• Neutralización

Se utiliza cal viva, lechada de cal u otro agente neutralizante, según su disponibilidad o costo. Algunas de las reacciones en esta etapa pueden ser a continuación:



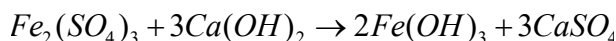
• Aireación

Se realiza con la finalidad de oxidar el Fe^{2+} a Fe^{3+} , que tiene poca solubilidad. El ion ferroso presenta una solubilidad mínima en el intervalo de pH de 9,3 a 12,0, mientras que el ion férrico es poco soluble y precipita como hidróxido a un pH aproximado de 4.

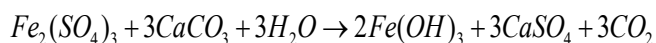


Los hidróxidos que se forman al reaccionar el sulfato férrico con los agentes neutralizantes son:

Con cal:



Con caliza:



Una regla práctica para predecir la rapidez con que los metales disueltos precipitan en función del pH se muestra en la tabla 1.

Tabla 1
Velocidad de precipitación de los sólidos disueltos

Rango de pH	Velocidad de precipitación
Menor a 6	Muy lenta; salvo presencia de bacterias
6 a 8	Moderada
Mayor a 8	Muy rápida

Fuente: [8].

• Sedimentación

Una vez que el DAM se neutraliza y el ion ferroso se ha oxidado a ion férrico, prosigue la sedimentación, mediante la cual se remueven los lodos que contienen los hidróxidos formados. El pH del medio en el que se realiza la precipitación depende del tipo de metal presente en el DAM; así, por ejemplo, el pH mínimo para el Pb^{2+} es 6,3, para el Fe^{2+} es 9,5 y para el Mn^{2+} es 10,6. Si el DAM contiene metales anfóteros como el zinc y el aluminio, estos aumentan su solubilidad a pH elevados, por lo que se debe tener especial cuidado con ellos al momento de tratar el drenaje ácido de mina.

• Disposición de lodos

Es una parte esencial del proceso; una vez culminado el tratamiento, se debe realizar una adecuada disposición de los lodos producidos con el fin de reducir los impactos ambientales.

High Density Sludge (HDS)

Esta tecnología, conocida en español como lodos de alta densidad, consiste en la recirculación de los lodos producidos durante la alcalinización, de modo que, al mezclarse nuevamente con la cal, se formen lodos más compactos y densos que permitan una mayor eficiencia en la separación sólido-líquido [6].

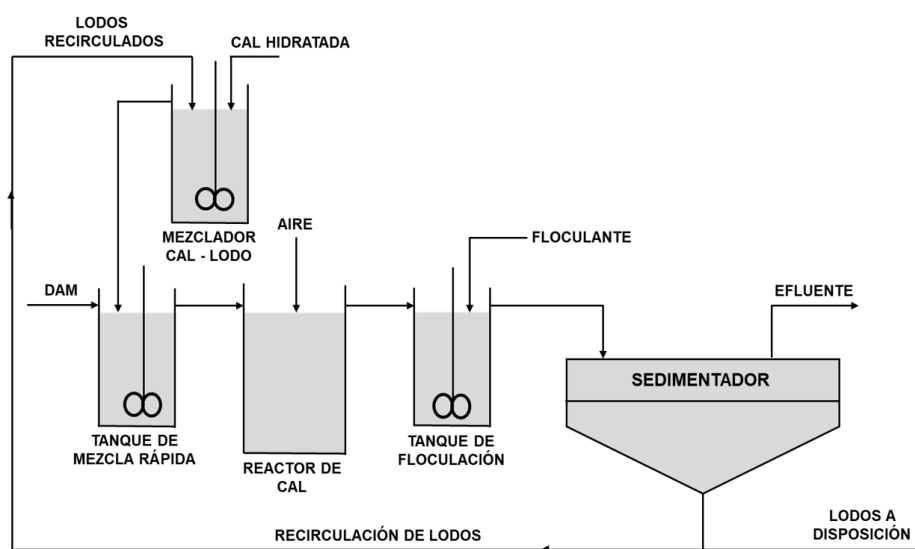


Figura 3. Esquema del tratamiento del DAM por HDS

Fuente: [6].

Neutralización y coagulación dinámica (NCD)

Patentada en 2004 por su inventor Villachica C. (SMALLVILL S. A. C.), esta tecnología para la neutralización del DAM consiste en la precipitación de los metales disueltos y la sedimentación de los precipitados obtenidos mediante el uso de relaves mineros, lo que incrementa la densidad de los lodos y los hace más compactos. Algunas ventajas de la tecnología NCD con respecto al HDS son las siguientes [6]:

- Menor tiempo de retención, de 5 a 6 minutos en comparación con los 50 minutos del HDS.
- Mayor velocidad de sedimentación.
- El precipitado adsorbido no ocupa un espacio adicional al requerido por el colector.

El proceso consiste en aprovechar la característica coloidal de los precipitados obtenidos al neutralizar los DAM y la energía generada durante su transporte a través de un canal o tubería. El agente neutralizante se añade durante su transporte, aguas

arriba de su punto de descarga, a una distancia suficiente que permita disponer del tiempo necesario para completar las reacciones de neutralización y precipitación de los sólidos disueltos. La separación sólido-líquido del efluente neutralizado se logra al mezclarlo con relaves, cuarzo, magnetita, escoria u otro

material sólido de carácter granular, que coagula los precipitados coloidales sobre su superficie, reduce su volumen y sedimenta rápidamente debido a su mayor densidad en comparación con los que se obtienen por métodos convencionalmente [8].

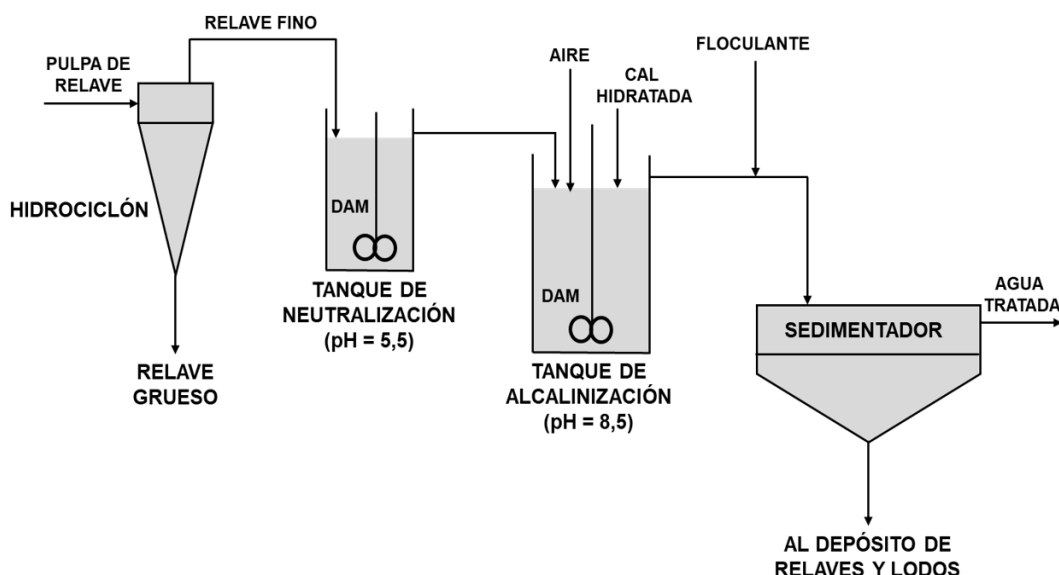


Figura 4. Esquema del tratamiento del DAM por NCD

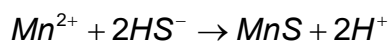
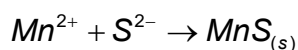
Fuente: [8].

Etapas adicionales al tratamiento de alcalinización convencional

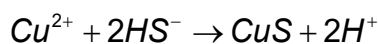
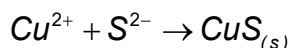
Las diferentes tecnologías que se aplican en el tratamiento del DAM no logran cumplir con los límites exigidos por las normativas vigentes, como el D. S. 010-2010-MINAM y los ECA, categoría 3, para riego de vegetales, establecidos en el D. S. 004-2017-MINAM. Esto obliga a complementar el proceso con un tratamiento terciario que, por lo general, puede consistir en ultrafiltración, nanofiltración u ósmosis inversa. Todas estas son tecnologías de membrana que implican altos costos de inversión y operación, además de generar pasivos ambientales.

La presente investigación modifica el tratamiento convencional del drenaje ácido de mina mediante una etapa adicional de sulfuración (adición de una solución de sulfhidrato de sodio, NaSH, al 10 % m/v). La sulfuración forma lodos más densos que permiten una mejor separación sólido-líquido, generando aguas más claras y con menor carga contaminante. Esto se debe a que la acción de los coagulantes y floculantes sobre los sulfuros insolubles es más eficiente que sobre los hidróxidos, lo que asegura una mayor eficacia en la remoción de los metales pesados. Las reacciones más importantes son las mostradas a continuación [1]:

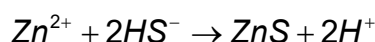
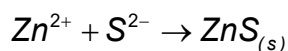
Para el manganeso



Para el cobre



Para el zinc



El tratamiento del DAM culmina con una coagulación-floculación. Para tal fin se emplean sulfato de aluminio, cloruro férrico, policloruro de aluminio, entre otros. Por otro lado, la floculación consiste en la aglomeración de partículas ya neutralizadas. Las sustancias que permiten este proceso son polímeros de tipo catiónico o aniónico que, al ser macromoléculas, resultan más eficientes en la aglomeración de las partículas neutralizadas. En el caso del tratamiento del drenaje ácido de mina, los iones de hierro actúan como coagulantes, por lo que únicamente se utilizan floculantes.

METODOLOGÍA

La investigación consistió en el tratamiento del DAM que fluye desde la laguna Quiulacocha hacia el río San Juan. Se neutralizó con cal en la etapa de alcalinización y con sulfhidrato de sodio (NaSH) en la etapa de sulfuración, con el propósito de aumentar

la remoción de los metales. El trabajo experimental y de gabinete se desarrolló en cuatro etapas.

Etapa 1: Muestreo de campo del drenaje ácido de mina

Se tomaron muestras de drenaje ácido de mina a la salida de la laguna Quiulacocha, que discurren hacia el río San Juan. Se obtuvieron muestras puntuales, recolectando 20 litros por cada hora durante cinco horas; de las muestras acumuladas en un depósito de 100 litros, se obtuvo una muestra compuesta de 40 litros para su caracterización y posterior tratamiento.

Etapa 2: Caracterización y tratamiento de las muestras de drenaje ácido de mina

La caracterización fisicoquímica del drenaje ácido de mina se realizó en el punto de muestreo y en el laboratorio de Tecsup Lima.

Los parámetros medidos fueron pH, temperatura, conductividad, ORP, sólidos suspendidos totales y sólidos totales.

Etapa 3: Procesamiento de los resultados obtenidos

Los datos recopilados del tratamiento del DAM se procesaron mediante el *software* estadístico SPSS.

Etapa 4: determinación de las dosis adecuadas de cal y NaSH

De acuerdo con el diseño experimental aplicado, se realizaron tratamientos del drenaje ácido de mina con diferentes combinaciones de soluciones de cal, NaSH y RPM, con los cuales se determinaron las dosis y RPM adecuadas para el tratamiento del drenaje.

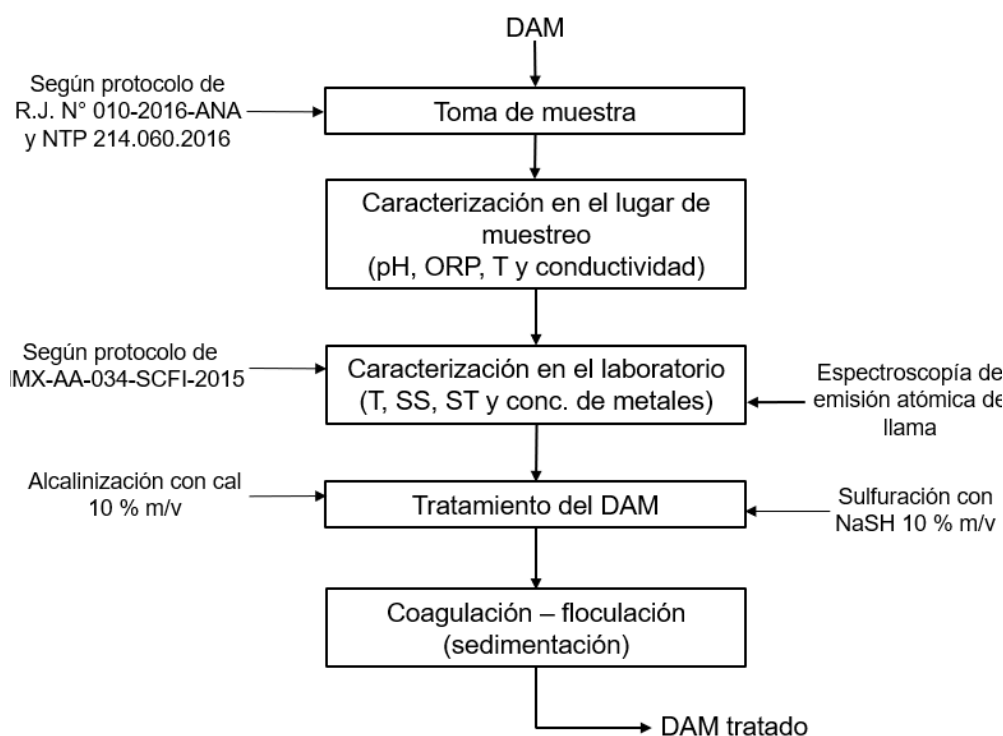


Figura 5. Secuencia de muestreo, caracterización y tratamiento del DAM

Fuente: Elaboración propia.

Técnicas e instrumentos para la recolección de información

Para la presente investigación, la toma de muestras del DAM se realizó conforme al Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales (R. J. 010-2016-ANA y NTP 214.060-2016). La medición de sólidos suspendidos y sólidos totales se efectuó según la norma mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015, y la medición de la concentración de metales se realizó de acuerdo con los Standard Methods de la APHA y la AWWA.

Se emplearon equipos para el monitoreo de aguas residuales, tales como un turbidímetro HACH, un multiparámetro HANNA y un espectrómetro de absorción atómica PERKINELMER PinAAcle 500. Una vez caracterizado el DAM, se trató mediante

alcalinización con una etapa adicional de sulfuración, con el objetivo de aumentar la remoción de los metales presentes en el agua.

Análisis y procesamiento de datos

Parámetros fisicoquímicos del drenaje ácido de mina

Se realizó en el punto de muestreo y en el laboratorio de Tecsup Lima, cuyos resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2.
Parámetros fisicoquímicos iniciales de DAM proveniente de la laguna Quiulacocha

Parámetros medidos en campo		Parámetros medidos en el laboratorio	
Temperatura (°C)	4	Temperatura (°C)	17
pH	2,32	pH	2,32
Conductividad (mS/cm)	10680	SST (mg/L)	64
ORP (mV)	656	ST (mg/L)	20016

Fuente: Elaboración propia.



Figura 6. Drenaje ácido de mina antes de su tratamiento

Fuente: Elaboración propia.



Figura 7. pH y conductividad inicial del DAM

Fuente: Elaboración propia.

Diseño experimental del tratamiento de drenaje ácido de mina

El diseño de experimentos consiste en determinar qué pruebas se deben realizar y de qué manera, con el fin de obtener datos que, al ser analizados estadísticamente, proporcionen evidencias objetivas que permitan responder las interrogantes planteadas y, de esta forma, clarificar los aspectos inciertos de un proceso, resolver un problema o lograr mejoras [4].

Para esta investigación, con la finalidad de obtener datos experimentales del tratamiento del drenaje ácido de mina para

su respectivo análisis, se aplicó un diseño factorial 2K con tres factores, cada uno con dos niveles y una réplica completa. Para el primer factor, cal al 10 % m/v, los niveles fueron 32 mL/L y 40 mL/L; para el segundo factor, sulfhidrato de sodio (NaSH) al 10 % m/v, los niveles fueron 0,5 mL/L y 1,0 mL/L; y para el tercer factor, gradiente de velocidad, los niveles fueron 160 RPM y 240 RPM.

$$N.^{\circ} \text{de experimentos} = 2^3 = 8$$

Cada experimento (tratamiento) tuvo su réplica, por lo que en total se realizó 16 experimentos, cada uno con un litro de DAM.

Tabla 3
Diseño de tres factores para el tratamiento de DAM

Corrida	Bloque	Cal (mL/L)	NaSH (mL/L)	Gradiente de velocidad (RPM)
M01	1	32	0,5	160
M02	1	32	0,5	240
M03	1	32	1,0	160
M04	1	32	1,0	240
M05	1	40	0,5	160
M06	1	40	0,5	240
M07	1	40	1,0	160
M08	1	40	1,0	240
RÉPLICA				
M09	2	32	0,5	160
M10	2	32	0,5	240
M11	2	32	1,0	160
M12	2	32	1,0	240
M13	2	40	0,5	160
M14	2	40	0,5	240
M15	2	40	1,0	160
M16	2	40	1,0	240

Fuente: Elaboración propia.

Procesamiento de datos y análisis estadístico

El procesamiento de los datos obtenidos del tratamiento del drenaje ácido de mina se realizó mediante el uso del *software* estadístico SPSS. Asimismo, para el análisis de los datos obtenidos en la parte experimental se tomaron como referencia los LMP de efluentes minero-metalúrgicos establecidos en el D. S. 010-2010-MINAM y el ECA para el agua regulado por el D. S. 004-2017-MINAM.

Determinación de la eficiencia de la remoción de los metales pesados

Después del tratamiento del drenaje ácido de mina mediante alcalinización con una etapa adicional de sulfuración, se analizó una muestra del agua clarificada en un espectrómetro

de absorción atómica para determinar la cantidad de hierro, cobre, plomo y zinc removidos. Con los resultados obtenidos, se calculó el porcentaje de remoción correspondiente a cada uno de los metales.

RESULTADOS

Características fisicoquímicas iniciales del drenaje ácido de mina de la laguna de Quilacocha

Los resultados de la caracterización inicial de la muestra se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4
Cuadro comparativo de los parámetros iniciales de DAM con las normas ambientales LMP y ECA categoría 3

Parámetro	LPM D.S. 010-2010-MINAM		ECA – CATEGORÍA 3 D.S. 004-2017-MINAM		Valor inicial
	Límite en cualquier momento	Límite para el promedio anual	Agua para riego	Bebida de animales	
pH	6 – 9	6 – 9	6,5 – 8,4	6,5 – 8,4	2,32
SST (mg/L)	50	25	-	-	64
Conductividad (μS/cm)	-	-	2500	5000	10680
Fe (mg/L)	2,00	1,60	5,00	**	16,030
Cu (mg/L)	0,50	0,40	0,20	0,50	2,998
Pb (mg/L)	0,20	0,16	0,05	0,05	1,157
Zn (mg/L)	1,50	1,20	2,00	24,0	2,571

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que la concentración de los metales pesados supera ampliamente los límites establecidos por las normas ambientales

peruanas, LMP y ECA, categoría 3, correspondientes a agua para riego y bebida de animales.

Resultados del tratamiento del drenaje ácido de mina de la laguna Quiulacocha

Luego del tratamiento del DAM mediante alcalinización y

sulfuración, se obtuvieron resultados favorables: la concentración de los metales disueltos en el agua tratada quedó muy por debajo de los límites establecidos por las normas ambientales, LMP y ECA, categoría 3, correspondientes a agua para riego y bebida de animales.



Figura 8. DAM después de su tratamiento por alcalinización y sulfuración

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del tratamiento se observan en las 6 y 7.

Tabla 5

Promedio de las concentraciones de los metales luego del tratamiento mediante alcalinización y sulfuración

Muestra	Cal al 10 % (mL/L)	NaSH al 10 % (mL/L)	G.V (RPM)	[Fe] (mg/L)	[Cu] (mg/L)	[Pb] (mg/L)	[Zn] (mg/L)
M01 + M09	32	0,5	160	0,1645	0,0025	0,0035	1,2055
M02 + M10	32	0,5	240	0,1620	0,0030	0,0030	1,3875
M03 + M11	32	1,0	160	0,2550	0,0020	0,0015	1,4270
M04 + M12	32	1,0	240	0,1355	0,0030	0,0045	1,3570
M05 + M13	40	0,5	160	0,2825	0,0050	0,0075	1,0055
M06 + M14	40	0,5	240	0,2025	0,0060	0,0065	1,0905
M07 + M15	40	1,0	160	0,2715	0,0050	0,0065	0,8840
M08 + M16	40	1,0	240	0,2060	0,0015	0,0010	1,2630

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6

Porcentaje de remoción de los metales después de alcalinización y sulfuración del DAM

Muestra	Cal al 10 % (mL/L)	NaSH al 10 % (mL/L)	G.V (RPM)	Fe (%)	Cu (%)	Pb (%)	Zn (%)
M01 + M09	32	0,5	160	98,97	99,92	99,69	53,11
M02 + M10	32	0,5	240	98,99	99,90	99,74	46,03
M03 + M11	32	1,0	160	98,41	99,93	99,87	44,50
M04 + M12	32	1,0	240	99,15	99,90	99,61	47,22
M05 + M13	40	0,5	160	98,24	99,83	99,35	60,89
M06 + M14	40	0,5	240	98,74	99,80	99,44	57,58
M07 + M15	40	1,0	160	98,31	99,83	99,44	65,61
M08 + M16	40	1,0	240	98,71	99,95	99,91	50,88

Fuente: Elaboración propia.

La remoción óptima se obtiene con 40 mL de cal y 1,0 mL de NaSH, con un gradiente de velocidad de 160 RPM: 98,31 % para

el hierro, 99,83 % para el cobre, 99,44 % para el plomo y 65,61 % para el cinc.

Tabla 7

Parámetros fisicoquímicos del DAM con las normas ambientales antes y después de su tratamiento

Parámetro	LPM D.S. 010-2010-MINAM		ECA – CATEGORÍA 3 D.S. 004-2017-MINAM		Valor Antes del tratamiento	Valor después del tratamiento
	Límite en cualquier momento	Límite para el promedio anual	Agua para riego	Bebida de animales		
pH	6 – 9	6 – 9	6,6-8,5	6,5 – 8,4	2,32	6,7 – 8,8
SST (mg/L)	50	25	-	-	64	4.5
Conductividad (μS/cm)	-	-	2500	5000	10680	67
Fe (mg/L)	2,00	1,60	5,00	*	16,030	0,2715
Cu (mg/L)	0,50	0,40	0,2	0,50	2,998	0,0050
Pb (mg/L)	0,20	0,16	0,05	0,05	1,157	0,0065
Zn (mg/L)	1,50	1,20	2,00	24,00	2,571	0,8840

Fuente: Elaboración propia.

La remoción óptima se obtiene con 40 mL de cal y 1,0 mL de NaSH, con un gradiente de velocidad de 160 RPM: 98,31 % para el hierro, 99,83 % para el cobre, 99,44 % para el plomo y 65,61 % para el cinc.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el tratamiento convencional del drenaje ácido de mina con cal al 10 % m/v y su posterior sulfuración con sulfhidrato de sodio (NaSH) al 10 % m/v muestran una alta remoción de los metales hierro (98,31 %), cobre (99,83 %) y plomo (99,44 %). En el caso del zinc, se logró remover un 65,61 %. En todos los casos, las concentraciones de los metales residuales del DAM tratado se encuentran por debajo de lo exigido por las normas ambientales D. S. 010-2010-MINAM y D. S. 004-2017-MINAM, categoría 3, agua para riego y bebida de animales; por lo tanto, se concluye que el método aplicado en el tratamiento del DAM ha sido eficiente.

Se concluye que la dosis de cal al 10 % m/v adecuada en la etapa de alcalinización es de 40 mL/L, con la cual se obtiene el mayor porcentaje de remoción de los metales hierro, cobre, plomo y zinc, tal como se observa en las tablas 18 y 19. La reducción de la cantidad de metales pesados (Fe, Cu, Pb y Zn) del drenaje ácido de mina en la etapa de sulfuración se logró con una dosis de sulfhidrato de sodio (NaSH) al 10 % m/v igual a 1,0 mL/L (ver tablas 18 y 19).

Se concluye que el gradiente de velocidad influye en la remoción de los metales, debido a que una adecuada agitación de la mezcla permite una mejor distribución de los reactivos químicos durante el tratamiento del DAM. La remoción eficiente de los metales pesados se logró a 160 RPM.

REFERENCIAS

- [1] Aduviri, O. (2006). *Drenaje ácido de mina: Generación y tratamiento*. Instituto Geológico y Minero de España, Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente.
- [2] Broughton, L. S., & Bonelli, J. (1995). *Guía ambiental para el manejo del drenaje ácido de mina*. Ministerio de Energía y Minas.
- [3] Comisión Nacional del Agua & Mekorot. (2014). *San Luis Río Colorado, Estado de Sonora: Tratamiento de efluentes con el suelo del acuífero. Recomendaciones de mejora*. Development and Enterprise Ltd.
- [4] Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. McGraw-Hill Interamericana.
- [5] Jennings, E. R., Neuman, D. R., & Blicher, P. S. (2008). *Acid mine drainage and effects on fish health and ecology: A review*. Reclamation Research Group, LLC.
- [6] Oré, S. (2015). *Recuperación de los metales pesados presentes en el drenaje ácido de mina mediante la precipitación selectiva para su posterior utilización* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú].
- [7] Tilley, E., et al. (2015). *Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento*. Instituto Federal Suizo para la Ciencia y la Tecnología Acuática.
- [8] Villachica, C., Llamosas, J., & Villachica, J. (2005). Tecnología nacional comprobada para el tratamiento de efluentes ácidos mineros. En *IV Congreso Internacional de Medio Ambiente en Minería y Metalurgia*, 13–16 de julio de 2005. SMALLVILL SAC – Consulcont S.A.C.

ACERCA DE LOS AUTORES

Ing. Sergio Rojas Rimachi

Ingeniero químico, egresado de la Universidad Nacional del Callao. Maestro en Gestión Ambiental para el Desarrollo Sostenible por la universidad Nacional del Callao. Docente a tiempo completo en Tecsup - Lima en el área de Minería y Procesos Químicos Metalúrgicos. Asimismo, capacitador en Monitoreo Ambiental y en tratamiento de aguas industriales y residuales.

 srojas@tecsup.edu.pe

Ing. Yorsel Soledad Mayhua Soto

Ingeniera industrial egresada de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), perteneciente al Colegio de Ingenieros del Perú, licenciada en Educación de la Universidad Enrique Guzmán y Valle la Cantuta. Magister

en Gestión Ambiental para el desarrollo sostenible por la Universidad Nacional del Callao. Con estudios de diplomados en Derecho Ambiental y Fiscalización Ambiental en la Universidad Continental.

Desde 2013, hasta la actualidad se desempeña como docente en el área de Minería y Procesos Químico Metalúrgicos en Tecsup N.º 1 Lima, labor que le permite trabajar en conjunto con otros docentes en proyectos e investigaciones relacionados con el tratamiento de aguas residuales tanto de procedencia doméstica como industrial.

 ymayhua@tecsup.edu.pe

Recibido: 02-05-2025

Revisado: 08-09-2025

Aceptado: 26-09-2025



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.

Solución digital en forma de asistente virtual por voz para el seguimiento de la estructura del material educativo en plataforma de aprendizaje.



Implementación de un Skill de Alexa como asistente virtual por voz para la validación de la estructura de los cursos en LMS Canvas

Implementation of an Alexa Skill as a voice virtual assistant for validating course structure in Canvas LMS

RESUMEN

El estudio se centra en proponer una solución digital en forma de asistente virtual por voz para el seguimiento de la estructura del material educativo publicado en una plataforma de aprendizaje virtual como Canvas LMS. Dicha solución utiliza la inteligencia artificial a través del dispositivo Echo Dot de Alexa para el procesamiento de voz, con el fin de hacerla más accesible y eficiente, especialmente para los docentes.

Este asistente facilitará el seguimiento tanto del desarrollo de los cursos en Canvas como del monitoreo de los mismos. Esta herramienta permitirá agilizar el trabajo de los distintos roles asociados a una plataforma educativa, siendo los principales los docentes y los validadores del diseño instruccional. El asistente permitirá realizar consultas puntuales sobre los recursos educativos publicados en los cursos de la plataforma Canvas LMS, de acuerdo con la metodología educativa ADDA, implementada en Tecsup, que se basa en la secuencia de una sesión de clase estructurada sobre tres fases fundamentales enfocadas en el aprendizaje: antes, durante y después [7].

La metodología de investigación se ha desarrollado en dos fases. En la primera se empleó la metodología de desarrollo de *software* Waterfall y, en la segunda, se llevó a cabo el monitoreo del uso de la aplicación mediante encuestas a los docentes participantes sobre su percepción de la solución.

El proyecto incluyó una investigación destinada a la prueba de hipótesis. Para ello se aplicó una encuesta a una muestra de 11 docentes del Departamento de Tecnología Digital de Tecsup en el semestre 2025-2. Como resultado, se observó que el 45,45 % de los docentes considera que el asistente por voz les ha facilitado la revisión de la metodología ADDA en sus cursos y que el 45,45 % afirma que el asistente les ha ayudado a reducir el tiempo dedicado a dicha metodología.

En cuanto a los hallazgos principales, destaca el interés que mostraron los docentes en utilizar el asistente como herramienta de apoyo en su labor, evidenciando además entusiasmo por continuar probándolo. Este estudio se desarrolló durante los semestres 2025-1 y 2025-2 en el Instituto de Educación Superior Tecsup (Lima).

Se puede concluir que el uso de lenguajes de programación, complementados con herramientas de inteligencia artificial y reconocimiento de voz, contribuye al mejoramiento continuo del material publicado en las plataformas educativas.

ABSTRACT

This study proposes a digital solution in the form of a voice-activated virtual assistant for tracking the structure of educational materials published on an e-learning platform, specifically Canvas LMS. This solution utilizes artificial intelligence through the Alexa Echo Dot device for voice processing, aiming to enhance accessibility and efficiency, especially for instructors.

The assistant will facilitate tracking and monitoring of course development. This feature will streamline tasks for the various roles associated with an educational platform, primarily instructors and instructional design validators. The assistant enables users to ask specific questions about the educational resources published in courses on the Canvas LMS platform in accordance with the ADDA educational methodology implemented at Tecsup. This methodology is based on a class session structured around three fundamental phases: Before, During, and After [7].

The research methodology comprised two phases. The first phase employed the "Waterfall" software development methodology. The second phase involved monitoring the application's usage through surveys of participating teachers regarding their perception of the solution.



Palabras Claves

Echo dot Alexa, Asistente virtual por voz, LMS Canvas, API Rest, Inteligencia Artificial, metodología educativa ADDA, Tecsup

Key words

Alexa Echo Dot, Voice-activated virtual assistant, Canvas LMS, REST API, Artificial Intelligence, ADDA educational methodology, Tecsup.

The project included a hypothesis testing phase, in which a survey was administered to a sample of 11 teachers from the Digital Technology Department at Tecsup during the 2025-2 semester. The results showed that 45.45% of the teachers considered that the voice assistant facilitated the review of the ADDA methodology in their courses, and 45.45% affirmed that the assistant helped them reduce the time spent on applying said methodology.

The main findings revealed the teachers' interest in using the assistant as a support tool in their work, as well as their enthusiasm for continuing to test it. This study was conducted during the 2025-1 and 2025-2 semesters at the Tecsup Higher Education Institute (Lima).

The study concludes that the use of programming languages, complemented by artificial intelligence and voice recognition tools, contributes to the continuous improvement of material published on educational platforms.

asistente virtual por voz de Amazon denominado Alexa, con su altavoz inteligente Echo Dot, está disponible desde finales del 2015 [6], y permite integrarse con otros sistemas a través del entorno de desarrollo en la nube de Amazon.

Como antecedente, se puede mencionar que en julio del 2024 se presentó en la competición Innovation Challenge 2024 de Tecsup el proyecto «Asistente de IA por voz para ayudar al personal de Tecsup en la adopción de la metodología ADDA», en el cual se enfatiza el uso de la inteligencia artificial para automatizar de manera sencilla gran parte del trabajo que implica estructurar y supervisar el contenido del material de los cursos en la plataforma educativa Canvas LMS.

En el tercer trimestre del 2024 se realizó una encuesta a los docentes del Departamento de Tecnología Digital de Tecsup Centro sobre la adopción de metodologías de enseñanza en la plataforma educativa Canvas LMS. El resultado de esta encuesta se muestra en la tabla 1, donde se observa que al 70 % de los docentes les resulta complicado adoptar una nueva metodología de enseñanza en la plataforma Canvas LMS y que dedicaban aproximadamente 2 horas adicionales a la semana a dicho proceso. A inicios del 2025 se ejecutó una encuesta muy similar a la primera, obteniéndose resultados semejantes (tabla 2). Por lo observado, se puede asumir que los docentes presentan dificultades para adaptarse a nuevas metodologías de enseñanza en una plataforma educativa.

INTRODUCCIÓN

La aparición del *chatbot* basado en inteligencia artificial «ChatGPT» en el contexto mundial a fines del 2022 [18] ha generado un efecto catalizador en el uso de asistentes de IA en diversos campos de la actividad humana, tales como la salud, la educación, las smart cities y la seguridad nacional, entre otros [10]. Por otra parte, el

Tabla 1

Encuesta a docentes sobre adopción de nuevas metodologías de enseñanza en Tecsup - 2024 ¹

Ítem	Resultados
Adopción a la metodología nueva de Tecsup en Canvas LMS	70 %
Afectados en su evaluación docente por parte del departamento de calidad	50 %
Horas invertidas en aprender la nueva metodología de aprendizaje.	2 horas en promedio

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2

Encuesta a docentes sobre adopción de nuevas metodologías de enseñanza en Tecsup - 2025 ²

Ítem	Resultados
Adopción sencilla a la metodología nueva de Tecsup en Canvas LMS	43 %
Afectados en su evaluación docente por parte del departamento de Calidad	57 %
Invierte entre 2 y 10 horas en aprender la nueva metodología en el LMS.	71 %
La metodología de uso del LMS actual, ayuda considerablemente a documentar los cursos.	14 %

Fuente: Elaboración propia.

En las etapas finales del proyecto, en el semestre 2025-2, se realizó una investigación con el fin de efectuar la prueba de hipótesis. Para ello se aplicó una encuesta a una muestra de 11 docentes del Departamento de Tecnología Digital de Tecsup, la cual constituyó una prueba directa del sistema siendo utilizado por el usuario (docente). Como resultado de dicha investigación, se observó que el 45,45 % de los docentes manifestó que el asistente por voz les ha facilitado la revisión de la metodología ADDA en sus cursos y que el 45,45 % considera que el

asistente les ha ayudado a reducir el tiempo dedicado a dicha metodología.

Sobre la base de estos hallazgos, se puede inferir que los docentes requieren apoyo en la interacción con sus cursos en la plataforma Canvas LMS, lo cual podría afectar incluso su desempeño de calidad. Por este motivo, este estudio se centra en proporcionar una interfaz por voz amigable a través del dispositivo Echo Dot de Alexa, que se comunicará con la plataforma educativa Canvas

¹ 16 docentes encuestados en el tercer trimestre del 2024, Tecsup Centro.

² 7 docentes encuestados en el segundo trimestre del 2025, Tecsup Centro.

LMS y permitirá a los docentes del Departamento de Tecnología Digital de Tecsup Centro interactuar con sus cursos, de modo que podrán obtener ágilmente la información necesaria para su desarrollo, así como reducir el tiempo dedicado a su preparación.

Problema

Actualizar el material de los cursos en la plataforma Canvas LMS ocasiona que los nuevos docentes requieran tiempo adicional para adaptarse a la metodología de enseñanza establecida en Tecsup, situación que también se manifiesta, aunque en menor medida, en el resto del cuerpo docente. Todo ello conlleva a que el docente disponga de menos tiempo para el dictado del curso. A esto se suma que su dedicación debería centrarse en investigar y mantener sus contenidos actualizados como prioridad [13].

Propuesta

El estudio se centra en proponer un asistente virtual por voz con IA que ayudará en la revisión del material almacenado en la plataforma Canvas LMS usada por Tecsup. Esto permitirá a los docentes del Departamento de Tecnología Digital realizar preguntas clave al asistente sobre las actividades y el material publicado en Canvas LMS de acuerdo con la metodología de enseñanza de la institución, así como verificar el cumplimiento de la estructura de los módulos de enseñanza según la metodología educativa de Tecsup. Para tal fin se creará una biblioteca en Python para comunicarse con la plataforma Canvas LMS a través del servicio REST, la cual se integrará con la plataforma de Alexa mediante el desarrollo de una *skill* que será utilizada por un Echo Dot. En la figura 1 se aprecia la arquitectura de la solución propuesta.

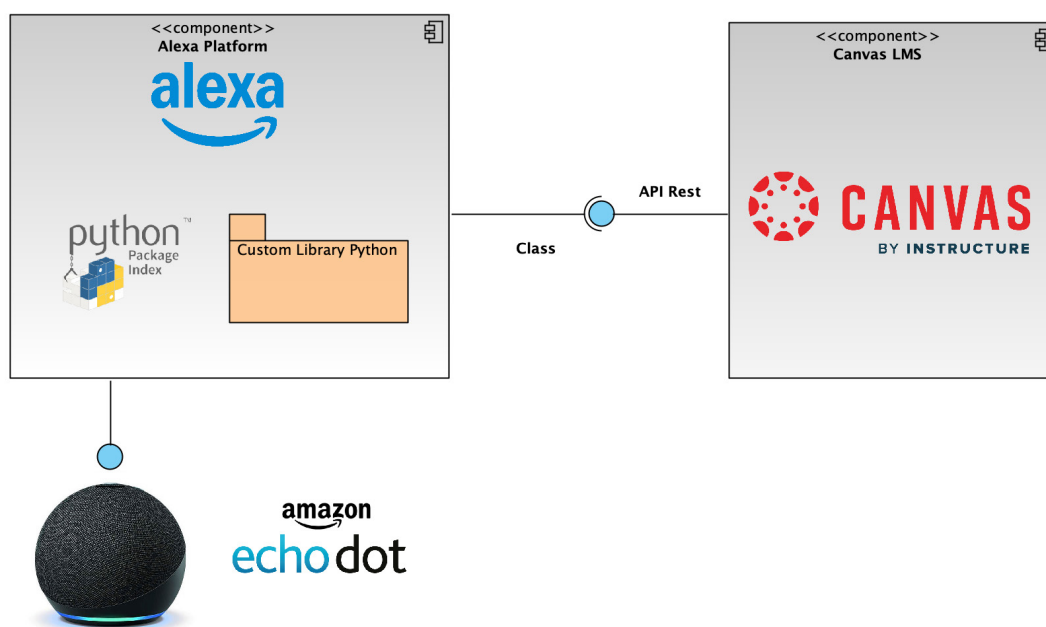


Figura 1. Arquitectura del asistente virtual por voz con IA para Canvas LMS

Fuente: Elaboración propia

Objetivos

El objetivo es proporcionar un asistente virtual por voz con IA con el fin de facilitar la revisión del contenido de los cursos en la plataforma Canvas LMS para el Departamento de Tecnología Digital de Tecsup, de acuerdo con la metodología de enseñanza ADDA de Tecsup, que apoye al docente en la elaboración y preparación de su curso y agilice el tiempo efectivo de enseñanza.

FUNDAMENTOS

Se presentan los conceptos empleados en el estudio:

Asistentes virtuales de voz: El asistente de IA, también llamado asistente virtual de IA, es un *software* impulsado por inteligencia

artificial que responde a consultas en lenguajes similares a los humanos mediante el procesamiento del lenguaje natural (PLN) para procesar, comprender y generar respuestas de forma conversacional [4].

Alexa: Es un servicio de voz basado en la nube de Amazon disponible en cientos de millones de dispositivos de Amazon y de fabricantes externos. Permite crear aplicaciones integradas con voz que ofrecen a los usuarios una forma más intuitiva de interactuar con la tecnología. Ofrece una colección de herramientas, bibliotecas, soluciones de referencia y documentación para facilitar el desarrollo para Alexa [8].

Alexa Intent: Un Intent representa una acción que cumple la solicitud hablada del usuario. Los *Intents* pueden incluir argumentos opcionales llamados *slots*. Los enunciados de ejemplo constituyen un conjunto de frases habladas probables asignadas a las intenciones [1].

Alexa Skill: Las *skills* son aplicaciones para Alexa que ayudan a los usuarios a realizar tareas cotidianas o a interactuar con su contenido de forma natural mediante la voz [2].

Biblioteca de *software*: Colección de programas y paquetes disponibles para uso común dentro de un entorno, cuyos elementos individuales no necesitan estar relacionados entre sí [15].

Canvas LMS: Canvas LMS es un sistema de gestión del aprendizaje (LMS) de código abierto basado en la nube, con funcionalidades avanzadas, accesible desde cualquier dispositivo en cualquier momento [11].

Control de versiones: Un sistema que registra los cambios realizados en un archivo o conjunto de archivos a lo largo del tiempo, de modo que sea posible recuperar versiones específicas. Existen varias implementaciones de Git, entre las más destacadas GitHub y GitLab [6].

Cloud computing: Es la disponibilidad de recursos de computación bajo demanda (como almacenamiento e infraestructura) como servicios a través de Internet. Elimina la necesidad de que las personas y empresas gestionen sus propios recursos físicos y permite pagar solo por lo que se utiliza [9].

Echo Dot: Es un dispositivo basado en voz ambiental, es decir, capta sonidos del entorno. Se trata de un altavoz inteligente creado por Amazon que integra al asistente virtual Alexa y permite a los usuarios comunicarse verbalmente con él utilizando el Echo Dot como medio de transmisión [17].

Learning Management System (LMS): Plataforma tecnológica web con fines académicos que permite planificar, distribuir, administrar, documentar y evaluar programas educativos o formativos. Un LMS estándar respalda un entorno de aprendizaje inclusivo que promueve agrupaciones colaborativas en línea, capacitación profesional, discusiones y comunicación entre los usuarios del sistema [5].

Python: Python es un lenguaje de programación de alto nivel, interpretado y de propósito general, conocido por su sintaxis sencilla y su legibilidad. Soporta múltiples paradigmas de programación y es ampliamente utilizado en desarrollo web, análisis de datos e inteligencia artificial [14].

PyPI: El *Python Package Index* (PyPI) es un repositorio de *software* para el lenguaje de programación Python. PyPI permite encontrar e instalar *software* desarrollado y compartido por la comunidad. Los propietarios de los paquetes usan PyPI para distribuir sus desarrollos [16].

Servicios REST: Interfaz de *software* que permite que distintas aplicaciones se comuniquen entre sí de forma sencilla mediante el acceso a recursos en un servidor web a través de Internet. Sigue principios arquitectónicos específicos para posibilitar la comunicación entre sistemas [12].

METODOLOGÍA

Se usó la metodología *Waterfall* para el desarrollo del proyecto. En la figura 2 se muestra el cronograma del proyecto.

		Name	Duration	Start	Finish	Predecessors
2		Proyecto Asistente de Voz con IA para Canvas LMS	158 days	1/10/25 8:00 AM	8/19/25 5:00 PM	
3		Antecedentes	10 days	1/10/25 8:00 AM	1/23/25 5:00 PM	
4		Participación en el Innovation Challenge 2024 – Tecsup	10 days	1/10/25 8:00 AM	1/23/25 5:00 PM	
5		Requerimientos	10 days	4/7/25 8:00 AM	4/18/25 5:00 PM	3
6		Revisión de la documentación	5 days	4/7/25 8:00 AM	4/11/25 5:00 PM	
7		Elaboración de SRS	5 days	4/14/25 8:00 AM	4/18/25 5:00 PM	6
8		Análisis y Diseño	23 days	4/21/25 8:00 AM	5/21/25 5:00 PM	5
9		Definir la Arquitectura de la solución	3 days	4/21/25 8:00 AM	4/23/25 5:00 PM	
10		Diseño de la librería de Python API CanvasLMS	10 days	4/24/25 8:00 AM	5/7/25 5:00 PM	9
11		Diseño Alexa Skill	10 days	5/8/25 8:00 AM	5/21/25 5:00 PM	10
12		Implementación	35 days	5/22/25 8:00 AM	7/9/25 5:00 PM	8
13		Desarrollo de la librería de Python API CanvasLMS	15 days	5/22/25 8:00 AM	6/11/25 5:00 PM	
14		Desarrollo de Alexa Skill	15 days	6/12/25 8:00 AM	7/2/25 5:00 PM	13
15		Configuración del Echo Dot de Alexa	5 days	7/3/25 8:00 AM	7/9/25 5:00 PM	14
16		Pruebas	10 days	7/10/25 8:00 AM	7/23/25 5:00 PM	
17		Pruebas de integración de los servicios REST de Canvas LMS	5 days	7/10/25 8:00 AM	7/16/25 5:00 PM	
18		Pruebas de integración con el Alexa Skill	5 days	7/17/25 8:00 AM	7/23/25 5:00 PM	17
19		Implantación	19 days	7/24/25 8:00 AM	8/19/25 5:00 PM	16
20		Despliegue de la librería API Canvas LMS en PyPI	4 days	7/24/25 8:00 AM	7/29/25 5:00 PM	
21		Despliegue del Alexa Skill	4 days	7/30/25 8:00 AM	8/4/25 5:00 PM	20
22		Encuesta aplicadas a la solución implantada	7 days	8/5/25 8:00 AM	8/13/25 5:00 PM	21
23		Análisis del resultado de las encuestas	3 days	8/14/25 5:00 PM	8/19/25 5:00 PM	22

Figura 2. Cronograma del proyecto

Fuente Elaboración propia.

Antecedentes

En el segundo semestre del 2024, se participó en el Innovation Challenge de Tecsup con el proyecto «Asistente de IA por voz para ayudar al personal de Tecsup en la adopción de

la metodología ADDA», siendo finalista en la competición y obteniendo el primer puesto en la categoría Optimización o Mejora de Procesos. Se identificó el interés de la institución en desarrollar soluciones que contribuyan a optimizar los procesos educativos en Tecsup.

Requerimientos

Se desea implementar un asistente de IA por voz que permita a los docentes del Departamento de Tecnología Digital de Tecsup interactuar con la plataforma Canvas LMS para monitorear si se cumple o no con la estructura de los módulos de los cursos

de acuerdo con la metodología ADDA aplicada en Tecsup. En la figura 3 se muestra la estructura de los módulos de un curso según la metodología ADDA, donde se observa que deben estar definidas actividades antes, durante y después de la sesión de clases.



Figura 3. Estructura de una semana de clases de acuerdo a la metodología ADDA
Fuente Elaboración propia.

Análisis y diseño

La solución planteada se muestra en la figura 1, donde se implementará un Alexa Skill que usará una biblioteca en Python 3.9.6, en la que estarán implementados los componentes de comunicación con los servicios REST de la plataforma Canvas LMS. Esta biblioteca se publicará en la plataforma PyPI. En el Skill se crearán varios *Intents* que permitirán el flujo de la comunicación por voz. La aplicación será utilizada por los docentes del Departamento de Tecnología Digital de Tecsup,

quienes interactuarán por voz con un Alexa Skill a través de un dispositivo Echo Dot de cuarta generación.

Cabe mencionar que la finalidad de crear una biblioteca en Python es simplificar el desarrollo del código fuente del Alexa Skill. En la figura 4 se muestra el diagrama de clases de la biblioteca en Python, denominada «api_canva_lms», donde se aprecia el diseño de una clase controladora que gestionará todas las peticiones al servicio REST de la plataforma Canvas LMS.

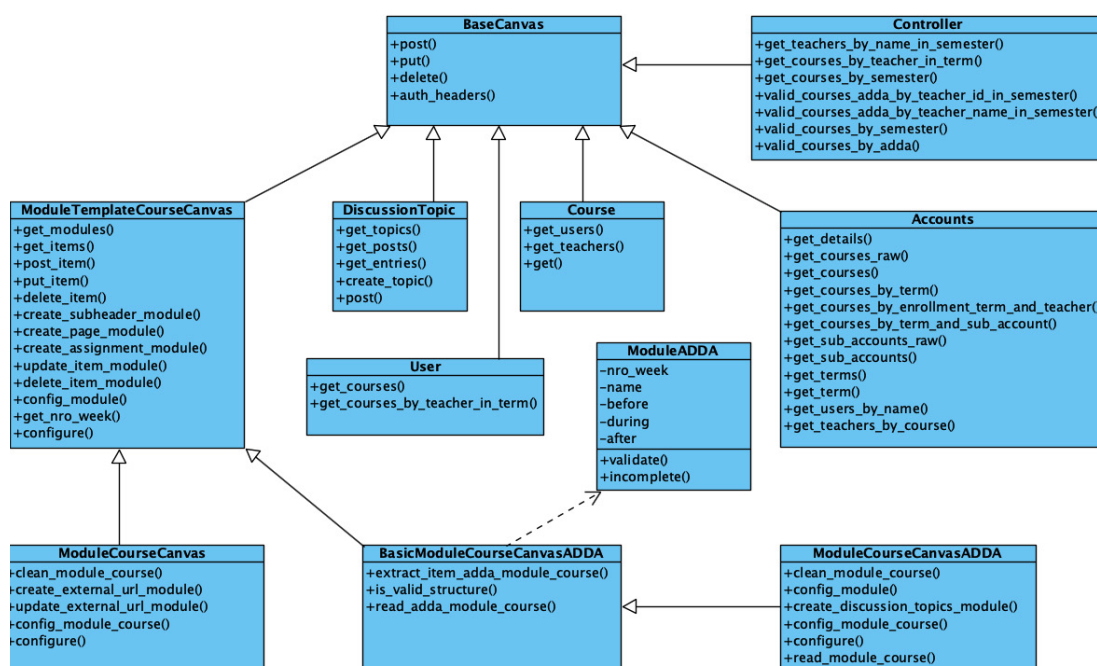


Figura 4. Diagrama de clases de la biblioteca api_canva_lms
Fuente Elaboración propia.

En la figura 5 se muestran las clases del Alexa Skill denominada «canvas_lms». Desde esta clase se gestiona la interacción por voz con el docente a través del Echo Dot.

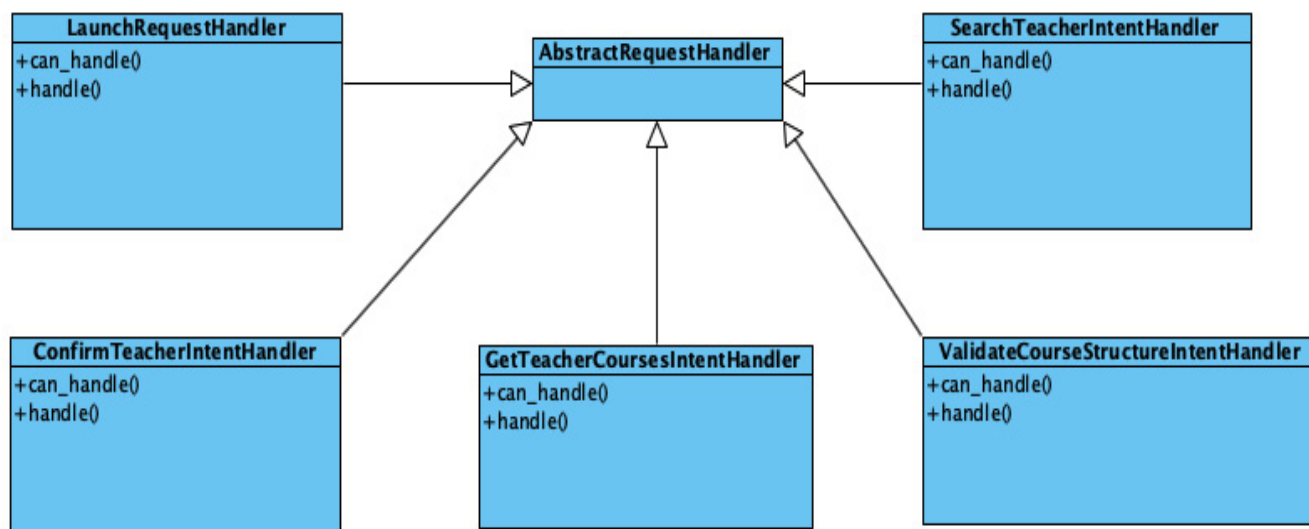


Figura 5. Diagrama de clases de canvas_lms
Fuente Elaboración propia.

Finalmente, en la figura 6, se muestra el diagrama de secuencia de las interacciones entre los comandos de voz y las clases del

Alexa Skill. Se aprecia una casuística de interacción a modo de ejemplo, en la que se busca la información de un docente.

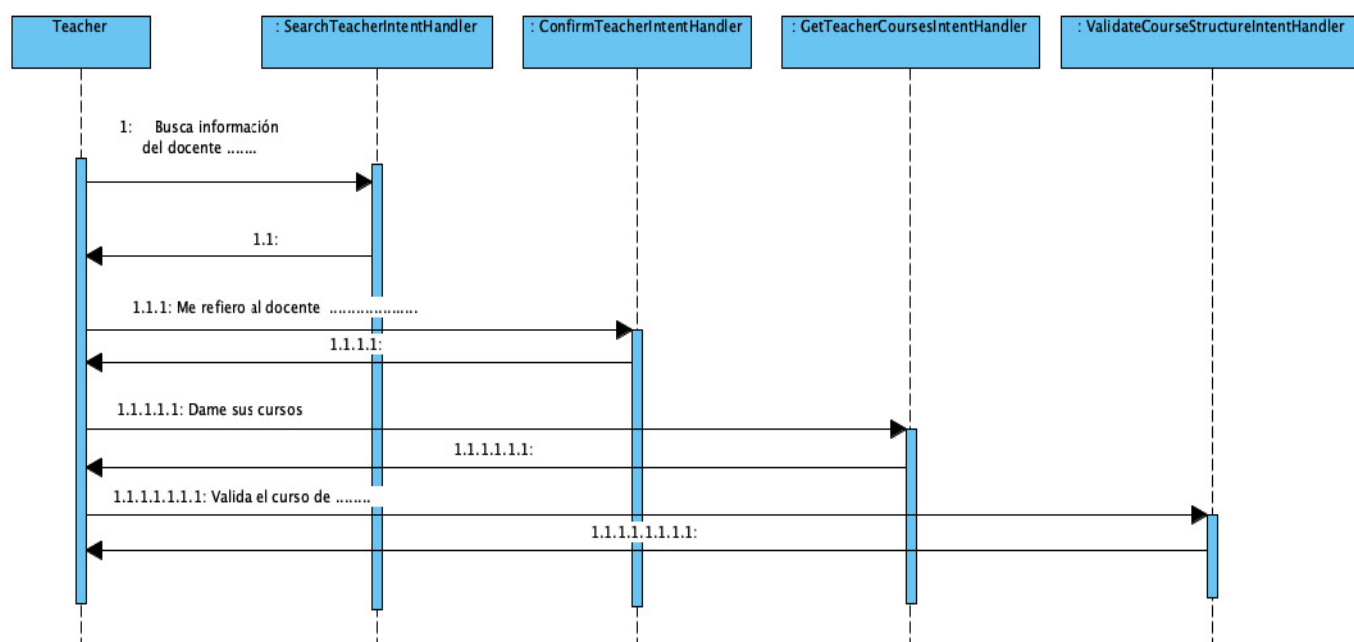


Figura 6. Diagrama de secuencia de canvas_lms
Fuente Elaboración propia.

Implementación

Para la implementación de la biblioteca «api_canvas_lms» se utilizó como entorno de desarrollo el programa Visual Studio Code. En

la figura 7 se aprecia la estructura de archivos y carpetas de la biblioteca.

```

api_canvas_lms
├── api_canvas_lms
│   ├── __init__.py
│   ├── account.py
│   ├── adda.py
│   ├── base.py
│   ├── course.py
│   ├── discussion_topic.py
│   ├── enrollment.py
│   ├── exceptions.py
│   ├── module.py
│   ├── mvc.py
│   ├── user.py
│   └── utils.py
├── api_canvas_lms.egg-info
│   ├── dependency_links.txt
│   ├── PKG-INFO
│   ├── SOURCES.txt
│   └── top_level.txt
├── build
├── dist
├── images
├── INSTALL.md
├── LICENSE
├── README.md
├── setup.py
├── TEST.md
└── uml
    
```

Figura 7. Estructura de la biblioteca api_canvas_lms
Fuente Elaboración propia.

El desarrollo del Alexa Skill se realizó directamente en la plataforma Alexa Developer Console. La Skill se denominó «canvas_lms» y se activará con el comando de voz «Alexa, abrir modo canvas». El flujo de funcionamiento se muestra en la figura 6.

Pruebas

Para poder realizar las pruebas se tuvo que publicar previamente la biblioteca «api_canvas_lms»³ en la plataforma de PyPi [16]. Las pruebas se han realizado desde Alexa Developer Console⁴, donde se encuentra implementado el Alexa Skill «canvas_lms». En la figura 8 se muestra la forma en que se llevaron a cabo las pruebas.

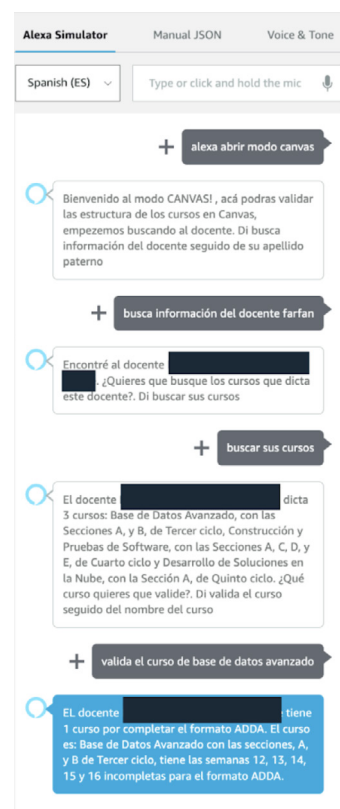


Figura 8. Pruebas realizadas en la plataforma de Alexa Developer Console
Fuente Elaboración propia.

³ Para la fecha de la publicación del paper la versión disponible era la 0.1.30.
⁴ Es la plataforma de desarrollo para Skill de Alexa

6. Implantación y alcance de las pruebas

Después de realizar las pruebas del Alexa Skill «canvas_lms», se procedió a utilizarlo en un dispositivo Echo Dot de cuarta generación. El Skill desarrollado no ha sido publicado; se empleó la versión de desarrollo con su respectiva cuenta de AWS, lo que garantiza el uso controlado del asistente y la protección de los contenidos de los cursos. De esta manera se asegura la protección de los datos. En este escenario controlado se realizaron las pruebas con la plana docente del Departamento de Tecnología Digital de Tecsups.

RESULTADOS

El objetivo de esta investigación es proporcionar un asistente virtual por voz con IA a los docentes del departamento de Tecnología Digital de Tecsups, con el fin de facilitar la revisión de la estructura de los cursos en la plataforma Canvas LMS de acuerdo con la metodología ADDA; de este modo, el docente podrá agilizar el tiempo efectivo de enseñanza a los estudiantes. Por tal motivo, se planteó la siguiente prueba estadística de Kendall donde la hipótesis es:

- **Hipótesis nula (H0):** La opinión de los docentes sobre si el asistente de voz facilita la revisión de sus cursos de acuerdo con la metodología ADDA no está relacionada con el ahorro de tiempo.
- **Hipótesis alternativa (H1):** La opinión de los docentes sobre si el asistente de voz facilita la revisión de sus cursos de acuerdo con la metodología ADDA sí está relacionada con el ahorro de tiempo.

Para poder realizar la prueba de hipótesis, se planteó una encuesta sobre una muestra de 11 docentes del Departamento de Tecnología Digital de Tecsups en el semestre 2025-2. En la tabla 3 se muestra la primera pregunta de la encuesta, donde se puede observar que el 45,45 % de los docentes considera que el asistente por voz les ha facilitado la revisión de la metodología ADDA en sus cursos, mientras que en la tabla 4 se muestra el resultado de la segunda pregunta de la encuesta y se aprecia que el 45,45 % de los docentes cree que el asistente les ha ayudado a reducir el tiempo dedicado a la metodología ADDA en sus cursos.

Tabla 3
Frecuencia y porcentaje de la primera pregunta de la encuesta

¿Cree que el asistente virtual le ha facilitado la revisión de la aplicación de la metodología ADDA en sus cursos asignados en LMS Canvas?	Frecuencia	Porcentaje
Definitivamente sí	5	45,45 %
Sí	4	36,36 %
No estoy seguro	2	18,18 %
No	0	0 %
Definitivamente no	0	0 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4
Frecuencia y porcentaje de la segunda pregunta de la encuesta

¿Cree que el uso del asistente le ahorrará tiempo de dedicación en completar ADDA en sus cursos en el LMS Canvas?	Frecuencia	Porcentaje
Definitivamente sí	5	45,45 %
Sí	4	36,36 %
No estoy seguro	2	18,18 %
No	0	0 %
Definitivamente no	0	0 %

Fuente: Elaboración propia.

Dado que solo se cuenta con 11 docentes encuestados, se aplicó la prueba de correlación de Kendall. El coeficiente de correlación obtenido es de 0,632, con un p -valor de 0,027, por lo que se puede concluir que existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula; es decir, los docentes

que consideran que el asistente de voz les ayuda en la revisión de sus cursos en Canvas LMS de acuerdo con la metodología ADDA también perciben que les ahorra tiempo en la preparación de sus cursos.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados de las pruebas estadísticas se puede concluir que el asistente de voz es un apoyo para los docentes de Tecsup en la revisión de sus cursos de acuerdo con la metodología ADDA y que reduce el tiempo dedicado a la preparación de dichos cursos.

Se han obtenido recomendaciones de los docentes encuestados, quienes indican que la interacción con el Echo Dot a veces es limitada; por este motivo, se recomienda integrar la solución con un modelo LLM [3].

En las pruebas realizadas con los docentes se han identificado casuísticas de la estructura de sus cursos según la metodología ADDA que no pudieron ser consideradas; se recomienda desarrollar una segunda versión de la solución para resolver estos inconvenientes.

La biblioteca «api_canvas_lms» ha sido publicada en la plataforma PyPI para ser reutilizada en otros proyectos de investigación, y se ha licenciado bajo GPL-3.0 para permitir su uso como biblioteca pública por parte de la comunidad de desarrolladores.

REFERENCIAS

- [1] Amazon. (2023, 28 de noviembre). *Create intents, utterances, and slots. Alexa Custom Skills*. <https://developer.amazon.com/en-US/docs/alexa/custom-skills/create-intents-utterances-and-slots.html>
- [2] Amazon. (2025, 14 de enero). *What is the Alexa Skills Kit? Alexa Skills Kit*. <https://developer.amazon.com/en-US/docs/alexa/ask-overviews/what-is-the-alexa-skills-kit.html>
- [3] Amazon Web Services. (2025). *¿Qué es un LLM (modelo de lenguaje de gran tamaño)?* <https://aws.amazon.com/es/what-is/large-language-model/>
- [4] Asistente de IA: aumenta la productividad. (2024). *Main page*. <https://aisera.com/chatbots-virtual-assistants-conversational-ai/>
- [5] Bradley, V. M. (2021). *Uso de sistemas de gestión de aprendizaje (LMS) con instrucción en línea*. <https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ1286531.pdf>
- [6] Chacon, S., & Straub, B. (2005). *Pro Git* (2.ª ed.). Apress.
- [7] Dirección de Calidad y Transformación Educativa - DICTE Instituto Superior Tecnológico Tecsup - Tecsup. (2024). *Modelo educativo Tecsup40*. <https://www.calameo.com/read/0076105321158ddb14650>
- [8] Documentación oficial de Alexa. (2025). *Main page*. <https://developer.amazon.com/en-US/alexa>
- [9] Google Cloud. (2025). *¿Qué es el cloud computing?* <https://cloud.google.com/learn/what-is-cloud-computing?hl=es>
- [10] Harrington, A. (2025). *The deepseek disruption: How China's groundbreaking AI model is transforming the global tech race*. Amazon Digital Services LLC - KDP.
- [11] Instructure, Inc. (2025). *Canvas LMS: Learning management system*. <https://www.instructure.com/lms-learning-management-system>
- [12] Lange, K. (2016). *The little book on REST services*. Independently published.
- [13] Pessoa Medeiros, R., Lisboa Ramalho, G., & Pontual Falcao, T. (2019). *A systematic literature review on teaching and learning introductory programming in higher education*. *IEEE Transactions on Education*, 62(2), 77–90. <https://doi.org/10.1109/TE.2018.2864133>
- [14] Python Software Foundation. (2022). *Python (versión 3.9.13)* [Software]. <https://www.python.org>
- [15] Schneider, M., & Butterfield, A. (2016). *Program library*. En A. Butterfield & G. E. Becchetti (Eds.), *A dictionary of computer science* (7ª ed., p. 831). Oxford University Press.
- [16] The Python Package Index (PyPI). (2024). *Main page*. <https://pypi.org/>
- [17] Thompson, J. (2017). *Amazon Echo Dot companion: The complete guide for doing anything with Echo Dot in 2017* [Edición Kindle].
- [18] Welle, D. (2022). *ChatGPT: El bot viral y futuro de la IA que podría cambiarlo todo*. DW.com. <https://www.dw.com/es/chatgpt-el-bot-viral-y-futuro-de-la-ia-que-podr%C3%ADa-cambiarlo-todo/a-64052465>

ACERCA DEL AUTOR


Jaime Gómez Marín

Coordinador de la carrera de Diseño y Desarrollo de Software de Tecsup, Ingeniero Electrónico por la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), Técnico en Electrónica de Sistemas Computarizados por el Instituto Tecsup, con estudios concluidos en la maestría de Estadística Aplicada por la Universidad Nacional Agraria la Molina (UNALM) y tiene un Micromaster en Statistics and Data Science por el MIT Institute for Data, Systems, and Society (IDSS).

 jgomezz@gmail.com

Silvia Mariana Montoya Saldaña

Docente de la carrera de Diseño y Desarrollo de Software de Tecsup, Ingeniero de Sistemas por la Universidad de Lima (ULIMA), Magister en Administración de Negocios por la Universidad ESAN con mención en Dirección General.

 smontoyas@gmail.com

Recibido: 15-09-2025

Revisado: 07-10-2025

Aceptado: 5-11-2025



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.



↗ INDEXADOS EN LATINDEX 2.0



La Revista I+i ahora forma parte del Catálogo 2.0
de Latindex, **sello internacional de calidad
editorial.**



Impacto de la presentación de resultados trimestrales de los principales ADR peruanos y su influencia en los rendimientos de las empresas.



OOO
OOO

¿Los resultados financieros influyen en las cotizaciones? evidencias desde la BVL con Estudio de Eventos y Ciencia de Datos

Do earnings matter for stock prices? Evidence from the BVL using Event Study methodology and Data Science

RESUMEN

Se estudia el impacto de la presentación de resultados trimestrales de los principales ADR peruanos y su influencia en los rendimientos de las empresas aplicando la metodología del estudio de eventos y el enfoque de ciencia de datos. La investigación es de tipo aplicada cuantitativa, de nivel explicativo y de diseño no experimental longitudinal (2015-2024). Los datos corresponden a 2 514 cotizaciones diarias ajustadas para cada acción, provenientes de Yahoo Finance, y los resultados financieros de Alpha Advantage, obtenidos con el uso del lenguaje R y APIs. Los hechos estilizados revelaron que los retornos presentaban una distribución simétrica, concentrados en la media cero, con colas pesadas, y que en general provenían de procesos autorregresivos de orden 2. Para el estudio de eventos se utilizó el esquema planteado por MacKinlay [12]. El evento estudiado fue la presentación de resultados trimestrales; se seleccionó el modelo de mercado para estimar el retorno esperado de las acciones y el retorno de mercado peruano se estimó por medio del ETF EPU. La ventana de estimación se estableció en 250 cotizaciones diarias previas al evento, la ventana del evento en un día y la ventana posevento en 10 días. A diferencia de MacKinlay [12], se empleó un esquema de ciencia de datos para afinar los valores umbrales en la categorización de la sorpresa del resultado (real frente al estimado), que se estableció en 5 %, en contraste con el 2,5 % planteado por MacKinlay [12], considerando que en los mercados emergentes se presentan escenarios políticos o sociales que afectan a las empresas. Clasificados los 144 eventos, se ajustaron modelos de regresión. Tres acciones mostraron todos los modelos significativos y la cuarta, parcialmente (67 %). Se identificó como activo menos riesgoso a BAP y a BVN como el más riesgoso. Se reveló que los eventos positivos modifican en promedio la cotización en 0,87 %, mientras que para los negativos y neutros no se puede ser concluyente. Los positivos, en promedio, tardan tres días en alcanzar sus máximos, en tanto que los negativos lo hacen en cinco días para sus mínimos.

ABSTRACT

This study examines the impact of quarterly earnings announcements of major Peruvian American Depositary Receipts (ADRs) on stock returns, applying the Event Study methodology within a Data Science framework. The research is applied, quantitative, explanatory, and follows a non-experimental longitudinal design covering the period 2015–2024. The dataset comprises 2,514 daily adjusted price observations for each stock obtained from Yahoo Finance, along with financial results sourced from Alpha Vantage through R programming and API integration.

The stylized facts show that returns exhibit a symmetric distribution centered around zero, display fat tails, and generally follow autoregressive processes of order 2. Based on MacKinlay's (1997) framework, the event analyzed corresponds to quarterly earnings announcements. Expected returns were estimated using the market model, with the EPU ETF serving as a proxy for the Peruvian market. The estimation window consisted of 250 trading days prior to the event, while the event window and post-event window were set at one day and ten days, respectively.

A Data Science approach was incorporated to refine the threshold for classifying earnings surprises (actual vs. expected), setting it at 5% rather than the traditional 2.5%, given the higher sensitivity of emerging markets to political and social shocks. A total of 144 events were modeled through regression analysis. Three stocks showed statistically significant results across all specifications, while the fourth did so in 67% of the cases. BAP was identified as the least risky asset and BVN as the riskiest.

The findings indicate that positive earnings announcements generate an average abnormal return of 0.87%, while the effects of negative and neutral announcements remain statistically inconclusive. On average, positive events reach their price peak



Palabras Claves

Estudio de eventos, ciencia de datos, BVL, ETF EPU, ADR, ETF

Key words

Event Study, Data Science, BVL, EPU ETF, ADR, abnormal returns

within three days, while negative events reach their minimum within five days.

INTRODUCCIÓN

El estudio de eventos es una herramienta que busca explicar las consecuencias de un factor —el evento— en el desarrollo de la variable bajo estudio. El impacto de ese factor sobre la variable puede ser rápido, como en el caso de las variables financieras sujetas a eventos tales como la publicación de resultados, los cambios en la conformación del equipo directivo, las fusiones o adquisiciones, entre otros. Existen también variables cuya evolución puede demorar semanas e incluso meses, como las económicas o sociales, en relación con los cambios estructurales de un país [12]. El estudio de eventos podría considerarse uno de los diseños de investigación más

antiguos, ya que las personas tratamos de explicar un efecto como consecuencia de algún evento; por ejemplo, cuando alguien coloca un cartel en su casa con el mensaje «No se aceptan vendedores» y, como consecuencia, observa que luego el número de visitas de vendedores disminuye [9]. Según Corrado, la aplicación del estudio de eventos en finanzas como esquema de trabajo comenzó con el análisis contable y financiero, para posteriormente extenderse a otras disciplinas como la economía, la historia, el derecho, el *marketing* y las ciencias políticas [4].

El mecanismo mediante el cual actúa un evento en las series financieras se muestra en la figura 1, donde se grafica un evento positivo en $t = 0$, lo que produce un salto en el precio de la acción cuando se publican los resultados de ganancias. El estudio de eventos requiere un valor de referencia para determinar si el cambio fue producido por el evento o por otras condiciones; en el ejemplo, se considera el portafolio de mercado¹.

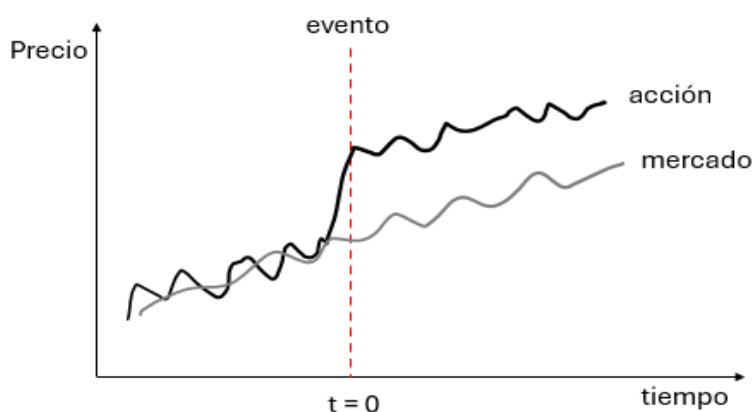


Figura 1. Efecto de un evento positivo sobre una acción vs. el mercado

El presente artículo aplica el estudio de eventos sobre un mercado emergente, la Bolsa de Valores de Lima (BVL), y busca determinar qué tipo de eventos (positivos, negativos o neutros) en la publicación trimestral de resultados son estadísticamente significativos en los rendimientos de las acciones a corto plazo. La muestra de acciones está conformada por los principales ADR² peruanos que cotizan en la bolsa estadounidense: Credicorp (BAP), Southern Copper Corporation (SCCO), Buenaventura (BVN) y Cementos Pacasmayo (CPAC). Como estimador del portafolio de mercado se utiliza el ETF³ EPU, que también cotiza en el mercado estadounidense.

La aplicación del estudio de eventos ha sido ampliamente desarrollada en mercados consolidados, donde las condiciones presentan una amplia diversidad de sectores, empresas,

volúmenes considerables de transacciones diarias y un gran número de participantes. En cambio, su aplicación en mercados emergentes es más limitada y las condiciones de mercado más restrictivas, como ocurre en el mercado peruano. Según Rocca, la BVL presenta una moderada capitalización bursátil, una liquidez media y sectores dominantes como la minería y la banca. Por ello, las iniciativas de integración de mercados, como el MILA (Mercado Integrado Latinoamericano, conformado por Perú, Chile, Colombia y México), permitirían superar estas limitaciones al integrarse con países que ofrecen mayor diversidad sectorial, liquidez, competitividad y profundidad [15].

La revisión bibliográfica sobre la aplicación del estudio de eventos en el mercado peruano evidencia una diversidad de sucesos que afectan el retorno de las acciones, desde eventos políticos del gobierno y políticas del BCRP hasta decisiones empresariales como la política de dividendos o el cambio de CEO, tal como se aprecia en la tabla 1. El análisis del efecto de la sorpresa en los resultados de los principales ADR peruanos constituye un tema de interés, pues permite poner a prueba la teoría de eventos en mercados emergentes, un ámbito aún poco explorado.

El esquema de trabajo econométrico utilizado corresponde al delineado por MacKinlay [12] y se basa en el modelo de mercado para pronosticar el rendimiento de las acciones

- 1 Para el caso peruano, la referencia sería el Índice General de la BVL y para el americano el SP500.
- 2 ADR, proviene del término inglés *American Depositary Receipt*, que refiere a acciones de empresas extranjeras al mercado americano que cotizan en ella por medio de un banco americano y pone de esta manera instrumentos de otros mercados a inversores en USA.
- 3 ETF, proviene del término inglés *Exchange-Traded Fund*, un instrumento que tiene un portafolio de activos subyacentes y que puede ser transado como si se tratase de una acción.

y, consecuentemente, calcular la diferencia entre el retorno observado y el retorno estimado. A este valor se le denomina retorno anormal y, para evaluar su impacto, se agregan los resultados con el fin de determinar el CAR (del inglés *Cumulative Abnormal Return*) para cada acción en cada categoría de evento.

La figura 2 muestra los resultados del estudio, donde se observa que los anuncios positivos y negativos generan un impacto a corto plazo alrededor del evento ($t = 0$); de esta manera, los positivos producen en promedio un salto al alza, los negativos una caída y los neutros no presentan un efecto significativo.

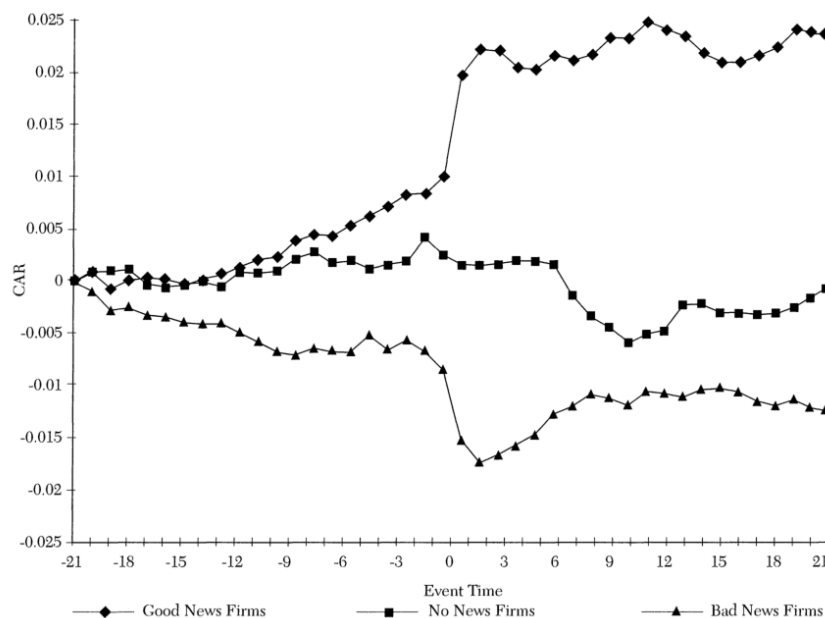


Figura 2. Agregado de retornos anormales (CAR) utilizando el modelo de mercado

Fuente: [12].

La investigación se refuerza mediante la aplicación del esquema de ciencia de datos CRISP-DM para la revisión y comprensión de las variables, es decir, de las series temporales financieras. Se analizan los hechos estilizados de las series de tiempo de forma individual y se encuentra que los retornos presentan un valor esperado prácticamente nulo; se agrupan (efectos cluster, más pronunciados en las caídas que en las subidas), son simétricos, muestran una concentración en el valor esperado (kurtosis > 3) y, en general, provienen de procesos autorregresivos de orden 2, AR(2), conforme al modelo ARIMA. La correlación entre los retornos de las acciones y el mercado muestra un buen nivel de ajuste; en contraste, la correlación entre las acciones es baja, lo que permitió que los ajustes mediante el modelo de regresión lineal obtuvieran un buen rendimiento.

A diferencia de MacKinlay [12], quien emplea un umbral del 2,5 % para determinar la categoría del evento, se analiza la distribución del porcentaje de la sorpresa entre los retornos reales y los

estimados y, con base en ello, se selecciona un umbral del 5,0 %. Este valor es mayor porque los mercados emergentes —entre los que se clasifica al Perú— son más volátiles, tal como se aprecia en los histogramas del porcentaje de sorpresa. Esto implica que se debe ampliar el margen para evitar el impacto de variables ajenas al evento analizado, como factores políticos o sociales.

Respecto a la ventana temporal del evento, se consideró un día, dado que la información de los resultados financieros en la actualidad se difunde con gran rapidez y la posibilidad de arbitraje sobre esta información es reducida.

Los resultados muestran que los eventos clasificados como positivos son estadísticamente significativos, mientras que para los negativos y neutros no se puede establecer un impacto concluyente. Para el día del evento, en promedio, la cotización mejora en 0,87 % y mantiene un impacto positivo durante los tres días siguientes.

Tabla 1
Revisión de bibliografía

Estudio (Autor/Año)	Modelo utilizado (días)	Modelo de retorno	Umbral de categorización	Principal hallazgo
Salas [16] Cambios anticipados positivos y negativos en la tasa de interés de referencia y la rentabilidad del índice general de la BVL 2003-2019	Estimación: toda la ventana de datos	Econométrico	variación anticipada = cambio de tasa interbancaria vs. cambio de tasa del BCRP positiva: variación anticipada > 0 negativa: variación anticipada < 0	El mercado chileno y peruano mostraron cambios significativos, especialmente en las empresas pequeñas, el mercado chileno reacciona más que el peruano.
Melgarejo et al. [13] The stock market's reaction to accounting information: The cases of Chile and Perú	Evento: [-1, +1] Estimación: [-60, -2]	Mercado	Cambio interanual de eps ajustado por crecimiento: Positivo: cambio > 0 Negativo: cambio < 0	No existe evidencia de que la modificación de la política de dividendos afecte la cotización, contrario a la teoría de mercados desarrollados.
Tocón [18] Cambio de CEO y precio de acciones	Estimación: 300 Evento: [-10, +10]	Mercado	Positivo: CAAR significativo y positivo. Negativo: CAAR significativo y negativo. Neutro: CAAR no significativo.	Los cambios de los CEO tienen un impacto en 63% de las observaciones (54% positivas, 46% negativas).
García [7] El contenido informativo de los anuncios de dividendos y la reacción del precio de las acciones: Perú 2001-2010	Estimación: 60 Evento: [-5, +5]	Mercado	Determina cambio como la variación respecto al año anterior: incremento, reducción y sin cambio	Las decisiones del BCRP influyen la rentabilidad de la BVL de forma asimétrica, los cambios positivos tienen mayor impacto que los negativos.
Fuenzalida, Mongrut, Nash [5] Stock Splits en La BVL: ¿Afectan el rendimiento y la liquidez de Los títulos?	Estimación: 100 Evento: [-15, +15]	Mercado	CAAR ≠ 0	No se encontraron hallazgos de impacto en el retorno. Aumentaron los volúmenes negociados.
Hernandez [8] Macroeconomic Reform and Policy: The Case of Peru	Estimación: 1996-1997 Evento: [-2, +2]	Mercado y CAPM	Categoriza con base al CAAR de varios años	a. Fujishock, en general positivo. b. Nuevas leyes, en general positivo. c. Autogolpe, negativo. d. Captura de Guzmán, en general positivo.

FUNDAMENTOS

Ciencia de datos

Es una práctica interdisciplinaria que incorpora métodos de ingeniería, estadística, minería de datos, *machine learning* y analítica predictiva. De forma similar a la investigación de operaciones, la ciencia de datos se centra en implementar decisiones basadas en datos y en gestionar su aplicación, por lo que posee un enfoque eminentemente práctico [21].

Metodología CRISP-DM

Es un esquema de trabajo para proyectos de ciencia de datos, minería de datos, entre otros, elaborado por un consorcio de empresas (IBM, NCR y Daimler) en 1996, que se ha consolidado como el estándar tanto en el ámbito de la investigación como en el de los negocios. Plantea seis fases: a) comprensión del negocio, b) comprensión de los datos, c) preparación de los datos, d) modelado, e) evaluación y f) despliegue [2]. Aunque el consorcio se disolvió, IBM ha actualizado algunos aspectos y, como modelo de proceso, sigue siendo ampliamente utilizado [12].

Regresión lineal simple

Es una técnica de aprendizaje supervisado en la que se asume que la variable independiente X influye en la variable dependiente Y , es decir, $X \rightarrow Y$. Esta influencia se expresa mediante una línea recta según la siguiente forma:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i$$

En la expresión previa, β_0 es el coeficiente que representa el parámetro de intercepción poblacional; β_1 es el coeficiente que representa el parámetro de regresión poblacional asociado a la variable predictora X_i ; ε_i es la variable aleatoria no observable, conocida como término aleatorio, que contiene los efectos de otras variables predictoras que no aparecen de forma explícita en el modelo.

Los supuestos del modelo son los siguientes: (1) la variable Y_i tiene una media y varianza constante (homocedasticidad); (2) la variable X_i es independiente de ε_i , es decir, no hay error en su medición; (3) la variable $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$, donde el valor constante de σ^2 indica que los valores de Y_i son independientes y no existe relación entre ellos [17].

Prueba de rango de Wilcoxon

Es una prueba de hipótesis no paramétrica utilizada para contrastar una hipótesis nula referente al valor de la mediana poblacional. Es más sensible que la prueba de los signos, ya que considera la diferencia entre el valor muestral y el valor hipotético [14].

Sistema financiero

Conjunto de agentes, regulaciones y plataformas que permiten captar y administrar recursos financieros bajo supervisión y regulación. En el caso peruano, los organismos que regulan el sistema financiero son la Superintendencia de Banca, Seguros y AFP, y la Superintendencia del Mercado de Valores. El proceso de intermediación indirecta se realiza a través de los bancos, que reciben el ahorro o excedente de los agentes superavitarios y lo trasladan hacia los agentes deficitarios, como las empresas que requieren recursos para proyectos de inversión o financiamiento de corto plazo. Los agentes de intermediación generan ganancias por la diferencia entre la tasa de interés a la que prestan y la que otorgan (spread).

En el proceso de intermediación directa, los agentes superavitarios y deficitarios negocian directamente valores mobiliarios dentro del mercado de valores. De esta manera, el inversionista (agente superavitario) asume los riesgos de su decisión y puede perder parte o la totalidad de lo invertido. La figura 3 muestra el sistema de intermediación directa en el Perú [15].

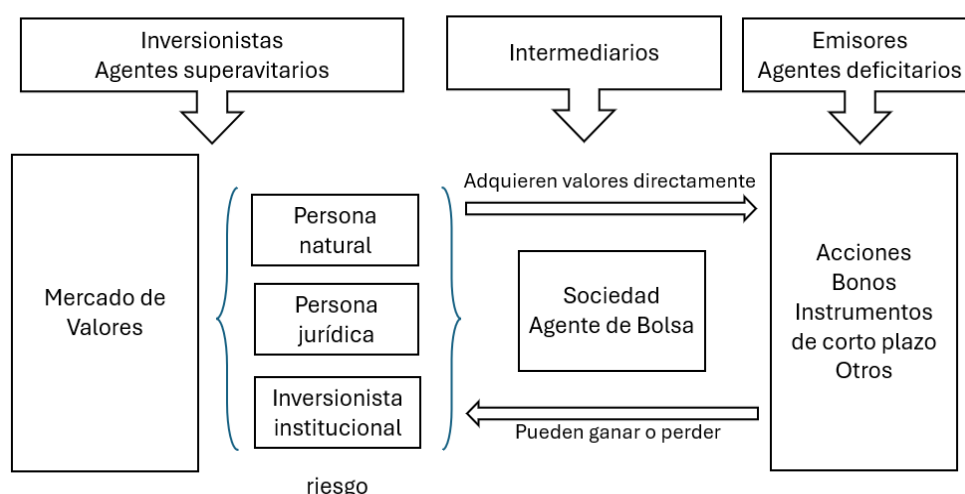


Figura 3. Sistema de intermediación directa en el Perú

Fuente: [15].

Exchange Traded Fund, ETF

Un *Exchange Traded Fund* (ETF) es un fondo de inversión que mantiene diversos activos subyacentes y puede comprarse y venderse como si se tratara de una acción común⁴. La mayoría de los ETF se estructuran para seguir el precio de un determinado activo, motivo por el cual se les denomina instrumentos pasivos. De esta manera, pueden replicar el precio de un metal, como el oro o el cobre, o el de un índice que representa un mercado; el más conocido es el que sigue al S&P 500, denominado SPY en el mercado estadounidense. La industria de los ETF ha

crecido considerablemente en las últimas dos décadas; según Investopedia, pasó de 0,2 billones de dólares estadounidenses en 2003 a 9,55 billones en 2022. Los tipos de ETF se han diversificado⁵ y, además de los pasivos, existen los que siguen países, regiones o sectores, así como los activos, apalancados o aquellos que apuestan en corto, entre otros.

En el presente trabajo se utilizó el ETF EPU como estimador del mercado peruano, dado que posee un portafolio de acciones representativas de empresas cuyos activos se encuentran

4 Véase: <https://www.investopedia.com/terms/e/etf.asp>

5 Un buen ejemplo de selector de ETF lo proporciona VettaFI en <https://etfdb.com/etfs/>

localizados en el Perú. El EPU es gestionado por la empresa *iShares*, con base en un índice elaborado para seguir al país, denominado MSCI Perú. La composición del 90 % del portafolio del EPU a diciembre de 2024 se presenta en la tabla 2, información

obtenida de la página de *iShares*⁶. El peso de las cuatro empresas seleccionadas para el estudio de eventos representa el 50,5 % del EPU.

Tabla 2
Conformación del EPU al 90 %, tomado al 31 de diciembre de 2024

Acción	Empresa	Sector	valor de mercado	peso %	acum %
BAP	CREDICORP LTD	Financials	16,367,910	22,9	22,9
SOCO	SOUTHERN COPPER CORP	Materials	15,177,064	21,2	44,1
BVN	BUENAVENTURA ADR REPRESENTING	Materials	3,115,642	4,4	48,5
HOC	HOCHSCHILD MINING PLC	Materials	3,057,113	4,3	52,8
CVERDEC1	CERRO VERDE	Materials	2,827,999	4,0	56,7
ALICORC1	ALICORP	Consumer Staples	2,134,236	3,0	59,7
FERREYC1	FERREYROS SAA	Industrials	2,002,748	2,8	62,5
FALABELLA	FALABELLA SACI SA	Consumer Discretionary	1,809,008	2,5	65,1
INRETC1	INRETAIL PERU CORP	Consumer Staples	1,772,063	2,5	67,5
LAUR	LAUREATE EDUCATION INC	Consumer Discretionary	1,764,089	2,5	70,0
WPM	WHEATON PRECIOUS METALS CORP	Materials	1,681,996	2,4	72,4
BBVAC1	BANCO BBVA PERU SA	Financials	1,663,157	2,3	74,7
TFPM	TRIPLE FLAG PRECIOUS METALS CORP	Materials	1,657,427	2,3	77,0
PAAS	PAN AMERICAN SILVER CORP	Materials	1,652,639	2,3	79,3
PARAUCO	PARQUE ARAUCO SA	Real Estate	1,647,930	2,3	81,6
IFS	INTERCORP FINANCIAL SERVICES INC	Financials	1,616,781	2,3	83,9
1208	MMG LTD	Materials	1,606,931	2,3	86,1
FVI	FORTUNA MINING CORP	Materials	1,601,150	2,2	88,4
CPACASC1	CEMENTOS PACASMAYO SAA	Materials	1,443,280	2,0	90,4

Retorno de las series financieras

La mayoría de los estudios en finanzas utilizan los retornos y no los precios. Esto se debe a dos aspectos: primero, que para los inversores ofrecen una perspectiva de comparación independiente de la magnitud y del tipo de activo analizado; y segundo, que los retornos presentan propiedades estadísticas que los hacen más fáciles de trabajar [19].

Sea P_t el precio de un activo en el tiempo t y P_{t-1} el precio en el período anterior $t - 1$; se puede definir el retorno R_t de las siguientes maneras:

Retorno simple

$$R_t = \frac{P_t - P_{t-1}}{P_{t-1}}$$

Retorno continuo

$$r_t = \ln(1 + R_t) = \ln\left(\frac{P_t}{P_{t-1}}\right)$$

Debido a las ventajas que ofrece trabajar con logaritmos —ya que transforman las multiplicaciones en sumas—, en el presente artículo se utilizará el retorno continuo. En general, $R_t \approx r_t$ [20].

Hechos estilizados de las variables financieras

Los hechos estilizados son patrones de las series económicas y financieras determinados empíricamente. El término se atribuye a Kaldor (1957) y se emplea, por ejemplo, en los estudios de crecimiento económico o de ciclo económico [6]. Para los retornos diarios del mercado estadounidense entre 1962 y 1994, Campbell (1997) encontró que los índices de mercado presentan una curtosis elevada —mayor que la de las acciones individuales— y un claro indicio de colas pesadas. En cuanto a la asimetría, los índices muestran valores negativos, mientras que las acciones individuales presentan valores positivos [1]. Una revisión detallada de la taxonomía, características y bibliografía puede consultarse en la página web de Sewell (2011)⁷.

6 Véase: <https://www.ishares.com/us/products/239606/?referrer=tickerSearch>

7 Véase: <https://finance.martinsewell.com/stylized-facts/>

Modelos ARIMA, AutoRegressive Integrated Moving Average

Es uno de los modelos de análisis de series temporales más difundidos. Utiliza los conceptos de estacionariedad (la serie no presenta tendencia ni estacionalidad) y autocorrelación (los valores actuales están relacionados con las observaciones previas). Combina el modelo autorregresivo (AR) y el de medias móviles⁸ (MA), como se presenta en la siguiente fórmula [10]:

$$(1 - \phi_1 B - \dots - \phi_p B^p) (1 - B)^d y_t = c + (1 + \theta_1 B + \dots + \theta_q B^q) \varepsilon_t$$

Donde par el modelo ARIMA (p, d, q):

p : es el orden del proceso AR y ϕ_i el coeficiente de orden i ($i \leq p$)

d : es el orden de la diferenciación

q : es el orden del proceso MA y θ_j el coeficiente de orden j ($j \leq q$)

B : es el operador de desplazamiento, así $By_t = y_{t-1}$, $B^2 y_t = y_{t-2}$

Esquema de trabajo del Estudio de Eventos

En esta sección, se explica el esquema propuesto por MacKinlay [12]. La selección del modelo y la descripción de las fórmulas corresponden a su publicación [12].

Establecer ventanas de tiempo para el estudio

Se refiere a establecer las ventanas de tiempo para lo siguiente:

- Ventana de estimación: comprende los días previos al evento que se utilizan para la estimación del modelo.
- Ventana de evento: abarca los días considerados para evaluar el impacto del evento.
- Ventana posevento: permite analizar la evolución del CAR.

Selección del modelo de estimación

Existen varios modelos para la estimación de los rendimientos de las acciones. En el presente trabajo se seleccionó el modelo de mercado, que es el más utilizado; otras opciones incluyen la media constante, el CAPM, el modelo de factores, entre otros.

$$R_{it} = \alpha_i + \beta_i R_{mt} + \varepsilon_{it}, \quad E(\varepsilon_{it}) = 0, \quad Var(\varepsilon_{it}) = \sigma_{\varepsilon_i}^2$$

Donde:

R_{it} es el retorno de la acción i en el día t

R_{mt} es el retorno del mercado en el día t

α_i, β_i son los coeficientes del modelo lineal

ε_{it} es el componente aleatorio no explicado por el modelo para la acción i en el día t

Determinar los retornos anormales y analizar resultados

$$AR_{it} = R_{it} - E(X_t)$$

Donde:

AR_{it} es el rendimiento anormal de la acción i en el día t perteneciente a la ventana de evento

X es la variable explicatoria en el día t , para el caso seleccionado es el retorno de mercado

Con base en los retornos anormales se calcula el CAR, *Cumulative Abnormal Return*, para cada acción i en la ventana de evento del día τ_1 al τ_2 .

$$CAR_i(\tau_1, \tau_2) = \sum_{t=\tau_1}^{\tau_2} AR_{it}$$

Luego, se estima en análisis transversal el promedio de los CAR para las N acciones del estudio.

$$\overline{CAR}(\tau_1, \tau_2) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N CAR_i(\tau_1, \tau_2)$$

Prueba de hipótesis

Se tienen a disposición varias pruebas estadísticas para evaluar la media o mediana del CAR en el estudio se aplicaron la prueba t (paramétrica) y la prueba de Wilcoxon (no paramétrica).

METODOLOGÍA

Se combinan dos metodologías de trabajo: el esquema principal sigue el enfoque econométrico planteado por MacKinlay [12] para el estudio de eventos, y el segundo se basa en la metodología *Cross Industry Standard Process for Data Mining* (CRISP-DM) para afinar y sustentar las decisiones sobre los valores de los parámetros, considerando que el mercado de acciones peruano (BVL) presenta características propias de un mercado emergente.

Etapas de recolección de datos

Los datos utilizados comprenden el periodo del 1 de enero de 2015 al 31 de diciembre de 2024 y se obtuvieron de dos fuentes. El primer *dataset* está conformado por las cotizaciones diarias de los principales ADR peruanos, provenientes de *Yahoo Finance* a través de las API proporcionadas por los paquetes de R. El segundo *dataset* corresponde a la publicación de los resultados financieros trimestrales, en especial al porcentaje de sorpresa, obtenido mediante la API de *Alpha Vantage*⁹. En ambos casos se empleó la capa gratuita de información.

⁸ No debe ser confundido con el suavizamiento que utiliza los promedios móviles para hacer un pronóstico con base a la media de una ventana de datos.

⁹ <https://www.alphavantage.co/documentation/#earnings>

Los paquetes utilizados para el tratamiento de los datos se presentan en la tabla 3. La estructura del *dataset* de cotizaciones diarias se muestra en la tabla 4; para el análisis de las series temporales se seleccionó el precio ajustado, ya que incorpora los eventos empresariales, como la entrega de dividendos, los *splits*, entre otros.

La estructura del *dataset* de ganancias trimestrales se presenta en la tabla 5. La fecha de presentación de resultados (*reportedDate*) y el porcentaje de sorpresa de ganancias (*surprisePercentage*) son variables relevantes, ya que el momento de presentación puede implicar el ajuste de la fecha en los casos de posmarket.

Tabla 3
Paquetes de RStudio empleados

Paquete	Uso
bizdays	cálculo de días laborables en la bolsa de Nueva York
broom	limpieza y organización de modelos de regresión lineal
corrplot	visualización de matriz de correlaciones
exactRankTests	prueba de hipótesis no paramétrico Wilcoxon
ggplot2	visualización de series de tiempo, <i>insights</i> , etc.
httr	<i>web scrapping</i> para obtener ganancias por acciones de Alpha Vantage
janitor	limpieza de datos
jsonlite	<i>web scrapping</i> para obtener ganancias por acciones de Alpha Vantage
lubridate	manejo de datos del tipo fecha
parallel	habilitación de manejo paralelo de <i>cores</i> del procesador
PerformanceAnalytics	cálculo de estadísticas financieras
purrr	habilitación de la programación funcional
readxl	lectura de archivos Excel
rvest	<i>web scrapping</i> para obtener ganancias por acciones de Alpha Vantage
skimr	revisión preliminar de datos
tidyquant	obtención de cotizaciones
tidyverse	manipulación de datos

Tabla 4
Estructura del *dataset* de cotizaciones diarias

Variable	Ejemplo	Descripción
symbol	EPU	mnemónico que identifica a la acción de la empresa
date	2015-01-02	fecha de cotización
open	31,9699993	cotización al inicio de operaciones (USD)
high	32,1399994	cotización más alta durante el día de operación
low	31,7299995	cotización más baja durante el día de operación
close	31,9300003	cotización de cierre del día de operación
volume	105200	número de acciones transadas durante el día
adjusted	23,428688	cotización ajustada, es el valor que se utilizará para el análisis

Tabla 5
Estructura del *dataset* de reporte de ganancias trimestrales

Variable	Ejemplo	Descripción
ticket	BAP	mnemónico que identifica a la acción de la empresa
fiscalDateEnding	2024-12-31	fecha fin del periodo del que se presentará información
reportedDate	2025-02-10	presentación de los resultados
reportedEPS	3.7942	ganancias por acción (eps) reportado
estimatedEPS	4.3402	estimado de las ganancias por acción resultados
surprise	-0.546	diferencia entre lo reportado y lo estimado
surprisePercentage	-12.5801	porcentaje de sorpresa de lo reportado vs lo estimado
reportTime	posmarket	momento de publicación de resultados antes del mercado (premarket), luego del cierre (posmarket)

Etapas de limpieza de datos y generación de variables

El *dataset* de cotizaciones se encontraba limpio y se generaron variables de series temporales diarias para el retorno de cada una de las acciones de los principales ADR peruanos analizados: Credicorp (BAP), Southern Copper Corporation (SCCO), Buenaventura (BVN) y Cementos Pacasmayo (CPAC), así como para el referente del mercado peruano representado por el ETF *iShares MSCI Peru ETF* (EPU).

Para el *dataset* de ganancias trimestrales se aplicaron las siguientes consideraciones:

- En caso de no existir valor de ganancia esperada, se asumió como tal el valor reportado y, consiguientemente, la sorpresa se consideró del 0 %, lo que genera eventos neutros.
- Si el momento de la publicación de resultados correspondía al posmarket, se utilizó como fecha efectiva el siguiente día hábil de negociación.
- El porcentaje de sorpresa de ganancias constituye una variable clave para la categorización de los eventos como positivos, neutros o negativos.

Análisis exploratorio de datos

Hechos estilizados

Las series temporales de los retornos de las variables financieras exhiben características empíricas en sus distintas ventanas temporales (diaria, semanal, mensual, etc.). En la figura 4 se presenta el gráfico de retornos diarios para el EPU (mercado) y BAP (Credicorp, como representante de un ADR), y en la tabla

6 se muestran las estadísticas relevantes de todas las acciones analizadas. Se puede concluir lo siguiente:

- La media y la mediana de los retornos diarios se sitúan alrededor de cero (figura 6).
- Estacionariedad: no existe tendencia en la serie.
- Se observan periodos donde la volatilidad se agrupa, es decir, presenta *clustering*. Por ejemplo, durante marzo de 2020, con la pandemia de COVID-19, tanto la cotización de BAP como la del mercado mostraron gran volatilidad, con movimientos al alza y a la baja superiores al 10 %, tras los cuales los niveles retornaron a rangos normales.
- Las caídas suelen ser más pronunciadas que las subidas (figura 4 y tabla 6).
- La curtosis es muy alta para todas las series, lo que evidencia una mayor concentración alrededor de la media en comparación con una distribución normal y la presencia de colas pesadas. El valor más alto corresponde a BAP (12,2) y el menor a SCCO (3,72) (figura 6 y tabla 6).
- La asimetría es relativamente baja y muestra el valor más alto para el EPU (-0,70) y el menor para BVN (-0,007).
- Los retornos no siguen una distribución normal (figura 6).
- Los retornos acumulados no presentan estacionariedad y sugieren el comportamiento de un proceso *random walk* (figura 5).
- Los modelos ARIMA de las series corresponden, en general, a procesos AR (2), como se aprecia en la tabla 7.

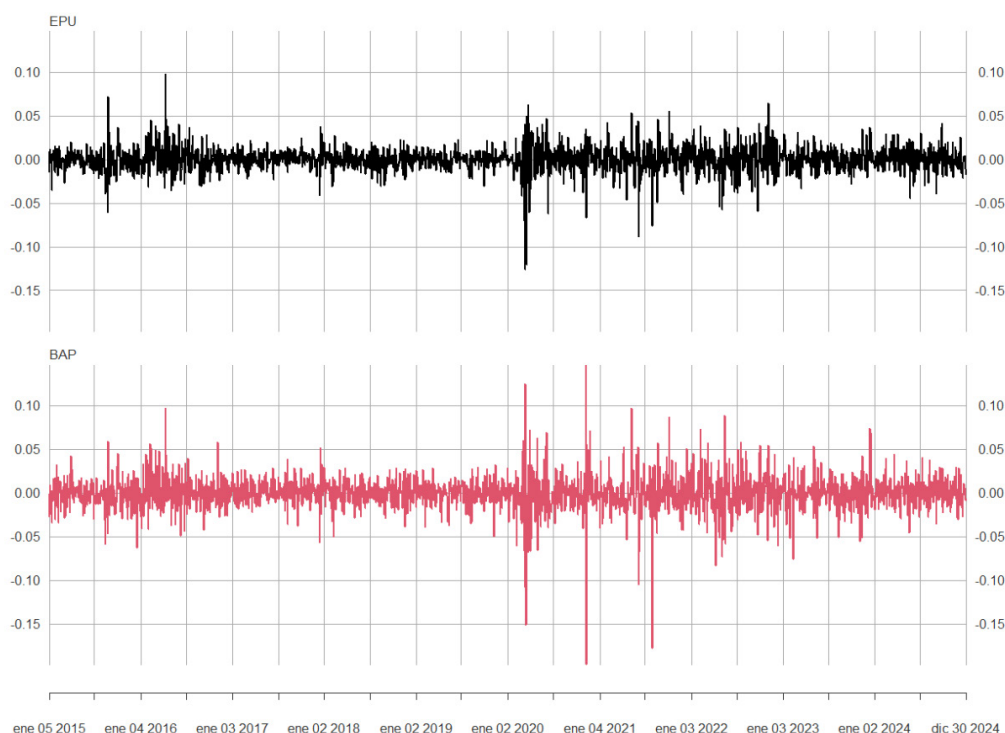


Figura 4. Retornos diarios para el EPU y BAP (de enero de 2015 a diciembre de 2024)

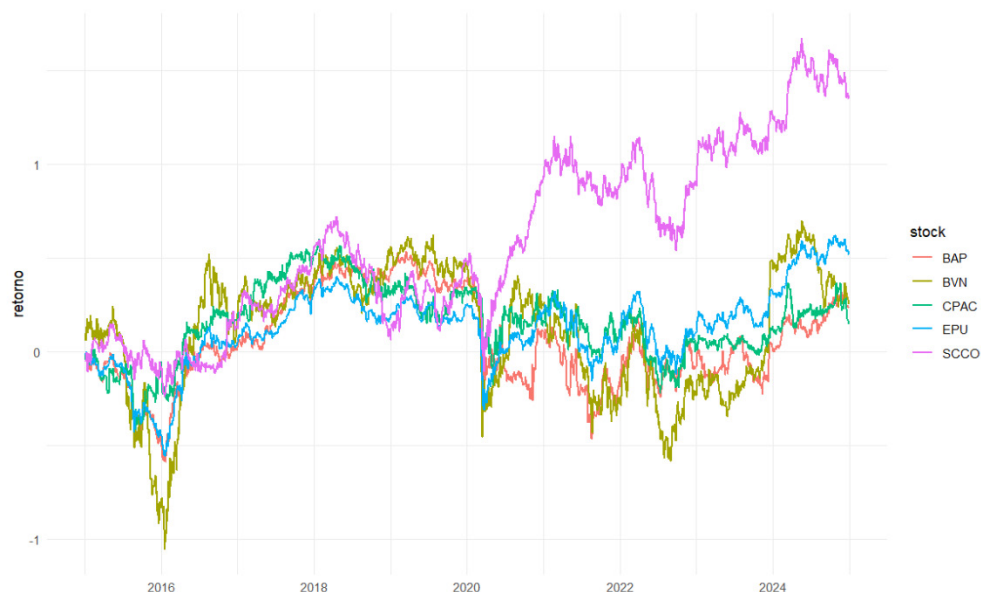


Figura 5. Retornos diarios acumulados (de enero de 2015 a diciembre de 2024)

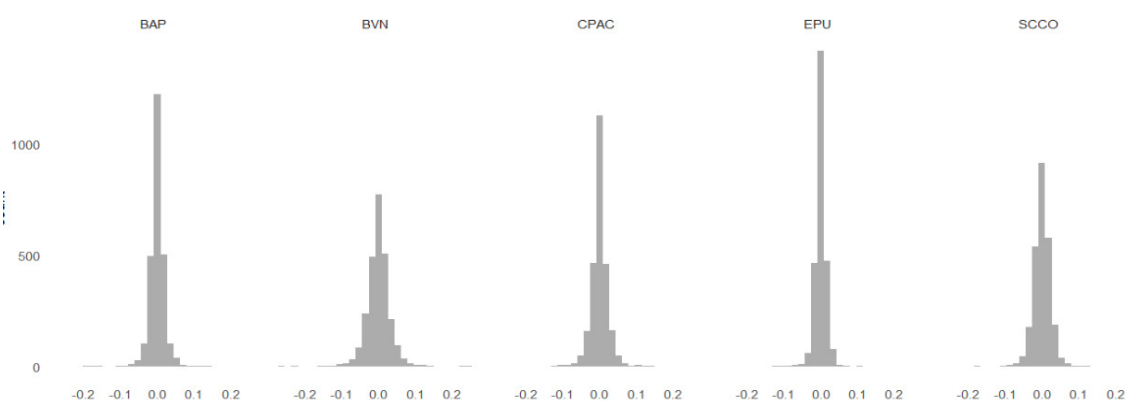


Figura 6. Histograma de los retornos diarios para las acciones en estudio

Tabla 6

Estadísticas de los retornos diarios de las acciones

estadístico	EPU	BAP	SCCO	BVN	CPAC
Observations	2514	2514	2514	2514	2514
Minimum	-0,1261	-0,1969	-0,1708	-0,2664	-0,1176
Quartile 1	-0,0071	-0,0091	-0,0121	-0,0158	-0,0104
Median	0,0006	0,0000	0,0006	0,0000	0,0000
Arithmetic Mean	0,0002	0,0001	0,0005	0,0001	0,0001
Geometric Mean	0,0001	-0,0001	0,0003	-0,0004	-0,0002
Quartile 3	0,0075	0,0092	0,0134	0,0168	0,0102
Maximum	0,0979	0,1466	0,1290	0,2438	0,1329
SE Mean	0,0003	0,0004	0,0004	0,0006	0,0004
LCL Mean (0,95)	-0,0004	-0,0007	-0,0003	-0,0011	-0,0008
UCL Mean (0,95)	0,0008	0,0009	0,0014	0,0013	0,0009
Variance	0,0002	0,0004	0,0005	0,0010	0,0005
Stdev	0,0144	0,0195	0,0224	0,0308	0,0222
Skewness	-0,7017	-0,5897	-0,1125	-0,0745	0,0895
Kurtosis	8,4369	12,2649	3,7216	7,4329	4,0453

Tabla 7
Estimación de modelos arima para los retornos diarios de las acciones

stock	modelo (p, d, q)	ar1	ar2	ar3	ma1	ma2
BAP	(2, 0, 0)	-0,04066	0,07784			
BVN	(2, 0, 2)	-0,11735	-0,88076		0,11238	0,85031
CPAC	(3, 0, 0)	-0,17181	-0,03927	-0,05177		
EPU	(2, 0, 0)	0,03085	0,07777			
SCCO	(2, 0, 2)	-0,46749	-0,88355		0,44848	0,85393

Relaciones entre las series

Respecto a la relación entre las variables, se observa lo siguiente:

- La correlación lineal entre el retorno del mercado (EPU) y las acciones se presenta en la figura 7; la mayor correlación se registra con SCCO (0,71) y la menor con CPAC (0,19).
- En cuanto a la correlación entre las acciones, la figura 7 muestra que la más alta corresponde a BAP y SCCO (0,43), mientras que la más baja se da entre BVN y CPAC (0,10).
- Los retornos de las acciones que muestran una mayor relación con el mercado (EPU), según la figura 8, son SCCO y BAP; les sigue BVN, con un nivel moderado, mientras que CPAC no evidencia relación significativa.
- El espacio riesgo-retorno de las acciones, presentado en la figura 9, indica que el portafolio de mercado (EPU) exhibe un menor riesgo y un retorno equilibrado, debido a la propia estructura del ETF. En cuanto a las acciones individuales, BVN presenta el mayor riesgo; SCCO muestra un riesgo moderado y el mayor retorno; BAP exhibe el menor riesgo y un retorno similar al de BVN; y CPAC, cercana a BAP, presenta un riesgo mayor y un rendimiento inferior al de esta última.

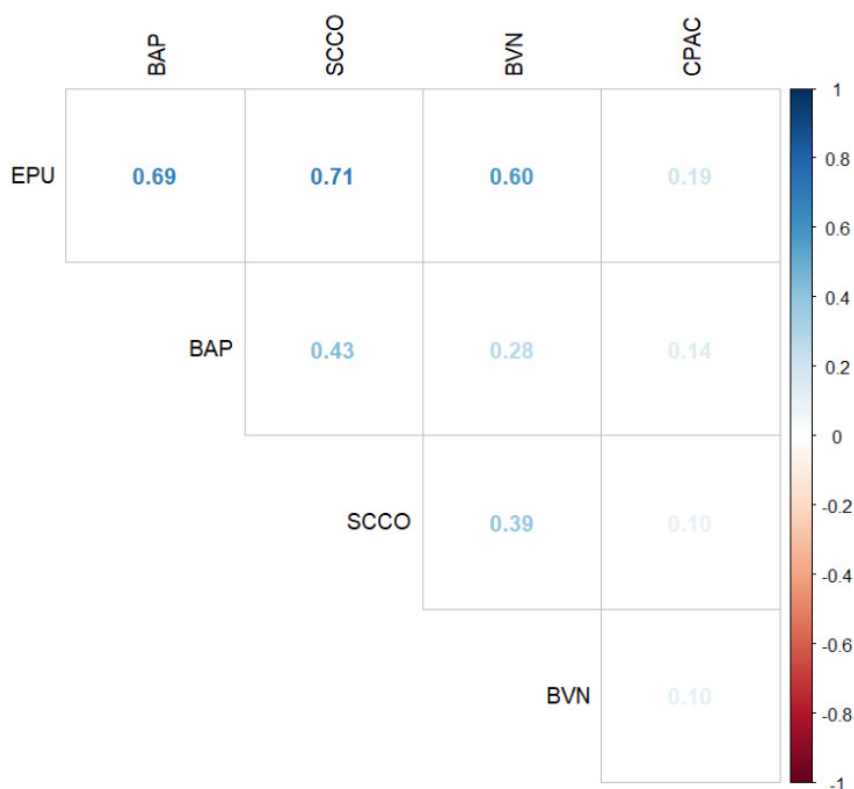


Figura 7. Correlación entre las variables

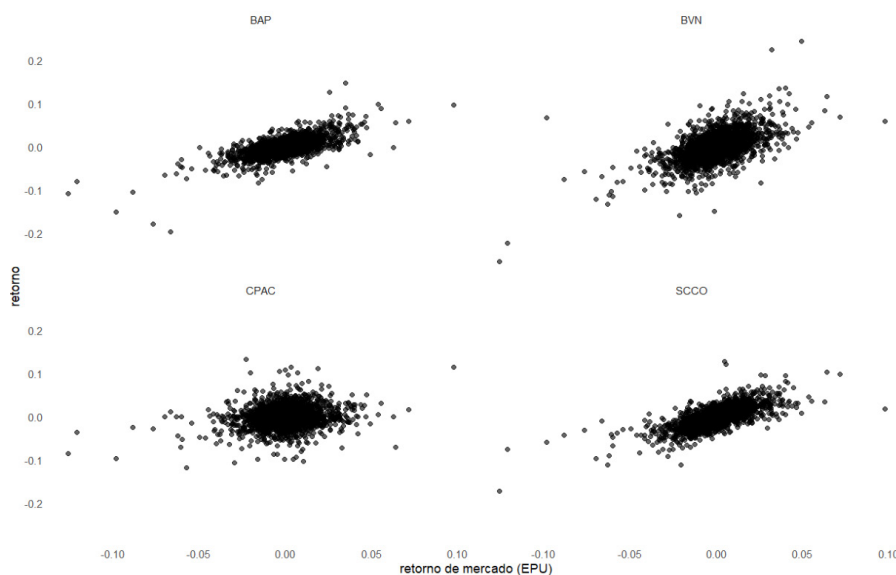


Figura 8. Diagrama de dispersión del retorno de cada acción vs. el retorno de mercado

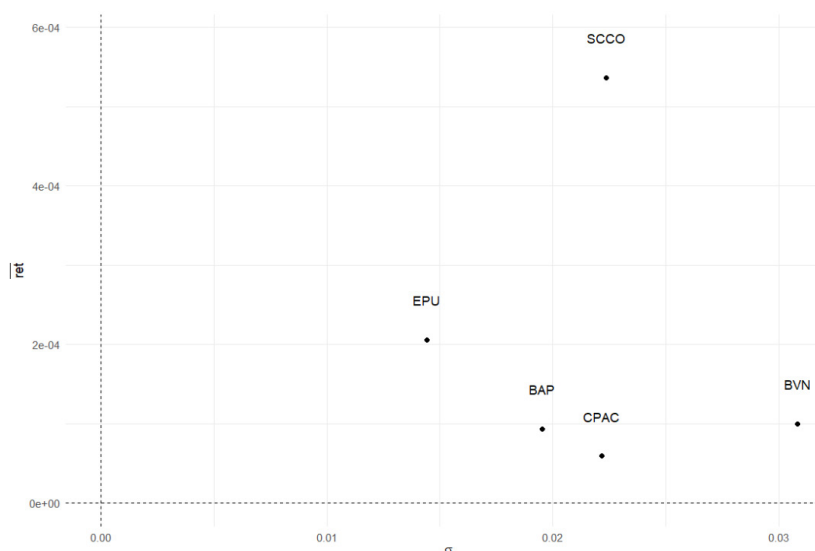


Figura 9. Riesgo-retorno para los activos en estudio

Aplicación del estudio de eventos

El estudio de eventos sigue el esquema desarrollado por MacKinlay [12], con algunas modificaciones respecto a las consideraciones de los valores umbrales para las sorpresas en los anuncios de ganancias, la ventana de eventos y una ventana más estrecha para el análisis del CAR.

Determinación del valor umbral para sorpresas de anuncios de ganancias y la categorización de los eventos

En el esquema propuesto por MacKinlay se utiliza un valor umbral de $\pm 2,5\%$ para la sorpresa de los anuncios de ganancias frente a los resultados estimados. De este modo, los valores por debajo de $-2,5\%$ se categorizan como eventos negativos; aquellos comprendidos entre $-2,5\%$ y $+2,5\%$ se consideran neutros; y los superiores a $+2,5\%$ se clasifican como positivos.

Para los mercados emergentes, se recomienda emplear valores distintos según las características de las acciones y del mercado analizados. En el caso de las cuatro acciones objeto de estudio, se consideraron porcentajes de sorpresa de $\pm 100\%$, cuyas distribuciones se presentan en la figura 10, donde se aprecian comportamientos marcadamente diferentes. Al analizar las sorpresas por tercios, la tabla 8 sugiere que el valor apropiado podría situarse alrededor de $\pm 7\%$; sin embargo, adoptar un valor tan amplio podría reducir la sensibilidad de la clasificación para detectar la naturaleza de cada evento. Por ello, se opta por un valor intermedio de $\pm 5\%$, entre el propuesto por MacKinlay y el derivado del análisis por tercios.

Adoptando el umbral de porcentaje de sorpresa en $\pm 5\%$, se establece que los eventos negativos corresponden a los menores de -5% , los neutros a los comprendidos entre -5% y $+5\%$, y los positivos a los superiores a $+5\%$. La figura 11 muestra la proporción por acción y categoría de evento.

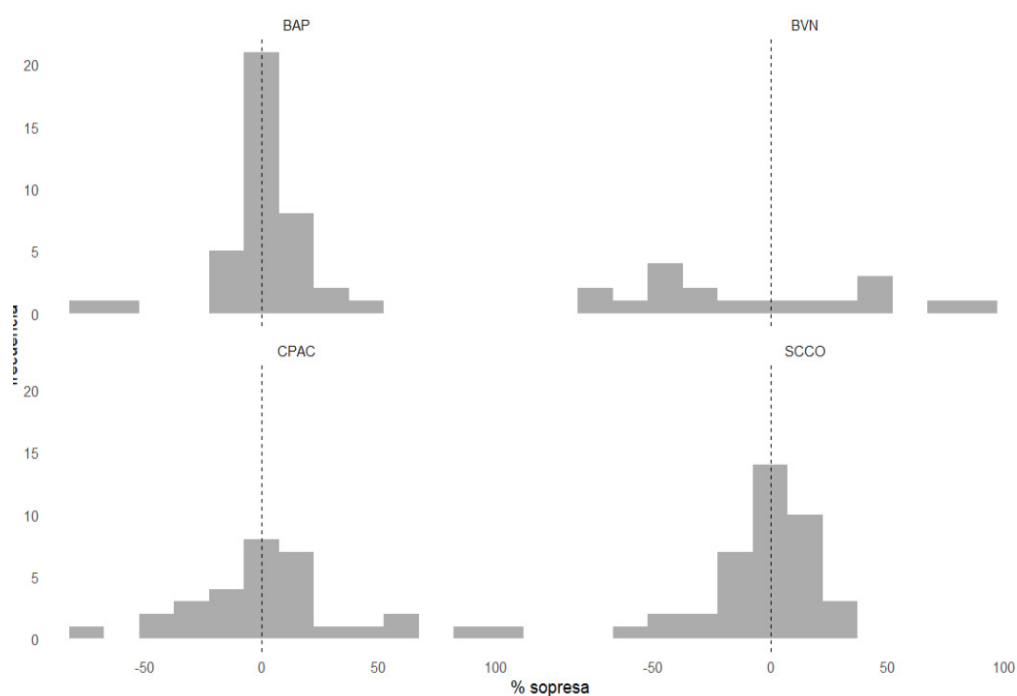


Figura 10. Distribución de los porcentaje de sorpresa por acción

Tabla 8
Cuantiles por tercios de los porcentajes de sorpresa

stock	cuantil 33	cuantil 67
BAP	- 4,044	5,364
BVN	- 40,176	18,583
CPAC	- 4,842	9,703
SCCO	- 7,203	7,303
Todos	- 6,603	7,692

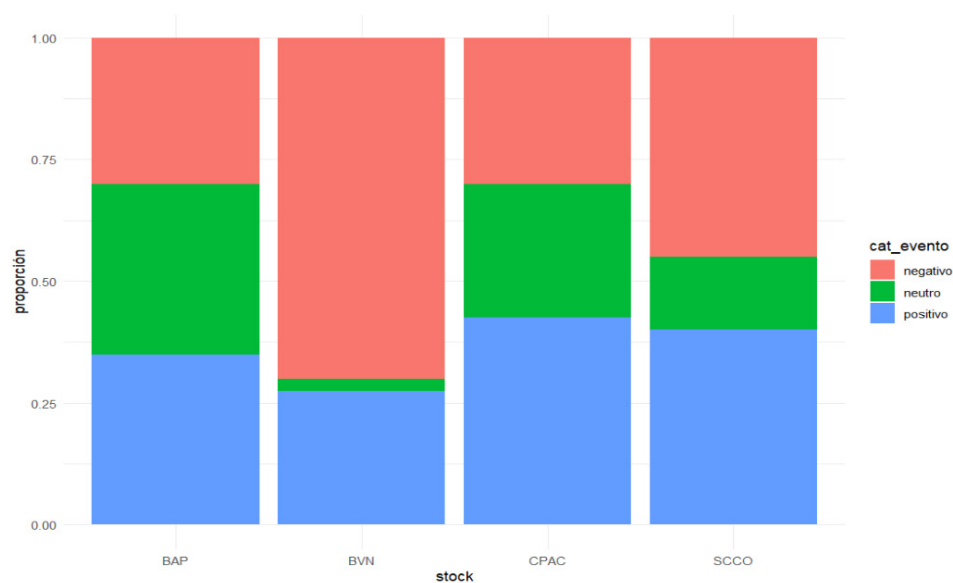


Figura 11. Proporción por acción y categoría de evento

Determinación de los valores de las ventanas de análisis

Para la ventana de estimación se considera un periodo de 250 días de cotizaciones previas a la presentación efectiva de los resultados, conforme a lo planteado por MacKinlay. La desventaja de esta ventana es la pérdida de un año de datos; sin embargo, se mantienen nueve años para el análisis, un periodo mayor que el empleado por MacKinlay, quien utilizó cinco años.

Para la ventana del evento se contempla un solo día, dado que en los mercados financieros actuales la información circula con gran rapidez y afecta la cotización de manera casi inmediata.

En cuanto a la ventana posterior al evento y de análisis del CAR, se tomó un periodo de 10 días. Este lapso es el recomendado para los mercados emergentes en comparación con los desarrollados, ya que en aquellos pueden presentarse variaciones en las condiciones políticas, económicas o sociales que alteren las cotizaciones y dificulten distinguir el efecto propio del anuncio de ganancias.

Selección del modelo para estimar los retornos anormales

Se selecciona el modelo de mercado siguiendo la recomendación de MacKinlay, ya que este resulta más preciso para determinar los retornos anormales al incorporar las variaciones atribuibles al comportamiento general del mercado (en comparación con el modelo de promedio de mercado). La estimación de cada modelo se realiza mediante una regresión lineal simple aplicada a cada acción dentro de cada categoría de evento, es decir, en

un análisis de series temporales. El retorno de mercado se asume correspondiente al EPU.

Con el modelo estimado, se determina el retorno anormal como la diferencia entre el valor pronosticado por el modelo y el valor real. Este se registra para cada día desde 10 días antes del evento hasta 10 días después, lo que permite analizar los retornos anormales acumulados (CAR).

Para mejorar la estimación promedio de los CAR, se agregan las acciones según cada tipo de evento, es decir, se realiza un análisis transversal.

Analizando los resultados por categoría de evento

Para cada categoría se calcula el CAR utilizando una ventana de análisis que comprende 10 días previos y 10 días posteriores al evento. Asimismo, se estima para cada día, a partir del día del evento, un intervalo de confianza del 95 %, asumiendo una distribución normal con base en los errores estándar de cada estimación diaria dentro de la ventana de análisis. Esta constituye una modificación al esquema general, que utiliza como error estándar el derivado de la ventana de estimación.

El CAR para los eventos positivos muestra que, en el día del evento, se produce un salto superior al de los días previos, y el impulso tiene una duración de cinco días posteriores. El mayor efecto se observa al segundo día, como se aprecia en la figura 12. Cabe destacar que, en los 10 días previos, existe una ligera tendencia positiva, y el evento positivo confirma dicha percepción favorable.

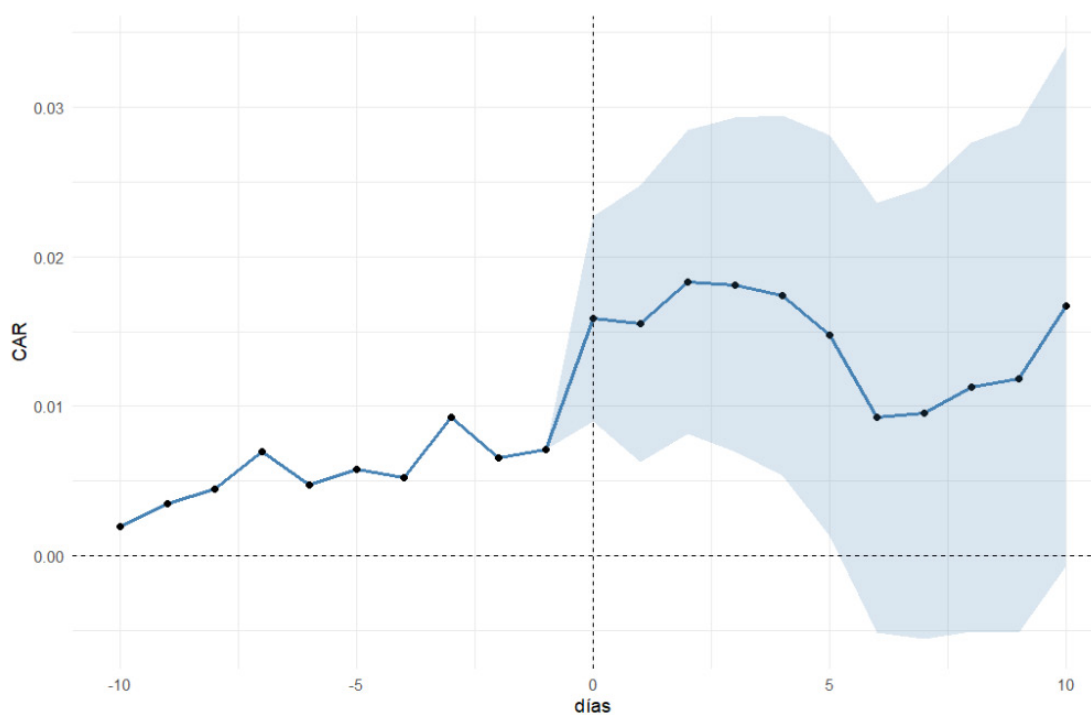


Figura 12. CAR para eventos positivos

El CAR para los eventos negativos muestra que, en el día del evento, se produce una caída más pronunciada que en los días previos. Aunque se observa un intento de recuperación al día siguiente, el nivel se mantiene en torno a la caída inicial hasta

el séptimo día posterior. La mayor disminución ocurre al quinto día, tras lo cual se inicia una recuperación, como se aprecia en la figura 13. A diferencia de los eventos positivos, en los 10 días previos no se evidencia una tendencia definida.

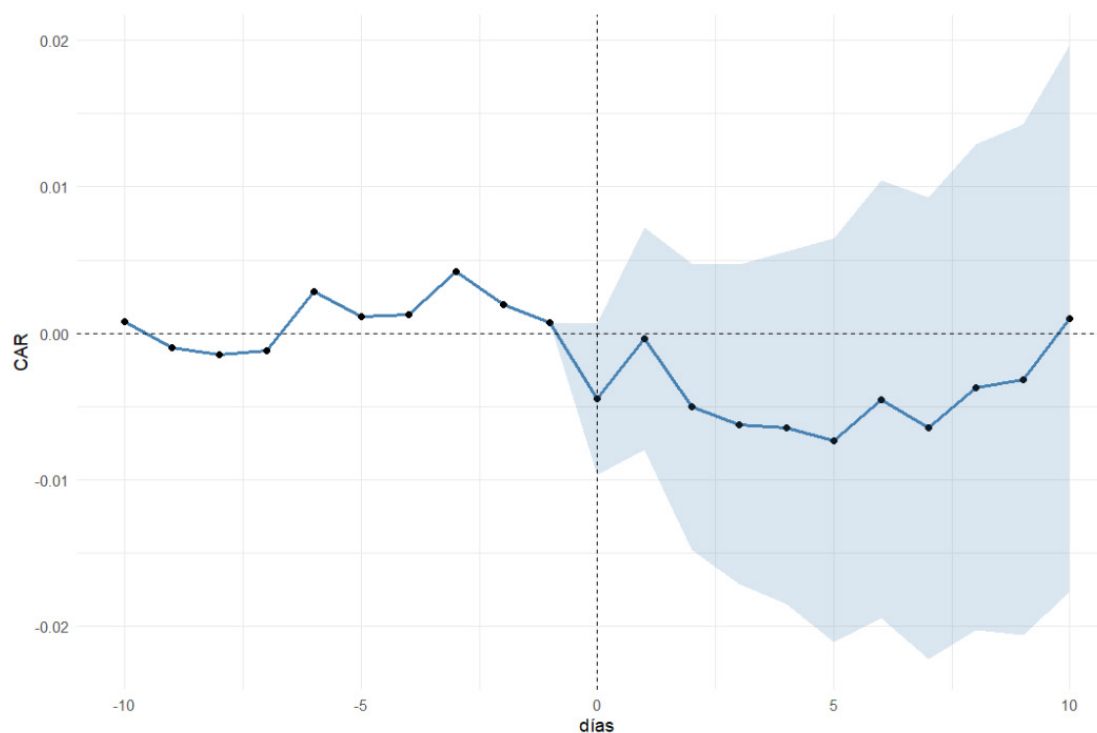


Figura 13. CAR para eventos negativos

El CAR para los eventos neutros muestra que, en el día del evento, casi no se registra variación. No obstante, a diferencia de los dos casos anteriores, se observa una recuperación hasta el quinto día posterior al evento, seguida de un ajuste que lleva los valores

promedio a niveles similares a los de los días previos, como se aprecia en la figura 14. En este caso, en los días anteriores al evento se percibe una ligera tendencia negativa.

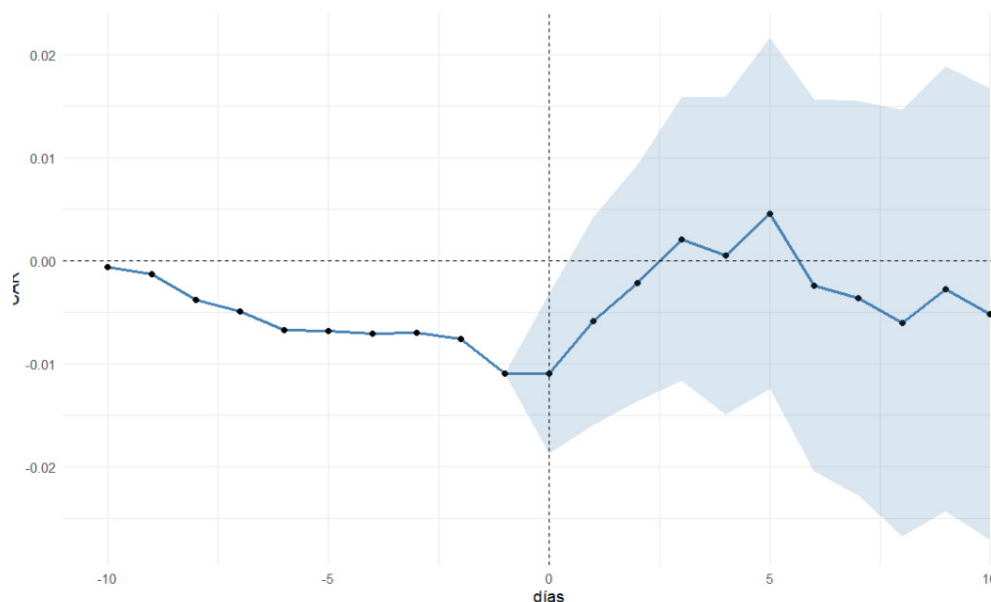


Figura 14. CAR para eventos neutros

El resumen de las tres categorías de eventos se presenta en la figura 15, donde se aprecia que los eventos positivos muestran un efecto significativo en la evolución al alza; los negativos evidencian un deterioro hasta el quinto día, seguido de una recuperación;

mientras que los neutros casi no presentan efecto en el día del anuncio. Los valores de los CAR correspondientes a los tres tipos de eventos se muestran en la tabla 9.

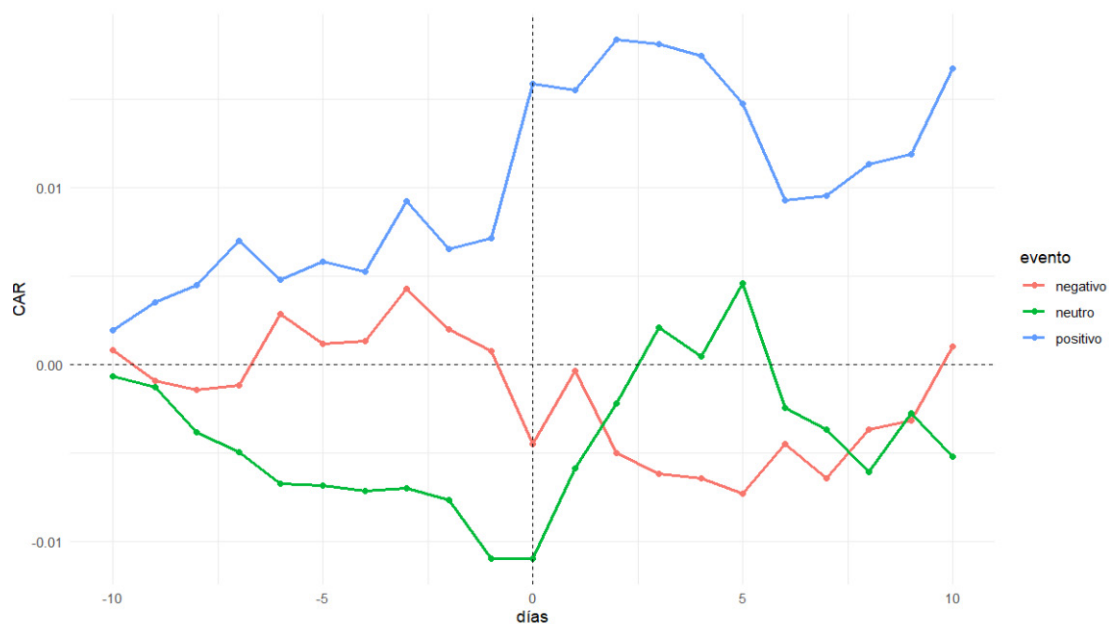


Figura 15. CAR comparativo de los eventos positivos, negativos y neutros

Tabla 9

CAR por tipo de evento para la ventana de análisis

Día	Car		
	Positivo	Negativo	Neutro
-10	0,001933	0,000805	-0,000669
-9	0,003488	-0,000949	-0,001300
-8	0,004467	-0,001449	-0,003840
-7	0,006956	-0,001187	-0,004976
-6	0,004775	0,002857	-0,006756
-5	0,005789	0,001144	-0,006835
-4	0,005235	0,001309	-0,007152
-3	0,009237	0,004246	-0,007000
-2	0,006526	0,001960	-0,007664
-1	0,007126	0,000721	-0,010980
0	0,015843	-0,004488	-0,010986
1	0,015519	-0,000366	-0,005880
2	0,018337	-0,005011	-0,002209
3	0,018119	-0,006218	0,002068
4	0,017425	-0,006472	0,000459
5	0,014754	-0,007309	0,004570
6	0,009247	-0,004524	-0,002452
7	0,009547	-0,006467	-0,003675
8	0,011292	-0,003692	-0,006076
9	0,011848	-0,003169	-0,002765
10	0,016709	0,000980	-0,005226

Prueba de hipótesis

Al revisar la distribución de los retornos anormales correspondientes al día del evento, la figura 16 muestra que, para los eventos positivos, los retornos son marcadamente superiores a cero; para los negativos, ligeramente inferiores a cero; y para los neutros, próximos a cero.

Plantearemos las siguientes pruebas de hipótesis para cada uno de los eventos:

a. Positivos

$$H_0: \text{los retornos anormales} = 0$$

$$H_1: \text{los retornos anormales} > 0$$

b. Negativos

$$H_0: \text{los retornos anormales} = 0$$

$$H_1: \text{los retornos anormales} < 0$$

c. Neutros

$$H_0: \text{los retornos anormales} = 0$$

$$H_1: \text{los retornos anormales} \neq 0$$

Se aplicaron dos pruebas de hipótesis: la prueba t (paramétrica) y la prueba de Wilcoxon (no paramétrica). Los resultados se presentan en la tabla 10, donde se observa que, para los eventos positivos, tanto la media como la mediana de los retornos son positivas. En el caso de los eventos negativos, la prueba t indica que los retornos son negativos, mientras que la prueba de Wilcoxon sugiere que, estadísticamente, la mediana puede considerarse igual a cero. Finalmente, para los eventos neutros, ambas pruebas coinciden en que los retornos pueden considerarse nulos.

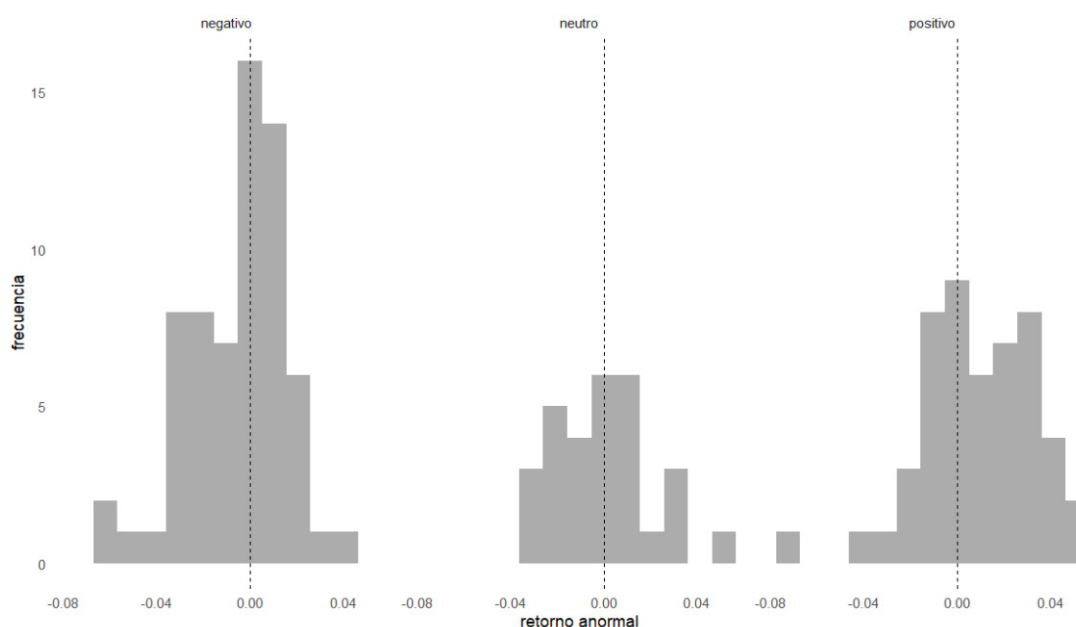


Figura 16. Distribución de los retornos anormales por categoría de evento para el día del evento

Tabla 10

Prueba de hipótesis paramétrica y no paramétrica

positivos	negativos	neutros
prueba t		
t = 2,5025, df = 49, p-value = 0,007859	t = -1,9818, df = 64, p-value = 0.0259	t = -0,0017147, df = 28, p-value = 0,9986
95 % CI: 0,002876906 Inf sample est: mean(x) = 0,008716586	95 % CI: -Inf -0.0008220673 sample est: mean(x) = -0,00520857	95% CI: -0,008139002 0,008125388 sample est: mean(x) = -6.807398e-06
prueba de Wilcoxon		
V = 894, p-value = 0,006642	V = 212, p-value = 0,4576	V = 212, p-value = 0.9152
95% CI: 0.003656522 Inf sample est: median = 0,009845796	95% CI: -Inf 0.006890687 sample est: median = -0,0005686259	95% CI: -0,008792914 0,007939620 sample est: median = -0,0005686259

RESULTADOS

Del análisis exploratorio de datos se concluye que las series temporales de los retornos del mercado (EPU) y de las acciones (BAP, BVN, CPAC y SCCO) presentan hechos estilizados comunes a las series financieras: valores esperados cercanos a cero, simetría, comportamiento no normal con colas pesadas y, en general, procesos autorregresivos de orden 2, AR(2).

Del análisis de las relaciones entre las series temporales se detectó que las acciones mantienen una buena correlación con el mercado (EPU), con excepción de CPAC, y una baja correlación entre ellas. Esto contribuyó a un buen ajuste en las regresiones lineales simples empleadas para estimar la relación entre el retorno de las acciones y el retorno de mercado.

Un elemento clave desarrollado fue la selección del valor umbral de sorpresa en los anuncios de ganancias trimestrales. Conforme al análisis de la distribución de esta variable y de los terciles, se optó por establecer este valor en ± 5 %.

En la aplicación de la metodología del estudio de eventos a la BVL se consideraron cuatro acciones durante un periodo de 10 años (se pierde un año por la ventana de estimación de 250 días) y cuatro eventos de presentación de resultados por año, lo que permitió analizar 144 eventos y realizar 144 estimaciones del modelo de mercado mediante regresiones lineales simples. En cuanto al nivel de significancia de los modelos aplicados, los correspondientes a BAP, BVN y SCCO resultaron todos significativos; en el caso de CPAC, el 67 % de los modelos para eventos positivos y negativos, y el 56 % para los neutros, fueron significativos. Los niveles de significancia de los β para cada acción y evento mostraron el mismo comportamiento. La tabla 11 presenta los valores promedio de β , de los cuales se concluye que, exceptuando a CPAC, el activo de mayor riesgo es BVN y el de menor riesgo es BAP.

Los gráficos y las pruebas de hipótesis evidencian que la sorpresa positiva en la presentación de resultados tiene un impacto favorable en la evolución de las acciones analizadas: el cambio respecto al cierre del día previo al anuncio es de 0,87 %; para los eventos negativos, de -0,52 % (aunque no estadísticamente significativo según la prueba no paramétrica); y para los neutros, de 0,00 %.

Tabla 11
Estimación de la **media** (β) para las acciones y eventos

Stock	Negativo	Neutro	Positivo
BAP	0,917694	0,901329	0,944498
BVN	1,240265	1,450224	1,298985
CPAC	0,269845	0,213625	0,285132
SCCO	1,068593	1,343157	1,129795

CONCLUSIONES

El estudio de eventos aplicado a la BVL, tomando como muestra las acciones de sus principales ADR durante un periodo de 10 años, muestra que la sorpresa de eventos positivos en

la presentación de resultados trimestrales influye de manera favorable en los retornos diarios de las acciones (+0,87 % el día del evento). En el caso de los eventos negativos, el efecto promedio es desfavorable (-0,52 % el día del evento); sin embargo, este no resulta estadísticamente significativo según la prueba de Wilcoxon (no paramétrica). En cuanto a los eventos neutros, no presentan cambios promedio (0,00 % el día del evento), y las pruebas estadísticas coinciden en que no generan impacto en el rendimiento durante el evento.

Si se consideran los valores promedio de β para cada una de las acciones como estimadores del riesgo respecto al mercado, se concluye que el activo más riesgoso es BVN y el menos riesgoso es BAP, lo que coincide con las estadísticas del riesgo-retorno, excluyendo a CPAC por su baja correlación con el mercado (EPU).

Las series temporales de los retornos de las acciones presentan como principales hechos estilizados un comportamiento no normal, con colas pesadas, simetría y, en general, un proceso autorregresivo de orden 2, AR(2).

La determinación del umbral de ± 5 % se realizó con base en la distribución de las sorpresas de las ganancias por acción durante el periodo comprendido entre enero de 2015 y diciembre de 2024. Se sugiere realizar esta estimación para calibrar el parámetro, dado que tiene un impacto considerable en la categorización de los eventos y en las estadísticas derivadas.

La BVL, como mercado emergente, se ve afectada por eventos ajenos al ámbito empresarial —como los políticos, sociales o institucionales—; por ello, se recomienda emplear ventanas cortas para los eventos y los análisis, con el fin de reducir su influencia en los resultados de las presentaciones trimestrales.

Dada la distribución no normal de los retornos y su acumulación, se recomienda el uso de pruebas no paramétricas, que permiten evitar el supuesto de normalidad en los retornos anormales.

Existen consideraciones adicionales que pueden afectar el estudio de eventos, como la superposición en las fechas de presentación de resultados. En este sentido, emplear una ventana de un día ayuda a disminuir dicho efecto, mientras que el uso de pruebas de hipótesis no paramétricas aporta mayor flexibilidad en los supuestos.

Un aspecto a considerar en estudios futuros es la posibilidad de establecer estrategias de inversión. Con los resultados obtenidos, los eventos positivos generarían una rentabilidad acumulada máxima hasta tres días después de la publicación de buenos resultados (+1,10 % respecto al día previo al evento); los eventos negativos mostrarían la mayor caída hasta cinco días después (-0,80 % respecto al día previo al evento); y los eventos neutros alcanzarían una subida máxima hasta cinco días después (+1,16 %).

Las actuales plataformas de difusión de información y de operaciones financieras reaccionan con rapidez ante los hechos públicos. En este sentido, considerar información intradía podría afinar los resultados; sin embargo, esta constituye una limitación del presente estudio, dado que se utilizaron fuentes públicas y gratuitas (Yahoo Finance), cuya menor unidad temporal disponible es el día.

REFERENCIAS


- [1] Campbell, J., Lo, A., & MacKinlay, A. (1997). *The econometrics of financial markets*. Princeton University Press.
- [2] Chapman, P. C. (2000). *CRISP-DM 1.0: Step-by-step data mining guide*. CRISP-DM Consortium.
- [3] Chen, J. (2025, 16 septiembre). *Exchange-Traded Fund (ETF): What It Is and How to Invest*. Investopedia. <https://www.investopedia.com/terms/e/etf.asp>
- [4] Corrado, C. (2010). Event studies: A methodology review. *Accounting and Finance*, 50(1), 207–234.
- [5] Fuenzalida, D., Mongrut, S., & Nash, M. (2008). Stock split en la Bolsa de Valores de Lima: ¿Afectan el rendimiento y la liquidez de los títulos? *Estudios Gerenciales*, 24(107), 11–36.
- [6] Galindo, H., & Montesinos, A. (2018). *Macroeconomía dinámica*. Fondo Editorial EDUNI.
- [7] García Gutiérrez, S. (2012). *El contenido informativo de los anuncios de dividendos y la reacción del precio de las acciones: Perú 2001-2010* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Cybertesis UNMSM.
- [8] Hernandez, M. (2002). Macroeconomic reform and policy: The case of Peru – Analyzing the effects of some major economic, political and social changes in the Peruvian financial market for the period between 1990 and 1992. *Undergraduate Journal of Economics*, 7(1), Art. 4.
- [9] Huntington-Klein, N. (2022). *The effect*. CRC Press.
- [10] Hyndman, R., & Athanasopoulos, G. (2018). *Forecasting: Principles and practice*. OTexts.
- [11] IBM. (2021, marzo 4). *IBM SPSS Modeler*. <https://www.ibm.com/docs/en/spss-modeler/18.0.0?topic=spss-modeler-crisp-dm-guide>
- [12] MacKinlay, A. (1997). Event studies in economics and finance. *Journal of Economic Literature*, 35(1), 13–39.
- [13] Melgarejo, M., Montiel, E., & Sanz, L. (2016). The stock market's reaction to accounting information: The cases of Chile and Peru. *Journal of Accounting in Emerging Economies*, 6(3), 254–268.
- [14] Porras Cerrón, J. (2017). *Pruebas no paramétricas usando R*. Universidad Nacional Agraria La Molina.

- [15] Rocca Carbajal, L. (2017). *El mercado de valores en fácil*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- [16] Salas, A. (2021). *Cambios no anticipados positivos y negativos de la tasa de interés de referencia y la rentabilidad del índice general de la Bolsa de Valores de Lima entre los años 2003 y 2019* [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de Ingeniería].
- [17] Soto, I., & Gamboa, J. (2021). *Ciencia de datos con R: Métodos estadísticos para la investigación experimental*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- [18] Tocón Vega, D. (2016). *¿El cambio de CEO puede afectar el valor de las firmas?: Un análisis de estudio de eventos en el mercado bursátil peruano* [Tesis de grado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas].
- [19] Tsay, R. (2010). *Analysis of financial time series*. Wiley.
- [20] Zivot, E. (2021). *Introduction to computational finance and financial econometrics with R*. <https://bookdown.org/>
- [21] Zumel, N., & Mount, J. (2020). *Practical data science with R*. Manning Publications.

ACERCA DEL AUTOR

Roberto León Leyva

Ingeniero de sistemas por la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) y MBA por la Universidad del Pacífico. Cuenta con estudios concluidos en la maestría de Estadística Aplicada por la Universidad Agraria La Molina (UNALM) y especializaciones por la Universidad de Michigan en Coursera: Data Analytics in the Public Sector with R y Applied Data Science with Python; y por Datacamp: Associate Data Scientist in R, Quantitative Analyst with R, Time Series y SQL for Database Administrators.

 robertoleon10@gmail.com

www.linkedin.com/in/robertoleonleyva

Recibido: 26-05-2025

Revisado: 28-05-2025

Aceptado: 17-10-2025



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.

Se analiza la influencia de los indicadores MTBF (tiempo medio entre fallas) y MTTR (tiempo medio de reparación) sobre el índice de disponibilidad, indicador fundamental para medir la eficiencia operativa de los activos.



Impacto de la gestión del MTBF y MTTR en el índice de disponibilidad de camiones mineros Caterpillar 785-793

Impact of MTBF and MTTR management on the availability index of Caterpillar 785-793 mining trucks

RESUMEN

La minería peruana constituye un pilar esencial del desarrollo económico del país, pues contribuye significativamente al empleo y a los ingresos estatales. Dentro de este sector, la gestión del mantenimiento de equipos pesados resulta crítica para garantizar la disponibilidad operativa, especialmente en camiones mineros Caterpillar 785-793. Este estudio analiza la influencia de los indicadores MTBF (tiempo medio entre fallas) y MTTR (tiempo medio de reparación) sobre el índice de disponibilidad, un KPI (Key Performance Indicator) fundamental para medir la eficiencia operativa de los activos.

Se destaca que un mantenimiento eficaz maximiza la disponibilidad y minimiza los costos operativos, respaldado por la medición precisa del desempeño mediante métricas y puntos de referencia establecidos.

La metodología aplicada incluye la simulación de distintos escenarios de MTBF (40 a 80 horas) y MTTR (3 a 12 horas), con el fin de evaluar su impacto en el índice de disponibilidad, cuyo valor de referencia varía entre el 88 % para flotas más usadas y el 92 % para flotas nuevas.

Los resultados evidencian que la disponibilidad es directamente proporcional al MTBF e inversamente proporcional al MTTR. El incremento del MTBF eleva el índice de disponibilidad, mientras que un aumento del MTTR lo reduce. Esta relación matemática permite a las áreas de mantenimiento orientar sus estrategias hacia la reducción de fallas y de tiempos de reparación, optimizando recursos y mejorando la productividad de la flota.

Se concluye que una adecuada gestión de MTBF y MTTR resulta vital para incrementar la disponibilidad, lo que incide directamente en la rentabilidad y competitividad de las operaciones mineras. Implementar estrategias orientadas a mejorar ambos indicadores

es fundamental para alcanzar una gestión del mantenimiento eficiente y alineada con los objetivos de productividad y sostenibilidad del sector.

ABSTRACT

Peruvian mining constitutes an essential pillar of the country's economic development, contributing significantly to employment and state revenues. Within this sector, maintenance management of heavy equipment is critical to ensure operational availability, particularly for Caterpillar 785-793 mining trucks. This study analyses the influence of MTBF (Mean Time Between Failures) and MTTR (Mean Time To Repair) indicators on the availability index, a fundamental KPI (Key Performance Indicator) for measuring the operational efficiency of assets.

Effective maintenance is shown to maximise availability and minimise operational costs, supported by accurate performance measurement through established metrics and benchmarks.

The methodology applied involved simulating different MTBF (40 to 80 hours) and MTTR (3 to 12 hours) scenarios to assess their impact on the availability index, whose benchmark target ranges from 88% for aging fleets to 92% for new fleets.

The results show that availability is directly proportional to MTBF and inversely proportional to MTTR. Increasing the MTBF raises the availability rate, while increasing the MTTR decreases it. This mathematical relationship allows maintenance departments to focus their strategies on reducing failures and repair times, optimising resources and improving fleet productivity.

It is concluded that proper management of MTBF and MTTR is vital for increasing availability, which has a direct impact on the profitability and competitiveness of mining operations. Implementing



Palabras Claves

Índice de disponibilidad, MTBF (tiempo medio entre fallas), MTTR (tiempo medio para reparar), camiones mineros y minería peruana.

Key words

Availability index; MTBF (Mean Time Between Failures); MTTR (Mean Time To Repair); mining trucks; Peruvian mining.

strategies to improve both indicators is key to achieving efficient maintenance management aligned with the sector's productivity and sustainability objectives.

INTRODUCCIÓN

El Ministerio de Energía y Minas [7] señala en su boletín informativo anual que la minería peruana continúa siendo un pilar clave para el desarrollo del país, al contribuir de manera significativa a la economía estatal y regional. Además de impulsar el crecimiento económico, fomenta la creación de empleo formal, con 244 073 nuevos puestos de trabajo generados a partir de una inversión de USD 3 343 millones. Asimismo, se encuentran en marcha 75 nuevos proyectos de exploración que reciben una inversión de USD 644 millones hasta septiembre de 2024.

De acuerdo con las cifras mencionadas sobre la inversión minera, el Ministerio de Energía y Minas [7] indica que el 26 % de dicha inversión se ha destinado al equipamiento y las maquinarias para el movimiento de tierras y el tratamiento de minerales. En este contexto, resulta crucial que la maquinaria se mantenga siempre operativa. Para ello, es necesario medir y gestionar indicadores de rendimiento y mantenimiento que permitan establecer métricas útiles para la toma de decisiones informadas, con el fin de garantizar la correcta ejecución de los proyectos para los cuales las maquinarias y equipos han sido destinados. Caterpillar [3] señala que la gestión del mantenimiento abarca un amplio espectro, siendo una de sus principales funciones asegurar que el sistema operativo productivo esté disponible en todo momento y cumpla con su propósito. El índice de disponibilidad del sistema depende de dos factores clave: el MTBF (tiempo medio entre fallas) y el MTTR (tiempo medio de reparación), los cuales constituyen indicadores de desempeño fundamentales para la toma de decisiones. En minería, al igual que en otras industrias, el mantenimiento se considera un proceso de valor agregado, dado que contribuye a la reducción de costos y a la mejora de los ingresos a largo plazo, protegiendo así la inversión realizada por las empresas del sector [4].

El objetivo principal de este artículo es analizar cómo la gestión de los indicadores de rendimiento, específicamente el MTBF (*Mean Time Between Failures*) y el MTTR (*Mean Time to Repair*), influye en la disponibilidad mecánica de los camiones mineros Caterpillar de las series 785 y 793 y, en consecuencia, en la eficiencia de los proyectos mineros. A través de este análisis, se busca ofrecer a los profesionales del sector una comprensión más profunda sobre la importancia de gestionar estos indicadores de manera eficaz, con el propósito de optimizar el mantenimiento de los equipos y reducir los tiempos de inactividad. Este artículo brinda herramientas y enfoques prácticos que permitirán a los lectores tomar decisiones informadas para maximizar la rentabilidad de las inversiones en maquinaria, contribuyendo así a mejorar la competitividad y sostenibilidad de las operaciones mineras a largo plazo.

FUNDAMENTOS

En la investigación de Baldeón-Pacheco *et al.* [2], se analiza la relación entre el mantenimiento preventivo de los camiones mineros Komatsu 980 E5 y su disponibilidad mecánica, con especial énfasis en el estudio de los indicadores MTTR (tiempo medio de

reparación) y MTBF (tiempo medio entre fallas), fundamentales en la gestión del mantenimiento. El objetivo de este estudio es determinar cómo las variaciones en estos indicadores clave de rendimiento pueden afectar directamente la disponibilidad de los camiones. Los resultados indican que un aumento del 20 % en el MTBF y del 5,7 % en el MTTR incrementa el índice de disponibilidad en un 3,3 %. El autor concluye que tanto el MTBF como el MTTR son factores determinantes que influyen directamente en la disponibilidad de la maquinaria. En este sentido, se destaca que un aumento del MTTR refleja tiempos de reparación más prolongados, mientras que una disminución del MTBF evidencia que la maquinaria experimenta fallas más frecuentes. De este modo, puede afirmarse que ambos indicadores tienen un impacto directo en el índice de disponibilidad.

Por otro lado, Ordoñez *et al.* [9] señalan en su investigación que, al aplicar estrategias de mantenimiento como el RCM (mantenimiento centrado en la confiabilidad), resulta fundamental establecer metodologías que incluyan tácticas preventivas y correctivas, las cuales contribuyen a mejorar los indicadores MTBF y MTTR y, en consecuencia, a incidir directamente en la disponibilidad de los activos. El autor subraya que el MTBF y el MTTR son indicadores clave de confiabilidad y mantenibilidad, respectivamente. El primero mide el tiempo que una maquinaria puede operar antes de presentar una falla, mientras que el segundo refleja el tiempo requerido para realizar los trabajos de mantenimiento en el equipo. Por tanto, la gestión de estos parámetros es crucial para asegurar la disponibilidad del activo. Esta investigación analiza la disponibilidad de una flota de camiones Freightliner CL 120 durante un período de dos años, considerando la variación de la disponibilidad antes y después de la implementación del RCM. Los resultados muestran que el MTBF aumentó en 18,02 horas, mientras que el MTTR se redujo en 1,38 horas, lo que generó un incremento del 12 % en la disponibilidad. En conclusión, se establece que las estrategias de mantenimiento que inciden directamente en el MTBF y el MTTR repercuten de manera significativa sobre el índice de disponibilidad.

Shaker *et al.* [12] mencionan que el tiempo medio entre fallas (MTBF) y el tiempo medio de reparación (MTTR) son dos indicadores clave de desempeño directamente relacionados con la disponibilidad de un sistema o proceso. Al desglosar estos conceptos, Alshaari y Nor [1] definen el MTBF como una métrica crucial para supervisar la tasa de fallas de los activos, ya que representa el tiempo promedio entre fallas de un sistema, excluyendo el tiempo dedicado a las reparaciones. Por su parte, el MTTR se define como el tiempo promedio requerido para diagnosticar y reparar un equipo averiado, devolviéndolo a sus condiciones normales de operación. Este indicador es esencial para evaluar la mantenibilidad de equipos y piezas reparables. Finalmente, Wang *et al.* [15] sostienen que la disponibilidad es la probabilidad de que un sistema o proceso esté operativo cuando sea necesario, y se puede expresar como un porcentaje del tiempo total.

Mora [8] explica que la función principal del mantenimiento es maximizar la disponibilidad requerida para la producción de bienes y servicios, al preservar el valor de las instalaciones y minimizar el deterioro de los equipos, lo cual debe lograrse al menor costo posible y a largo plazo. Bajo esta premisa, D'Alessio [5] sostiene que uno de los objetivos del mantenimiento es mantener la disponibilidad de los sistemas y sus máquinas en apoyo del proceso productivo; una gestión deficiente del mantenimiento origina consecuencias operacionales costosas, como pérdidas económicas por paradas imprevistas en la producción.

Caterpillar [3] señala que el rendimiento máximo de cualquier equipo de minería depende principalmente de tres factores críticos: a) el diseño del equipo, b) la aplicación para la cual se utiliza y c) el mantenimiento que recibe durante su tiempo de servicio. De estos tres factores, el mantenimiento ofrece a la dirección la mejor oportunidad para influir y controlar el rendimiento del equipo. Para cuantificar dicho rendimiento, es necesario establecer ciertos criterios. Los siguientes son aplicables a la mayoría de las actividades, incluida la gestión de equipos de minería: a) no se puede gestionar lo que no se puede controlar, b) no se puede controlar lo que no se puede medir y c) no se debe medir sin un objetivo, pues sin un objetivo no se puede mejorar. La gestión sin métricas es, en realidad, una gestión basada en la intuición. Los puntos de referencia, resultado del proceso de evaluación comparativa, son estándares, mediciones, métricas o indicadores clave de rendimiento que cuantifican las mejores prácticas de una operación. En minería, los puntos de referencia pueden ser operativos, relacionados con la aplicación o vinculados al mantenimiento.

Punto de referencia (Benchmark): Juran *et al.* [6] lo definen como un proceso continuo de medición de productos, servicios y prácticas en comparación con los competidores más exigentes de la empresa o con compañías reconocidas como líderes del sector. Se trata de un estándar de desempeño de clase mundial en relación con un objetivo específico.

Indicador clave de rendimiento: también conocido como KPI (*Key Performance Indicator*), es una métrica de desempeño de nivel superior. El conjunto de KPI utilizados para describir el rendimiento de un proyecto determinado puede variar según el sitio, el producto, la aplicación o la perspectiva, ya sea del distribuidor o del cliente, de los departamentos de operaciones y mantenimiento, o del área de control de proyectos y contratos. Según Timjerdine [14], los indicadores clave de rendimiento (KPI) de mantenimiento, así como la medición del rendimiento del mantenimiento (MPM), ocupan un lugar destacado tanto entre los investigadores como entre los profesionales, debido a un cambio de paradigma que transformó la percepción del mantenimiento: de considerarlo un proceso costoso a reconocerlo como un proceso generador de valor agregado y de reducción de costos o mejora de ingresos a largo plazo para las empresas.

Tiempo medio entre fallas (MTBF): Patricio *et al.* [11] lo definen como una métrica que mide el tiempo promedio entre fallas de un equipo o sistema durante su operación. Cuanto mayor sea el MTBF, mejor será la confiabilidad del sistema. La fórmula propuesta para calcular el MTBF es la siguiente:

$$MTBF = \frac{\text{Tiempo total de operación}}{\text{Número de fallas}}$$

Donde:

- Tiempo total de operación es el tiempo durante el cual el sistema o el equipo está funcionando sin fallas.
- Número de fallas es el número de fallos que ocurren durante el período de tiempo considerado.

Tiempo medio para reparación (MTTR): según Patricio *et al.* [11], es una métrica que mide el tiempo promedio necesario para reparar un equipo después de una falla. Cuanto menor sea el MTTR, más rápido se reparará el equipo y volverá a operar. Para Orosnjak [10], este indicador permite calcular la mantenibilidad de la maquinaria. La fórmula propuesta para calcular el MTTR es la siguiente:

$$MTTR = \frac{\text{Tiempo total de paradas}}{\text{Número de paradas}}$$

En donde:

- El tiempo total de paradas es el tiempo total durante el cual el sistema o el equipo estuvo fuera de funcionamiento debido a fallas.
- Número de paradas es el número de fallas que ocurren durante el período de tiempo considerado.

En la figura 1 se aprecia que, dentro del tiempo total de inactividad de un activo, el MTTR abarca un porcentaje considerable que puede gestionarse desde el personal técnico hasta los aspectos logísticos y de capacitación.

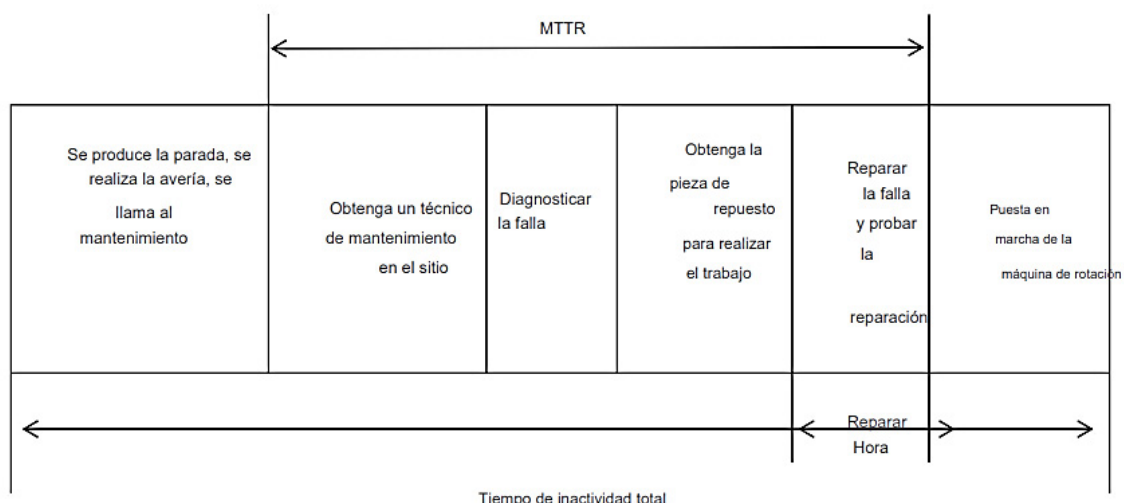


Figura 1. Tiempo de inactividad total de un activo

Fuente: [13].

Índice de disponibilidad: según Alshaari y Nor [1], es la probabilidad de que un componente o sistema se encuentre operando durante un determinado intervalo de tiempo. La disponibilidad puede definirse como la proporción del tiempo en que el equipo es capaz de cumplir su función. Para Mora [8], la disponibilidad inherente o intrínseca resulta especialmente útil cuando se busca controlar las actividades de mantenimiento no programadas. Sus parámetros son el MTBF (tiempo medio entre fallas) y el MTTR (tiempo medio para reparar), considerando únicamente los daños, fallas o pérdidas de funcionalidad por causas propias del equipo o externas a este.

La SMRP [13] señala que la disponibilidad inherente está en función del tiempo medio entre fallas (MTBF) y del tiempo medio para reparar o reemplazar (MTTR), y se basa en la ecuación matemática $A = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR})$. La fórmula para calcular la disponibilidad es la siguiente:

$$A = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}}$$

En donde:

- «A» es la disponibilidad
- MTBF es el tiempo medio entre fallas
- MTTR es el tiempo medio de reparación

Los indicadores clave técnicos de nivel 2 corresponden a T6 disponibilidad = $\text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR}) \times 100$; y, de nivel 3, a E5 tiempo medio entre fallas (MTBF) = tiempo total de funcionamiento / número de fallas y tiempo medio de reparación (MTTR) = tiempo total hasta la recuperación / número de fallas.

En la figura 2 se observa la línea de tiempo de efectividad general de los equipos, donde, en la fila de disponibilidad (*availability*), se aprecia que el tiempo total disponible de un equipo puede dividirse en: a) horas de producción programadas, b) tiempo de espera y c) paradas programadas. En el caso de la primera división, correspondiente a las horas de producción programadas, se advierte que este lapso está compuesto por las horas de producción efectivas y las horas con paradas no programadas.

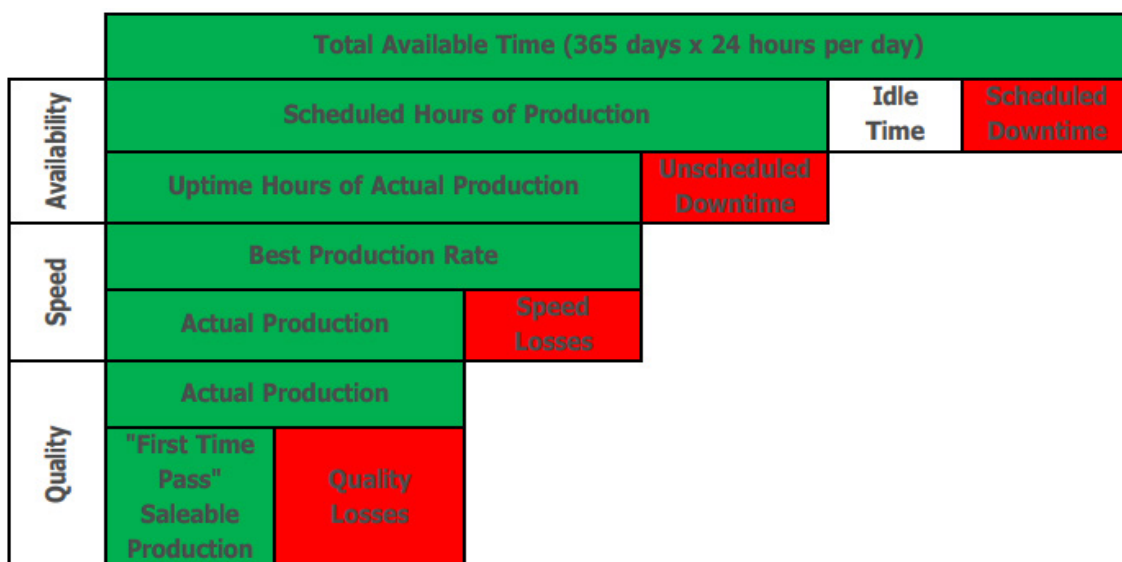


Figura 2. Cronología de la eficacia general del equipo

Fuente: [13].

METODOLOGÍA

En el presente estudio se han considerado los valores de desempeño típicos de los camiones mineros Caterpillar, modelos 785 a 793. Para las flotas nuevas, el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) se estima en 80 horas, lo que refleja el rendimiento óptimo de los camiones en sus primeras etapas de operación. En cambio, para las flotas maduras —aquellas que han completado su primer ciclo de reconstrucción de componentes críticos—, el MTBF se reduce aproximadamente a 60 horas debido al desgaste natural

de los componentes. El tiempo medio de reparación (MTTR) se sitúa en un rango de 3 a 6 horas, dependiendo de factores como la disponibilidad de repuestos y la capacitación del personal. En cuanto a la disponibilidad operativa, los estándares indican un valor del 92 % para flotas nuevas, mientras que para las flotas maduras la disponibilidad desciende al 88 %, lo que refleja las condiciones de operación y el mantenimiento requerido para cada tipo de flota.

En la figura 3, se muestran los límites inferiores y superiores sugeridos para el tiempo medio entre fallas (MTBF).

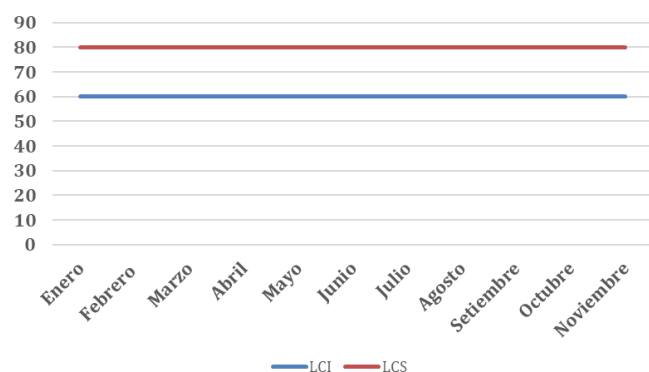


Figura 3. Límites inferiores y superiores del MTBF

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4, se presentan los límites inferiores y superiores correspondientes al tiempo medio para la reparación (MTTR), que varía entre tres y seis horas, de acuerdo con el *benchmarking* de la marca.

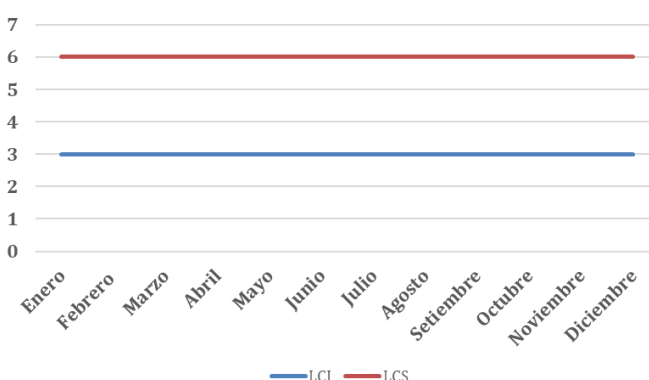


Figura 4. Límites superiores e inferiores del MTTR

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1
Desempeño de variables MTBF y MTTR

ÍNDICE DE DISPONIBILIDAD (%)				MTTR (h)			
MTBF (h)	3	4	5	6	8	10	12
40	93,02	90,91	88,89	86,96	83,33	80	76.92
50	94,34	92,59	90,91	89,29	86,21	83,33	80,65
60	95,24	93,75	92,31	90,91	88,24	85,71	83,33
65	95,59	94,2	92,86	91,55	89,04	86,67	84,42
70	95,89	94,59	93,33	92,11	89,74	87,5	85,37
75	96,15	94,94	93,75	92,59	90,36	88,24	86,21
80	96,39	95,24	94,12	93,02	90,91	88,89	86,96

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5, se muestran los límites superiores e inferiores del índice de disponibilidad inherente considerados para los camiones CAT 785-793, de acuerdo con el *benchmark* de la marca.

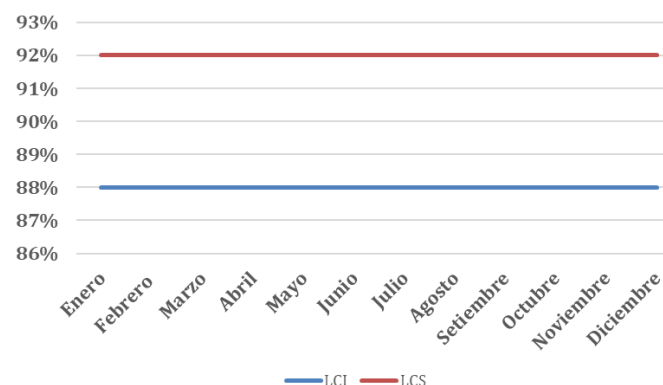


Figura 5. Límites superiores e inferiores de la disponibilidad

Fuente: Elaboración propia.

En el presente estudio se realizó una simulación utilizando diversos valores del tiempo medio entre fallas (MTBF) y del tiempo medio de reparación (MTTR), con el propósito de evaluar su impacto en el índice de disponibilidad de los camiones mineros Caterpillar 785-793. La tabla 1 presenta los resultados obtenidos a partir de distintos escenarios, en los cuales se consideraron valores de MTBF comprendidos entre 40 y 80 horas, y de MTTR entre 3 y 12 horas, lo que permite observar cómo las variaciones en ambos parámetros inciden directamente en la disponibilidad operativa de la flota. Para cada combinación de valores de MTBF y MTTR se muestra el índice de disponibilidad resultante, expresado en porcentaje, lo que facilita una comparación visual de los efectos de las diferentes configuraciones de mantenimiento sobre la eficiencia operativa de los camiones. Este enfoque permite identificar con claridad las condiciones óptimas para maximizar la disponibilidad de la flota, así como los puntos críticos en los que la interacción de ambos parámetros puede generar una disminución significativa de la eficiencia operativa.

RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de la simulación de datos, cuyo propósito es analizar el impacto del tiempo medio entre fallas (MTBF) y del tiempo medio de reparación (MTTR) sobre el índice de disponibilidad operativa de los equipos. Mediante la variación controlada de ambos parámetros dentro de rangos representativos, se busca identificar patrones y relaciones que permitan comprender cómo influyen en el desempeño general de la flota. Los resultados

se presentan en forma tabular y porcentual, lo que facilita su interpretación y posterior análisis.

La figura 4 muestra un gráfico de dispersión que ilustra la relación entre los parámetros MTBF, MTTR y su impacto en el índice de disponibilidad. Se observa que, a medida que el MTBF aumenta, la disponibilidad tiende a incrementarse de forma significativa, evidenciando una relación directamente proporcional. Por el contrario, para valores constantes de MTBF, un incremento del MTTR produce una disminución progresiva de la disponibilidad, lo que indica una relación inversamente proporcional entre ambas variables.

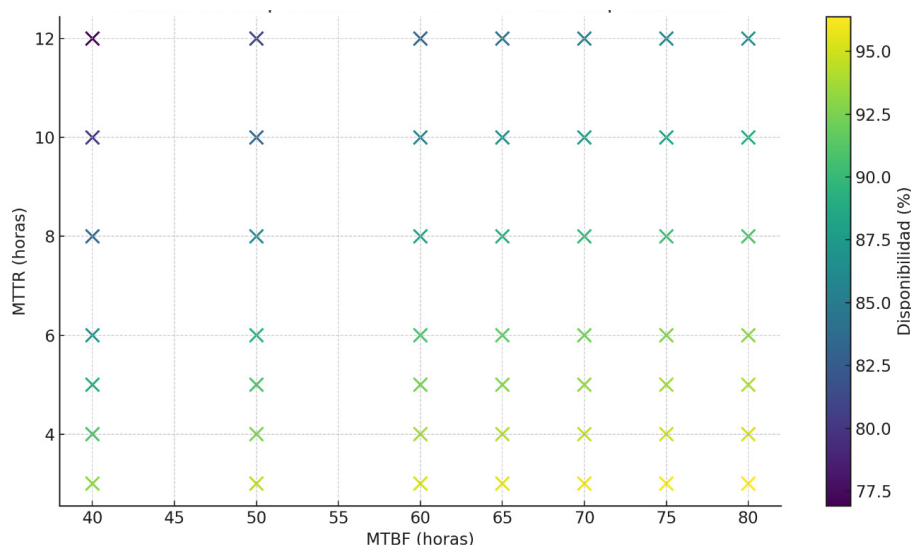


Figura 6. Impacto del MTBF y MTTR sobre la disponibilidad (gráfico de dispersión)

Fuente: Elaboración propia.

La figura 5, correspondiente al mapa de calor, refuerza los hallazgos anteriores. Las zonas con mayor disponibilidad operativa (cercanas al 92 % y representadas por colores cálidos) se alcanzan cuando se combinan valores elevados de MTBF (80 horas) con valores bajos de MTTR (3 horas). A medida que

el MTTR aumenta hacia 6 horas o el MTBF disminuye hasta 60 horas, la disponibilidad desciende a niveles cercanos al 88 %, lo que concuerda con los valores de referencia establecidos para las flotas consideradas «maduras».

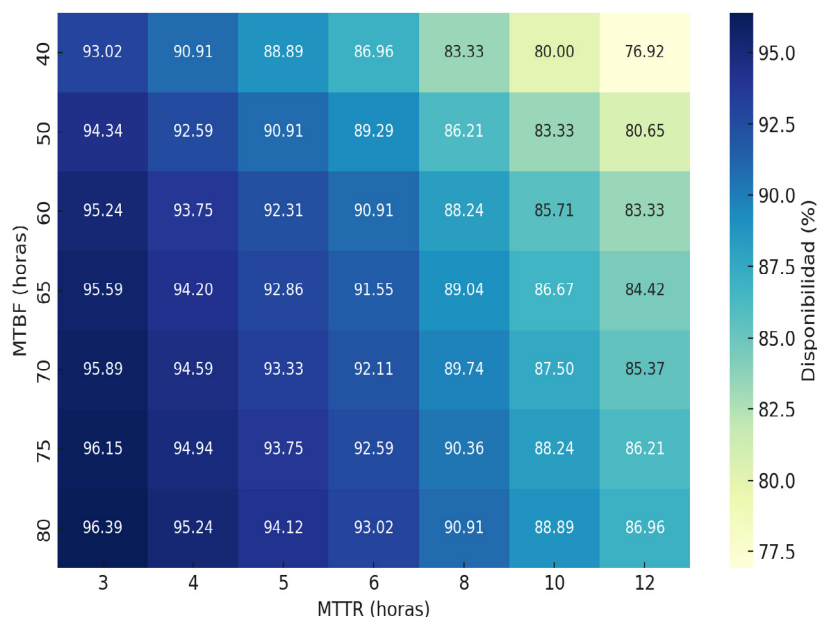


Figura 7. Impacto del MTBF y MTTR sobre la disponibilidad (mapa de calor)

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de la simulación demuestra con claridad la influencia crítica del MTBF (tiempo medio entre fallas) y del MTTR (tiempo medio de reparación) sobre el índice de disponibilidad de los camiones mineros Caterpillar 785-793. Estos resultados son coherentes con las mejores prácticas de gestión del mantenimiento, como se observa en la figura 2 y en el mapa de calor, que refuerzan la importancia de optimizar ambos parámetros. Incrementar el MTBF implica aplicar estrategias orientadas a reducir las fallas, como el mantenimiento predictivo, el análisis de causas raíz (RCA) y la mejora de la calidad de los componentes. Por su parte, reducir el MTTR requiere optimizar la logística de repuestos, fortalecer la capacitación continua del personal técnico, perfeccionar los procedimientos de reparación y minimizar los tiempos muertos operativos. En conjunto, estos enfoques contribuyen a la mejora continua de la disponibilidad operativa, en consonancia con los estándares de referencia establecidos para flotas de camiones nuevos y «maduras».

CONCLUSIONES

Sobre la base del análisis del MTBF, MTTR e índice de disponibilidad se concluyen los siguientes puntos:

- La disponibilidad mejora significativamente con mayores valores de MTBF. A medida que el tiempo medio entre fallas (MTBF) aumenta, la disponibilidad también lo hace, incluso cuando el MTTR permanece constante. Esto resalta la importancia de implementar estrategias orientadas a mejorar la confiabilidad del sistema.
- El MTTR tiene un impacto inversamente proporcional en la disponibilidad. Para un mismo valor de MTBF, al incrementarse el MTTR, la disponibilidad disminuye de forma considerable. Esto demuestra que reducir los tiempos de reparación es tan relevante como aumentar el MTBF.
- Existe una zona óptima de operación. Las combinaciones de MTBF altos (≥ 70) y MTTR bajos (≤ 5) presentan disponibilidades superiores al 93 %, lo que representa un rango operativo deseable para equipos críticos en sectores como la minería o la producción continua.
- La gestión integrada del mantenimiento debe priorizar ambas métricas. Centrarse únicamente en aumentar el MTBF o reducir el MTTR no es suficiente; los mejores resultados se alcanzan cuando ambas variables se gestionan de manera simultánea mediante estrategias de mantenimiento preventivo, predictivo y capacitación técnica.

REFERENCIAS

- [1] Alshaari, A., & Nor, M. (2021). Reliability analysis on water pumps in water supply system in johor. *Journal of Physics: Conference Series*, 1874(1) doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1874/1/012021>
- [2] Baldeon-Pacheco, A., De la Cruz-Escobar, N., Velasquez-Costa, J., & Vilchez-Baca, H. (2024). *Análisis del mantenimiento preventivo en los camiones mineros 980 E-5 y su relación con la disponibilidad mecánica*. Latin American

and Caribbean Consortium of Engineering Institutions. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2024.1.1.1258>

- [3] Caterpillar Inc. (2005). *Performance metrics for mobile mining equipment*.
- [4] Chompu-inwai, R., Diaotrakun, R. y Thaiupathump, T. (2013), Key indicators for maintenance performance measurement: The aircraft galley and associated equipment manufacturer case study. En *2013 10th International Conference on Service Systems and Service Management* (pp. 844-849).
- [5] D'Alessio Ipinza, F. (2004). *Administración y dirección de la producción: Enfoque estratégico y de calidad* (2.ª ed.). Pearson Educación.
- [6] Juran, J., Godfrey, A., Hoogstoel, R., & Schilling, E. (1999). *Juran's quality handbook* (5.ª ed.). McGraw-Hill.
- [7] Ministerio de Energía y Minas. (2024). *Cartera de proyectos de exploración minera 2024*. <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/5417728-cartera-de-proyectos-de-exploracion-minera-2024>
- [8] Mora Gutiérrez, L. (2009). *Mantenimiento: Planeación, ejecución y control*. Alfaomega Grupo Editor.
- [9] Ordoñez Gamarra, R., Rodríguez, S., & Yupanqui, E. (2024). *Implementación del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) para mejorar la disponibilidad de los tractocamiones CL120 Freightliner en la empresa J&J Transportes y Soluciones Integrales S.A.C*. Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2024.1.1.577>
- [10] Orošnjak, M., Beker, I., Brkja, N., & Vrhovac, V. (2024) Predictors of Successful Maintenance Practices in Companies Using Fluid Power Systems: A Model-Agnostic Interpretation. *Appl. Sci*, 14(5921). <https://doi.org/10.3390/app14135921>
- [11] Patricio, L., Varela, L., & Silveira, Z. (2025). Proposal for a Sustainable Model for Integrating Robotic Process Automation and Machine Learning in Failure Prediction and Operational Efficiency in Predictive Maintenance. *Appl. Sci*. 15(854). <https://doi.org/10.3390/app15020854>
- [12] Shaker, F., Shahin, A., & Jahanyan, S. (2024). Simulating the corrective actions affecting system availability: a system dynamics approach. *Journal of Modelling in Management*, 19(6), pp. 1827-1848. <https://doi.org/10.1108/JM2-07-2023-0136>
- [13] Society for Maintenance and Reliability Professionals. (2020). *SMRP best practices: Metrics and guidelines* (6.ª ed.). <https://smrp.org/Learning-Resources/SMRP-Library/Best-Practices-Metrics-Guidelines>
- [14] Timjerdine, M. (2023). Performance measurement in aircraft maintenance – literature review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 29(74). <https://doi10.1108/JQME-10-2021-0080>

[15] Wang, W. H., Bai, N., Wang, L., Liu, G. K., Qian, G., & Yang, X. (2023). Application of the reliability-centered maintenance techniques for dynamic equipment in the petrochemical ammonia-related systems. En *E3S Web of Conferences* (Vol. 385, p. 04014). EDP Sciences. DOI: <https://10.1051/e3sconf/202338504014>

ACERCA DE LOS AUTORES

Efraín Freddy Cirineo Loyola


Magíster en Gestión Estratégica de Empresas, cuenta con diplomados en Gerencia de Mantenimiento y Dirección Productiva del Mantenimiento. Asimismo, es un profesional certificado en mantenimiento y confiabilidad e Ingeniero Mecánico. Docente del Departamento de Gestión y Mantenimiento de Maquinaria Pesada en Tecsup.

Antes de unirse a Tecsup, trabajó por más de 15 años en diversas empresas, en los sectores minería, construcción, planta concentradora y educación; desarrollando sólidos conocimientos en gestión de activos físicos, ingeniería de mantenimiento, confiabilidad y productividad de equipo pesado.

 ecirineo@tecsup.edu.pe

Fernando Jorge Chahud Olivera

Bachiller en Ingeniería Industrial de la Universidad San Ignacio de Loyola, con maestría en Ciencias Empresariales y Gestión de Proyectos y especialista en Gestión y Mantenimiento de maquinaria pesada egresado de Tecsup. Más de diez años de experiencia en sectores de minería, construcción, generación y agroindustria. Especialización en lubricación, análisis de aceites, hidráulica, motores diésel, tren de fuerza y gestión de garantías.

 fchahud@tecsup.edu.pe

Recibido: 04-05-25

Revisado: 19-09-25

Aceptado: 03-10-25



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.

PILARES DEL MODELO

Estos le dan apertura, dinamismo y flexibilidad, lo que orienta nuestra función formativa de manera articulada y coherente con nuestros principios, abordando las tendencias globales en educación tecnológica para transformar y modernizar nuestro futuro.



Articulación con la empresa y con el mundo



Aprendizaje inmersivo
con docentes que inspiran



Experiencia estudiantil
transformadora



Innovación
y emprendimiento



Flexibilidad
educativa



Infraestructura y
equipamiento moderno

Análisis del proceso judicial con énfasis en la etapa de ejecución de sentencias aplicando técnicas de limpieza, organización y procesamiento de datos.



Análisis de datos de los procesos legales de alimentos para menores en una Corte Superior de Justicia del sur del Perú

Data Analysis of Child Support Proceedings in a Superior Court of Justice in Southern Peru

RESUMEN

El presente artículo analiza el proceso judicial de alimentos seguido a favor de menores de edad en el Perú, con énfasis en la etapa de ejecución de sentencias. Esta fase es la más importante y crítica, pues permite garantizar efectivamente el derecho de los niños, niñas y adolescentes a recibir una pensión digna. El objetivo de la investigación fue medir los tiempos de duración de las principales etapas procesales (calificación, trámite y ejecución; la impugnación forma parte de la ejecución, de acuerdo con el Modelo Corporativo que viene impulsando el Poder Judicial [Presidencia del Poder Judicial, 2022]) a fin de identificar los cuellos de botella que afectan la eficacia del sistema judicial. Para ello, se empleó una metodología de análisis cuantitativo basada en la revisión de 358 expedientes de cuatro juzgados de paz letrado de familia de una Corte Superior de Justicia del sur del Perú, aplicando técnicas de limpieza, organización y procesamiento de datos con Python, Google Colab y Excel. Los resultados muestran que, si bien se registran mejoras en los plazos de calificación y trámite, cuyo producto final es la sentencia, la etapa de ejecución continúa siendo lenta e impredecible, con demoras que superan los 15 meses en promedio. Este hallazgo revela que la sola emisión de una resolución no garantiza la justicia material, lo que genera una brecha entre la norma y la realidad, afecta directamente a la población más vulnerable y plantea un desafío de justicia social (Defensoría del Pueblo, 2018). Se concluye que el fortalecimiento de esta etapa requiere reformas procesales acompañadas de la implementación de nuevas herramientas de análisis de datos, que permitan monitorear y optimizar los tiempos del proceso con el objetivo de volver más eficaz el sistema de justicia.

ABSTRACT

This article analyzes judicial child support proceedings for minors in Peru, with an emphasis on the judgment enforcement phase. This is the most critical stage, as it guarantees the right of children and adolescents to receive a decent pension. The objective of the research was to measure the duration of the main procedural stages—admission, processing, and enforcement—noting that appeal proceedings are considered part of enforcement in accordance with the Corporate Model promoted by the Judiciary (Presidency of the Judiciary, 2022). The study aimed to identify bottlenecks that affect the efficiency of the judicial system. A quantitative methodology was applied, based on the review of 358 case files from four Family Magistrate Courts within a Superior Court of Justice in southern Peru, using data cleaning, organization, and processing techniques through Python, Google Colab, and Excel. The results show that, although there are improvements in the admission and processing stages—which conclude with sentencing—the enforcement stage remains slow and unpredictable, with delays exceeding an average of 15 months. This finding reveals that the mere issuance of a resolution does not guarantee substantive justice; it creates a gap between the law and reality, which directly affects the most vulnerable population and poses a challenge to social justice (Ombudsman's Office, 2018). It is concluded that strengthening this stage requires procedural reforms supported by the implementation of new data analysis tools to monitor and optimize case duration, aiming to make the justice system more efficient.



Palabras Claves

Proceso legal, Alimentos de menores, Sistema judicial peruano, Ejecución de sentencias, Análisis de datos, Justicia de familia.

Key words

Legal proceedings, Child Support, Peruvian judicial system, Enforcement of judgments, Data analysis, Family justice.

El proceso judicial de alimentos en el Perú constituye un pilar esencial para la protección de los derechos de los niños, niñas y adolescentes, al garantizar el acceso a una pensión que asegure condiciones de vida dignas. Sin embargo, la eficacia de este proceso se ve comprometida por demoras significativas, especialmente en la etapa de ejecución de sentencias, lo que genera una brecha entre la justicia formal y la justicia material. La sola emisión de una resolución (sentencia) no asegura el cumplimiento efectivo del derecho alimentario, perpetuando una problemática de justicia social que afecta directamente a la población más vulnerable.

El presente estudio busca ofrecer un diagnóstico empírico sobre la duración real de las etapas del proceso de alimentos (calificación, trámite y ejecución de sentencias) en una Corte Superior del sur del país. Para ello, se aplicó una metodología de análisis cuantitativo basada en la revisión de 358 expedientes judiciales de cuatro juzgados de paz letrado (primera instancia), empleando herramientas tecnológicas de libre acceso como Python y Google Colab para la limpieza, organización y procesamiento de datos, complementando el análisis con registros en Excel y el levantamiento de información a través de un cuestionario con preguntas similares a las presentadas en el Informe de Adjuntía 001-2018-AP/AAC, sobre «El proceso de alimentos en el Perú: avances, dificultades y retos».

Por su parte, la etapa de ejecución continúa siendo la más lenta

FUNDAMENTOS

Normatividad

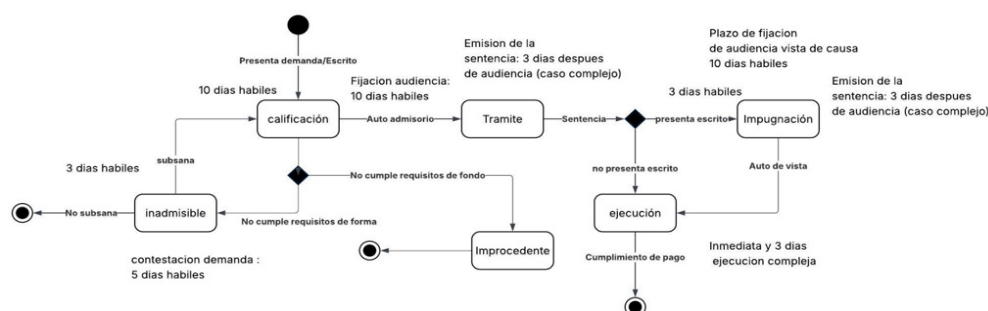
El proceso de alimentos sigue la vía sumarísima, según el art. 546 del Código Procesal Civil [3], siendo los juzgados de paz Letrado los competentes para su tramitación en primera instancia.

La Ley 28439, «Ley que simplifica las reglas del proceso de alimentos», modifica el Código Civil (art. 545), el Código Procesal Civil (arts. 566 y 566-A), el Código de los Niños y Adolescentes (arts. 96, 164 y 171) y la Ley Orgánica del Poder Judicial (art. 4, inc. 4), específicamente en lo referido a la postulación, los requisitos de la demanda, la competencia, así como la ejecución anticipada, la ejecución forzada y el acceso a la justicia.

La Directiva 022-2022-CE-PJ, denominada «Ejecución de sentencias de pensión de alimentos para niñas, niños y adolescentes» [9], aprobada por Resolución Administrativa 356-2022-CE-PJ [5], tiene como objetivo establecer disposiciones para dinamizar la ejecución de las sentencias de pensión de alimentos y garantizar la protección efectiva de los derechos fundamentales y el interés superior de las niñas, niños y adolescentes.

Históricos

El proceso de alimentos se ha sujetado a un esquema estructural de operatividad de los juzgados que, bajo un modelo individual, presenta el siguiente flujo de estados:



Fuente: Elaboración propia a partir de la revisión documentaria del proceso único de alimentos (2025), plazos procesales según el Código Procesal Civil vigente.

Cabe destacar que, en aplicación de este modelo y a la luz de las conclusiones presentadas por la Defensoría del Pueblo (Informe de Adjuntía 001-2018-DP/AAC) [6], se han validado a nivel nacional los siguientes resultados, los cuales se refieren directamente a las etapas objeto de análisis:

- Calificación de la demanda: «Apenas algo más de un tercio de las demandas evaluadas (37,1 %) fueron calificadas dentro del plazo legal de cinco días hábiles».
- Trámite del proceso: «Menos del 3 % de las demandas de alimentos fueron resueltas en primera instancia y dentro del plazo legal de 30 días hábiles. Lamentablemente, casi la mitad de los procesos estudiados (47,5 %) tardaron más de medio año en resolverse en dicha instancia».
- Ejecución de sentencia: «Alrededor de un tercio de las sentencias que concedieron una pensión de alimentos fueron cumplidas por la parte demandada (38,9 %). No obstante, en el 27,3 % la entrega de la pensión se hizo efectiva en un lapso de cinco meses, mientras que en el 23,5 % el cumplimiento tardó más de quince meses».

Es importante resaltar, respecto del Modelo Corporativo, que los operadores de justicia se han orientado hacia la especialización por etapas del proceso, como son calificación, trámite y ejecución. Esta tendencia busca su aplicación estandarizada en materia de familia, y su análisis y comportamiento constituyen la esencia del presente documento, el cual permitirá mostrar información clasificada y consolidada mediante la aplicación de metodologías y herramientas digitales.

Análisis

Se identificaron los órganos jurisdiccionales para el proceso de levantamiento de información a nivel de primera instancia. Se consideraron cuatro Juzgados de Paz Letrado en la especialidad de Familia.

Asimismo, gracias a la cooperación interinstitucional y en cumplimiento de los compromisos asumidos por las instituciones públicas y privadas, se contó con la participación de jóvenes estudiantes de Derecho en el proceso de levantamiento de información, mediante la verificación física y virtual de 358 expedientes judiciales correspondientes a los años 2020 al 2024, tramitados en la vía del proceso único.

Las principales limitaciones del presente estudio estuvieron asociadas a la disponibilidad y calidad de la información.

- En primer lugar, se identificó una **escasa cantidad de expedientes físicos** disponibles en los anaques de la institución analizada, lo que restringió el acceso a información completa de casos concluidos; por ello, se decidió considerar la totalidad de la muestra para el estudio.
- En la **recolección de datos realizada por los estudiantes de Derecho**, pese a su compromiso, se produjeron algunos errores humanos de registro. Estos fueron identificados y corregidos durante las etapas de depuración y análisis de datos.
- **En los expedientes electrónicos** solo se permitió acceder a los datos del proceso en la etapa de trámite, debido a la reciente implementación de este sistema.

- La **institución no contaba con herramientas especializadas para el análisis estadístico**, como SPSS u otros *softwares* similares. El procesamiento de datos en las áreas responsables suele realizarse exclusivamente mediante Microsoft Excel, lo que limita el alcance de los análisis que pueden efectuarse de manera rutinaria.
- La información utilizada corresponde a datos anonimizados de expedientes judiciales, procesados únicamente con fines académicos y de mejora institucional. No se revelaron identidades ni se accedió a información confidencial.

La información se consolidó y analizó, lo que permitió arribar a conclusiones sobre la situación actual, los logros y retos alcanzados, así como las dificultades que aún persisten, además de la actualización normativa y las mejoras implementadas.

Metodología

El presente estudio adopta un enfoque cuantitativo, descriptivo y transversal. Su finalidad fue analizar, mediante herramientas de programación, los tiempos de duración de las etapas del proceso judicial de alimentos en los juzgados de paz letrado de familia (primera instancia) de una Corte Superior del sur del Perú, considerando la cantidad de órganos jurisdiccionales y la carga procesal que enfrentan.

Fuente y muestra de datos

Se trabajó con una base de 358 expedientes judiciales disponibles en formato físico o electrónico al momento del estudio, seleccionados de forma total o censal bajo un criterio de conveniencia, correspondiente al periodo 2020-2024. Este criterio se adoptó debido a las limitaciones de acceso y tiempo en la recopilación de la información, por lo que se analizaron todos los expedientes disponibles en los juzgados evaluados.

Cada expediente judicial de alimentos fue considerado una unidad de análisis, registrándose de forma independiente las fechas y variables de cada etapa procesal. Un expediente integra una serie de documentos (demanda, pruebas, oficios, contestaciones, resoluciones, sentencias, notificaciones, autos, entre otros); por ello, el trabajo no consistió solo en el conteo, sino en la revisión exhaustiva de los principales hitos procesales, tales como las fechas de ingreso de la demanda, calificación de la demanda, emisión de sentencia, interposición de apelación, emisión de sentencia de vista, aprobación de liquidaciones y otros datos obtenidos mediante fichas estructuradas de recolección de información.

La información fue depurada para eliminar registros incompletos o inconsistentes, quedando para el análisis un total de 358 registros en las etapas de calificación (300), trámite (256), impugnación (135) y ejecución (174) con información completa en esta fase. Si bien el número de expedientes en la etapa de impugnación, luego de revisar el total de la muestra (82 % de apelaciones), fue reducido, solo se encontraron 37 con proceso íntegro. Estos casos permitieron estimar con precisión los tiempos promedio y las variaciones entre etapas, proporcionando evidencia empírica representativa de la dinámica procesal en materia de alimentos.

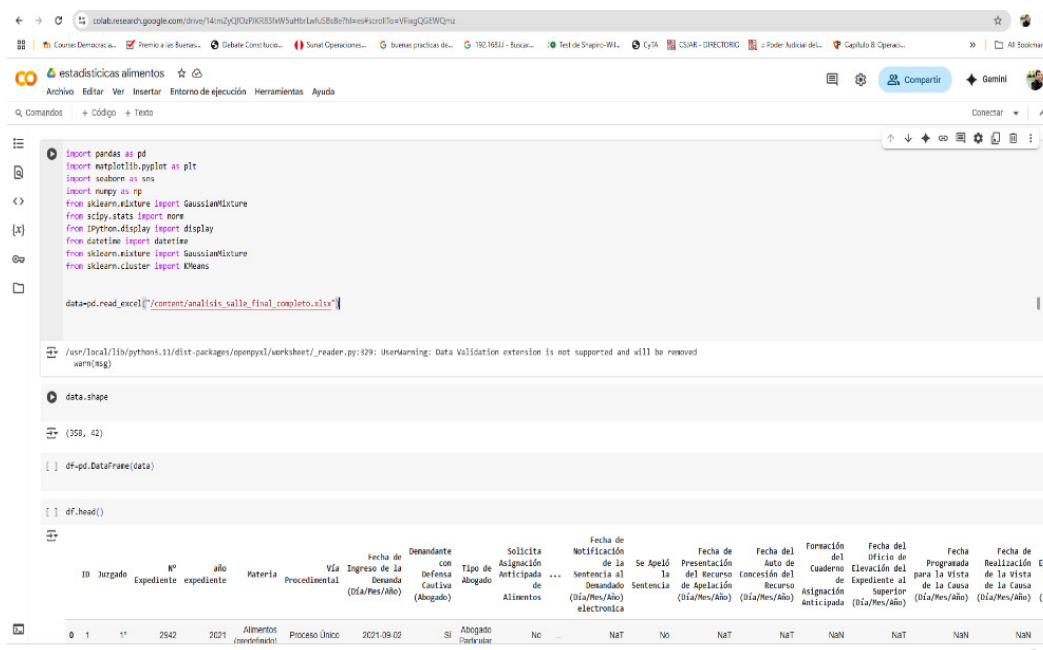


Figura 3. Captura, pantalla de trabajo Colab de Google.

Fuente: Trabajo de importación de librerías y de la base de datos en Excel. (2025)

Limpieza de datos

En la fase de procesamiento, los datos fueron sometidos a un proceso de limpieza y validación con el objetivo de garantizar su coherencia temporal y analítica. Se procedió a eliminar registros con valores nulos, duplicados o inconsistencias temporales (por ejemplo, fechas de sentencia anteriores a la presentación de la demanda), así como filas y columnas que no aportaban información relevante para el cálculo de los tiempos de calificación, trámite y ejecución del proceso único de alimentos.

Esta depuración se justificó en que el propósito central del análisis fue obtener estimaciones precisas de la duración promedio de cada etapa procesal; por tanto, la presencia de valores faltantes o incongruentes habría distorsionado los

resultados. No se aplicaron métodos de imputación, dado que las ausencias de datos se debieron a eventos procesales no ocurridos al momento del levantamiento de información (es decir, los expedientes se dejaron en la etapa de sentencia por falta de impulso de las partes o, en su defecto, no se encontró información sobre la conclusión del proceso; también se registraron expedientes aún en ejecución, pero sin iniciar o culminar el proceso de liquidación).

Posteriormente, se generaron variables derivadas para calcular los tiempos de cada etapa del proceso, empleando las diferencias entre las fechas registradas en los expedientes judiciales. Con ello fue posible construir una distribución de frecuencias mediante el análisis de datos. Las principales variables y fórmulas utilizadas fueron:

Etapa de calificación por expediente.

Tiempo de calificación = (Fecha de calificación de la demanda) - (Fecha de ingreso de la demanda)

Etapa de trámite por expediente.

Tiempo de trámite = (Fecha de emisión de la sentencia) - (Fecha de calificación de la demanda)

Etapa de impugnación por expediente.

Tiempo de impugnación= (Fecha de auto que declara la sentencia consentida) – (Fecha de presentación del recurso de apelación)

Etapa de ejecución por expediente.

Tiempo de ejecución= (Fecha de primer pago consentido de la liquidación - Fecha de sentencia consentida)

Tiempo total promedio= (Tiempo de calificación promedio) + (Tiempo de trámite promedio) + (Tiempo de impugnación promedio) + (Tiempo de ejecución promedio)

Figura 4. Fórmulas para hallar el tiempo de la etapa de calificación, trámite, impugnación y ejecución proceso único de alimentos.

Fuente: Cálculo de los tiempos de calificación, trámite, impugnación y ejecución, elaboración propia (2025).

Estas variables permitieron analizar los tiempos promedio, las medianas y los rangos de cada fase procesal. El tratamiento y la visualización de los datos se realizaron mediante Microsoft Excel, Python y Google Colab. El detalle técnico de las rutinas de procesamiento y los ejemplos de código se presentan en el anexo 1, con el fin de favorecer la reproducibilidad del estudio.

Cálculo de estadísticos descriptivos

Se generaron gráficos de barras para comparar los valores centrales y de dispersión. Las visualizaciones fueron exportadas como imágenes para su inclusión en el documento académico.

o edia, mediana, moda.

o Cuartiles (Q1, Q3) y rango intercuartílico (IQR).

o Desviación estándar y valores mínimos/máximos.

1. Análisis por etapa procesal:

o Se calcularon estadísticas específicas para cada etapa: calificación, trámite, impugnación y ejecución.

2. Visualización

Fragmento ilustrativo

Obtenemos un *dataframe* de calificación a través del filtrado de datos y la aplicación de la siguiente fórmula:

```
df_analisis_descriptivo['duracion'] = df_analisis_descriptivo['Fecha de Emisión de la Sentencia (Día/Mes/Año)'] - df_analisis_descriptivo['Fecha de Ingreso de la Demanda (Día/Mes/Año)'] #calificacion
df_analisis_descriptivo
```

Figura 5. Fragmento ilustrativo, muestra la etapa de calificación para hallar la diferencia de días desde la fecha de la emisión de la sentencia menos la fecha del ingreso de la demanda.

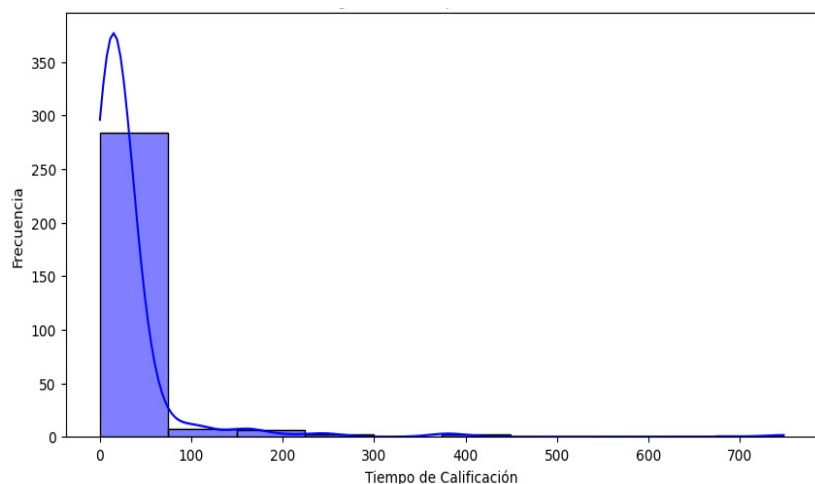
Nota. Código de Python de cálculo de tiempo de calificación.

Fuente: Elaboración propia (2025).

El análisis exploratorio de datos permitió identificar tendencias y comportamientos diferenciados en las tres etapas del proceso judicial de alimentos: calificación, trámite y ejecución. A partir del procesamiento de 358 expedientes revisados, se evidencian avances en las dos primeras etapas, aunque persisten demoras estructurales en la fase de ejecución.

Estos resultados refuerzan la necesidad de implementar estrategias de mejora procesal basadas en evidencia empírica y apoyadas

en herramientas de análisis de datos. En particular, se sugiere priorizar la optimización de la etapa de ejecución, especialmente el seguimiento de los casos que se encuentran en abandono, en ejecución sin impulso, en liquidación de pensiones devengadas o en conciliación sin avance, dado su impacto directo en la efectividad del derecho alimentario y en la percepción ciudadana de la justicia social.



Análisis descriptivo:

La media de «Tiempo de calificación» es:
28,85430463576159
La mediana de «Tiempo de calificación» es: 14,0
La(s) moda(s) de «Tiempo de calificación» es/
son: [13]
El primer cuartil (Q1) es: 9,0
El tercer cuartil (Q3) es: 25,0
El rango intercuartílico (RIC) es: 16,0
La desviación estándar de «Tiempo de calificación» es: 60,39607887549323

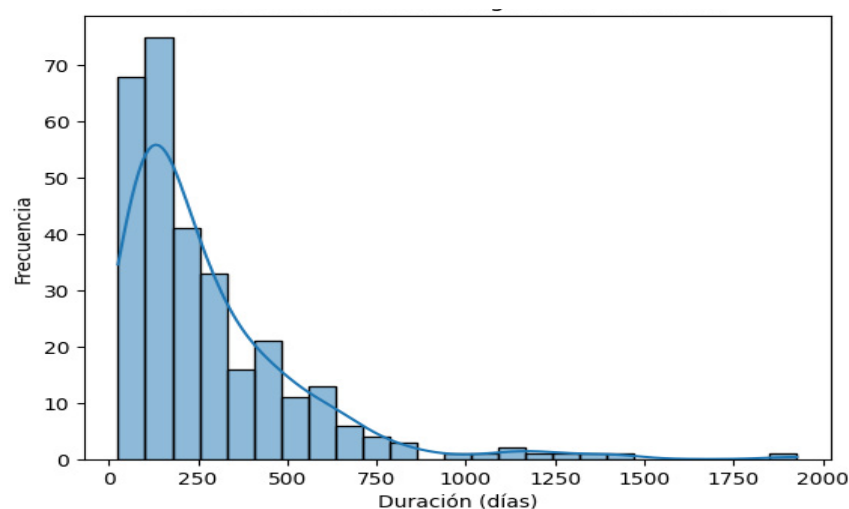
Figura 6. Resultados por etapa de calificación

Nota. Cálculo de los tiempos de calificación

Fuente: Elaboración propia (2025).

Durante la etapa de calificación, el tiempo promedio registrado fue de 29 días, con valores mínimos de 14 y máximos de 90 días, lo que refleja una gestión relativamente eficiente y homogénea entre los órganos jurisdiccionales evaluados. Este desempeño

se asocia con la especialización del personal jurisdiccional y la aplicación del modelo corporativo, que distribuye funciones y responsabilidades de manera más estandarizada (Presidencia del Poder Judicial, 2022).



Análisis descriptivo:

La media de «Tiempo de trámite» es: 276
El primer cuartil (Q1) es: 110
El segundo cuartil (Q2) es: 191
El tercer cuartil (Q3) es: 368
La desviación estándar de «Tiempo de trámite» es: 257
Tiempo mínimo: 26
Tiempo máximo: 1927

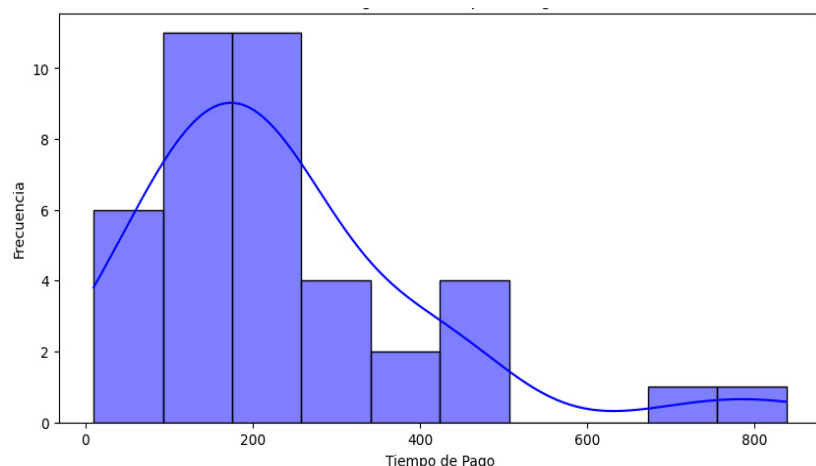
Figura 7. Resultados por etapa de trámite

Nota. Cálculo de los tiempos de trámite

Fuente: Elaboración propia (2025).

En la etapa de trámite, los expedientes presentaron una mediana de 191 días (aproximadamente, seis meses), con una variabilidad significativa entre juzgados. Las diferencias en los tiempos de programación de audiencias y la frecuencia de reprogramaciones explican parte de esta dispersión. También se identificó que el 40 % de los demandados no contestó la demanda, mientras que el 46 % fue declarado rebelde, lo que contribuye a retrasos adicionales en la tramitación de los procesos. Además, se resalta

que el 25 % de los expedientes logró emitir una sentencia en 110 días, es decir, cuatro meses. Asimismo, el 75 % de todos los expedientes alcanzó una sentencia luego de la calificación en un promedio de 368 días, equivalente a un año y un mes, lo que demuestra que los procesos iniciados concluyen con sentencia, a pesar de las posibles complicaciones del proceso judicial. En consecuencia, se cumple el acto procesal de la sentencia, que garantiza en parte el derecho del alimentista.



Análisis descriptivo:

Cantidad de datos: 37
 La media de «Tiempo de impugnación» es: 468
 El primer cuartil (Q1) es: 359
 El Segundo cuartil (Q2) es: 431
 El tercer cuartil (Q3) es: 542
 La desviación estándar de «Tiempo de trámite» es: 191
 Tiempo mínimo: 542
 Tiempo máximo: 1032

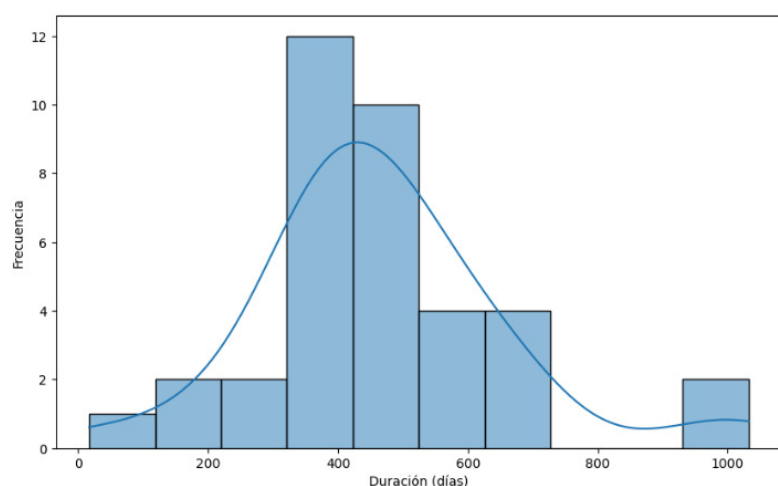
Figura 8. Resultados por etapa de impugnación, la cual es parte de la ejecución
Nota. Cálculo de los tiempos de impugnación.

Fuente: elaboración propia (2025).

De los resultados de la etapa de ejecución respecto de la impugnación, se debe precisar que no todos los expedientes son apelados, dado que algunos quedan consentidos si ninguna de las partes impulsa el proceso. Se identificó que el 82 % de los expedientes fueron apelados y solo el 18 % no se encontraban en esa condición. De los 111 expedientes apelados, únicamente 37 registraban una fecha de término; los 85 restantes aún se encontraban en trámite en segunda instancia al momento del análisis. Para los 37 casos completos, la media del tiempo de impugnación fue de 468 días (16 meses), lo que evidencia que esta etapa constituye

uno de los principales cuellos de botella del proceso judicial de alimentos.

El alto nivel de dispersión en los tiempos y la falta de cierre en la mayoría de los expedientes reflejan una débil gestión de seguimiento en las segundas instancias y una brecha estructural en la coordinación entre los juzgados de primera y segunda instancia. Este hallazgo revela que la demora en la resolución de las apelaciones afecta directamente la oportunidad de acceso a una pensión efectiva, prolongando la vulnerabilidad económica de los beneficiarios.



Análisis descriptivo:

La media de «Tiempos de pago» es: 233,925
 La mediana de «Tiempo de pago» es: 193,0
 La(s) moda(s) de «Tiempo de pago» es/son: [234, 439]
 El primer cuartil (Q1) es: 128,0
 El tercer cuartil (Q3) es: 275,0
 El rango intercuartílico (RIC) es: 147,0
 La desviación estándar de «Tiempo de pago» es: 173,559180404161

Figura 9. Resultados por etapa de ejecución

Fuente: Cálculo de los tiempos de calificación, trámite, impugnación y ejecución, elaboración propia (2025).

De los 174 expedientes que lograron llegar a la etapa de ejecución, se observa que esta fase constituye uno de los principales cuellos de botella del proceso judicial de alimentos. Se determinó que el 87 % de las sentencias no fueron ejecutadas, mientras que solo el 13 % se cumplieron efectivamente, con plazos que superan los 15 meses en promedio. Esta situación demuestra que la sola emisión de una resolución judicial no garantiza el acceso real a la justicia ni la satisfacción del derecho alimentario, generando una profunda brecha entre la justicia formal (dictada en sentencia) y la justicia material (efectivamente cumplida).

El hallazgo revela que la ineficacia en la ejecución constituye un punto crítico del sistema judicial, donde la demora o la inacción perpetúan la vulnerabilidad económica de los niños y adolescentes beneficiarios. Este resultado confirma las observaciones señaladas por la Defensoría del Pueblo [6], que ya advertía deficiencias estructurales en la etapa de ejecución de sentencias de alimentos, las cuales aún persisten a pesar de las reformas implementadas.

RESULTADOS

Se trabajó con una muestra de 358 expedientes judiciales de procesos de alimentos tramitados en juzgados de paz letrado de familia.

Tabla 2
Resumen, de resultados trabajados en Google Colab con Python

Etapas	Mediana (días)	Media (días)	Desviación estándar
Calificación	14	29	60
Trámite	191	276	257
Impugnación	431	468	191
Ejecución	193	234	173

Nota. Tiempos promedios obtenidos del análisis de datos

Fuente: Elaboración propia (2025).

Los resultados obtenidos

En general

El tiempo total estimado para la tramitación completa de un proceso judicial de alimentos asciende, según la media, a aproximadamente dos años y siete meses, mientras que la mediana indica dos años y tres meses, considerando las tres etapas procesales: calificación, trámite y ejecución. No obstante, el análisis detallado muestra que la impugnación, que se encuentra dentro de la ejecución, y la ejecución por falta de impulso de oficio actúan como cuellos de botella complementarios que explican gran parte de dicha dilación estructural.

En la etapa de impugnación, el 82 % de las sentencias fueron apeladas (solo el 18 % quedaron consentidas). De los 111 expedientes apelados, únicamente 37 registraban una fecha de término al momento del corte; los 85 restantes permanecían aún en trámite. Para esos 37 casos completos, la media del tiempo de impugnación fue de 468 días (aproximadamente 16 meses), con una distribución ampliamente dispersa: Q1 = 359 días, Q2 (mediana) = 431 días, Q3 = 542 días y desviación estándar \approx 191 días; el valor máximo observado alcanzó 1 032 días. Estos resultados evidencian no solo demoras prolongadas en segunda instancia, sino también una marcada variabilidad entre expedientes, lo que sugiere diferencias en la gestión y en la carga procesal de las instancias superiores. Además, la existencia de 85 apelaciones sin fecha de cierre revela una falta de seguimiento exhaustivo en esa fase.

Paralelamente, la etapa de ejecución muestra una tasa de cumplimiento muy baja: del total de expedientes que llegaron a ejecución, el 87 % no registró ejecución efectiva, mientras que solo el 13 % se cumplió por impulso de parte, con plazos promedio que superan los 15 meses.

En conjunto, la combinación de una impugnación extensa y una ejecución inefectiva explica por qué la resolución final tarda tanto y por qué la sentencia no siempre se traduce en justicia material para los menores beneficiarios [6].

Las etapas evaluadas fueron calificación, trámite y ejecución.

Los resultados se resumen en la siguiente tabla:

Por etapas:

- La etapa de calificación: los resultados evidencian un tiempo promedio de 29 días para la calificación de las demandas, lo que confirma la eficacia del Modelo Corporativo implementado en los juzgados de paz letrado de familia, especialmente por la especialización funcional de los actores judiciales. Este resultado representa una mejora respecto del Informe de Adjuntía 001-2018-DP/AAC de la Defensoría del Pueblo [6], donde apenas el 37 % de las demandas fueron calificadas dentro del plazo legal de cinco días hábiles. En contraste, el 50 % de los expedientes en esta Corte Superior de Justicia del sur del Perú fueron atendidos entre 0 y 14 días.

No obstante, aún se observan casos con demoras superiores a 25 días, generalmente vinculadas a dificultades en la notificación de la parte demandada, lo que constituye un cuello de botella puntual en el inicio del proceso. Este hallazgo sugiere la necesidad de reforzar los mecanismos de notificación al obligado o demandado.

- La etapa de trámite: en esta etapa se registró un tiempo promedio de 276 días (aproximadamente nueve meses). Este resultado, si bien refleja la implementación del modelo corporativo en los juzgados de paz letrado de familia, no evidencia una mejora sustancial respecto de los hallazgos del Informe de Adjuntía 001-2018-DP/AAC de la Defensoría del Pueblo [6], el cual reportó un tiempo promedio nacional de 229 días desde la interposición de la demanda hasta la conciliación, considerando tanto la calificación como el trámite. En comparación, el tiempo obtenido en este estudio —centrado únicamente en la fase de trámite— sugiere una mayor duración procesal, lo que podría deberse a la acumulación de actos procesales, reprogramaciones frecuentes de audiencias, retrasos en las notificaciones y diferencias operativas entre juzgados.
- Esta situación pone de manifiesto que, a pesar de los esfuerzos normativos y de gestión, el trámite continúa siendo la etapa más prolongada y variable del proceso de alimentos, afectando la eficacia del sistema judicial y el acceso oportuno a una pensión alimentaria para los menores beneficiarios. Se recomienda fortalecer los mecanismos de control de plazos, implementar alertas automáticas en el sistema judicial

electrónico y estandarizar la programación de audiencias para optimizar esta fase.

- La etapa de ejecución: aunque la media de duración de esta etapa fue de 234 días, la alta desviación estándar de 173 días revela una significativa dispersión en los casos analizados.

En consecuencia, el cumplimiento efectivo de una sentencia puede extenderse hasta **aproximadamente 14 meses (407 días)** en algunos expedientes.

Los datos analizados, en comparación con lo expresado en el Informe de Adjuntía de [6], no muestran una mejora significativa, a pesar de las actualizaciones normativas implementadas por el Estado y el Poder Judicial, lo que también resulta incomprensible para las partes procesales involucradas. Sin embargo, debe valorarse la sobrecarga procesal actual en paralelo con los estándares de carga establecidos para cada órgano jurisdiccional, lo que haría necesario incluir la actualización de hitos estadísticos que se sumen a la carga de jueces y asistentes judiciales en cuanto a su producción.

De manera complementaria, se advierte que, como resultado del trabajo realizado, durante el trámite de la impugnación de las sentencias emitidas en el proceso de alimentos podría presentarse un retraso significativo de 468 días, siendo esta una variable importante a considerar. Cabe señalar que este período de tiempo se contabiliza desde la elevación del expediente al juzgado especializado de familia hasta la emisión de la sentencia final por parte de este, que confirma o no la resolución emitida en primera instancia por los juzgados de paz letrado de familia.

Finalmente, es necesario resaltar que la etapa de ejecución muestra una alta variabilidad en sus tiempos, y el registro actual de mejora no resulta favorable al demandante, dado que este no obtiene una sentencia firme y de efectivo cumplimiento en un corto plazo. Por tanto, la información presentada constituye un posible punto de inflexión y reflexión, con la finalidad de que, en el futuro, puedan propiciarse nuevas buenas prácticas, acciones de monitoreo del cumplimiento de funciones y/o estrategias de fortalecimiento de recursos humanos y materiales, que permitan materializar los esfuerzos de los actores del proceso.

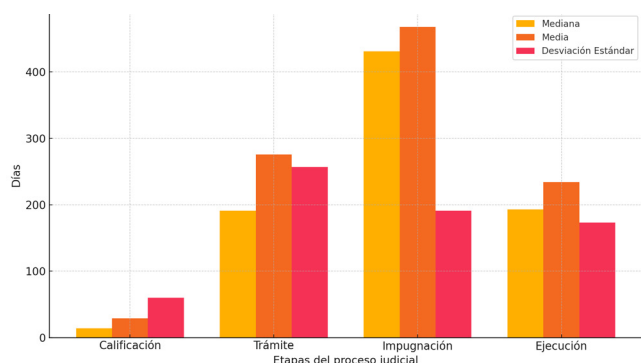


Figura 10. Resultados por etapas de calificación, trámite y ejecución

Nota. Duración promedio, mediana y desviación estándar por etapa del proceso judicial de alimentos.

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

Primera. Las instituciones públicas, debido a limitaciones presupuestarias, tecnológicas y de competencias especializadas, presentan dificultades para aplicar metodologías de análisis de datos. Esto restringe el aprovechamiento de la información estadística generada por el propio sistema judicial, pese a su relevancia para la mejora de la gestión procesal y la atención oportuna de las demandas ciudadanas.

Segunda. De acuerdo con los registros nacionales, el proceso de alimentos representa alrededor del 35 % del total de causas ingresadas al Poder Judicial del Perú (Poder Judicial del Perú, 2022), lo que evidencia su magnitud e impacto en la carga procesal de los órganos jurisdiccionales, especialmente en los juzgados de paz letrado de familia.

Tercera. Si bien se han emitido normas orientadas a mejorar la celeridad y eficacia de los procesos de alimentos, como la Ley 28439 y la Directiva 022-2022-CE-PJ [9], los resultados del análisis muestran que persisten brechas significativas entre la norma y su aplicación práctica, particularmente en la etapa de ejecución, donde los plazos exceden los 15 meses en promedio, impidiendo la materialización del derecho alimentario.

Cuarta. Del análisis de 358 expedientes judiciales, los tiempos promedio obtenidos fueron los siguientes:

- Calificación: 29 días, lo que refleja eficiencia y una mejora en comparación con los datos reportados por la Defensoría del Pueblo [6].
- Trámite: 276 días, evidenciando una fase extensa y variable, asociada a reprogramaciones y acumulación de actos procesales.
- Ejecución: 234 días en promedio, aunque con alta dispersión ($DE = 173$ días), lo que muestra que el cumplimiento efectivo puede tardar hasta 407 días (14 meses) en algunos casos. Asimismo, la etapa de impugnación alcanza una duración promedio de 468 días, configurándose como otro cuello de botella relevante del proceso, presente en aproximadamente el 80 % de los casos.

Quinta. A la luz de los resultados, se identifica que el problema estructural no radica en la emisión de sentencias, sino en su ejecución efectiva. Esto genera una brecha entre la justicia formal y la justicia material, afectando directamente a niños, niñas y adolescentes en situación de vulnerabilidad [6]. Por tanto, las cortes superiores deben centrar sus esfuerzos en fortalecer los mecanismos de seguimiento y control de la etapa de ejecución, promoviendo criterios uniformes, interoperabilidad con entidades externas (Sunat, Reniec, Banco de la Nación) y una mayor supervisión del cumplimiento de las pensiones, en concordancia con la Directiva 022-2022-CE-PJ [9].

Sexta. Finalmente, se recomienda incorporar estrategias de gestión basadas en datos que permitan monitorear en tiempo real los tiempos procesales y priorizar los casos con mayores demoras. Esto, complementado con el impulso de oficio, la conciliación temprana y la formación especializada del personal judicial, constituye un conjunto de factores primordiales que contribuirían a una justicia más eficaz, equitativa y centrada en el bienestar de la niñez.

RECOMENDACIONES

- Fortalecer la etapa de ejecución de sentencias. Se sugiere implementar mecanismos de seguimiento automatizado y monitoreo continuo de los procesos en ejecución, priorizando aquellos en los que existan menores en situación de vulnerabilidad. Asimismo, debe promoverse el impulso de oficio por parte de los órganos jurisdiccionales, garantizando que las resoluciones judiciales se traduzcan en una pensión efectiva y oportuna.
- Mejorar la gestión procesal y la trazabilidad de los expedientes. Los hallazgos revelan demoras significativas en las etapas de impugnación y ejecución. Por tanto, se recomienda desarrollar sistemas de trazabilidad procesal que integren datos de primera y segunda instancia, permitiendo identificar los puntos de congestión y evaluar el rendimiento judicial mediante indicadores objetivos.
- Estandarizar buenas prácticas entre los juzgados. Las diferencias observadas en los tiempos promedio entre juzgados sugieren la necesidad de establecer protocolos uniformes de gestión y criterios comunes de actuación, especialmente para la programación de audiencias, la emisión de sentencias y la ejecución de resoluciones alimentarias.
- Impulsar la cooperación interinstitucional. Dado que las principales solicitudes de información judicial se dirigen a entidades como la Sunat, el Reniec, la Sunarp y el Banco de la Nación, se recomienda fortalecer los convenios de colaboración tecnológica para el intercambio de información en tiempo real, lo que reduciría los tiempos de verificación patrimonial y de ejecución.
- Capacitar en herramientas de análisis de datos. La experiencia con Python y Google Colab demuestra el potencial de las herramientas de *software* libre para la gestión judicial. Se sugiere implementar programas de formación técnica en análisis de datos dirigidos al personal jurisdiccional y administrativo, con el fin de consolidar una cultura institucional basada en evidencia.
- Replicar el estudio a nivel nacional. Se recomienda extender esta investigación a otras Cortes Superiores del país para establecer estándares nacionales de duración procesal en materia de alimentos. Ello permitirá comparar la eficiencia de los juzgados y generar una línea base que oriente políticas públicas de mejora judicial.
- Promover una perspectiva de justicia social. Las demoras en la ejecución de sentencias alimentarias no constituyen solo un problema administrativo, sino una vulneración directa al interés superior del niño. Por tanto, se insta a las autoridades a incorporar un enfoque de justicia social y de protección de los derechos humanos en las estrategias de modernización judicial.

REFERENCIAS

- [1] Código Civil. (1984, 24 de julio). *Decreto Legislativo N.º 295*, art. 472 (Perú).
- [2] Código de los Niños y Adolescentes. (2000, 7 de agosto). *Ley.º 27337*, arts. 92 y 93 (Perú).
- [3] Código Procesal Civil. (1992, 4 de marzo). *Decreto Legislativo N.º 768*, art. 546 (Perú).
- [4] Consejo Ejecutivo del Poder Judicial. (2020, 19 de diciembre). *Resolución Administrativa N.º 000371-2020-CE-PJ. Aprueban el modelo de "Despacho Judicial Corporativo de Familia"*. Poder Judicial del Perú.
- [5] Consejo Ejecutivo del Poder Judicial. (2022, 29 de septiembre). *Resolución Administrativa N.º 000356-2022-CE-PJ. Aprueban la Directiva N.º 022-2022-CE-PJ, denominada "Ejecución de sentencias de pensión de alimentos para niñas, niños y adolescentes" (Versión 001)*. Poder Judicial del Perú.
- [6] Defensoría del Pueblo. (2018, 1 de agosto). *Informe de Adjuntía N.º 001-2018-DP/AAC*. <https://www.defensoria.gob.pe/informes/informe-n-001-2018-dp-aac/>
- [7] Poder Judicial del Perú. (2020, 4 de junio). *Directiva N.º 007-2020-CE-PJ*. <https://www.pj.gob.pe/wps/wcm/connect/128289004fc4ed8cb27cb76976768c74/RA+007-2020-CE-PJ.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=128289004fc4ed8cb27cb76976768c74>
- [8] Poder Judicial del Perú. (2022). *Portal Estadístico del Poder Judicial del Perú*. <https://portalestadistico.pj.gob.pe>
- [9] Poder Judicial del Perú. (2022, 29 de septiembre). *Directiva N.º 022-2022-CE-PJ*. https://www.pj.gob.pe/wps/wcm/connect/ajpvyc/sajpvyc/as_acceso_justicia_inicio/as_protocolos
- [10] Subgerencia de Estadística, Gerencia General del Poder Judicial. (2025). *Informe estadístico*. Poder Judicial del Perú.

ACERCA DEL AUTOR

Victor Andree Polar Concha

Ingeniero industrial y estudiante de la maestría en Project Management con experiencia en el sector público y académico. Ha trabajado en el Congreso de la República, el Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo, y el Poder Judicial, impulsando proyectos de mejora de procesos y acceso a la justicia. Ha sido docente técnico-universitario, enfocado en la aplicación de tecnologías para la eficiencia institucional. Fundador de la asociación ecológica Evergreen y de la Gran Sociedad Patriótica, y candidato a maestro en Project Management, integra su labor técnica con su compromiso ciudadano. Con experiencia en análisis de datos, gestión de proyectos y difusión de conocimiento, es autor del libro *El Perú que todos necesitamos*.

 victorpolar@gmail.com


Karin del Carpio Mogrovejo

Maestra en Gestión Pública, egresada de la maestría de derecho procesal, abogada y funcionaria pública del Poder Judicial. Actualmente, es coordinadora a cargo de la Coordinación de Servicios Judiciales y Recaudación.

Posee experiencia en la gestión de proyectos, análisis de procesos/procedimientos/trámites y desarrollo de documentos de gestión institucionales.

Jennifer Yessenia Polar Concha

Doctora en Derecho, maestra en Derecho Constitucional, egresada de maestría en gestión pública, y con estudios de máster en Adulto, Comunidad y Educación Superior por la Universidad de Alberta (Canadá). Ha trabajado como fiscal adjunta de familia en la provincia de Islay, y como docente en universidades del país, dictando el curso de Derecho de Familia y Sucesiones. Con amplia experiencia en procesos/procedimientos/trámites legales del área de familia.

 jenyasak@gmail.com

Recibido: 29-04-2025

Revisado: 18-08-2025

Aceptado: 13-10-2025



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.



↗ INDEXADOS EN LATINDEX 2.0



La Revista I+i ahora forma parte del Catálogo 2.0
de Latindex, **sello internacional de calidad
editorial.**



Fuerza de tracción y compresión en distintas partes de diferentes estructuras mediante dinámicas creativas y ágiles.



Armado de estructuras didácticas con movimiento para la enseñanza de la física realizado en Tecsup sede Arequipa durante 2024

Assembly of didactic structures with movement for teaching physics carried out at Tecsup Arequipa headquarters during 2024

RESUMEN

El estudio se centra en analizar el armado de estructuras con vigas de diferentes tamaños, así como el uso de conectores con distintos ángulos, que en conjunto forman algún tipo de estructura similar a una realidad construida en nuestro entorno o alcance.

Este tipo de estructuras pueden programarse para generar movimiento y, de ese modo, analizar diversos factores físicos que interactúan en distintas partes de la misma. Se puede determinar la fuerza de tracción y de compresión según la ubicación de la celda de fuerza. En este caso, se trabajó con el *software* Pasco Capstone, que mediante el uso de *bluetooth* permite registrar datos reales captados por los sensores. Además, el *software* Pasco posibilita programar el servomotor para generar movimiento en la estructura ya armada.

Este tipo de estudio es de carácter innovador y aplicado a la física. Mediante la creatividad y agilidad, el estudiante puede armar diferentes tipos de estructuras para luego medir la fuerza de tracción y compresión en distintas partes de la estructura. Asimismo, puede programarse para que en alguna de sus partes se genere movimiento de acuerdo con los parámetros ingresados.

La metodología utilizada en la investigación tiene como principal enfoque la recolección de información, con el fin de determinar el error porcentual del valor obtenido.

Nuestro trabajo de investigación concluye que, mediante la aplicación de metodologías estructuradas e innovadoras, el estudiante puede aprender temas relacionados con la física a través de la elaboración de estructuras y la medición de diferentes valores.

El 96,5 % de los estudiantes que desarrollaron el laboratorio de estructuras se mostraron satisfechos con dicha metodología. Asimismo, el 29,8 % calificó el Laboratorio de Estructuras como interesante y creativo.

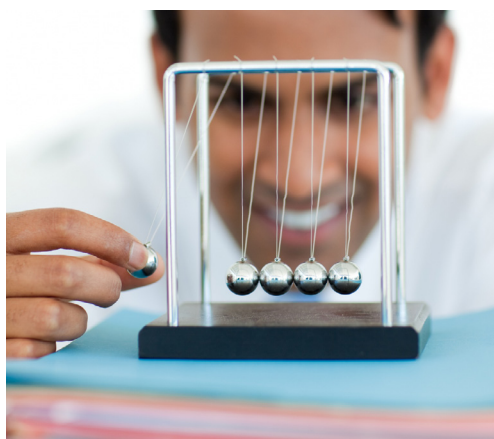
Después de aplicar la prueba estadística chi-cuadrado, se concluye que no existe relación entre las carreras que estudian los alumnos y el nivel de satisfacción con el armado de estructuras, lo cual permite implementar este nuevo laboratorio de estructuras en todas las carreras de manera transversal.

ABSTRACT

The study focuses on analyzing the construction of structures, with beams of different sizes, as well as the use of connectors at different angles, which together form some type of structure similar to some built reality in our environment or within our reach.

These types of structures can be programmed to generate motion, allowing for the analysis of various physical factors interacting with different parts of the structure. Tensile and compressive forces can be determined, depending on where the force cell is located. We work with PASCO Capstone software, which uses Bluetooth to capture real-time data captured by these sensors. Additionally, the PASCO software allows the servomotor to be programmed to generate motion in the assembled structure.

This type of study is innovative and applied to physics. Using creativity and agility, students can build different types of structures and then measure the tensile and compressive forces in different parts of the structure. It can also be programmed to



Palabras Claves

Estructuras, física, innovador, fuerza, armar

Key words

Structures, physics, innovative, strength, assemble.

generate movement in certain parts of the structure, according to the entered parameters.

The methodology used in the research has as its main focus the collection of information, in order to determine the percentage error of said value.

Our research concludes that by applying structured and innovative methodologies, students can also learn about physics-related topics by developing structures and measuring different values.

96.5% of students who developed the structures laboratory are satisfied with the methodology, and 29.8% of students rate the Structures Laboratory as interesting and creative.

After applying the Chi-square statistical test, it is concluded that there is no relationship between the degree programs studied by students and their level of satisfaction with structural assembly, which leads to the application of this new structural laboratory across all degree programs.

INTRODUCCIÓN

En la enseñanza de la física se emplean múltiples herramientas para explicar, de manera didáctica, diferentes fenómenos físicos. Del mismo modo, se utilizan estos recursos cuando se busca medir valores reales de aplicación práctica mediante el uso de sensores y estructuras. Por ello, realizamos este trabajo de investigación, que plantea el armado de estructuras por parte del alumno, de modo que este proceso sirva para el posterior análisis de datos utilizando el *software* Pasco Capstone.

En este estudio de investigación se realizarán diversas mediciones físicas en determinadas estructuras, lo que permitirá profundizar y verificar la escalabilidad de este tipo de experiencias. Si bien en una primera etapa pueden contribuir a una interacción más didáctica con el alumno, al profundizar en el detalle de cada elemento considerado en la estructura se evidencia la presencia de múltiples principios físicos aplicables, los cuales pueden corroborarse mediante el desarrollo del experimento.

Podemos mencionar que una de las fuerzas a verificar en este estudio son las fuerzas de tracción y de compresión, y la siguiente figura ilustrará cómo se aplicarán en el presente estudio:

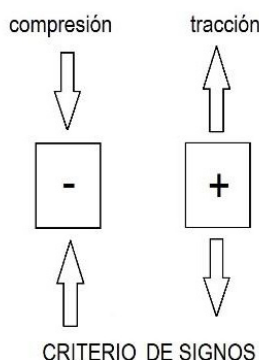


Figura 1. Fuerzas de compresión y tracción (signos).

Fuente: [6].

Como se observa en la figura anterior, la fuerza de tracción tiende a estirar o alargar un cuerpo. En nuestro caso, dicha fuerza se refleja al estirar determinadas vigas dentro de la estructura armada, y puede variar según se modifique la posición de la estructura o se incremente el peso cerca de la celda de fuerza que realiza la medición.

Por otro lado, la fuerza de compresión tiende a acortar o comprimir un cuerpo. En nuestro estudio, esta fuerza se medirá mediante la celda de fuerza antes mencionada, ubicada en algún punto de la estructura sujeta a dos vigas. El valor obtenido podrá registrarse en newton mediante el *software* Pasco.

Problema

El principal problema identificado es la escasa participación de los alumnos de diferentes carreras de Tecsup en los laboratorios de física. Sin embargo, gracias a la implementación de este nuevo laboratorio como introducción a los temas posteriores, se ha comprobado una mayor apertura del estudiante hacia los contenidos de física, ya que este tipo de experiencias lo motiva a cuestionarse cómo funcionan ciertas estructuras estáticas y móviles, verificando datos concretos a través de los sensores de Pasco.

Propuesta

Se propone elaborar un análisis detallado de los distintos principios físicos que pueden medirse mediante la construcción de una estructura en movimiento, con la ayuda de un servomotor, un control *node* y una celda de fuerza del proveedor Pasco.

FUNDAMENTOS

Se han buscado trabajos de investigación relacionados con el armado de estructuras y la enseñanza de la física, encontrándose algunos estudios afines, como se muestra a continuación:

Bruun, J., & Christiansen, F. (2016). Kinaesthetic activities in physics instruction: Image-schematic justification and design based on didactic situations. *Journal of Physics Education Research*, 12(1). Hernández Barco, J. (2019). *Implementación de una propuesta para la enseñanza del movimiento rectilíneo uniforme y uniformemente acelerado a partir de experiencias motrices como elemento didáctico innovador* [Tesis de pregrado, Universidad Autónoma de Bucaramanga]. Repositorio UNAB.

Kuokkanen, J., Gutiérrez, D., Enkvist Snellman, J., & Romar, J.-E. (2023). Integrating movement and physical education into subject teaching. En *Developing a didactic framework across and beyond school subjects* (pp. 13–30). Routledge.

Montoya Morado, E., & García Ramírez, M. (2024). Estrategia didáctica transversal para la enseñanza de la física general a través del deporte. *RIDE: Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, 14(28).

Sánchez Salcán, N., & Revelo, J. (2023). *Estrategias didácticas basadas en una metodología activa para la enseñanza del movimiento unidimensional* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Chimborazo]. Repositorio Digital UNACH.

Asimismo, se presentan los conceptos empleados en el estudio:

Estructura: el término estructura, según el *Diccionario de la lengua española*, indica la disposición o modo en que se relacionan las distintas partes de un conjunto. Según el *Diccionario de Oxford*, es la forma y disposición de las partes de algo complejo. En el ámbito de la ingeniería, se refiere a un conjunto de elementos resistentes de una construcción que soportan las cargas y garantizan su estabilidad.

Pasco Capstone: es un *software* que se instala en una computadora o laptop y permite desarrollar gráficas, elaborar tablas y procesar información derivada de mediciones de datos primarios. Se vincula con diferentes sensores (de temperatura, fuerza, movimiento, presión, aceleración, rotación, velocidad, entre otros). Esta plataforma trabaja con los sensores vía bluetooth, de modo que recaba información que luego puede analizarse para demostrar diversos principios físicos.

Vigas: para armar las estructuras se utilizan vigas de 1 cm de ancho por 1 cm de alto, pero de diferentes longitudes (por ejemplo, 5,5 cm, 8 cm, 11,5 cm, 17 cm y 24 cm). Cada una posee un modo de conexión con otras vigas, lo que permite generar distintos tipos de ángulos y elaborar diversas estructuras. Además, existen vigas rígidas y vigas flexibles; estas últimas posibilitan la creación de estructuras con cierto grado de curvatura.

Conectores: son parte de la estructura final y sirven para unir las vigas entre sí, formando diferentes ángulos. Por ejemplo, hay conectores que permiten generar ángulos de 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° y 315°. A nivel estructural, este tipo de elemento posibilita elaborar estructuras rígidas y cuadrangulares; sin embargo, mediante el uso de otros accesorios pueden generarse diferentes tipos de ángulos e incluso, con vigas flexibles, estructuras con curvaturas.

Celda de fuerza: es un sensor del proveedor Pasco que permite medir las fuerzas de tracción y compresión, asignando signo positivo a la tracción y signo negativo a la compresión. Estos valores pueden visualizarse en tiempo real mediante el *software* Pasco.

Servomotor: este componente permite generar movimiento en revoluciones. Debe conectarse a un accesorio adicional con tornillos para producir diferentes tipos de fuerza y se utiliza con mayor eficacia junto con poleas.

Control node: es un accesorio que permite programar el movimiento del servomotor, como el ángulo, la velocidad, la aceleración, las repeticiones y otros factores. Esta programación se realiza directamente desde el *software* Pasco en el apartado de código.

OBJETIVOS

Los objetivos del estudio son los siguientes: definir una metodología que permita aprender de manera clara y didáctica cómo el armado de estructuras contribuye a comprender diversos principios físicos; identificar qué principios físicos pueden medirse mediante el uso del servomotor y la celda de fuerza en una estructura en movimiento; analizar el armado de

estructuras para la enseñanza de la física desde un enfoque didáctico; y, finalmente, analizar el error porcentual que pueda encontrarse al medir diferentes valores físicos en una estructura en movimiento.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Entre los principales resultados de esta etapa inicial se destaca el uso de diversas metodologías y herramientas vinculadas con la enseñanza de la física, enfocadas en el armado de estructuras, tales como el simulador en línea PhET de la Universidad de Colorado y el *software* Algodo, que permite simular desde un ordenador diferentes experiencias de física concebidas por el docente. Asimismo, se observó la aplicación de la metodología STEAM en la enseñanza de la física.

Se concluye que existe una amplia variedad de experiencias relacionadas con el armado de estructuras aplicadas a la enseñanza de la física, lo que evidencia múltiples oportunidades de desarrollo para nuestro estudio de investigación.

METODOLOGÍA

Para implementar este tipo de experiencia como laboratorio introductorio en los cursos de física, se empleó la metodología en cascada.

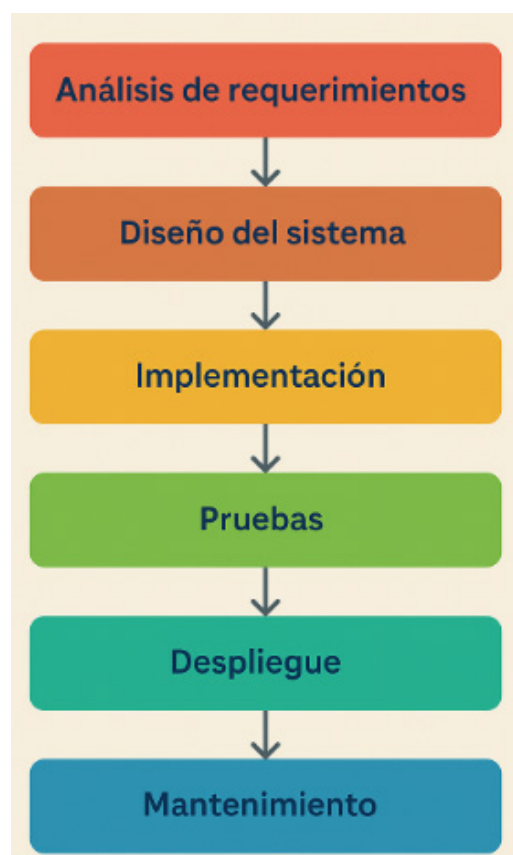


Figura 2. Metodología en cascada (estructura)

Fuente: Pressman, R. S., & Maxim, B. R. (2020). Ingeniería del software: Un enfoque práctico (9.ª ed.). McGraw-Hill Education

ANTECEDENTES

En enero de 2024, participé en dos webinars desarrollados por el proveedor Pasco, en los que se presentó el uso de estructuras con celdas de fuerza y servomotor, lo cual se complementó con los kits que ya teníamos y que cumplían dichos requisitos. Asimismo, se identificó que estaba pendiente la creación de un laboratorio introductorio para la enseñanza de la física que despertara la curiosidad del estudiante y, al mismo tiempo, abordara el tema de las unidades y magnitudes.

REQUERIMIENTOS

Después de la capacitación, se realizó un inventario minucioso de las compras previas para el laboratorio de física y se encontró una gran cantidad de accesorios, vigas y conectores necesarios para el desarrollo de esta experiencia con estructuras. Además, como ya se trabajaba con el *software* Pasco, se verificó que se cumplía con los requerimientos mínimos para la implementación del nuevo laboratorio.

De igual modo, se comprobó la existencia de las vigas, conectores y accesorios necesarios para el armado de la estructura, como los que se muestran a continuación:

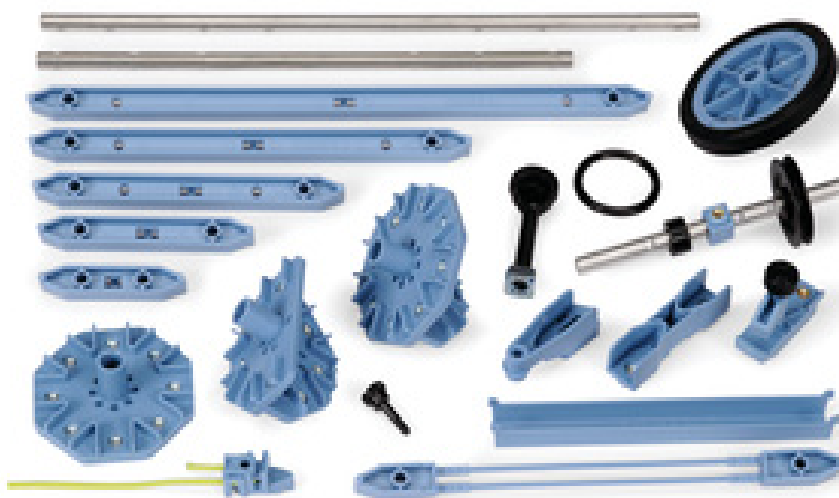


Figura 3. Vigas, conectores y accesorios para el armado de estructuras

Fuente: Pasco, 2025.

ANÁLISIS Y DISEÑO

Para implementar el armado de una estructura, es necesario definir previamente el diseño que se va a realizar, de modo que pueda ejecutarse con el kit de estructuras. En este caso, se eligió, como diseño, una maquinaria pesada:



Figura 4. Excavadora, maquinaria pesada, Komatsu

Fuente: Komatsu, 2025.

De la misma manera, diseñamos el código a implementar:

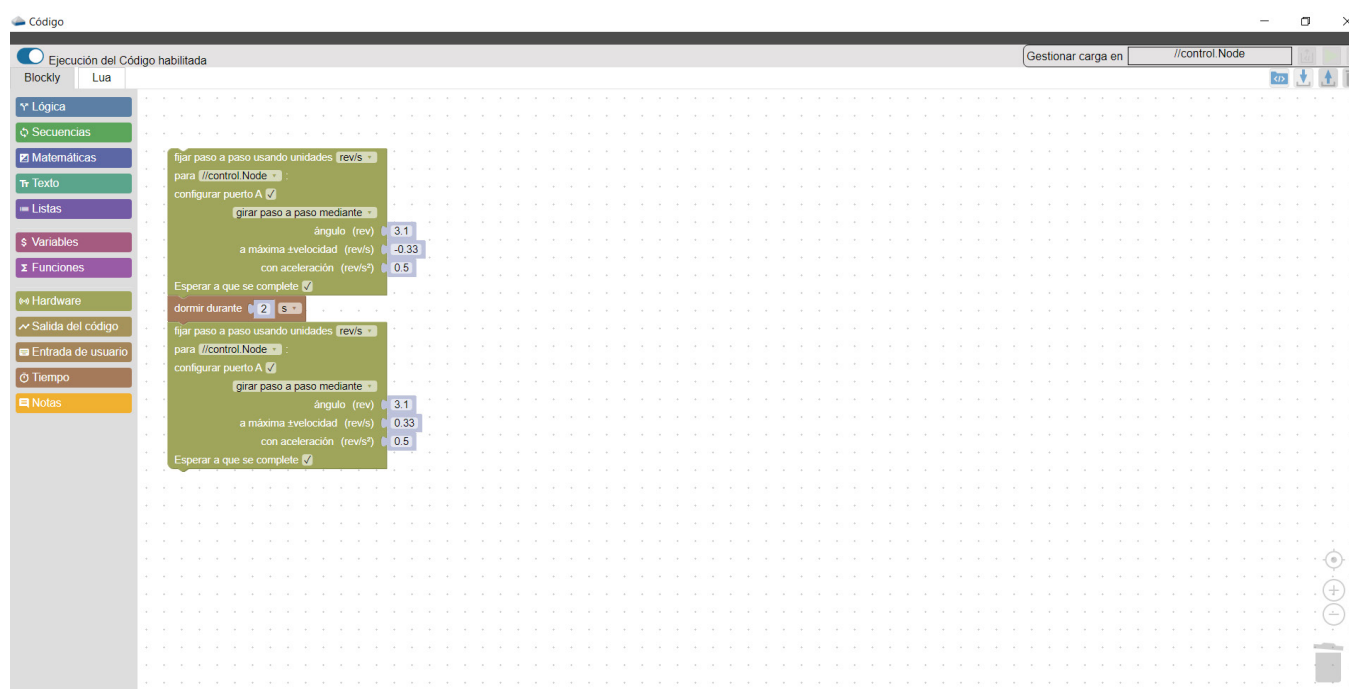


Figura 5. Programación de código fuente en el software Pasco Capstone

Fuente: Pasco Capstone versión 2.10.8, 2025.

Este código permite programar el movimiento que se desea aplicar a la estructura una vez armada, considerando el ángulo de movimiento, la velocidad y la aceleración. En este caso, se incluye una pausa de dos segundos entre cada movimiento.

Implementación

Se procede a unir las vigas de diferentes tamaños con los conectores y accesorios, de manera que la estructura se

asemeje lo más posible al diseño planteado. En nuestra estructura se emplearon vigas fijas y flexibles, una celda de fuerza, un control *node* y un servomotor.

A continuación, se muestra una de las estructuras elaboradas con un kit proporcionado a los estudiantes, con el fin de analizar lo que puede lograrse en un laboratorio introductorio de física:

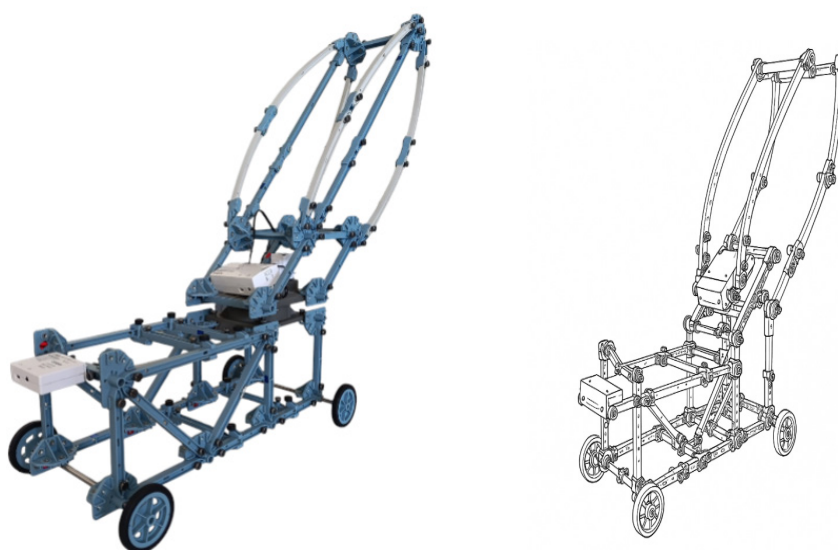


Figura 6. Estructura armada similar a una excavadora a color y a grises

Fuente: Elaboración propia.

En el armado de dicha estructura se utilizaron cuatro ruedas, dos varillas de metal (parte de los accesorios), así como tornillos, conectores, vigas rígidas y vigas flexibles de color plomo. Además, en la parte inferior extrema se colocó una celda de fuerza que, de manera inalámbrica, permite medir la fuerza de tracción o de compresión según los valores obtenidos a partir de las diferentes masas colocadas cerca de este sensor.

También se elaboró una imagen en blanco y negro, similar a la estructura construida, para evidenciar que en cualquier estructura pueden identificarse diversos tipos de fuerzas, como el peso, la tensión, la tracción y la compresión, entre otras. Esto contribuye al aprendizaje de la física mediante el uso de diagramas de cuerpo libre.

Pruebas

Para realizar las pruebas, es necesario vincular los sensores de Pasco en su versión física con el *software*, verificando previamente que cuenten con suficiente batería para la ejecución del experimento.

En primer lugar, se registran los datos que genera la estructura cuando se encuentra estática, mediante la celda de fuerza; posteriormente, se analiza su comportamiento cuando está en movimiento, a través de la programación del servomotor.

Cuando la estructura está estática, es decir, sin movimiento, se configura la celda de fuerza para colocarla en cero, de modo que, a partir de ese valor, se pueda determinar si cambia hacia tracción o compresión al añadir masas adicionales en los costados:

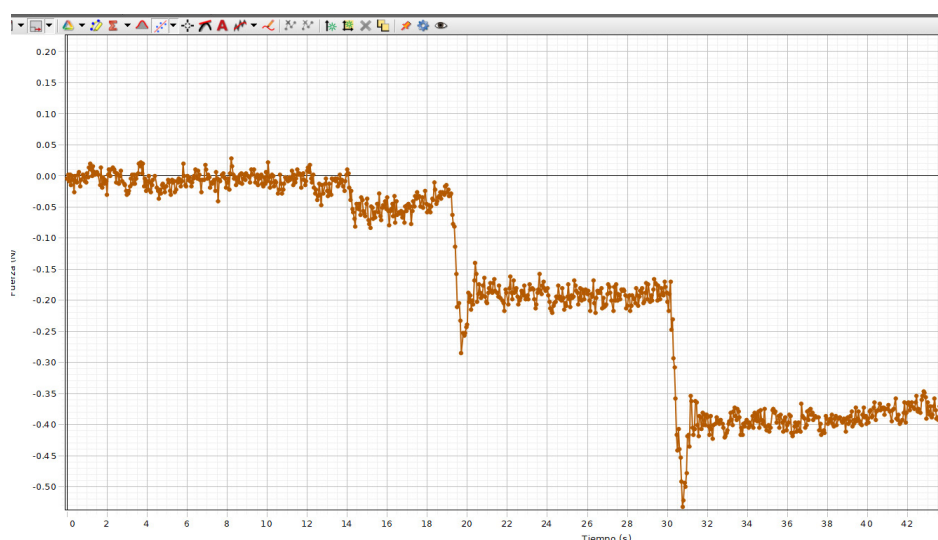


Figura 7. Variabilidad de la fuerza de compresión de la estructura armada, con 200 g y 700 g

Fuente: Elaboración propia.

Según la gráfica anterior, podemos analizar y explicar lo siguiente: en un primer momento, cuando no existía ninguna masa en la estructura, la fuerza oscilaba en un valor cercano a cero. En un segundo momento, al colocar una masa de 200 gramos cerca de la celda de fuerza, se identificó un valor de $-0,19$ N, lo que demuestra la presencia de una fuerza de compresión, evidenciada por el signo negativo. En un tercer

momento, al añadir una masa adicional de 500 gramos cerca de la celda de fuerza —es decir, una masa total de 700 gramos en la estructura a una distancia de 10 centímetros— se obtuvo una fuerza promedio de $-0,39$ N, lo que indica una mayor fuerza de compresión al incrementar la masa. A continuación, se presentan los resultados obtenidos una vez que la estructura comienza a moverse según lo programado:



Figura 8. Variabilidad del ángulo de giro de la parte superior de la estructura

Fuente: Elaboración propia.

Esta gráfica indica que, durante los primeros 9,5 segundos, la parte superior de la estructura realizó una vuelta completa. Luego permaneció inmóvil durante 2,5 segundos, de acuerdo

con la programación que establecía una pausa de 2 segundos, y posteriormente giró en sentido contrario durante los siguientes 9 segundos. Asimismo, se obtuvo la siguiente gráfica:

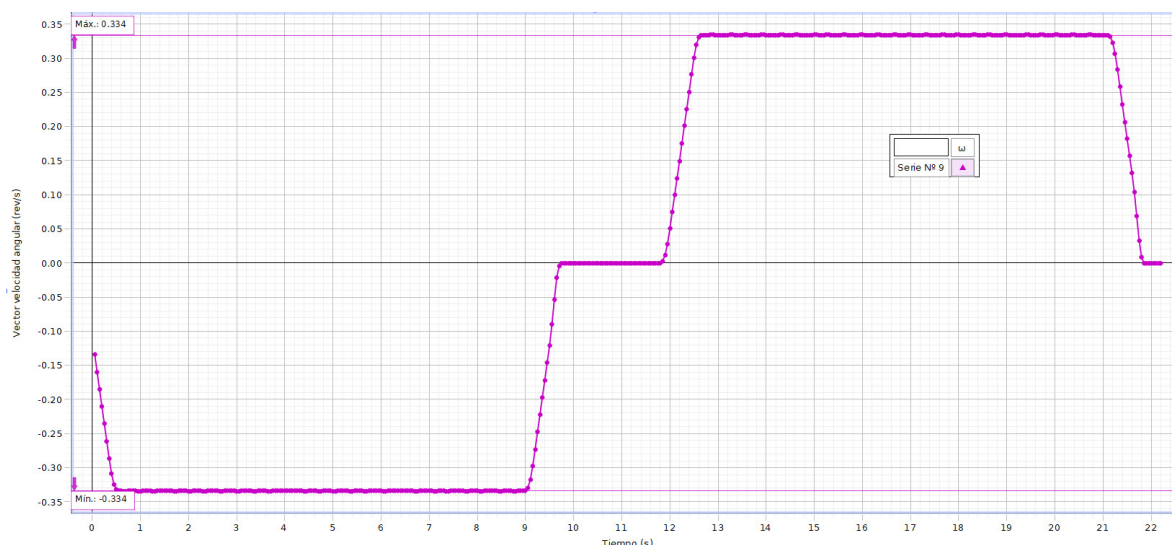


Figura 9. Variabilidad del ángulo de la velocidad angular de la parte superior de la estructura

Fuente: Elaboración propia.

Esta gráfica muestra que se alcanzó, en el punto más bajo, una velocidad angular de $-0,334$ revoluciones por segundo; cuando la estructura se detuvo, la velocidad angular fue de cero, y posteriormente, al girar en sentido contrario, alcanzó una velocidad angular de $+0,334$ revoluciones por segundo. Estos datos confirman que el valor de la velocidad angular es el mismo, aunque el signo varía según el sentido de giro.

Para calcular el error porcentual, es necesario comparar lo planificado o programado con lo efectivamente ejecutado.

Planificado: Tiempo planificado de parada: 2 s
Ejecutado: Tiempo ejecutado de parada: 2,1 s
Error porcentual:

$$\text{Error \%} = \left| \frac{V_{\text{teórico}} - V_{\text{experimental}}}{V_{\text{teórico}}} \right| \times 100 \%$$

$$\text{Error \%} = \left| \frac{2s - 2,1s}{2s} \right| \times 100 \%$$

$$\text{Error \%} = \left| \frac{0,1s}{2s} \right| \times 100 \%$$

$$\text{Error \%} = 0,05 \times 100 \%$$

$$\text{Error \%} = 5 \%$$

Por último, se puede observar cómo varía la fuerza de tracción y compresión en función del movimiento de la parte superior de la estructura:

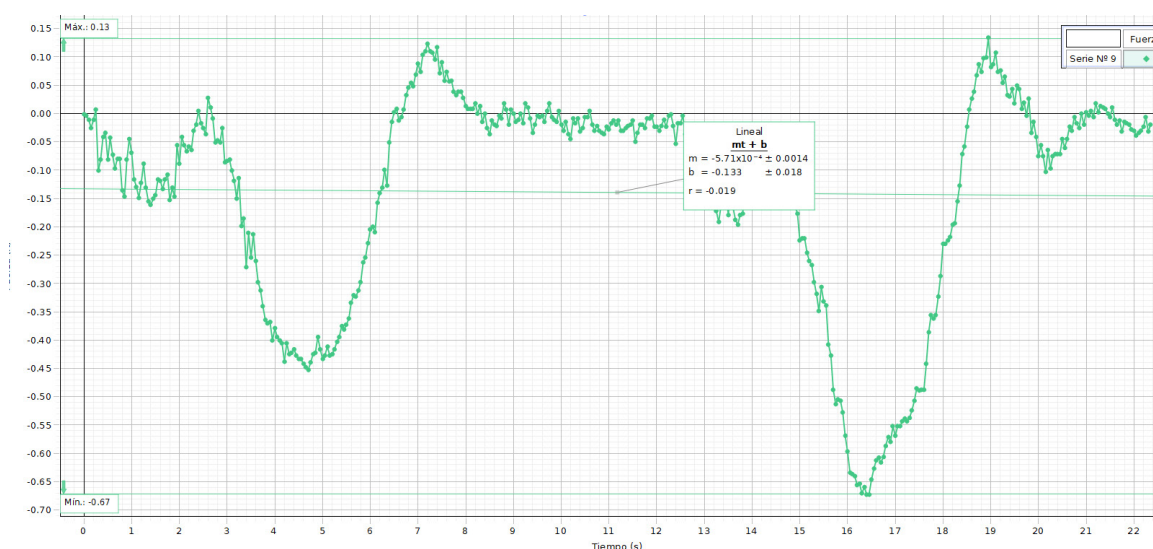


Figura 10. Variabilidad del ángulo de la fuerza de tracción y compresión durante el movimiento de la parte superior de la estructura

Fuente: Elaboración propia.

Podemos concluir que la celda de fuerza ubicada en el extremo opuesto al servomotor presenta una interferencia mínima. No obstante, se identificó que durante el movimiento de la parte superior de la estructura existe una mayor fuerza de compresión y que, al realizar un ajuste lineal, la pendiente presenta un valor negativo.

Limitaciones

Se presentaron diversas limitaciones durante el desarrollo de este estudio, como la falta de disponibilidad de materiales para el armado de estructuras y la pérdida de piezas de algunos kits. Además, para utilizar las celdas de fuerza y programar el control *node*, fue necesario solicitar una capacitación adicional para su correcta implementación.

RESULTADOS

El objetivo de este estudio es incentivar a los estudiantes de secundaria, institutos y universidades a comprender que los

temas relacionados con la física pueden abordarse de manera creativa, lúdica e innovadora, siempre que se introduzcan herramientas como el armado de estructuras Pasco. Por ello, se plantea la siguiente prueba de hipótesis:

Hipótesis nula: no existe relación entre la carrera técnica que estudia el alumno y su nivel de satisfacción al armar las estructuras Pasco.

Hipótesis alterna: existe relación entre la carrera técnica que estudia el alumno y su nivel de satisfacción al armar las estructuras Pasco.

Para determinar la prueba de hipótesis se aplicó una encuesta a estudiantes de diferentes carreras técnicas en Tecsup, sede Arequipa. En total, participaron 57 alumnos de primer semestre pertenecientes a las carreras de Gestión y Mantenimiento de Maquinaria Pesada, Diseño y Desarrollo de *Software*, Gestión y Mantenimiento de Maquinaria Industrial y Operación de Plantas de Procesamiento de Minerales. La encuesta se aplicó a los estudiantes de los cursos de Ondas y Calor, y Ciencias Básicas y Aplicadas.

¿Me siento satisfecho(a) con mi participación y el resultado del Laboratorio de Estructuras recibido?

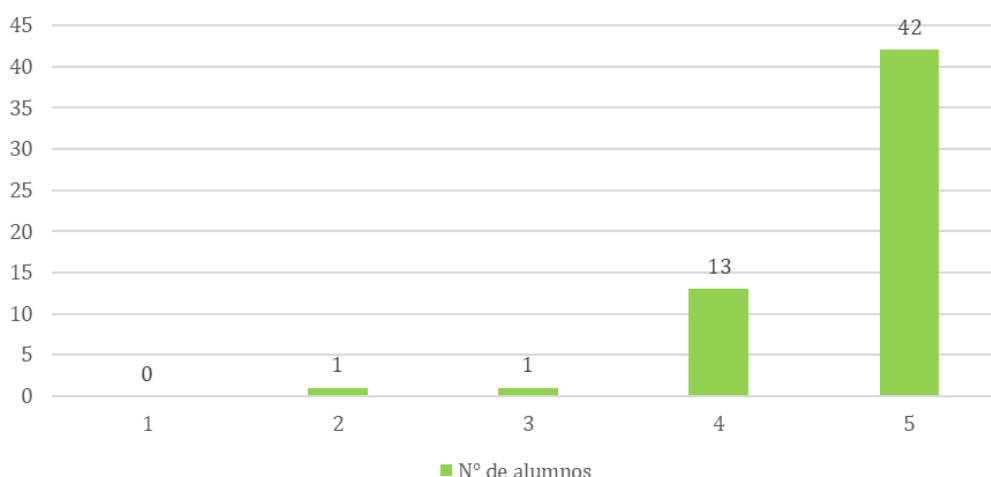


Figura 11. Satisfacción de los alumnos respecto al Laboratorio de Estructuras

Fuente: Elaboración propia.

Según el gráfico anterior, se puede concluir que el 96,5 % de los estudiantes que desarrollaron el laboratorio de estructuras se encuentran satisfechos con dicha metodología.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en la segunda pregunta de la encuesta:

Tabla 1

Frecuencia y porcentaje de segunda pregunta de la encuesta

Define, en una palabra, el Laboratorio de Estructuras que cursaste	Frecuencia	Porcentaje
Interesante	9	15,8 %
Creatividad	8	14,0 %
Didáctico	3	5,3 %
Ingenioso	2	3,5 %
Lo mejor	2	3,5 %
Otros con menor frecuencia (admirable, agradable, buena, conocimientos, crear, épico, estupendo, ingenio, práctico)	33	57,9 %
TOTAL	57	100 %

Fuente: Elaboración propia.

Según la tabla anterior, se puede concluir que el 29,8 % de los estudiantes calificó el Laboratorio de Estructuras como

interesante y creativo, lo que cumple con el objetivo de generar un ambiente de interés por parte del estudiante en los temas de física.

Tabla 2
Carreras a las que aplicó la encuesta

Carrera técnica	Frecuencia	Porcentaje
Gestión y Mantenimiento de Maquinaria Pesada	34	59,7 %
Gestión y Mantenimiento de Maquinaria Industrial	5	8,7 %
Diseño y Desarrollo de <i>Software</i>	17	29,8 %
Operación de Planta de Procesamiento de Minerales	1	1,8 %
TOTAL	57	100 %

Fuente: Elaboración propia.

Según la tabla anterior, se puede identificar que la encuesta se aplicó en cuatro carreras técnicas, siendo la de C21, Gestión y Mantenimiento de Maquinaria Pesada, aquella en la que se

observó una mayor incidencia de respuestas. Esto se debe a que dicha carrera posee un amplio campo de aplicación cuando se trata de estructuras.

Tabla 3
Cursos en los cuáles se aplicó la encuesta sobre el armado de estructuras

Curso	Frecuencia	Porcentaje
Ciencias Básicas y Aplicadas	17	29,8 %
Ondas y Calor	40	70,2 %
TOTAL	57	100 %

Fuente: Elaboración propia.

Según se muestra en la tabla anterior, se obtuvo una mayor incidencia de respuestas por parte de los alumnos del curso de Ondas y Calor, el cual aborda diversos temas de física y permitió a los estudiantes identificar un campo de aplicación muy interesante.

Después de analizar los resultados de la encuesta, se concluye que se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula.

Tabla 4
Tabla de contingencia, frecuencias observadas (*chi-cuadrado*)

Carrera / nivel de satisfacción	2	3	4	5
C19–Operación de Plantas de Procesamiento de Minerales	0	0	1	0
C21–Gestión y Mantenimiento de Maquinaria Pesada	0	0	6	25
C22–Gestión y Mantenimiento de Maquinaria Industrial	0	0	0	2
C24–Diseño y Desarrollo de <i>Software</i>	1	1	7	11
Total	1	1	14	38

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5
Resultados del test de *chi-cuadrado*

Estadístico	Valor
X ² - Chi cuadrado	9,28
gl - grados de libertad	9
p - valor	0,412
Total	1

Fuente: Elaboración propia.

Debido a que el valor de p es de 0,412, y este es mayor que 0,05, no se evidencia una relación estadísticamente significativa entre la carrera técnica que estudia el alumno y su nivel de satisfacción al armar las estructuras Pasco. Por ende, se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alterna. El nivel de satisfacción de los estudiantes no depende significativamente de la carrera que cursan.

Aunque se observan pequeñas diferencias descriptivas —por ejemplo, los alumnos de Diseño de Software y de Maquinaria Pesada tienden a concentrarse más en el nivel 5 de satisfacción—, estas diferencias no son lo suficientemente amplias como para considerarse significativas desde un punto de vista estadístico.

Estos resultados son favorables, pues respaldan el uso y armado de estructuras en todas las carreras técnicas de Tecsup, sede Arequipa.

Como punto adicional, se realizó un concurso de estructuras en el que participaron alumnos de primero y segundo semestre de los cursos de Ciencias Básicas y Aplicadas, Física General, Ondas y Calor, y Mecánica de Sólidos. El evento se llevó a cabo en el *hall* del pabellón A, primer piso, de Tecsup, sede Arequipa. Se adjunta el [enlace](#) con la evidencia.

CONCLUSIONES

Se pudo determinar que la metodología en cascada es la más apropiada para aplicar el uso de las estructuras Pasco en un laboratorio introductorio de temas de física. Asimismo, se calcularon los valores de la fuerza de compresión en una estructura tanto móvil como estática.

Se identificó, además, que, además de la compresión y la tracción, fue posible calcular la velocidad angular y el ángulo de una estructura al programarla desde el *software* Pasco mediante lenguaje de código.

Adicionalmente, este tipo de taller se aplicó también en el verano de 2025, como parte del programa Vacaciones Creativas, dirigido a los hijos de docentes a tiempo parcial y tiempo completo de Tecsup Arequipa.

REFERENCIAS

- [1] Bruun, J., & Christiansen, F. (2016). Kinaesthetic activities in physics instruction: Image-schematic justification and design based on didactic situations. *Journal of Physics Education Research*, 12(1).
- [2] Casado del Prado, J., Carrascal Vaquero, I., Diego Cavia, S., & Arroyo Martínez, B. (2017). *Sistema para el ensayo de cargas de fatiga de tracción y compresión sobre los elementos de sujeción de una vía ferroviaria dentro del mismo ciclo de carga*.
- [3] Cervera Ruiz, M., & Blanco Díaz, E. (2002). *Mecánica de estructuras*.
- [4] Claussen, C., Forino, E., Kalinowski, N., Lavery, S., Mikolajko, R., Nguyen, A., ... & Stewart, J. (2020). *Systems engineering capstone report*.
- [5] Hernández Barco, J. (2019). *Implementación de una propuesta para la enseñanza del movimiento rectilíneo uniforme y uniformemente acelerado a partir de experiencias motrices como elemento didáctico innovador* [Tesis de pregrado, Universidad Autónoma de Bucaramanga]. Repositorio UNAB.
- [6] Hurtado Rincón, C., & Aguirre Chaparro, C. (2021). *Diseño de un prototipo de una máquina tipo industrial para evaluación de fuerzas de tracción-compresión*.
- [7] Kuokkanen, J., Gutiérrez, D., Enkvist Snellman, J., & Romar, J.-E. (2023). Integrating movement and physical education into subject teaching. En *Developing a didactic framework across and beyond school subjects* (pp. 13–30). Routledge.
- [8] Mentor, I., & Martin, C. (2016). *Capstone project*.
- [9] Montoya Morado, E., & García Ramírez, M. (2024). Estrategia didáctica transversal para la enseñanza de la física general a través del deporte. *RIDE: Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, 14(28).
- [10] Sánchez Salcán, N., & Revelo, J. (2023). *Estrategias didácticas basadas en una metodología activa para la enseñanza del movimiento unidimensional* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Chimborazo]. Repositorio Digital UNACH.

ACERCA DEL AUTOR

Juan Abimael Peñaloza Galatayud

Profesional Titulado en Ingeniería Industrial por la Universidad Nacional de San Agustín (UNSA) de Arequipa, con colegiatura otorgada por el Colegio de Ingenieros del Perú. Título de Maestro en Administración de Negocios de la Universidad Católica de Santa María - Arequipa, con certificación en Nearpod, certificación como Project Management International, con certificación en Simulación PheT (simulador de Física), uso de TIC en el proceso de enseñanza-aprendizaje, certificación en SPSS otorgada por el INEI, Excel Avanzado otorgado

por el Instituto de Informática de la UNSA. Experiencia como docente en curso de ciencias-física; desempeño laboral en empresas privadas y públicas.



Recibido: 03-06-2025

Revisado: 08-09-2025

Aceptado: 07-10-2025



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.

Análisis de contaminantes atmosféricos y condiciones térmicas a través de los índices PMV (Predicted Mean Vote) y PET (Physiological Equivalent Temperature).



Evaluación de contaminación y confort del peatón en Tecsüp mediante mediciones en campo y modelamiento numérico con ENVI-met

Assessment of Pollution and Pedestrian Comfort at Tecsüp using Field Measurements and Numerical Modeling with ENVI-met

RESUMEN

Este estudio evalúa la calidad del aire y el confort térmico en el campus de Tecsüp mediante modelado numérico en ENVI-met, con el objetivo de identificar zonas críticas y proponer medidas de mejora. Se analizaron contaminantes atmosféricos (SO_2 , NO , O_3 y $\text{PM}_{2.5}$) y condiciones térmicas a través de los índices PMV (Predicted Mean Vote) y PET (Physiological Equivalent Temperature), los cuales permiten evaluar la percepción térmica del peatón considerando variables como temperatura, humedad, radiación y viento.

Los resultados mostraron que las concentraciones de PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ superaron los límites diarios establecidos por el ECA para aire, con valores máximos registrados de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $126.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, frente a los límites de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En cambio, las concentraciones de O_3 ($55 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y CO ($2\,500 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se mantuvieron dentro de los valores establecidos por el ECA. La velocidad del viento varió entre 0.14 m/s y 1.30 m/s , condicionando la dispersión de contaminantes, especialmente en las avenidas Huarochirí y Cascanueces, donde se registraron los niveles más altos debido al tráfico vehicular. En términos de confort térmico, los valores de PMV oscilaron entre 1.47 y 2.48 y los de PET entre 36°C y 56°C , lo que evidencia un estrés térmico moderado a severo en gran parte del campus, con zonas de confort únicamente bajo cobertura vegetal.

Se concluye que la incorporación de vegetación adicional y estructuras de sombra, junto con una reorganización del flujo vehicular, permitiría reducir tanto las concentraciones de contaminantes como las temperaturas percibidas, mejorando la calidad ambiental del campus.

ABSTRACT

This study evaluates air quality and thermal comfort on the Tecsüp campus using numerical modeling in ENVI-met, with the aim of identifying critical areas and proposing improvement measures. Air pollutants (SO_2 , NO , O_3 , and $\text{PM}_{2.5}$) and thermal conditions were analyzed using the Predicted Mean Vote (PMV) and Physiological Equivalent Temperature (PET) indices, which allow the evaluation of pedestrian thermal perception by considering variables such as temperature, humidity, radiation, and wind.

The results showed that PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ concentrations exceeded the daily limits established by the Environmental Quality Standards (ECA), with maximum recorded values of $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $126.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively, compared to the limits of $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. In contrast, O_3 ($55 \mu\text{g}/\text{m}^3$) and CO ($2,500 \mu\text{g}/\text{m}^3$) concentrations remained within the established regulatory values. Wind speeds varied between 0.14 m/s and 1.30 m/s , influencing the dispersion of pollutants, especially on Huarochirí and Cascanueces avenues, where the highest levels were recorded due to vehicular traffic. In terms of thermal comfort, PMV values ranged between 1.47 and 2.48, and PET values between 36°C and 56°C , demonstrating moderate to severe thermal stress across much of the campus, with comfort zones found only under vegetation cover.

The study concludes that the incorporation of additional vegetation and shading structures, along with reorganizing vehicular flow, would reduce both pollutant concentrations and perceived temperatures, thereby improving the campus's environmental quality.



Palabras Claves

Contaminación atmosférica, $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , confort térmico, PMV, PET, modelado numérico, ENVI-met, dispersión de contaminantes, tráfico vehicular, isla de calor urbana, infraestructura verde.

Key words

Air pollution, $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , thermal comfort, PMV, PET, numerical modeling, ENVI-met, pollutant dispersion, vehicular traffic, urban heat island, green infrastructure.

INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire y el aumento de las temperaturas son problemas ambientales críticos a nivel global y local. Las emisiones provenientes del tráfico vehicular y de la actividad industrial han deteriorado la calidad del aire y agravado el estrés térmico en muchas ciudades [9]. En Lima Metropolitana, la alta densidad poblacional y la limitada regulación de emisiones generan niveles alarmantes de contaminación y calor urbano, afectando la salud y la calidad de vida de sus habitantes [5].

En este contexto, se planteó un proyecto académico de diseño entre la Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC) y Tecsup para analizar los niveles de contaminación atmosférica y de comodidad del peatón en el campus de Tecsup, ubicado en el distrito de Santa Anita, Lima. El distrito de Santa Anita presenta condiciones ambientales preocupantes. La zona de estudio abarca aproximadamente 132 300 m², con un perímetro de 1500 m, delimitado por la avenida Huarochirí, la avenida Cascanueces, la avenida Santa Ana y la calle 6, ubicada en las coordenadas 12° 02' 43,2" S y 76° 57' 09,6" W.

Estudios previos han evidenciado un incremento en la concentración de contaminantes como PM₁₀, PM_{2,5}, CO y NO₂, especialmente en horas de alta congestión vehicular. Estos niveles, registrados mediante conteos de tráfico y análisis históricos, superan en algunos casos los límites normativos. Además, se ha observado un aumento de la temperatura, lo que afecta el bienestar de peatones y estudiantes [8].

Este estudio tiene como objetivo analizar la calidad del aire y el confort térmico en el campus de Tecsup mediante mediciones en campo y simulaciones numéricas con ENVI-met. Se evaluarán las condiciones actuales de contaminación y temperatura para obtener datos precisos sobre la situación ambiental. Paralelamente, se modelará la dispersión de contaminantes y las variaciones térmicas con ENVI-met, lo que permitirá identificar patrones críticos. Finalmente, se compararán los resultados obtenidos para determinar las zonas con mayores impactos ambientales, proporcionando información clave para la gestión ambiental en la comunidad de Tecsup.

Aunque diversos estudios previos han empleado modelos como WRF-CHEM y OpenFOAM para analizar la calidad del aire y el microclima urbano, estos enfoques presentan limitaciones en la resolución espacial y en la representación detallada de variables microclimáticas a escala local [2], [6]. Por ejemplo, WRF-CHEM se utiliza principalmente para modelar procesos atmosféricos a escala regional o de ciudad, mientras que OpenFOAM es eficaz para la dinámica de fluidos, pero requiere gran capacidad computacional y configuraciones complejas para simular interacciones entre vegetación, radiación y entorno construido. Esto significa que OpenFOAM no resulta adecuado para simular procesos de la dinámica de la capa límite atmosférica, como la transferencia de calor entre materiales y atmósfera o los procesos de absorción y adsorción de la vegetación, entre otros.

En contraste, ENVI-met se seleccionó por su capacidad para representar con precisión el microclima urbano mediante

simulaciones tridimensionales de alta resolución (0,5 a 10 m), integrando los efectos de radiación, viento, materiales, vegetación y geometría urbana [3], [7]. Estas características permiten evaluar con mayor detalle la influencia de la vegetación, las superficies pavimentadas y las estructuras de sombra sobre la temperatura y la dispersión de contaminantes. Además, ENVI-met ha demostrado ser una herramienta eficiente para proyectos de diseño urbano y planificación ambiental a pequeña escala, proporcionando resultados prácticos y visuales útiles para la toma de decisiones.

Por tanto, este estudio aplica un modelo microclimático con enfoque de diseño, con el fin de identificar zonas críticas dentro del campus de Tecsup y proponer soluciones basadas en vegetación y sombra que contribuyan a mejorar las condiciones de confort térmico y la calidad del aire.

FUNDAMENTOS

En los últimos años, el uso de modelos numéricos ha sido fundamental para estudiar y comprender los procesos atmosféricos a diferentes escalas. A continuación, se presenta una revisión de la literatura que destaca cómo se han empleado estos modelos en diversos estudios.

Los modelos CMAQ y WRF han sido ampliamente utilizados para estudiar la calidad del aire a escala regional o urbana. Un ejemplo destacado es el estudio titulado «Modelo regional de la calidad de aire utilizando el modelo WRF/CHEM: Implementación de datos globales y locales para Mendoza». Este trabajo muestra los primeros resultados obtenidos en el modelado de la calidad del aire regional en Mendoza mediante el modelo WRF/Chem. El modelo fue configurado para representar correctamente la orografía local y caracterizar los tipos y usos de suelo en la región. Los resultados indican que una configuración adecuada permite una descripción detallada de la evolución espacio-temporal de la pluma de contaminantes antropogénicos [2].

A microescala, los modelos OpenFOAM y ANSYS Fluent se han empleado para simular la dispersión de contaminantes en entornos urbanos. En el estudio titulado «Atmospheric Wind Field Modelling with OpenFOAM for Near-Ground Gas Dispersion», OpenFOAM se utilizó para desarrollar un modelo CFD que garantiza un flujo de capa límite atmosférica homogéneo, mejorando la precisión en la dispersión de gases cerca del suelo. Para ello, reemplazó el perfil logarítmico del viento por una ley de potencia, evitando velocidades negativas y mejorando la resolución en zonas cercanas a la superficie. El modelo fue validado con la directriz VDI 3783/9 y túneles de viento, demostrando una alta concordancia entre los valores simulados y medidos [6]. Otro estudio, «3D Computational Fluid Dynamics Modeling of Temperature and Humidity in a Humidified Greenhouse», utilizó ANSYS Fluent para simular la distribución de temperatura y humedad en un invernadero con humidificadores. La simulación CFD permitió analizar la ventilación y evaporación, optimizando el control climático para mejorar la eficiencia del sistema [4].

Además, ENVI-met ha demostrado ser una herramienta eficaz para simular el microclima urbano y evaluar el impacto de diferentes estrategias de vegetación y diseño urbano. En

el estudio «Urban microclimate improvement using ENVI-met climate model», se utilizó ENVI-met para modelar distintos escenarios bioclimáticos en un barrio residencial de Atenas, demostrando que la vegetación en calles es la estrategia más efectiva para mitigar el efecto de isla de calor urbana y mejorar la calidad ambiental [1]. Por último, «Evaluación del desempeño termorradiativo del modelo ENVI-met para tipologías de infraestructura verde: Experiencia en un clima subtropical» analiza la capacidad de ENVI-met para simular el desempeño térmico y radiativo de distintas infraestructuras verdes, como techos verdes, muros verdes y árboles urbanos. A través de mediciones de campo y pruebas de sensibilidad del modelo, el estudio evalúa la precisión de ENVI-met en la estimación del confort térmico y la interacción entre vegetación y entorno construido. Los resultados destacan la importancia de realizar ajustes locales en los parámetros del modelo y la validación con datos experimentales para mejorar su precisión en aplicaciones urbanas [3].

El presente estudio se centra en analizar la calidad del aire y la comodidad térmica del peatón en el campus de Tecsup mediante mediciones en campo y simulaciones numéricas con ENVI-met. Se utilizará este modelo para evaluar el impacto de diferentes estrategias de vegetación y diseño urbano en la calidad del aire y el confort térmico.

Las premisas del estudio se basan en la capacidad de los modelos numéricos para proporcionar una evaluación detallada y precisa de los efectos de distintas estrategias de diseño urbano. Estos modelos permiten simular la dispersión de contaminantes y las variaciones térmicas en entornos urbanos, lo que resulta crucial para comprender y mejorar la calidad del aire y el confort térmico en áreas específicas. No obstante, la precisión de los modelos depende en gran medida de la calidad y cantidad de datos disponibles. Las simulaciones pueden no captar todas las variables y dinámicas presentes en el entorno real, lo que representa una limitación significativa. Además, la implementación de estos modelos requiere una comprensión profunda de los procesos atmosféricos y la capacidad de interpretar los resultados de manera eficaz para tomar decisiones informadas sobre la gestión ambiental.

METODOLOGÍA

Se procesaron datos meteorológicos y de calidad del aire de la estación certificada Santa Anita del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) debido a su proximidad y a la disponibilidad de registros históricos. Estos se clasificaron en dos categorías: meteorológicos (temperatura, humedad, precipitación y viento) y contaminantes (CO, NO₂, O₃, PM_{2.5}, PM₁₀ y SO₂). Se generaron gráficas para describir tendencias y establecer condiciones iniciales para el modelado.

La delimitación del área de estudio consideró la velocidad promedio del viento, factor clave en la dispersión de contaminantes. Se efectuó un conteo vehicular en puntos estratégicos de vías cercanas a Tecsup, diferenciando entre vehículos ligeros, pesados, motocicletas, transporte público, minibuses y particulares. Se registró la cantidad de cada tipo en distintos horarios y días para obtener un perfil del tráfico en la zona. Luego, se calcularon tasas de emisión por tipo de vehículo con valores de referencia provenientes de inventarios

de emisiones, lo que permitió estimar la contribución de cada fuente móvil a la contaminación en el área de estudio. Estos valores se integraron en ENVI-met para representar las emisiones del tráfico en la simulación.

El modelado se llevó a cabo en ENVI-met, utilizando un enfoque tridimensional a pequeña escala para obtener mayor precisión. La altura del modelo se fijó en 40 m con base en la velocidad del viento (1,6 m/s) y su ajuste vertical, asegurando que la simulación captara la influencia de las edificaciones sin exceder la capa límite atmosférica. Se realizaron pruebas de dependencia de malla con 240 configuraciones, variando el tamaño de celda (3 m, 5 m, 10 m y 15 m), la altura de las edificaciones y la presencia de vegetación tridimensional. A partir del análisis del tiempo de ejecución y de la precisión de los resultados, se seleccionó un tamaño de celda de 5 m, equilibrando el detalle geométrico y la eficiencia computacional.

El modelo se configuró en ENVI-Guide con datos meteorológicos reales del 1 de febrero de 2024, estableciendo un tiempo de simulación de una hora. Se validó comparando las variables de temperatura, humedad y contaminantes (NO₂, O₃ y PM_{2.5}) con datos recolectados in situ dentro de Tecsup. Se realizó una simulación adicional sin geometría para contrastar el perfil de temperatura con el modelo principal.

Los resultados se analizaron a 1,5 m de altura, generando mapas de distribución de contaminantes y de confort térmico (PMV, PET). Se incluyeron mapas de diferencias de velocidad del viento entre modelos y se identificaron zonas críticas con base en la intersección de los índices de calidad ambiental, lo que permitió proponer medidas de mejora para el campus.

RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados del análisis de las series de tiempo de variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa y velocidad del viento) y de contaminación (PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, NO₂ y CO) obtenidas de la estación Santa Anita (STA). Este análisis incluye promedios horarios, diarios y mensuales.

Variables Meteorológicas

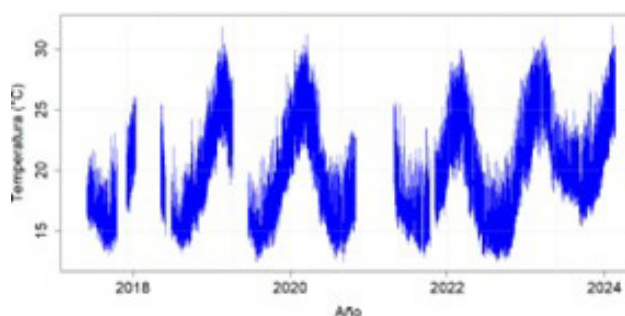


Figura 1. Serie diaria de PM10

Fuente: Elaboración propia.

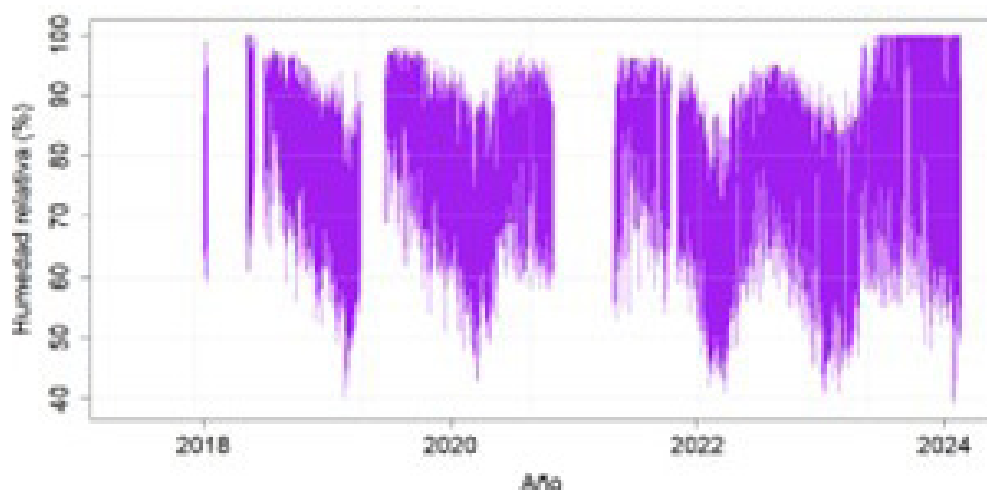


Figura 2. Serie mensual del ozono (O₃)

Fuente: Elaboración propia.

De la figura n.º 1 se observa que la temperatura presenta estacionalidad, es decir, patrones recurrentes a lo largo del tiempo. En la figura n.º 2, la humedad relativa muestra un comportamiento inverso al de la temperatura. Al analizar las series horarias, se aprecia que la temperatura alcanza sus valores más elevados a partir de las 9:00 horas, extendiéndose hasta aproximadamente las 15:00 horas. Este patrón tiene su punto culminante alrededor de las 14:00 horas, con picos que superan los 30 °C. Por otro lado, la humedad relativa, que suele ser inversamente proporcional a la temperatura, presenta un promedio cercano al 60 % durante las horas más cálidas. Este comportamiento evidencia la dinámica diaria típica de un clima predominantemente árido.

Variables contaminantes

En el análisis de las variables contaminantes, la serie de tiempo no mostró ninguna tendencia ni estacionalidad significativa. Por esta razón, el análisis estadístico se centró principalmente en estudiar la variación horaria de los contaminantes y en estimar si los niveles de contaminación atmosférica superan los estándares ambientales establecidos en la normativa nacional. Se incluyeron únicamente datos correspondientes a días laborales (de lunes a viernes). No obstante, debido a la presencia de vacíos en los registros, no se identificaron patrones estacionales en ninguna de las variables estudiadas.

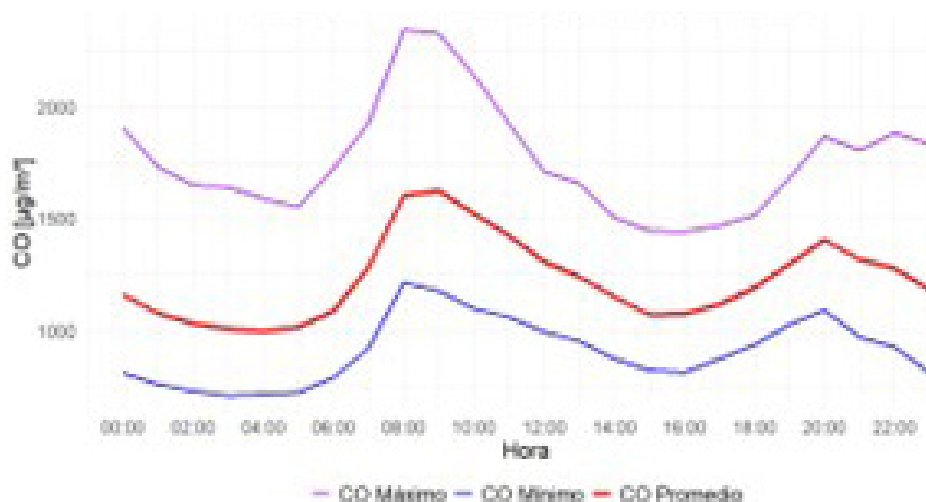


Figura 3. Serie horaria del monóxido de carbono

Fuente: Elaboración propia.

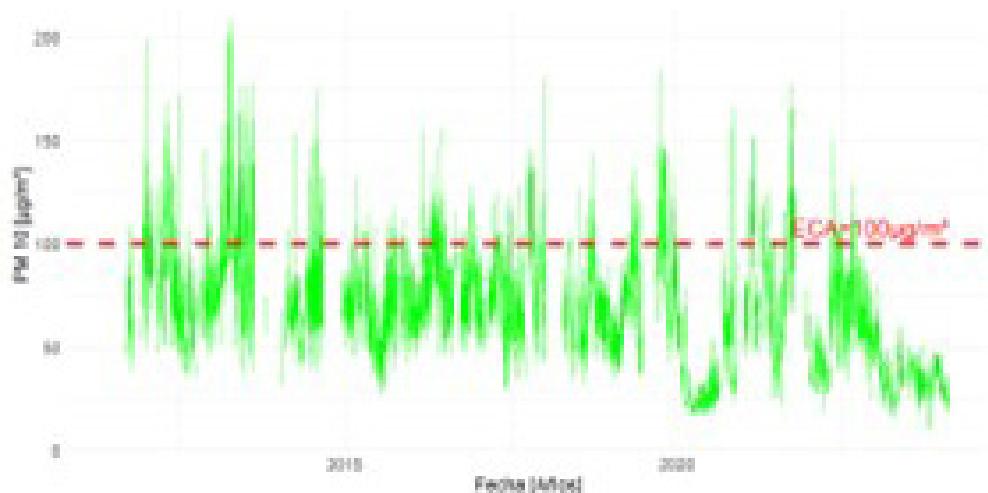


Figura 4. Serie diaria de PM10

Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento horario de los contaminantes, como se muestra en la figura 3, refleja un patrón asociado con las actividades humanas y el tráfico vehicular. Excepto en el caso del ozono (O_3), los contaminantes presentan picos durante las horas de alta congestión, alcanzando valores máximos alrededor de las 8:00 y las 20:00 horas. Estos niveles disminuyen durante las horas de menor actividad, como el mediodía y la madrugada. En cambio, el O_3 , debido a su relación directa con la radiación solar, alcanza su máximo promedio a las 13:00 horas, con un valor de $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por su parte, las concentraciones de CO y NO_2 se mantuvieron

por debajo de los límites establecidos por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA).

En la serie diaria, el material particulado PM_{10} (figura 4) presentó valores promedio que superan el límite diario de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con máximos registrados en el rango de 25 a $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De manera similar, el $\text{PM}_{2.5}$ mostró concentraciones que en ocasiones sobrepasaron el límite diario de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, alcanzando un máximo de $126,59 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Estos resultados evidencian la importancia de monitorear continuamente estas variables para evaluar los riesgos asociados con la calidad del aire.

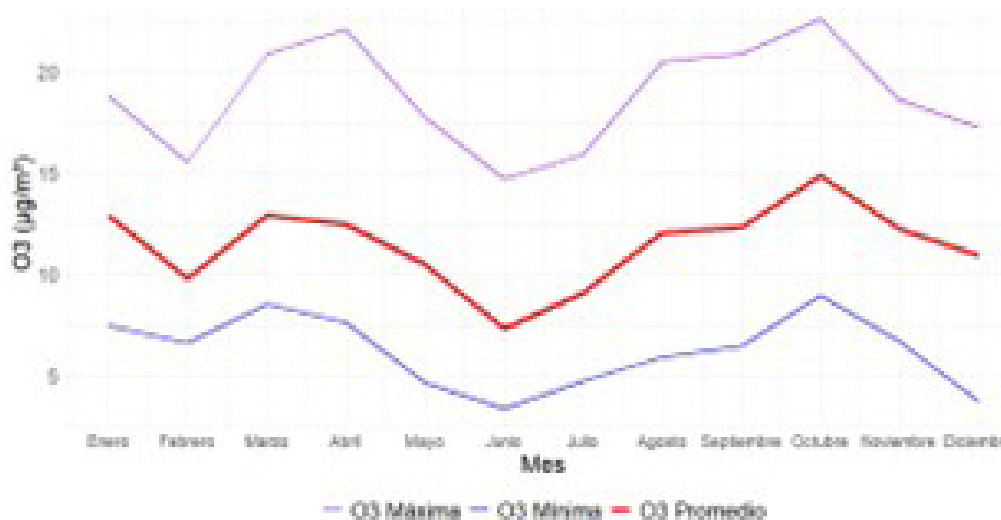


Figura 5. Serie mensual del ozono

Fuente: Elaboración propia.

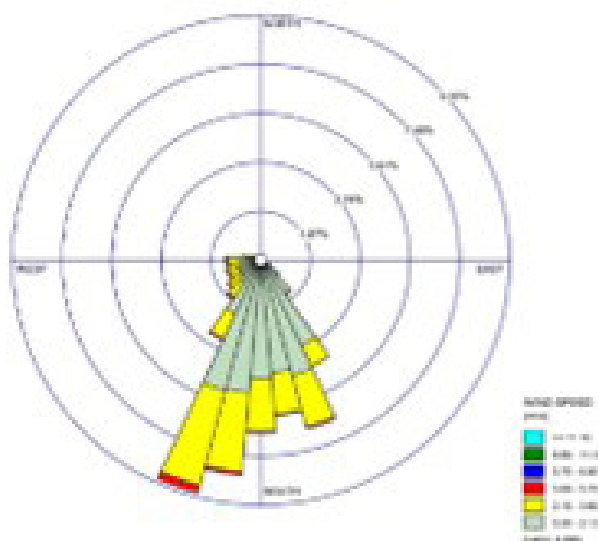


Figura 6. Rosa de viento de la zona de estudio

Fuente: Elaboración propia.

En las series mensuales (figura 5) se evidenció que las concentraciones de O_3 están directamente relacionadas con las temperaturas más altas, alcanzando sus valores máximos en los meses de mayor radiación solar. Por otro lado, el PM_{10} mostró picos significativos en los meses de abril y octubre, mientras que el $PM_{2.5}$ presentó un incremento notable en junio, con un máximo de $64 \mu g/m^3$. Finalmente, las concentraciones de CO registraron un aumento extremo en febrero, superando los 2 500 $\mu g/m^3$, lo que refleja la influencia de condiciones específicas en la dinámica de los contaminantes.

En cuanto a la dirección y velocidad del viento (figura 6), el análisis mensual mostró que los vientos predominan desde el suroeste hacia el noreste, con velocidades promedio de

1,47 m/s. En términos de intensidad, se identificaron rangos predominantes entre 0,5–2,1 m/s (39,7 %) y 2,1–3,6 m/s (24,8 %). A lo largo del año, estas características se mantuvieron consistentes, lo que indica una predominancia de vientos de baja a moderada intensidad en la estación STA.

Estos análisis constituyeron datos indispensables para la configuración del modelo computacional ENVI-met.

Zona de estudio

La zona de estudio se delimitó dentro del campus de Tecsup y su entorno inmediato, considerando un área de $464 \text{ m} \times 277 \text{ m}$ y una altura de 40 m, como se muestra en la figura 7.



Figura 7. Delimitación de la zona de estudio Tecsup

Fuente: Elaboración propia.

Tráfico medido e incorporación en ENVI-met

El conteo vehicular se realizó en las principales avenidas y calles adyacentes: avenida Huarochirí, avenida Cascanueces, avenida Santa Ana y calle 6. Los datos obtenidos clasificaron los vehículos en seis categorías: vehículos ligeros (LDV), vehículos

pesados (HDV), motocicletas, transporte público, coaches y vehículos particulares (PC). Posteriormente, estos resultados se extendieron a una escala temporal de 24 horas utilizando curvas estándar de tráfico predefinidas por ENVI-met. En este caso, se consideró que las calles y avenidas son consistentes con vías urbanas.

Tabla 1

Tabla de conteo del parque automotor en la zona de estudio

Tipo	Avenidas							
	Av. Santa Ana	%	Calle 6	%	Av. Cascanueces	%	Av. Huarochirí	%
Vehículos ligeros	134	7	9	8	87	12	108	8
Vehículos pesados	54	3	2	2	18	3	58	5
Motocicletas	850	44	76	63	204	29	390	30
Transporte público	410	24	12	10	160	22	380	29
Vehículos particulares	456	22	16	13	194	28	320	24
Coaches	0	0	5	4	39	6	54	4
Total	1904	100 %	120	100 %	702	100 %	1310	100 %

Fuente: Elaboración propia.

El conteo se realizó durante una hora consecutiva (14:20–15:20 h) el jueves 25 de abril de 2024, considerando el flujo en ambos sentidos para avenidas de doble vía. Las categorías se definieron según la clasificación estándar de ENVI-met: LDV (vehículos ligeros), HDV (vehículos pesados), motocicletas (mototaxis y motos lineales), transporte público (buses y taxis), coaches (combis o minivanés) y PC (vehículos particulares).

La tabla 1 indica que Santa Ana es la avenida con mayor tráfico, seguida por Huarochirí, Cascanueces y calle 6, en orden descendente. El gráfico muestra que en dichas vías el tráfico de motocicletas es predominante, alcanzando un máximo del 63 % en la calle 6. Se reconoce que las motocicletas, al ser considerablemente más contaminantes que los automóviles particulares o los taxis, constituyen la principal causa de contaminación ambiental en la zona debido a sus emisiones de gases nocivos. La siguiente categoría predominante es la del transporte público, con un máximo del 29 % en la avenida Huarochirí. La categoría de vehículos particulares supera el 20 % en las tres avenidas. No se identificaron coaches en la avenida Santa Ana, pero sí una proporción similar en la calle 6 y la avenida Huarochirí (4 %). La presencia de vehículos ligeros (camiones de carga medianos) y de vehículos pesados se atribuye a que la zona es semiindustrial.

Modelo base realizado en ENVI-met

A partir de la información recopilada, se generó un modelo tridimensional del campus de Tecsup con vistas en planta y en perspectiva que permiten observar la disposición espacial del área de estudio.

Para el modelado se consideraron las siguientes alturas: los pabellones 1, 2, 4, 6 y 8 tienen una altura de 3 metros; los pabellones 3 y 5, una altura de 6 metros; y los pabellones 7, 9 y 10, una altura de 4 metros.

Para las áreas verdes dentro y fuera de Tecsup se utilizaron diferentes modelos: «grass 25 cm aver» para el césped, «dense hedge dense 1 m» para árboles de 1 metro de altura y «02 ALDS Conic, large trunk, dense, small (5 m)» para árboles de 5 metros de altura.

En los alrededores de Tecsup, la mayoría de los edificios modelados tienen una altura de 6 metros; no obstante, también se incluyeron edificaciones de 3 y 9 metros, distribuidas equitativamente en toda la zona (figura 8).

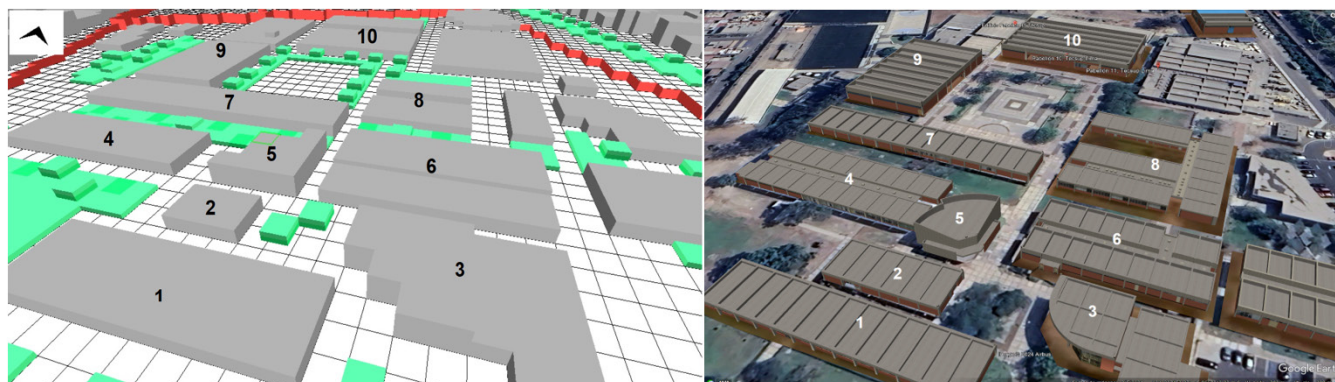


Figura 8. Vista en perspectiva de izquierda (modelo) y derecha (realidad).

Fuente: Elaboración propia.

Validación del modelo

La validación del modelo ENVI-met se realizó mediante la comparación entre los resultados simulados (celda de 5 m) y los datos registrados por dos estaciones de monitoreo de calidad del aire ubicadas dentro del campus de Tecsup. Se evaluaron variables meteorológicas (temperatura y

humedad relativa) y contaminantes atmosféricos (NO₂, O₃ y PM_{2,5}). La configuración del modelo consideró la fecha del 10 de abril de 2024 a las 14:00 h, con dirección del viento de 210°, parámetros meteorológicos observados y concentraciones de fondo de contaminantes (NO, NO₂, O₃, PM₁₀, PM_{2,5} y SO₂).

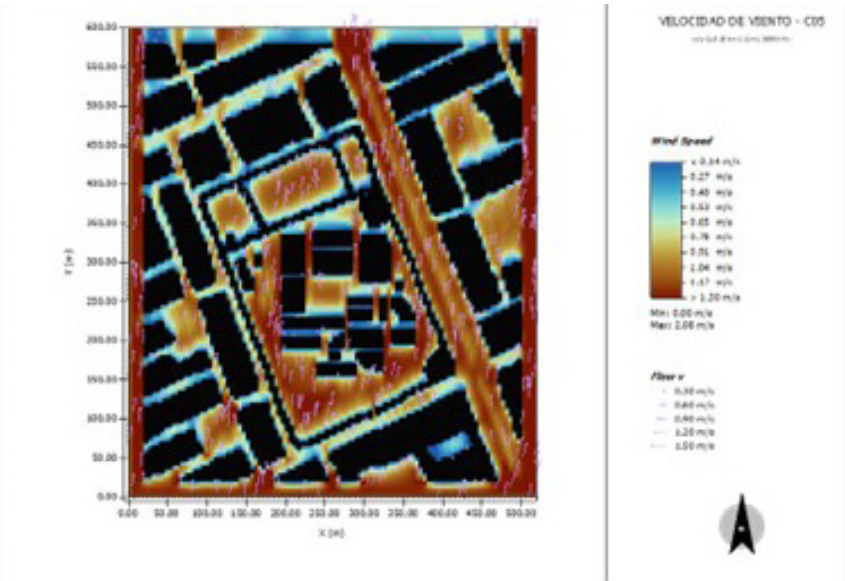
Tabla 2.
Tabla de comparación de resultados con datos de dos estaciones de monitoreo en Tecsup

Estación	Coordenadas Latitud – Longitud	Parámetro	Unidad	Medido	Simulado (5 m)
1	-12,0451129, -76,9526085	Temperatura	°C	31,27	30,77
		Humedad Relativa	%	46,57	52,33
		NO ₂	µg/m ³	63,66	6,24
		O ₃	µg/m ³	42,44	18,72
		PM _{2,5}	µg/m ³	8,16	6,02
2	-12,0439210, -76,9533756	Temperatura	°C	29,03	30,91
		Humedad Relativa	%	53,58	51,78
		NO ₂	µg/m ³	76,30	14,76
		O ₃	µg/m ³	43,07	18,97
		PM _{2,5}	µg/m ³	8,85	6,09

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la tabla 2 se evidencia una alta correspondencia en las variables meteorológicas, con diferencias menores al 15 %, lo que confirma la precisión del modelo en la reproducción de las condiciones térmicas y de humedad. En el caso de los contaminantes, las diferencias más amplias se explican por la ausencia de ciertas fuentes externas de emisión fuera del

dominio de simulación. La consistencia observada en la relación y magnitud de los contaminantes entre las estaciones, tanto en las simulaciones como en los datos reales, demuestra que el modelo captura correctamente las dinámicas de dispersión y concentración, resultando adecuado para representar las condiciones ambientales locales en el entorno de Tecsup.



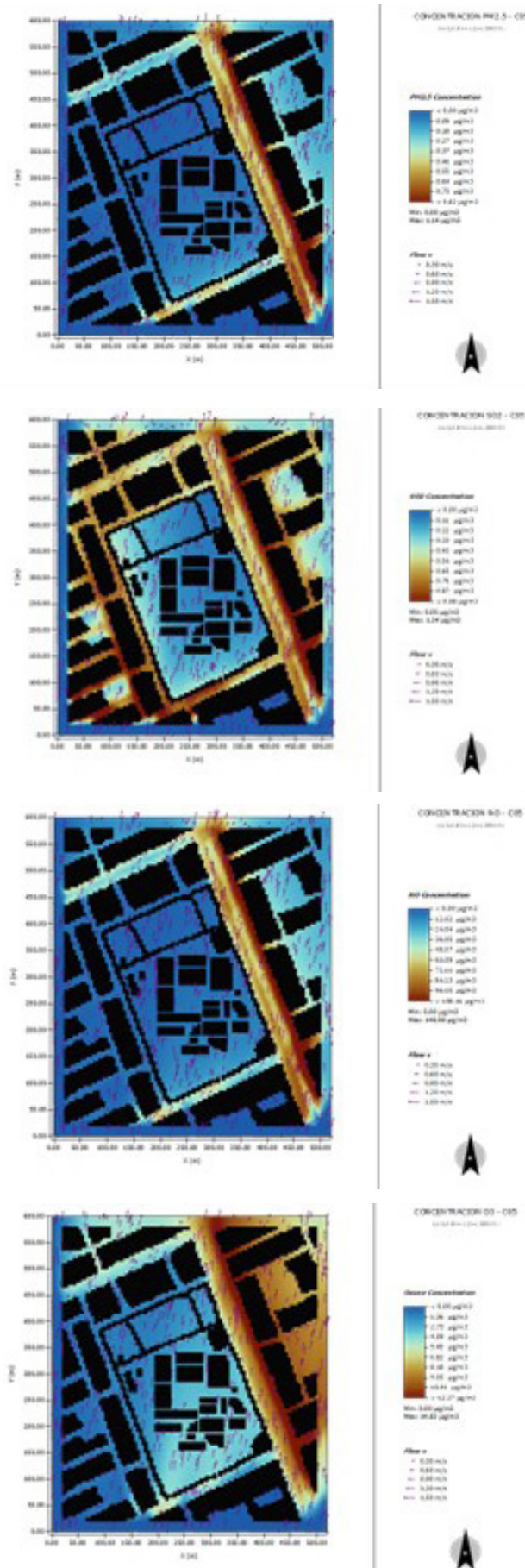


Figura 9. Mapas de velocidad de viento, PM2.5, SO2, NO y O3 con setup de la Estación Santa Anita

Fuente: Elaboración propia.

Tal como se muestra en la figura 9, la distribución de la velocidad del viento está influenciada por la configuración urbana y la presencia de edificaciones. Se observan variaciones significativas, con valores entre 0,14 m/s y 1,30 m/s. En las zonas interiores de Tecsup, entre edificaciones, la velocidad es menor (0,14–0,65 m/s) debido al efecto de obstrucción, mientras que en las zonas exteriores y en la avenida Huarochirí se registran las mayores velocidades (0,78–1,30 m/s) a causa de la dirección predominante del viento.

En cuanto a los valores registrados para los contaminantes, el ozono mostró concentraciones alrededor de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dentro del campus de Tecsup, aunque en los exteriores estos valores llegaron a duplicarse. En el caso del $\text{PM}_{2,5}$ y del NO_2 , las concentraciones simuladas se encuentran en el rango de 6 y 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, y, de igual manera, pueden duplicarse o triplicarse fuera del campus. Esto indica que los valores registrados dentro del campus pueden considerarse dentro de los niveles de contaminación «buena» o «moderada», mientras que en los exteriores pueden alcanzar niveles «insalubres para grupos sensibles» o «insalubres».

El $\text{PM}_{2,5}$ sigue un patrón similar al del NO_2 y el NO , con las mayores concentraciones en la avenida Huarochirí (0,46–0,82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y un valor máximo de 1,14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Las avenidas Cascanueces y Santa Ana presentan niveles intermedios (0,18–0,46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), mientras que dentro de Tecsup los valores son menores (0–0,18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Estos resultados evidencian la influencia de la estructura urbana en la dispersión de contaminantes y cómo la vegetación puede contribuir a mitigar sus concentraciones.

Descripción, con base en los resultados, de las zonas a mejorar

Para estimar la comodidad del peatón, se calcularon los parámetros de PMV (*Predicted Mean Vote*), cuyo valor varía entre –5 y 5. Los valores negativos indican que la persona experimenta sensación de frío, mientras que los positivos reflejan sensación de calor. Un valor de 0 representa una condición de confort térmico, en la que la persona se siente perfectamente cómoda.

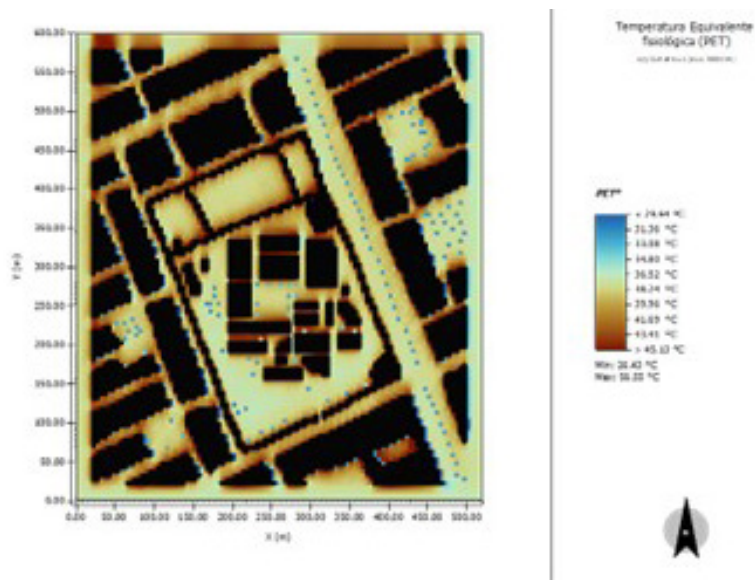


Figura 10. Mapa de PMV de la zona de estudio
Fuente: Elaboración propia.

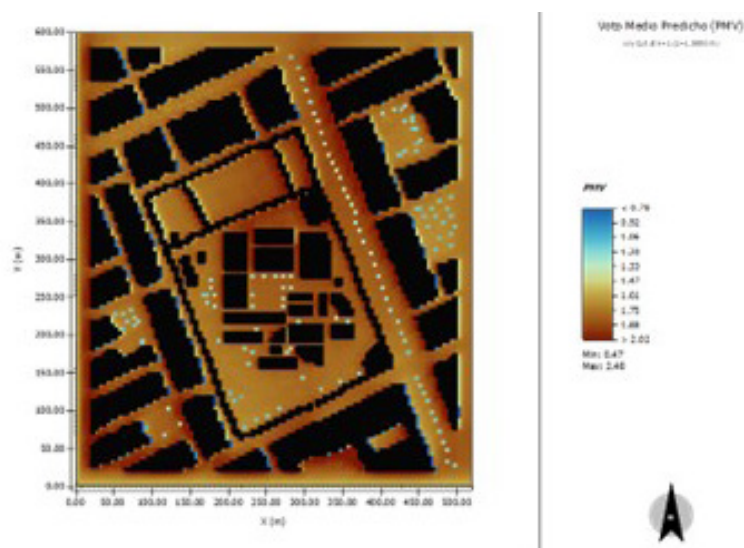


Figura 11. Mapa PET de la zona de estudio
Fuente: Elaboración propia.

Para las instalaciones de Tecsup se observa, según la figura 10, que los valores de PMV (*Predicted Mean Vote*) varían entre 1,47 y 2,48, lo que indica que el peatón percibe un ambiente caluroso en todo el instituto, excepto en las zonas donde hay árboles. En cuanto a los valores de PET (*Physiological Equivalent Temperature*), mostrados en la figura n.º 11, este índice evalúa la percepción humana del confort térmico en

exteriores, considerando factores como la temperatura del aire, la humedad, la radiación solar y el viento. Los peatones perciben temperaturas entre 36,5 °C y 56,6 °C en todo Tecsup, salvo cuando se encuentran bajo un árbol o en las sombras proyectadas por los edificios. Cabe resaltar que, al tener edificaciones de un solo piso en su mayoría, Tecsup no genera sombras suficientes a las 14:00 horas.



Figura 12. Posibles zonas a mejorar

Fuente: Elaboración propia.

Con base en los resultados obtenidos, se observó que el campus de Tecsup debería implementar estrategias orientadas a mejorar la calidad del aire y la comodidad del peatón, ya que los resultados actuales no son favorables. No obstante, es prioritario intervenir en las áreas donde los peatones transitan con mayor frecuencia, dado que se identificó que los niveles más elevados de contaminación se concentran de manera significativa en la entrada de Tecsup, específicamente en las cercanías de la avenida Cascanueces.

En la figura n.º 12, las zonas sombreadas con borde verde representan áreas donde podrían incorporarse árboles que contribuyan a disminuir la concentración de contaminantes en el aire. Las zonas sombreadas con borde amarillo corresponden a espacios en los que podrían implementarse árboles altos, toldos, quinchos o estructuras que generen sombra. La plaza central es un espacio con alto potencial de mejora, ya que constituye un área amplia de uso común entre la comunidad de Tecsup. Del mismo modo, los pasillos que dividen los pabellones de los edificios aledaños se identifican como zonas críticas de alta contaminación, lo que las convierte en puntos prioritarios para la implementación de medidas destinadas a mejorar la calidad del aire.

CONCLUSIONES

El modelado microclimático y de calidad del aire en el campus de Tecsup permitió identificar con precisión las zonas más críticas de contaminación y de estrés térmico. Los resultados mostraron que las concentraciones de material particulado superaron los límites establecidos por el ECA para aire, alcanzando valores máximos de $PM_{10} = 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $PM_{2,5} = 126,59 \mu\text{g}/\text{m}^3$, frente a los límites de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. En cambio, el O_3 ($55 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y el CO ($2\,500 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se mantuvieron dentro de los valores permitidos. Estas concentraciones más elevadas se localizaron principalmente en las avenidas Huarochirí y Cascanueces, coincidiendo con los mayores flujos vehiculares.

En términos microclimáticos, las velocidades del viento oscilaron entre 0,14 m/s y 1,30 m/s, lo que condicionó la dispersión de contaminantes. Los índices de confort térmico evidenciaron un estrés térmico moderado a severo, con valores de PMV entre 1,47 y 2,48 y de PET entre 36 °C y 56 °C, superando los umbrales de confort establecidos para ambientes urbanos. Las zonas bajo cobertura vegetal fueron las únicas que mantuvieron condiciones cercanas al confort térmico.

Estos resultados demuestran la validez y aplicabilidad del modelo ENVI-met para representar las dinámicas locales de dispersión de contaminantes y temperatura en entornos urbanos. No obstante, se reconoce como limitación la ausencia de fuentes de emisión externas al dominio y la simulación de corto plazo, lo que podría generar diferencias respecto de mediciones continuas.

Se recomienda priorizar la implementación de infraestructura verde (árboles de copa amplia, jardines lineales y techos vegetales) y estructuras de sombra en zonas de alta exposición térmica, junto con una gestión del tráfico interno y perimetral que reduzca la emisión de contaminantes. Asimismo, los futuros estudios deberían incorporar simulaciones multitemporales y escenarios de mitigación para evaluar la efectividad de estas medidas a largo plazo.

REFERENCIAS

- [1] Chatzinikolaou, E., Chalkias, C., & Dimopoulou, E. (2018). *Urban microclimate improvement using ENVI-met climate model. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-4*, 69–76. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-69-2018>
- [2] Fernández, R., Allende, D. G., Castro, F., Cremades, P., & Puliafito, S. E. (2010). Modelado regional de la calidad de aire utilizando el modelo WRF/Chem: Implementación de datos globales y locales para Mendoza. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 14, 43–50. Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente (ASADES). ISSN 0329-5184.
- [3] Ouyang, W., Sinsal, T., Simon, H., Morakinyo, T., Liu, H., & Ng, E. (2021). Evaluating the thermal-radiative performance of ENVI-met model for green infrastructure typologies: Experience from a subtropical climate. *Building and Environment*, 207, 108427. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108427>
- [4] Pérez-Vega, C., Ramírez-Arias, J. A., López-Cruz, I. L., Arteaga-Ramírez, R., & Cervantes-Osornio, R. (2021). 3D computational fluid dynamics modeling of temperature and humidity in a humidified greenhouse. *Revista Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 13(1). <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2020.10.060>
- [5] Pinedo-Jáuregui, E., Gamarra, D., & Quispe, L. J. (2020). Análisis del control de emisiones atmosféricas vehiculares en Lima Metropolitana. *South Sustainability*, 1(1), 11–22. <https://doi.org/10.21142/SS-0101-2020-005>
- [6] Schalaus, S., Habib, A., & Michel, S. (2021). Atmospheric wind field modelling with OpenFOAM for near-ground gas dispersion. *Atmosphere*, 12(8), 933. <https://doi.org/10.3390/atmos12080933>

- [7] Schneider, M., Tötzer, T., Bügelmayr-Blaschek, M., & Berg, R. (2023). Pitfalls and potentials of microclimate simulations in urban planning. *Journal of Urban Planning and Development*, 149(4), 04023002. <https://doi.org/10.1061/JUPDDM.UPENG-450>
- [8] Senamhi. (2014). *Informe de calidad del aire en Lima Metropolitana*. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/03201SENA-141.pdf>
- [9] Zhao, M., Vicedo-Cabrera, A. M., Guo, Y., Tong, S., Coelho, M., Saldiva, P., & others. (2023). Joint effect of heat and air pollution on mortality in 620 cities of 36 countries. *Environment International*, 181, 108258. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108258>

ACERCA DEL AUTOR

Lourdes Diaz Espinoza

(2002, Lima, Perú) es estudiante de Ingeniería Ambiental en la Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC). Actualmente, cursa el noveno ciclo de su carrera. Posee formación en gestión ambiental, normativa ambiental y evaluación de impactos, con experiencia en monitoreo de componentes físicos y biológicos. Ha desarrollado investigaciones sobre calidad del aire, gestión ambiental y sostenibilidad, áreas en las que busca generar un impacto positivo a través de soluciones prácticas e innovadoras.

@ lourdes.diaz@utec.edu.pe

Daniel Vicente Horna Muñoz

(1988, Lima, Perú) es el director del departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC). Obtuvo su PhD de la Universidad de Iowa y MSc de Stanford University, ambos en ingeniería civil. Ha desarrollado investigaciones sobre la dinámica de fluidos computacional aplicada a fluidos ambientales en temas relacionados con contaminación ambiental, inundaciones y contaminación atmosférica.

@ dhorna@utec.edu.pe

Enviado: 29-04-2025
Revisado: 15-09-2025
Aceptado: 17-10-2025



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.

PILARES DEL MODELO

Estos le dan apertura, dinamismo y flexibilidad, lo que orienta nuestra función formativa de manera articulada y coherente con nuestros principios, abordando las tendencias globales en educación tecnológica para transformar y modernizar nuestro futuro.



Articulación con la empresa y con el mundo



Aprendizaje inmersivo
con docentes que inspiran



Experiencia estudiantil
transformadora



Innovación
y emprendimiento



Flexibilidad
educativa



Infraestructura y
equipamiento moderno

Precisión y la veracidad de los métodos predictivos según los minerales sometidos a distintas cargas molidoras.



Análisis comparativo de los modelos matemáticos de Fred Bond, Steve Morrell y Roddy Valle, sobre el consumo energético aplicado a la molienda de minerales

Comparative Analysis of the Mathematical Models of Fred Bond, Steve Morrell, and Roddy Valle on Energy Consumption Applied to Mineral Grinding

RESUMEN

En el ámbito minero, la optimización de los procesos de molienda es esencial para la eficiencia energética y la rentabilidad global de las operaciones. En este contexto, la estimación precisa del consumo energético durante la etapa de cominución del mineral desempeña un papel crucial.

Se estima que entre el 30 % y el 40 % de la energía total se consume durante esta fase, lo que evidencia la importancia de seleccionar modelos de predicción confiables para el análisis en planta de molienda.

Las estimaciones del consumo energético en la molienda requieren modelos predictivos que se fundamentan en fórmulas matemáticas empíricas, entre las cuales destacan tres propuestas para este fin: Fred Bond (1952), Steve Morrell (2021) y Roddy Valle (2020).

Esta experiencia vincula la precisión y la veracidad de los métodos predictivos según los minerales sometidos a distintas cargas molidoras. Las pruebas metalúrgicas buscan identificar el modelo de predicción del consumo energético más preciso y confiable entre los tres enfoques analizados. Para lograrlo, se contrastarán las estimaciones proporcionadas por estos modelos con datos reales de consumo energético obtenidos mediante el sistema de monitoreo eGauge, que en tiempo real ofrece los valores del triángulo de potencias eléctrico.

Las pruebas de molienda a nivel *batch* se efectuaron con seis tipos distintos de minerales y con cargas de bolas variables, incluyendo un 30 %, 35 % y 40 % del volumen del molino, y a una velocidad crítica del 70 %.

Los resultados obtenidos evidencian que el modelo de predicción del consumo energético en la molienda que proporciona resultados

más precisos y aplicables en diversas condiciones operativas, entre los enfoques analizados, es el modelo de Steve Morrell.

Cabe mencionar que el modelo de Roddy Valle presentó un error muy cercano al de Morrell en las pruebas de laboratorio, siendo los valores para Valle de 9,22 % y para Morrell de 8,49 %. El modelo de Bond presentó un error de 19,58 %, lo que demuestra la no aplicabilidad de este modelo en pruebas de laboratorio en Tecsup, todas referidas a la determinación del consumo energético en la molienda.

Las pruebas experimentales de *Work Index*, molienda y análisis granulométrico se desarrollaron en los laboratorios de procesamiento de minerales de Tecsup, siguiendo los protocolos planteados por sí en la ecuación respectiva.

ABSTRACT

In the mining field, optimizing grinding processes is essential for energy efficiency and the overall profitability of operations. In this context, the accurate estimation of energy consumption during the comminution stage of the ore plays a crucial role.

It is estimated that between 30% and 40% of the total energy is consumed during this phase, highlighting the importance of selecting reliable predictive models for analysis in the grinding plant.

Energy consumption estimates in grinding require predictive models based on empirical mathematical formulas, among which three models stand out for this purpose: Fred Bond (1952), Steve Morrell (2004), and Roddy Valle (2020).

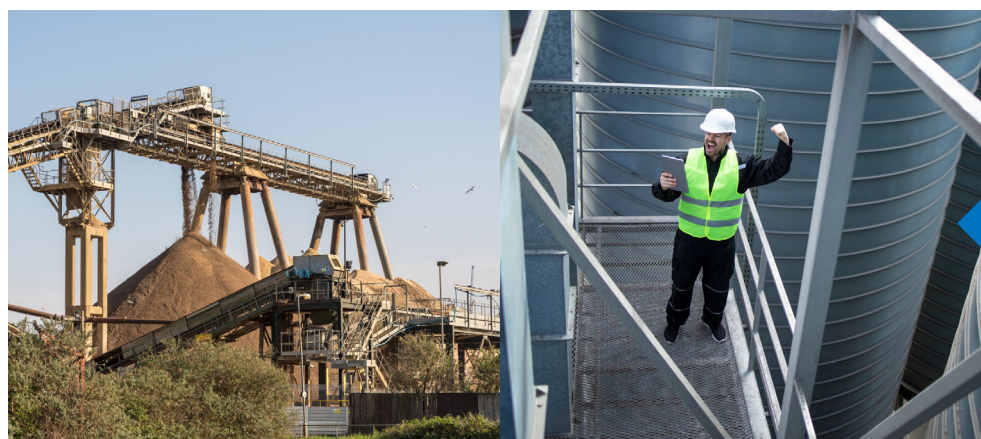
This study relates the accuracy and reliability of the predictive methods according to the mineral types under different grinding media loads.

Palabras Claves

Consumo energético, molienda, análisis granulométrico, modelo de Steve Morrell, Fred Modelo de Bond, Modelo de Roddy Valle

Key words

Energy consumption, grinding, particle size analysis, the Steve Morrell model, the Bond's work index model, and the Roddy Valle model



The metallurgical tests aim to identify the most accurate and reliable predictive model for energy consumption among the three approaches analyzed. To achieve this, the estimates provided by these models will be compared with actual energy consumption data obtained through the eGauge monitoring system, which provides real-time values of the electrical power triangle.

Batch grinding tests were carried out with six different types of ores and varied ball loads, including 30%, 35%, and 40% of the mill volume, at a critical speed of 70%.

*The results show that among the analyzed approaches, the predictive model that provides the most accurate and applicable results under various operating conditions is the **Steve Morrell model**.*

*It is worth noting that the **Roddy Valle model** presented an error very close to that of Morrell in laboratory tests, with values of **9.22%** compared to **8.49%** for Morrell. The **Bond model** showed an error of **19.58%**, demonstrating its lack of applicability in laboratory-scale grinding energy consumption tests conducted at **TECSUP**.*

*The experimental tests for **Work Index, grinding, and particle size analysis** were carried out in the **mineral processing laboratories of TECSUP**, following the protocols established in their respective equations.*

INTRODUCCIÓN

Según Álvarez (2010) "La subida en los últimos años de los costes energéticos ha inducido la necesidad en la industria minera en general y en las plantas de beneficio en particular, de una mejora de la eficiencia de sus operaciones", esto conlleva optimizar el consumo energético en la conminución en general en las operaciones en plantas concentradoras.

Según Fernández (2012), Las operaciones de fragmentación constituyen una de las etapas más relevantes en los procesos industriales, dado que generan un considerable consumo energético. Con el propósito de incrementar y optimizar la eficiencia de las operaciones mencionadas, es necesario llevar a cabo un análisis y una estimación del consumo energético que se genera en las diversas etapas del proceso. El consumo energético asociado a las operaciones de trituración y molienda ha sido objeto de estudio desde mediados del siglo XX. En este contexto, la propuesta de Fred Bond en 1952, que empleó un molino de bolas estándar en un entorno de laboratorio, establece una relación entre los datos empíricos de la energía consumida por tonelada de mineral y el proceso de reducción de tamaño, conocido como índice de trabajo (work index). El método de Bond para calcular el trabajo (Wi) presenta limitaciones en su aplicabilidad, particularmente en la predicción de la energía utilizada en operaciones de molienda de partículas muy finas. Asimismo, resulta ineficaz para establecer relaciones precisas en partículas de tamaños inferiores a veinte micrones (ultrafinos).

Casali (2014), en su investigación titulada "Técnica para calcular indirectamente el índice de Bond en partículas ultra finas", propone una técnica que se basa en el análisis de la distribución de partículas para calcular el índice de Bond, especialmente efectiva para materiales con partículas diminutas donde la prueba de moler directa resulta ineficaz. Esta técnica utiliza el vínculo entre la proporción de partículas y la dureza del material para calcular

la energía de trituración necesaria. Propone análisis de partículas en PSD, relación con la dureza del mineral y determinación indirecta del índice de Bond para alcanzar un tamaño específico para estimación indirecta del índice de Fred Bond.

Armas (2013), en la investigación realizada en la planta concentradora Huari, se determinó un elevado consumo de energía eléctrica. Esta conclusión se alcanzó mediante una evaluación experimental, dado que el consumo de energía está influenciado por la carga, el tipo de material y diversos factores relacionados con la instalación. Todos estos elementos son indicativos para llevar a cabo una evaluación eléctrica adecuada.

Arancibia (2015) examina el procedimiento de dimensionamiento de un molino de bolas mediante el método de Bond, el cual se considera uno de los modelos más utilizados en la ingeniería de procesos minerales para la estimación del consumo específico de energía en el proceso de molienda. El presente estudio expone los fundamentos teóricos del Índice de Trabajo de Bond (Wi) y su integración en la ecuación clásica utilizada para calcular la potencia requerida en el proceso de reducción de tamaño de un mineral, desde un tamaño inicial F80 hasta un tamaño final P80 deseado.

El estudio de Álvarez (2010) examina la influencia de la selección del modelo de distribución del tamaño de partículas en la energía calculada a través del método de Bond. El autor sostiene que la ecuación de Bond, la cual se fundamenta en el Índice de Trabajo (Wi) y los tamaños F80 y P80, adopta una representación idealizada de la distribución granulométrica que no necesariamente se alinea con las condiciones reales. Álvarez, al comparar los modelos Rosin-Rammler, Gaudin-Schuhmann, Gates-Gaudin-Schuhmann y log-normal, demuestra que cada uno de estos modelos produce distintos valores de F80 y P80. Esta variabilidad en los resultados tiene un impacto significativo en la estimación de la energía. En materiales que presentan una alta proporción de finos o colas extensas, las variaciones son particularmente evidentes. El estudio concluye que el consumo energético calculado por Bond podría estar sujeto a subestimaciones o sobreestimaciones si no se tiene en cuenta de manera adecuada el modelo de distribución. La representación granulométrica seleccionada resulta fundamental para la obtención de cálculos energéticos precisos en los procesos de molienda.

En la búsqueda de un modelo que permita determinar el consumo de los KWH/TM, así como evaluar cuánto de la energía se aprovecha en el proceso de molienda, se pretende analizar por qué un modelo resulta más preciso que otro en operación y cuáles son las variables que determinan la aplicación de dichos modelos. Uno de los factores más importantes es el tamaño de alimentación a la molienda $F_{(80)}$ y el tamaño del producto $P_{(80)}$.

En la búsqueda de un modelo preciso para prever el consumo energético en la molienda de minerales, es crucial considerar la complejidad de las condiciones operativas y la ausencia de evaluaciones comparativas exhaustivas entre los modelos disponibles. La evaluación detallada de los modelos de Bond, Morrell y Valle es esencial para determinar su aplicabilidad bajo diversas granulometrías y tipos de minerales.

El modelo matemático de Fred Bond, con su exponente fijo (-0,5), ha sido ampliamente utilizado en la industria minera. No obstante, su precisión se ve comprometida cuando las condiciones operativas difieren significativamente de las pruebas

de laboratorio, lo que ha impulsado la incorporación de factores de corrección en el tiempo.

Por otro lado, Morrell (2004) cuestiona la validez del modelo de Bond debido a la necesidad de factores de corrección, argumentando que su exponente fijo no está respaldado por datos experimentales. Morrell sugiere que este exponente debería ser variable para ajustarse a una gama más amplia de minerales, según lo propuesto por Huki en 1961, aunque su análisis se basa en un circuito completo de molienda SAG [7].

En contraste con el enfoque teórico de Bond, el modelo de Roddy Valle adopta un enfoque estadístico respaldado en datos históricos de molienda obtenidos en más de 80 plantas. Este enfoque busca adaptarse mejor a las condiciones reales y a la variabilidad del mineral, ofreciendo una alternativa a los modelos tradicionales.

A medida que exploramos estos modelos y su aplicabilidad en la molienda de minerales, surge la necesidad de comprender en profundidad cómo cada uno aborda las complejidades operativas y las características variables de los minerales. Este análisis comparativo pretende esclarecer las fortalezas y limitaciones de cada modelo, proporcionando una guía fundamentada para la selección del enfoque más adecuado en distintos contextos operativos minero-metalúrgicos.

Otra de las características que se evidencian a partir de un análisis empírico de datos operacionales es que cada modelo muestra mayor precisión según las condiciones granulométricas que presenta el mineral tanto en el alimento como en el producto del mismo.

FUNDAMENTOS

La molienda es un proceso fundamental en el que se reducen las partículas de diferentes materiales para obtener productos finales de alta calidad. No obstante, el consumo de energía asociado a este proceso puede representar una parte sustancial de los costos totales de producción.

En este contexto, la optimización del consumo energético en la molienda se ha convertido en un objetivo clave para las empresas, ya que puede tener un impacto significativo en su competitividad, rentabilidad y sostenibilidad ambiental. Para alcanzar este propósito, resulta esencial disponer de herramientas y métodos que permitan estimar con precisión el consumo energético en función de distintos parámetros de operación y de las características del material. En la actualidad, las industrias mineras utilizan la ecuación de Bond para determinar dicho consumo energético.

Para ello, se efectuó un análisis comparativo de tres fórmulas empíricas: Bond, Morrell y Valle.

- Ecuación de Fred Bond

$$W = 10W_i * \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right)$$

- Ecuación de Steven Morrell

$$W = 4 * M_{ib} * \left(P_{80}^{-\left(0.295 + \frac{F_{80}}{10^6}\right)} - F_{80}^{-\left(0.295 + \frac{F_{80}}{10^6}\right)} \right)$$

- Ecuación de Roddy Valle

$$W = 10 * W_i * \left(P_{80}^{-0.8 * F_{80}^{-0.05}} - F_{80}^{-0.8 * F_{80}^{-0.05}} \right)$$

Asimismo, se analizó el consumo energético respecto de su ecuación matemática y en comparación con un consumo real. Estas fórmulas se basan en diferentes variables, como el tamaño de partícula inicial (F_{80}) y final (P_{80}), la velocidad crítica del molino, el tiempo de residencia, la carga de bolas y otros factores relevantes.

El objetivo principal de este estudio es evaluar la precisión y la veracidad de estos modelos matemáticos en condiciones reales de operación, utilizando datos experimentales obtenidos de seis muestras de minerales diferentes. Se pretende analizar las fortalezas y limitaciones de cada fórmula en términos de su capacidad para predecir el consumo energético en la molienda, así como determinar qué factores influyen de manera significativa en la precisión de las estimaciones.

Los resultados de este análisis comparativo proporcionarán información valiosa para el sector minero, permitiéndole seleccionar la fórmula más adecuada en función de las características específicas de su proceso de molienda y optimizar así el consumo energético de manera eficiente mediante la ecuación correcta. Además, contribuirá al avance del conocimiento en este campo al ofrecer una evaluación crítica y rigurosa de las fórmulas empíricas existentes y de su aplicabilidad en la práctica industrial.

En una planta de molienda, es fundamental el control en línea de los parámetros operacionales para una mejor evaluación del consumo energético y para determinar cuál es el modelo más adecuado para la evaluación de la energía del proceso, complementariamente a la determinación energética proporcionada por la parte eléctrica.

Procedimiento experimental

Se realizaron las pruebas de molienda para seis tipos de minerales, por lo cual a cada uno de ellos se le determinó su *Work Index* (Wi) y, por cada tipo de mineral, se extrajeron tres submuestras para efectuar pruebas de molienda con tres cargas moledoras diferentes.

Para el cálculo del Wi se trituro cada una de las muestras hasta obtener un mineral menor a malla 6 ASTM, de las cuales se seleccionaron 5 kg de muestra representativa. Se determinó su F_{80} y se efectuó el índice de trabajo de Bond tal como se especifica en el procedimiento estandarizado.

Para la determinación del consumo energético en la molienda se tritaron las muestras hasta obtener un mineral menor a malla 10 y se seleccionaron 3 kg de cada mineral en bolsas de 1 kg para, posteriormente, realizar las pruebas de molienda al 30 %, 35 % y 40 % de carga de bolas, registrando el consumo real del molino con el equipo eGauge. Finalizado este proceso, se efectuó el análisis granulométrico para encontrar el P_{80} .

El porcentaje de sólidos de todos los ensayos realizados fue del 30 %. El tiempo de residencia del mineral en el molino de bolas fue de 12 minutos debido a que la potencia tardaba un tiempo en estabilizarse.

La ecuación utilizada para la determinación del *Work Index* fue la siguiente:

$$W_i = \frac{44.5}{P_i^{0.23} * Gbp^{0.82} * \left[\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right]}$$

Cabe mencionar que las pruebas de *Work Index* se realizaron siguiendo los procedimientos y cargas de bolas planteadas por Bond.

A continuación, se muestran los diagramas de flujo de la determinación del *Work Index* en laboratorio con el molino de Bond en primera instancia, así como el diagrama de flujo del proceso para la determinación del consumo energético en la molienda de los minerales ensayados.

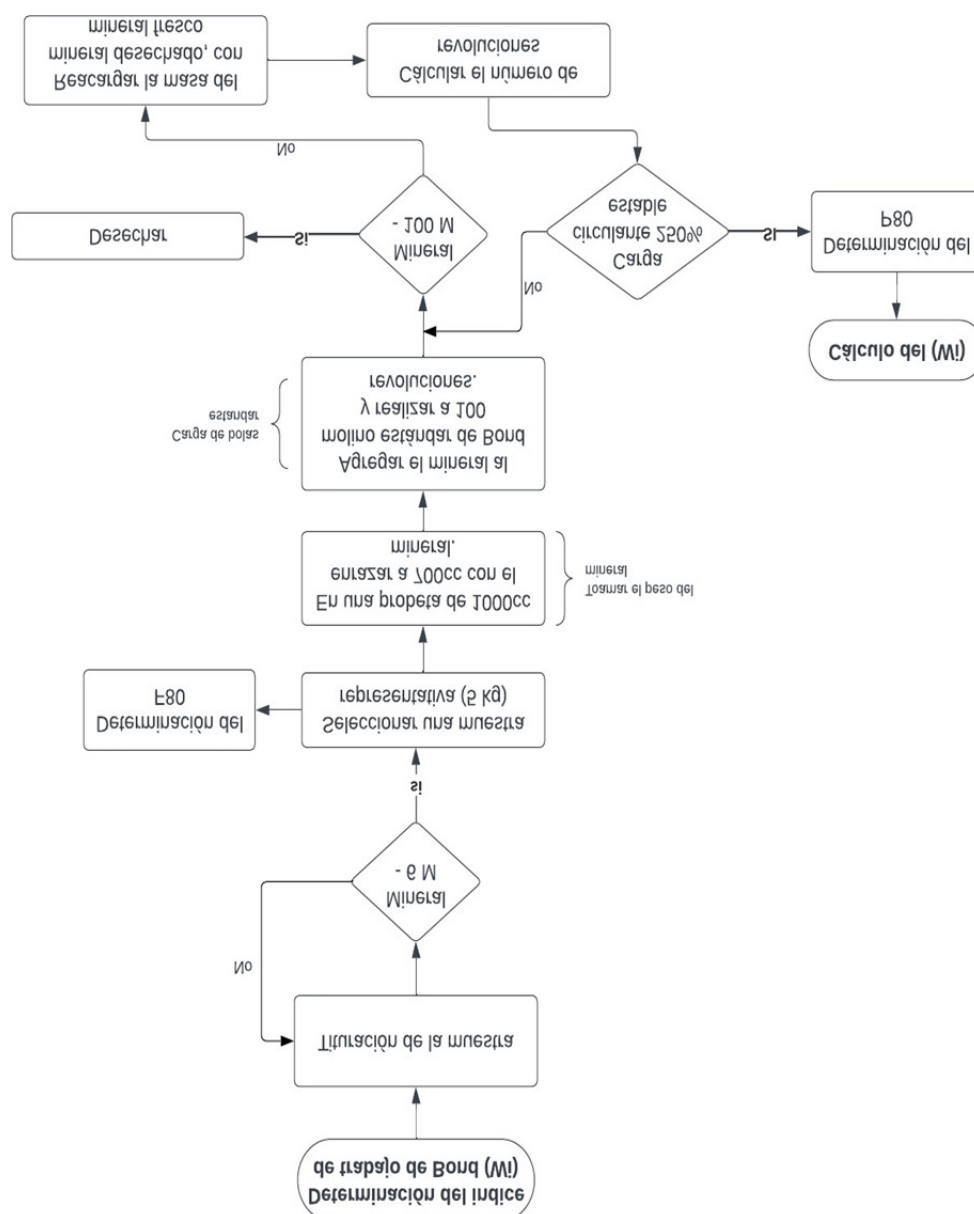


Figura 1. Diagrama de flujo experimental del Work Index

Fuente: Elaboración propia.

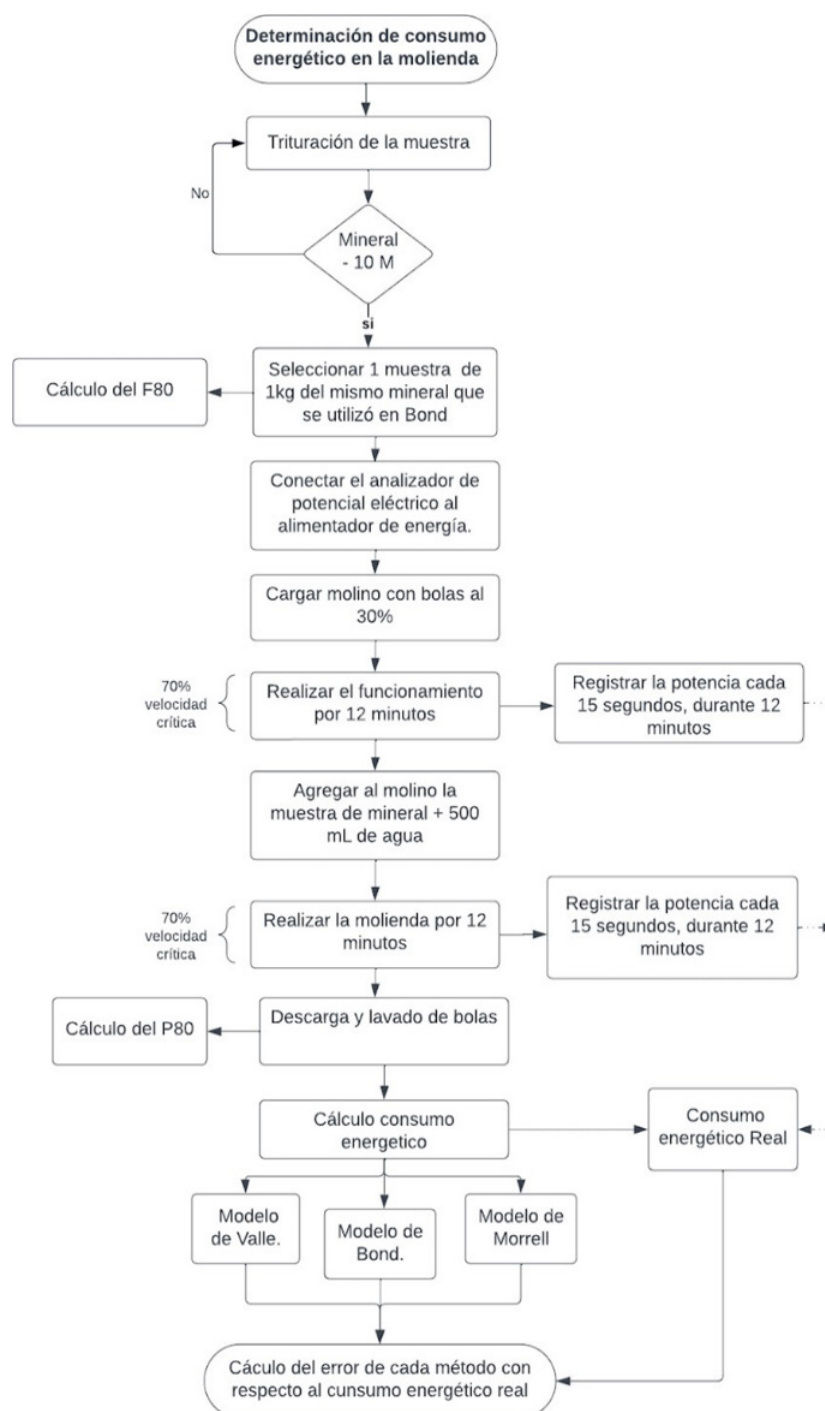


Figura 2. Diagrama experimental del consumo energético

Fuente: Elaboración propia.

Equipo empleado

Para las pruebas de *Work Index* se usó el molino estándar de Bond de 12" de diámetro por 12" de largo y, para las pruebas de molienda, se empleó un molino de bolas de laboratorio de 1 kg de capacidad.

Por otro lado, para el registro del consumo energético del molino de bolas en la molienda se utilizó el sistema de monitoreo de energía eGauge conectado de forma directa a las entradas de corriente del molino.

Para mitigar armónicos no deseados de la corriente y la tensión en el sistema eléctrico, que causan distorsiones en el correcto registro de la potencia, se utilizaron bobinas de choque. El análisis granulométrico se efectuó mediante la serie de mallas estandarizadas ASTM.

Las pruebas metalúrgicas y granulométricas se realizaron en los laboratorios de procesamiento de minerales de Tecsup.

Mineral empleado

En las pruebas experimentales se usaron 6 muestras de minerales con una granulometría y dureza variada.

Tabla 1
Tipos de muestra de minerales

Tipos de muestra	
Mineral 1	Sulfurado
Mineral 2	Sulfurado pirítico
Mineral 3	Sulfurado
Mineral 4	Oxidado
Mineral 5	Sulfurado
Mineral 6	Sulfurado

Fuente: Elaboración propia.

Metodología

Las pruebas experimentales fueron divididas en dos partes. La primera tuvo como objetivo principal determinar el índice de trabajo de Bond para cada uno de los minerales utilizados. Se trabajaron estas pruebas de WI bajo los siguientes parámetros:

Tabla 2
Parámetros de las pruebas del índice de trabajo de Bond

Parámetro	Mineral 1	Mineral 1	Mineral 1	Mineral 1	Mineral 1	Mineral 1
Masa	1222,4	1454,0	1442,5	1343,50	1577,9	1548,8
% -m100	16,29	17,48	15,09	23,26	20,07	24,00
Masa-m100	199,14	254,16	217,68	312,55	316,64	371,67
PPI	349,26	415,43	412,17	383,96	450,85	442,53
F80	219,06	1624,7	1899,9	1507,1	1899,9	2049,2
Pi	150	150	150	150	150	150

Fuente: Elaboración propia.

Los *Work Index* de los minerales ensayados oscilaban entre 10,61 y 14,99 KWH/TC, siendo estos de dureza media en general. La cantidad de mineral utilizada para cada prueba fue de aproximadamente 5 kg.

La segunda parte tuvo como objetivo medir la cantidad de energía real y compararla con los valores proporcionados por los tres métodos predictivos evaluados. La distribución granulométrica de las muestras a evaluar es la siguiente:

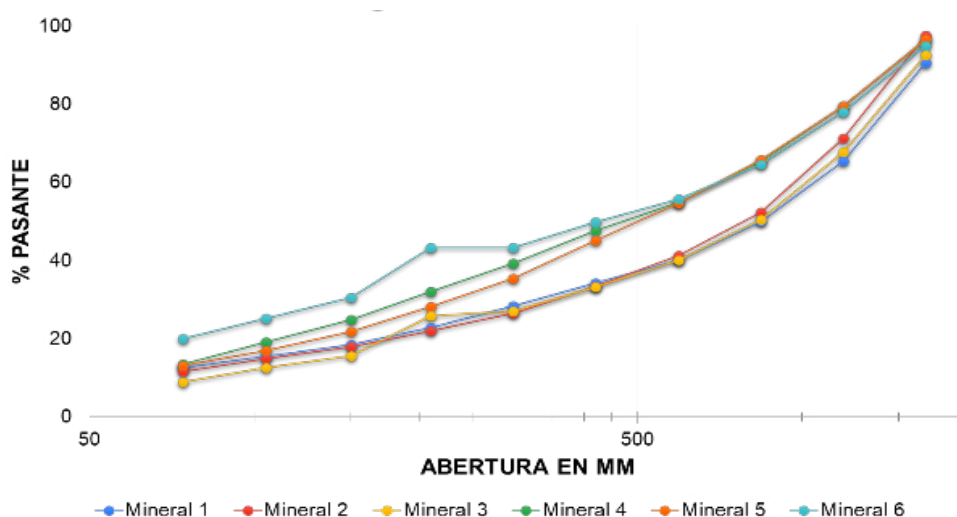


Figura 3. Distribución granulométrica del alimento F80

Fuente: Elaboración propia.

Para estas pruebas de molienda se trabajó bajo los siguientes parámetros:

Tabla 3

Parámetros de pruebas de molienda

Tiempo de residencia	12 minutos
Carga de bolas	30 %, 35 % y 40 %
Masa de mineral	1 kg
Porcentaje de sólidos	30 %
Velocidad de giro	70 % de la velocidad crítica

Fuente: Elaboración propia.

En el presente estudio se llevaron a cabo pruebas de molienda con las seis muestras para cada carga moledora, lo que resultó en un total de 18 pruebas realizadas.

- Mineral 1: 30 %, 35 % y 40 % de carga de bolas.
- Mineral 2: 30 %, 35 % y 40 % de carga de bolas.
- Mineral 3: 30 %, 35 % y 40 % de carga de bolas.
- Mineral 4: 30 %, 35 % y 40 % de carga de bolas.
- Mineral 5: 30 %, 35 % y 40 % de carga de bolas.
- Mineral 6: 30 %, 35 % y 40 % de carga de bolas.

Los modelos predictivos de Bond, Morrell y Valle fueron aplicados a cada una de estas pruebas, lo que permitió una evaluación exhaustiva del comportamiento de las diferentes muestras y cargas en el proceso de molienda. Estos modelos proporcionaron datos valiosos para analizar estos métodos bajo distintas condiciones, evaluando de ese modo su robustez y precisión.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Mineral 1: Granulometría del alimento y producto

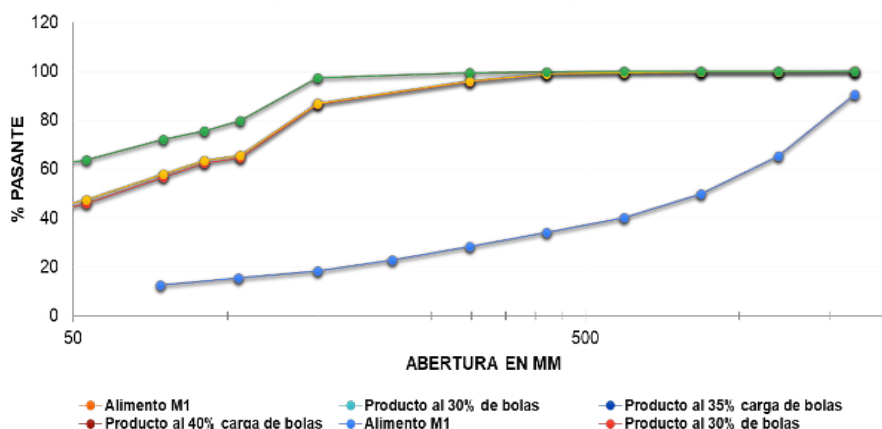


Figura 4. Distribución granulométrica del F80 y P80 del mineral 1

Fuente: Elaboración propia.

Mineral 2: Granulometría del alimento y producto

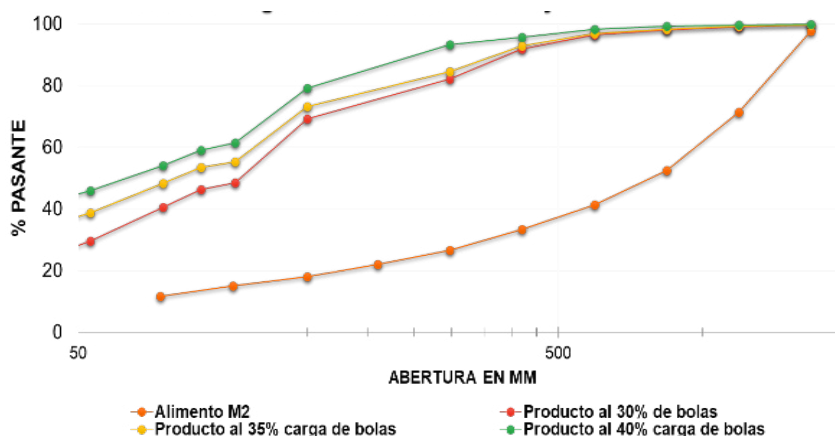


Figura 5. Distribución granulométrica del F80 y P80 del mineral 2

Fuente: Elaboración propia.

Mineral 3: Granulometría del alimento y producto

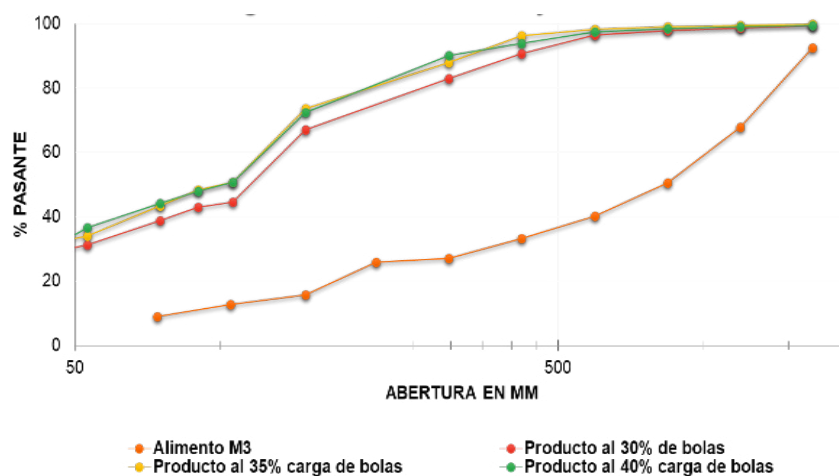


Figura 6. Distribución granulométrica del F80 y P80 del mineral 3

Fuente: Elaboración propia.

Mineral 4: Granulometría del alimento y producto.

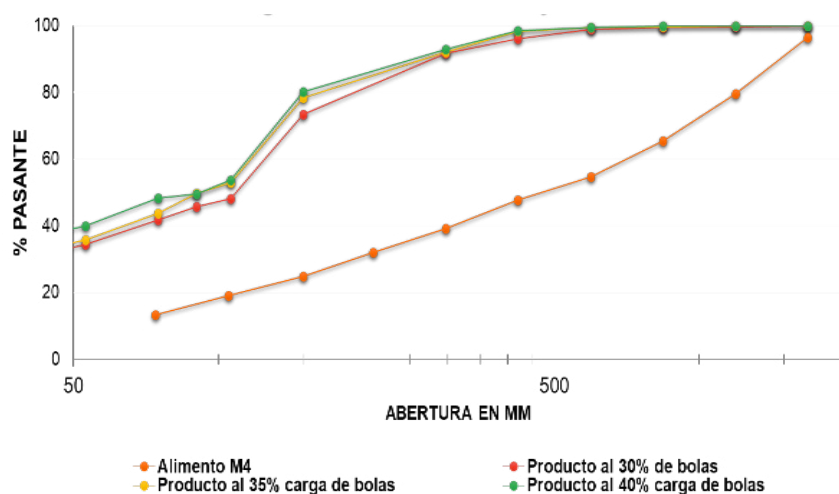


Figura 7. Distribución granulométrica del F80 y P80 del mineral 4

Fuente: Elaboración propia.

Mineral 5: Granulometría del alimento y producto

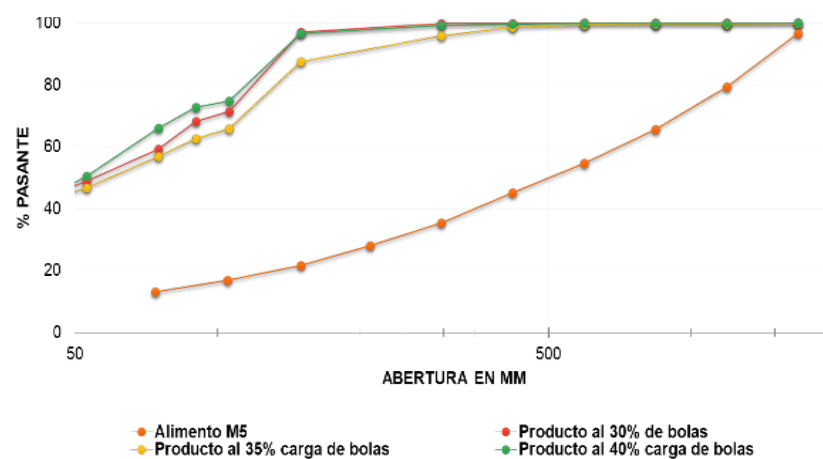


Figura 8. Distribución granulométrica del F80 y P80 del mineral 5

Fuente: Elaboración propia.

Mineral 6: Granulometría del alimento y producto

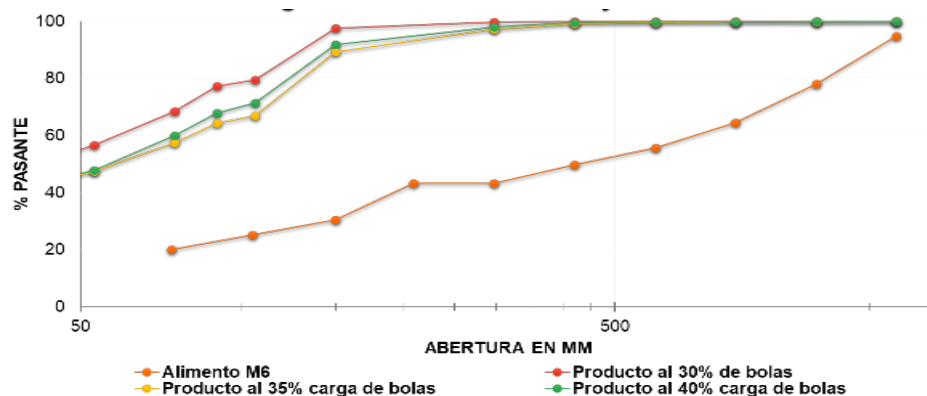


Figura 9. Distribución granulométrica del F80 y P80 del mineral 6

Fuente: Elaboración propia.

Consumo energético en molienda

Según Torocahua (2014) La potencia activa se define como la capacidad de un circuito para transformar la energía eléctrica en trabajo. Esta potencia es generada por la componente de la corriente que se encuentra en fase con la tensión. Es importante señalar que la potencia activa no se consume en el sentido estricto, ya que su manifestación depende de la presencia de elementos como bobinas o condensadores en los circuitos, los cuales generan campos magnéticos y eléctricos. Por otro lado, la potencia aparente, también conocida como potencia compleja, en un circuito eléctrico de corriente alterna

se considera como la suma vectorial de la potencia activa y la potencia reactiva, constituyendo así la potencia total del sistema.

Para calcular el consumo energético real de cada muestra de mineral, se utilizó un software desarrollado por el equipo de eGauge. Este *software* permite medir con precisión el consumo de energía y proporciona datos fiables sobre el consumo de cada muestra. Al emplear esta herramienta, se obtiene información precisa y detallada sobre el consumo energético de cada muestra de mineral, lo que resulta fundamental para efectuar análisis y evaluaciones rigurosas.



Figura 10. Cálculo del consumo energético real de cada muestra de mineral

Fuente: Elaboración propia.

Los datos obtenidos por este *software* para cada muestra era la siguiente:

08/03/24 23:13:00 – 08/03/24 23:24:00

Register	Tiempo ponderado	Promedio
Uso	66.79 Wh	364.00 W
Generación	0.00 Wh	0.00 W
A_L1	148.21 k°·s	224.55 °
A_S1	850.12 °·s	1.29 °
C-S1	236.14 mAh	1.29 A
D_A	40.93 Wh	223.00 W
P_Activa	66.79 Wh	364.00 W
P_Aparente	91.74 VAh	500.00 VA
P_Reactiva	62.87 vahr	342.00 var
T-L1	41.17 Vh	224.55 V
Tensión	236.14 mAh	1.29 A

Figura 11. Datos de cada muestra con software desarrollado por el equipo de eGauge.

Fuente: Elaboración propia.

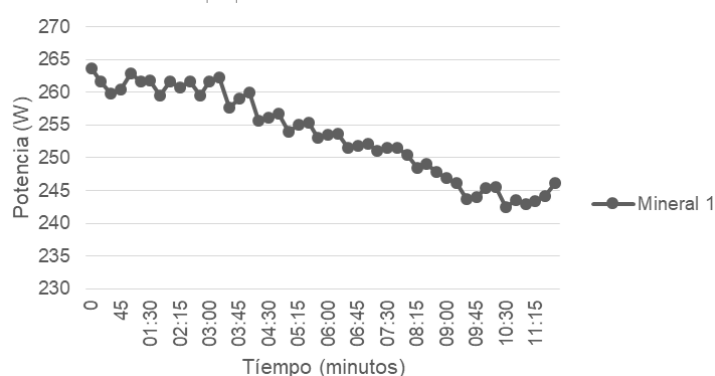


Figura 12. Potencia activa del mineral 1

Fuente: Elaboración propia.

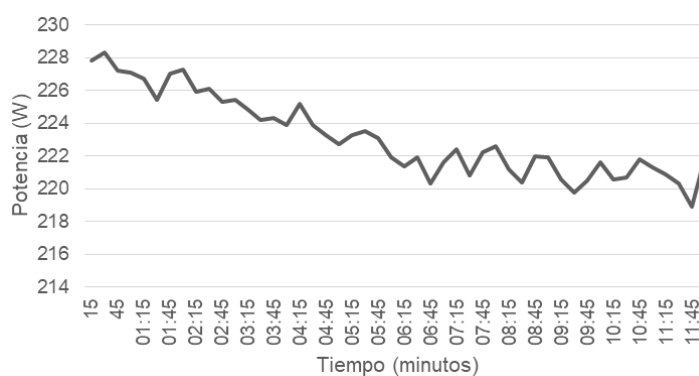


Figura 13. Potencia activa del mineral 2

Fuente: Elaboración propia.

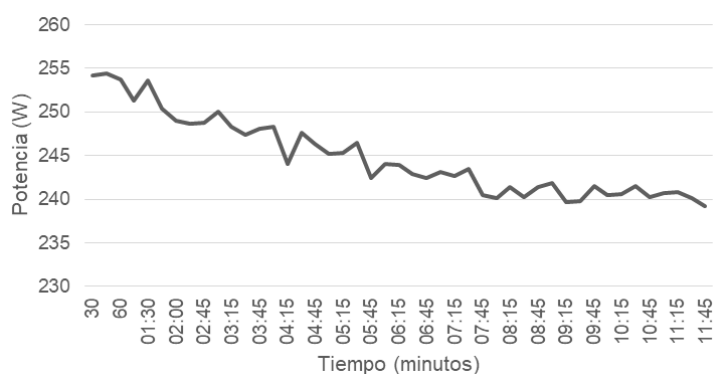


Figura 14. Potencia activa del mineral 3

Fuente: Elaboración propia.

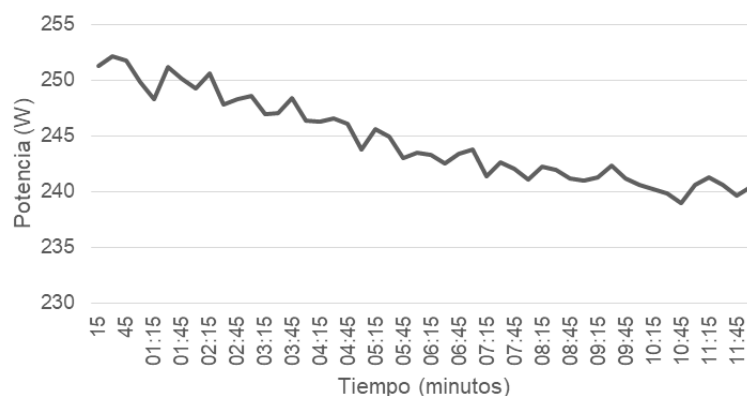


Figura 15. Potencia activa del mineral 4

Fuente: Elaboración propia.

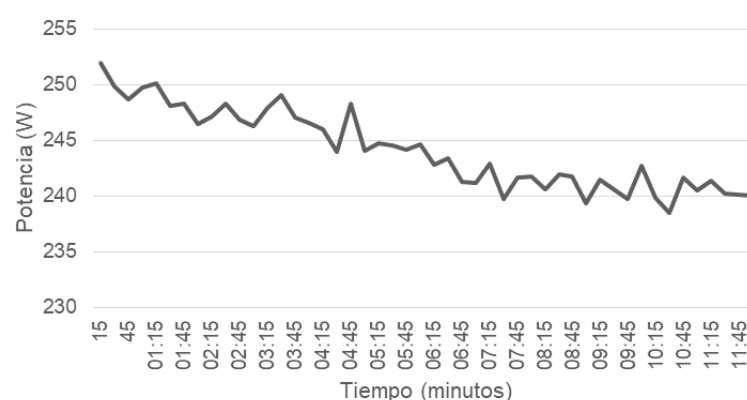


Figura 16. Potencia activa del mineral 5

Fuente: Elaboración propia.

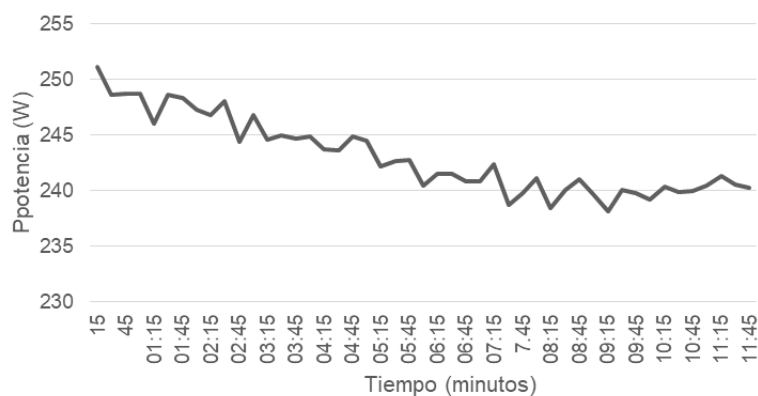


Figura 17. Potencia activa del mineral 6

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3

Porcentaje de error al 30 % de carga de bolas

	Muestra 1	Muestra 2	% Error				% Error promedio (30 %)
			Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	
Bond	17,51 %	34,57 %	14,98 %	19,75 %	12,69 %	12,32 %	18,64 %
Morrell	2,64 %	19,85 %	2,60 %	0,98 %	9,38 %	10,27 %	7,62 %
Valle	5,32 %	4,90 %	10,58 %	8,46 %	12,35 %	12,03 %	8,94 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4
Porcentaje de error al 35 % de carga de bolas

	% Error						% Error promedio (35 %)
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	
Bond	7,73 %	39,14 %	18,11 %	19,59 %	24,75 %	7,92 %	19,54 %
Morrell	11,17 %	21,08 %	3,19 %	0,81 %	3,39 %	14,85 %	9,08 %
Valle	13,09 %	9,15 %	7,62 %	8,12 %	1,81 %	15,15 %	9,15 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5
Porcentaje de error al 40 % de carga de bolas

	% Error						% Error promedio (40 %)
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	
Bond	17,49 %	31,55 %	10,77 %	7,24 %	16,56 %	39,74 %	20,56 %
Morrell	11,00 %	10,44 %	3,95 %	11,85 %	10,00 %	5,31 %	8,76 %
Valle	3,04 %	4,22 %	13,18 %	17,36 %	8,17 %	11,46 %	9,57 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6
Error % promedio de todas las 6 muestras de minerales

	30 % carga de bolas	35 % carga de bolas	40 % carga de bolas	Error % promedio por cada método
Bond	18,64 %	19,54 %	20,56 %	19,58 %
Morrell	7,62 %	9,08 %	8,76 %	8,49 %
Valle	8,94 %	9,15 %	9,57 %	9,22 %
Error % promedio por carga de bolas	11,73 %	12,59 %	12,96 %	-

Fuente: Elaboración propia.

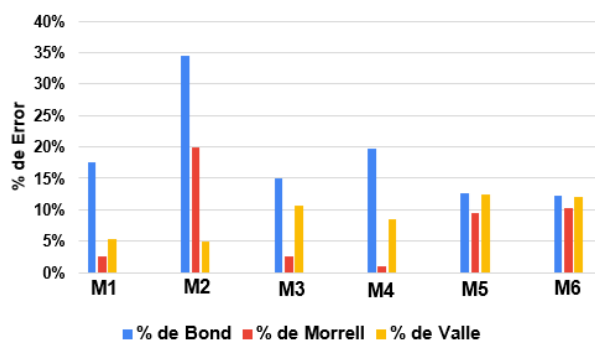


Figura 18. Porcentaje de error al 30 % de carga de bolas

Fuente: Elaboración propia.

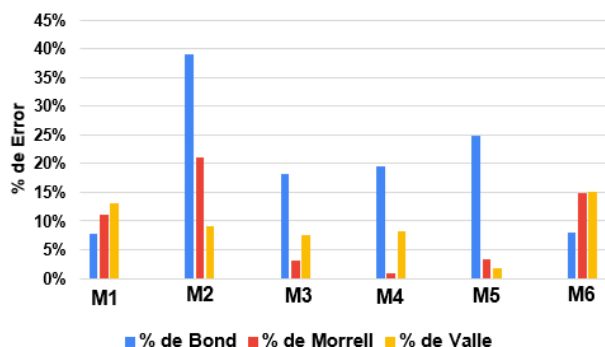


Figura 19. Porcentaje de error al 35 % de carga de bolas

Fuente: Elaboración propia.

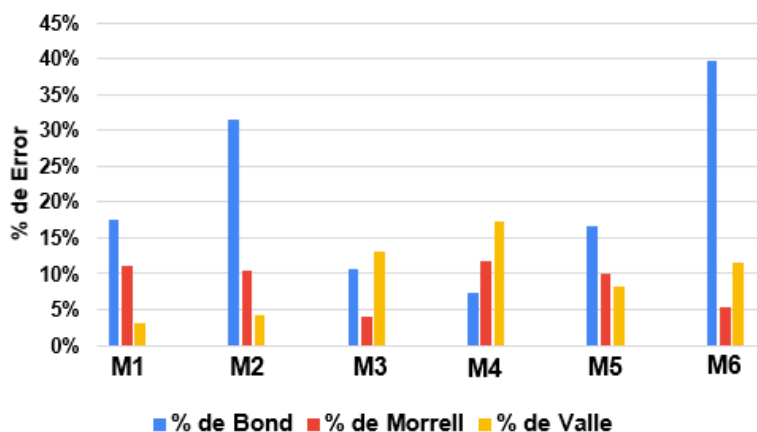


Figura 20. Porcentaje de error al 40 % de carga de bolas

Fuente: Elaboración propia.

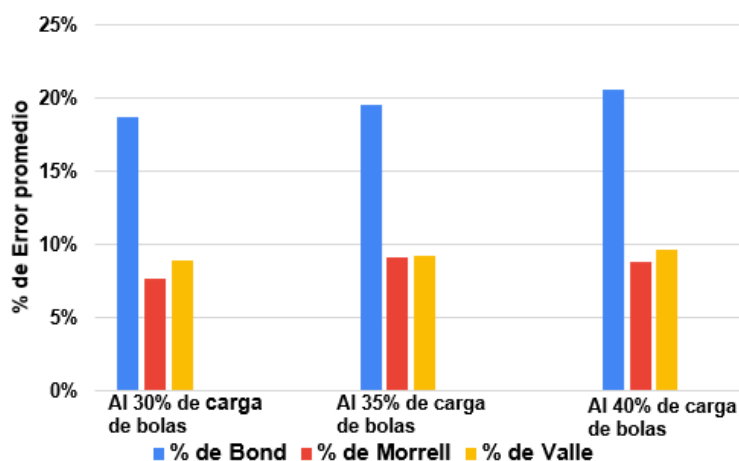


Figura 21. Error % promedio de las 6 muestras de minerales

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

Se demuestra que el modelo de Bond exhibió el mayor error promedio del 19,58 %, lo que indica limitaciones en su capacidad para predecir con precisión el consumo energético en la molienda de minerales mediante molinos de bolas. Esto se debe a su falta de adaptación a determinadas condiciones operativas específicas.

El modelo de Steve Morrell se destacó por presentar el menor error promedio del 8,49 %, demostrando una precisión notable en la predicción del consumo energético. Su robustez y menor variabilidad lo convierten en un modelo más confiable y aplicable en una amplia variedad de situaciones operativas.

El modelo de Roddy Valle se ubicó entre los de Morrell y Bond, con un error promedio del 9,22 %. Aunque evidencia una precisión intermedia, su aplicación puede resultar viable en condiciones específicas, aunque con ciertas limitaciones en su capacidad predictiva en comparación con el modelo de Morrell.

Se observa que, al aplicar los modelos matemáticos a distintas características granulométricas en la alimentación a nivel operacional, el error de cada modelo disminuye conforme se alcanzan ciertos valores típicos de $F_{(80)}$. Ello corrobora la aplicación del modelo más conocido, el de Bond, el cual funcionaba adecuadamente en molinos antiguos que presentaban alimentaciones del orden de entre 9000 y 10000 micras para dicho parámetro.

En todos los casos de las experiencias realizadas se verifica que el modelo de Bond es el que presenta mayor error; sin embargo, entre los modelos de Morrell y Valle existen diferencias en cuanto al error, debido a que, en algunas pruebas, el modelo de Valle resulta más preciso que el de Morrell y, en otras, ocurre lo inverso. Esto permite entender que el tamaño de alimentación desempeña un papel preponderante en el resultado final.

Un factor que se anticipaba en los resultados es el efecto de la carga de bolas. Cuanto más baja es la carga de bolas, mejor se comporta el modelo de Morrell, que toma como base la molienda SAG. En tanto se eleva la carga moledora a valores medios operacionales para molinos de bolas, el resultado es ligeramente más favorable para el modelo de Valle.

El modelo de predicción del consumo energético que, entre los enfoques analizados, proporciona resultados más precisos y aplicables en diversas condiciones operativas es el modelo de Steve Morrell.

Lo que se puede concluir finalmente es que los modelos matemáticos se adaptan a las granulometrías y cargas de bolas típicas en las cuales se evaluaron dichas ecuaciones, pero no son tan generales como se esperaba. Es decir, cuando se varía ese parámetro, el error se incrementa de manera considerable.

REFERENCIAS

- [1] Álvarez, B. (2010). *Análisis de la influencia de los modelos de distribución de tamaño de partículas en la determinación de consumos energéticos en molienda mediante el método de Bond* [Tesis doctoral, Universidad de Oviedo]. <https://core.ac.uk/download/pdf/71839999.pdf>
- [2] Arancibia, M. (2015). *Dimensionamiento de molino de bolas por el método de Bond, aplicando factores correctores de la fórmula*. <https://qaqc2000.blogspot.com/2015/10/dimensionamiento-de-molino-de-bolaspor.html>
- [3] Armas, H., & Poma, J. (2013). *Evaluación del consumo de energía eléctrica en la operación de conminución de la planta concentradora de Huari-UNCP* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú]. https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/577/TIMM_23.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [4] Casali, A. (2014). *Metodología para la determinación indirecta del índice de Bond en tamaños de partícula ultrafinos* [Tesis de ingeniería, Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/131772/Maximizacion-de-la-informacion-de-conminucion-obtenible.pdf?sequence=4>
- [5] Fernández, M. (2012). *Metodología para la determinación indirecta del índice de Bond en tamaños de partícula ultrafinos* [Tesis doctoral, Universidad de Oviedo]. https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/13449/TD_miguelonofrefernandez.pdf
- [6] Morrell, S. (2021). *The Morrell method to determine the efficiency of industrial grinding circuits: 2021 revision*. https://www.researchgate.net/publication/358220501_The-Morrell-Method-to-Determine-the-Efficiency-of-Industrial-Grinding-Circuits_2021_Revision

- [7] Torocahua, F. (2014). *Diseño e implementación de un tablero analizador de redes para la medición de parámetros eléctricos y de calidad de la energía eléctrica* [Tesis de bachiller, Universidad Católica de Santa María]. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12920/4704/4A.0172.IM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

ACERCA DEL AUTOR

Luis Clemente Huere Anaya

Es ingeniero metalurgista por la Universidad Nacional de Ingeniería, con amplia experiencia en plantas concentradoras de minerales polimetálicos (plomo, cobre, zinc y plata). Especialista en lixiviación de minerales cupríferos y auríferos, extracción por solventes, electrodeposición y tecnologías de carbón activado (CIC, CIL, CIP), así como en fundición de oro y plata. Es magíster en Ciencias de la Educación y cuenta con estudios doctorales en la Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle. Actualmente, es docente principal en Tecsup, consultor e investigador en procesamiento de minerales e hidrometalurgia.

Recibido: 25-04-25

Revisado: 17-09-25

Aceptado: 28-10-25



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.



↗ INDEXADOS EN LATINDEX 2.0



La Revista I+i ahora forma parte del Catálogo 2.0
de Latindex, **sello internacional de calidad
editorial.**



Cómo lograr una adecuada reducción de tamaño del mineral sin recurrir a procesos mecánicos de trituración.



Mine to pad en minería aurífera: estudio de caso (1996-2008) sobre fragmentación para lixiviación sin chancado en Perú

Mine-to-Pad in Gold Mining: A Case Study (1996-2008) on Fragmentation for Run-of-Mine (ROM) Leaching in Peru

RESUMEN

En el contexto de la minería a cielo abierto en el Perú, el presente estudio expone la experiencia de una operación aurífera que, desde 1994, implementa un proceso de lixiviación sin etapas de chancado ni molienda. El presente trabajo constituye un estudio de caso en una mina específica, cuyo objetivo principal es mostrar, con validación de planta metalúrgica, cómo una fragmentación promedio cercana a 4 pulgadas puede resultar adecuada para la lixiviación en este contexto particular, dadas las características geológicas del yacimiento.

El estudio abarca el periodo 1996-2008 y evalúa diversas técnicas aplicadas para optimizar el microfracturamiento del mineral, incluyendo sistemas de iniciación no eléctrica, electrónica, cámaras de aire y el uso de emulsión gasificada. La metodología se basa en el análisis operativo y granulométrico del P80 en pilas de lixiviación, así como en indicadores de costos asociados a perforación, voladura, carguío y tratamiento en planta.

La elección de una granulometría promedio cercana a 4 pulgadas se justifica porque ofrece un equilibrio entre la permeabilidad de las pilas, la exposición superficial del mineral y el control en la generación de finos. Este tamaño permitió mejorar la recuperación metalúrgica sin incrementar excesivamente los costos de perforación y voladura, validándose como el punto óptimo en este estudio de caso.

Entre los principales hallazgos, se evidencia que una adecuada secuencia de voladura incrementa la permeabilidad de las pilas y mejora la recuperación de oro, incluso en materiales de baja ley. Además, se observa que un aumento moderado del costo de perforación y voladura reduce los costos globales de minado.

Se concluye que el enfoque *mine to pad* es técnicamente viable, económicamente rentable y ambientalmente favorable al eliminar etapas de chancado, reducir el consumo energético y mantener un circuito cerrado en planta. Este modelo representa una alternativa eficiente para operaciones con mineralizaciones complejas o de baja ley.

ABSTRACT

In the context of open-pit mining in Peru, this study presents the experience of a gold operation that, since 1994, has implemented a leaching process without crushing or grinding stages (Run-of-Mine). The present work constitutes a case study of a specific mine, with the main objective of demonstrating, through metallurgical plant validation, how an optimal fragmentation near 4 inches can prove suitable for leaching in this particular context, given the geological characteristics of the deposit.

Covering the period from 1996 to 2008, the study evaluates various techniques aimed at optimizing ore microfracturing, including non-electric and electronic initiation systems, air decking, and the use of gassed emulsions. The methodology is based on operational analysis and P80 particle size distribution in leaching heaps, along with cost indicators related to drilling, blasting, loading, and plant processing.

The choice of an average particle size close to 4 inches is justified because it provides a balance between heap permeability, mineral surface exposure, and control of fines generation. This size improved metallurgical recovery without excessively increasing drilling and blasting costs, validating it as the optimal point in this case study.



Palabras Claves

Lixiviación, fragmentación de roca, voladura controlada, *mine to pad*, minería aurífera, perforación, recuperación.

Key words

Leaching, rock fragmentation, controlled blasting, Mine-to-Pad, gold mining, drilling, recovery.

The results evidence that an adequate blasting sequence increases heap permeability and improves gold recovery, even in low-grade materials. Furthermore, it is observed that a moderate increase in drilling and blasting costs results in a reduction of overall mining costs.

It is concluded that the "Mine-to-Pad" approach is technically feasible, economically profitable, and environmentally favorable, as it eliminates crushing stages, reduces energy consumption, and maintains a closed-loop process in the plant. This model represents an efficient alternative for operations with complex or low-grade mineralizations.

INTRODUCCIÓN

En las operaciones de minería aurífera a cielo abierto, los costos asociados a las etapas de chancado y molienda representan una parte significativa del gasto total de procesamiento, especialmente en yacimientos de baja ley. Este escenario plantea la necesidad de optimizar las primeras etapas del proceso de conminución, buscando alternativas más eficientes y rentables.

En este contexto, el presente estudio aborda el problema de cómo lograr una adecuada reducción de tamaño del mineral sin recurrir a procesos mecánicos de trituración. Específicamente, se investiga la aplicación de técnicas avanzadas de voladura para obtener una fragmentación óptima que permita la lixiviación directa del mineral, eliminando las etapas de chancado.

El objetivo principal del estudio es demostrar que, mediante un diseño adecuado de voladura orientado al microfracturamiento del mineral, es posible alcanzar resultados metalúrgicos favorables, reducir el costo total de minado y aumentar la eficiencia del proceso de recuperación de oro. Este enfoque, conocido como *mine to pad*, se presenta como una alternativa viable para ciertos contextos. Cabe señalar que existen antecedentes internacionales y latinoamericanos (Chile, México, Australia) que ya han explorado la lixiviación directa sin chancado, como los estudios de Morales y Riquelme [6] en Chile, Torres y Rojas [8] en Perú y México, y Kanchibotla [2] en Australia, lo que refuerza el sustento académico de este estudio de caso, lo que da mayor rigor académico a este estudio de caso.

La voladura es la primera etapa del proceso de conminución, compitiendo con las otras etapas de este proceso: chancado y molienda, precondicionando la roca para su posterior tratamiento de la forma más económica para el costo total de minado, siendo el objetivo la calidad de fragmentación como producto final.

FUNDAMENTOS

Diversos estudios en minería a cielo abierto han demostrado que el microfracturamiento inducido por voladura mejora significativamente la eficiencia del proceso de lixiviación al aumentar tanto la superficie específica del mineral como la permeabilidad de las pilas. Investigaciones como las de [1] y [8] han resaltado la importancia de una adecuada fragmentación para optimizar el rendimiento metalúrgico y reducir los costos globales de procesamiento.

Basado en esta evidencia, entre 1996 y 2008 se implementaron en una operación minera aurífera distintas tecnologías orientadas a perfeccionar el control de la fragmentación a través de la voladura. Estas incluyeron el uso de sistemas de iniciación no eléctrica, secuencias de disparo con retardos optimizados, incorporación de cámaras de aire en zonas de roca blanda a media, iniciación electrónica en zonas duras y el uso progresivo de emulsión gasificada.

El trabajo de investigación parte de la premisa de que una fragmentación controlada mediante voladura puede sustituir eficazmente las etapas de chancado, siempre que se logre un tamaño de partícula adecuado para la lixiviación. No obstante, se reconocen limitaciones como la variabilidad geológica del macizo rocoso, la heterogeneidad de las leyes minerales y la necesidad de adaptar constantemente los diseños de malla de perforación para lograr resultados consistentes.

En los últimos años, la optimización del proceso de fragmentación con fines de lixiviación ha cobrado relevancia dentro de la minería metálica a cielo abierto. Yancachajlla Tito evidenciaba, desde 2008 [9], la eficacia del enfoque *mine to pad* aplicado a la lixiviación de oro sin chancado, destacando la importancia del microfracturamiento del macizo rocoso para alcanzar una granulometría adecuada sin requerir etapas de molienda. Posteriormente, la continuidad de este trabajo fue reconocida internacionalmente con la aceptación de una versión actualizada en la 52.^a Annual Conference on Explosives & Blasting Technique del International Society of Explosives Engineers (ISEE), donde se amplía la discusión sobre la eficiencia energética y el impacto en la recuperación metalúrgica en operaciones auríferas. Estos avances reflejan una evolución sostenida del concepto, reafirmando su potencial como alternativa técnica y económica en los procesos de lixiviación sin conminución.

METODOLOGÍA

Se adoptó un enfoque empírico aplicado directamente en faena, integrando observaciones de campo y análisis granulométrico mediante procesamiento de imágenes. El objetivo principal fue evaluar cómo diferentes diseños de malla de perforación influyen en la eficiencia del proceso de lixiviación sin chancado, característico del concepto *mine to pad*.

Se evaluaron distintas configuraciones de malla (5,50 m y 4,80 m) considerando variables críticas como el tamaño del fragmento (P80), los índices de recuperación metalúrgica y los costos operativos asociados (perforación y voladura, carguío, acarreo y lixiviación). Para caracterizar la distribución granulométrica y analizar su relación con la permeabilidad de las pilas y la recuperación de metales, se empleó tecnología de análisis fotogramétrico. No obstante, este método mostró la limitación de subestimar la fracción fina, por lo que se recomienda complementarlo con muestreos físicos y con el uso de *softwares* de simulación, como JK Simblast, que permiten validar y optimizar los diseños de malla. Adicionalmente, se propone integrar cuadros comparativos que evidencien la cinética de lixiviación en función de diferentes granulometrías, así como un cuadro consolidado que relacione los costos de perforación y voladura con el costo final de producción, en reemplazo de múltiples cuadros parciales.

La elección de los procedimientos técnicos respondió a la necesidad de lograr una conminución eficiente desde la voladura, evitando etapas posteriores de chancado o molienda. En este marco, se aplicaron progresivamente tecnologías de detonación avanzadas, como sistemas de iniciación no eléctrica y electrónica, modificación de retardos de superficie (de 800/25 ms a 800/17 ms), uso de cámaras de aire y, más recientemente, retenedores de energía y emulsión gasificada.

Estas técnicas permitieron mejorar la secuencia de salida y maximizar el microfracturamiento de la roca, lo que favoreció una mayor exposición del mineral al agente lixivante. La aplicación práctica del estudio consistió en ajustar mallas de perforación y carga según la dureza del macizo rocoso, buscando siempre un equilibrio entre el costo de perforación y la eficiencia del proceso global, especialmente la recuperación metalúrgica.

Los resultados obtenidos permiten demostrar que un control preciso de la fragmentación inicial, alineado con un diseño técnico racional de la malla y el uso eficiente de la energía explosiva, reduce el costo total de minado y mejora significativamente la eficiencia del proceso metalúrgico sin chancado.

Inicialmente, se comenzó realizando voladuras sobredimensionando el explosivo para obtener una fragmentación mínima alrededor de 3 pulgadas; posteriormente se hicieron investigaciones acerca del tamaño ideal para el proceso óptimo en la lixiviación en pilas, logrando una fragmentación promedio que permitió la adecuada percolación de la solución hacia el fragmento poroso microfracturado.

En 2002 se modificaron las secuencias de salida para aprovechar el choque entre el fracturamiento producido entre pozo y pozo, realizando salidas de distintas maneras con doble y triple salida de taladros en el inicio para obtener una cara libre mucho mayor.

El análisis por imagen mostró el comportamiento de las variables granulométricas bajo un espaciamiento de malla de 5,50 m, sirviendo como base comparativa frente a diseños más densos (por ejemplo, 4,80 m o 4,50 m).

DESARROLLO

La voladura es la primera etapa del proceso de conminución, compitiendo con las otras etapas de este proceso (chancado y molienda), preacondicionando la roca para su posterior

tratamiento de la forma más económica para el costo total de minado, siendo el objetivo la calidad de fragmentación como producto final.

Al referirnos al producto final (fragmentación), no solo consideramos los procesos físicos como extracción, transporte, chancado y molienda. Ya se ha demostrado la importancia de la creación de microfracturas en el mineral para el tratamiento por parte de la planta metalúrgica, debido a la facilidad de molienda, a la disminución de su *work index*, al aumento de la eficiencia de la lixiviación y al incremento de la superficie específica.

Inicialmente, se comenzó realizando voladuras sobredimensionando el explosivo para obtener una fragmentación mínima alrededor de 3 pulgadas; posteriormente se hicieron investigaciones acerca del tamaño ideal para el proceso óptimo en la lixiviación en pilas, logrando una fragmentación promedio que permitió la adecuada percolación de la solución hacia el fragmento poroso microfracturado.

Proceso de lixiviación en pilas del mineral minado sin chancado en pad

La parte fundamental de las operaciones en esta mina a tajo abierto es la extracción de oro y plata a partir de la lixiviación del mineral en los *pads*, una vez almacenado en ellos el mineral extraído de los tajos y acondicionado con la cal necesaria para lograr un pH adecuado para la mejor recuperación de los metales. La lixiviación se realiza con una solución cianurada y alcalina que atrapa los metales al percolar por el *pad*.

La solución discurre por tuberías colocadas en el fondo del *pad* sobre una geomembrana de protección y es trasladada a la poza de solución rica (*pregnant*). Desde allí es bombeada a la planta, donde se encuentran las columnas de carbón activado que recolectan el oro y la plata contenidos en la solución. Luego, esta pasa a otra poza de solución pobre (*barren*), la cual es repotenciada y bombeada nuevamente hacia los *pads* para iniciar una nueva etapa de lixiviación. Como se observa, esto completa un circuito cerrado que no libera solución al medio ambiente.

Después de cargar con oro y plata las columnas con carbón activado, los carbones son trasladados a la planta de desorción a presión, donde se obtiene un cemento que contiene los metales. Dicho cemento se envía luego al horno de fundición, el cual, a 1100 °C de temperatura, permite obtener como producto final las barras doré con contenido de oro y plata.

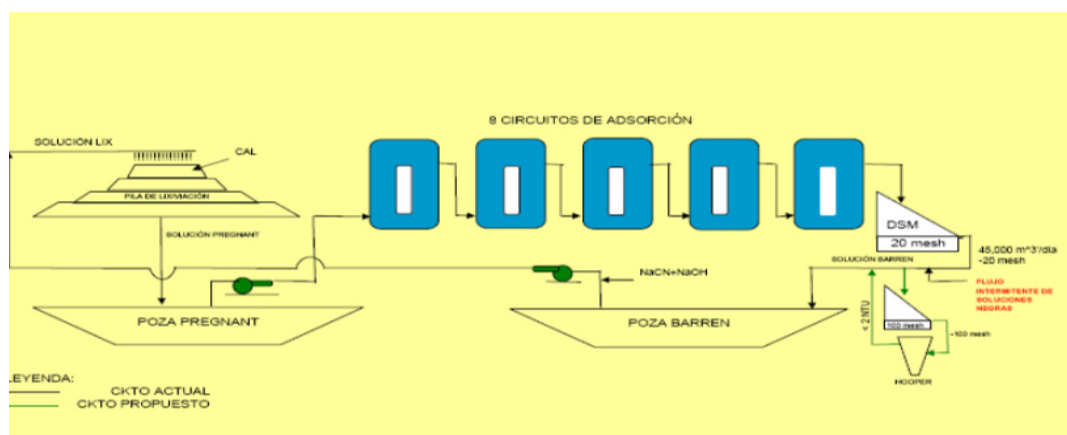


Figura 1. Flow sheeth: resumen de operaciones de lixiviación y adsorción en planta

Fuente: Departamento de Metalurgia - Compañía Minera Aurífera Santa Rosa SA

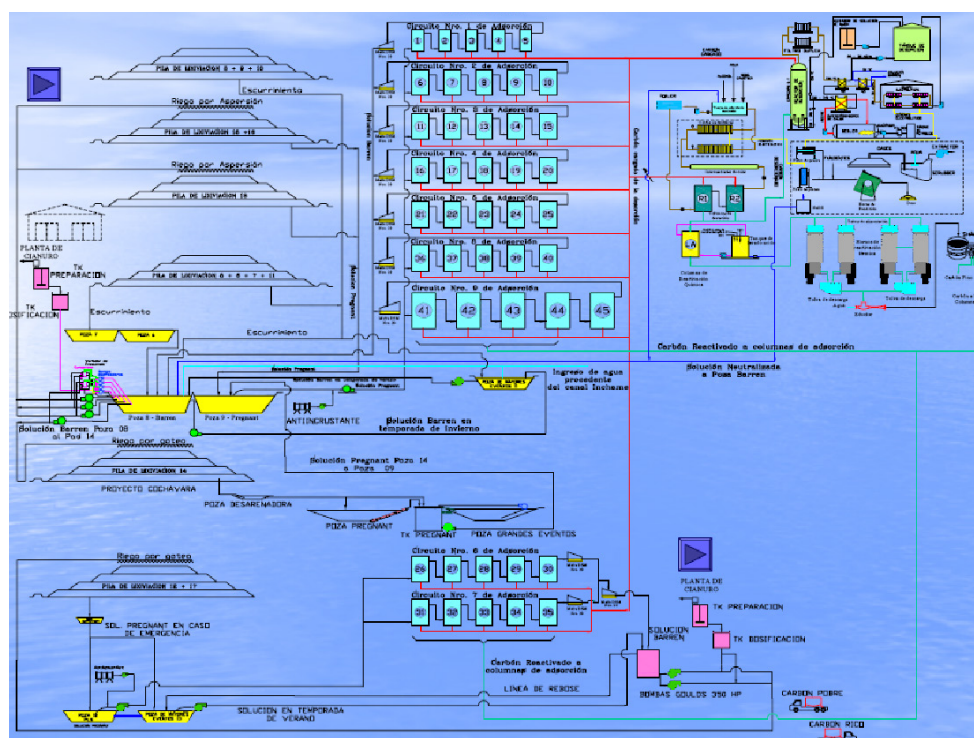


Figura 2. Diagrama de flujo de operación de la planta de beneficio

Fuente: Departamento de Metalurgia - Compañía Minera Aurífera Santa Rosa SA

Eficiencia de riego en las pilas de lixiviación

Es cierto que los problemas más comunes en este sistema de procesamiento son el taponamiento en las mangueras causado por el gotero o por el mineral, que, debido a la cantidad de finos, se compacta y forma canalizaciones internas que segregan la solución, además de la reducción de la calidad de riego y de la distribución de mineral y solución en las pilas.

Esta operación de lixiviación será controlada a través de las *ratios* de riego, la eficiencia de las mangueras de riego, los

taludes, el retiro de los taludes y el control horizontal de los pisos de descarga de mineral. Asimismo, la solución será controlada cada 12 horas para nivelar las concentraciones de cianuro y cal.

Sin embargo, las microfracturas del mineral volado depositado en las pilas de lixiviación constituyen un parámetro importante, puesto que de ello dependerán la velocidad de riego y el alcance para una buena lixiviación, siendo también una ventaja en la recuperación metalúrgica, al obtenerse mejores índices de rendimiento para la planta. Este es uno de los factores que influyen en la eficiencia de riego que a continuación mencionaremos.



Figura 3. Sistema de riego y salida de solución

Fuente: Departamento de Metalurgia - Compañía Minera Aurífera Santa Rosa SA

Fragmentación óptima como único proceso de conminución (reducción de tamaño) para lixiviación

Debido a que los minerales se encuentran asociados a la ganga, se hace necesaria la reducción de tamaño por voladura, de manera que exista una liberación de los granos minerales desde la matriz mediante la microfracturación durante la detonación.

La reducción de tamaño es la etapa de mayor consumo energético, por lo que debe ser óptima para asegurar un buen regadío en las pilas de lixiviación y evitar problemas en la velocidad de riego y en la recuperación que provocaría la generación de partículas demasiado finas, las cuales perjudican la etapa global de concentración.

La conminución comienza y termina durante el proceso de detonación de los taladros mediante la interacción, en milisegundos, entre las fuerzas de compresión entre ellos y también por la interacción roca-roca como producto del primer proceso. Como el producto generado tiene un tamaño adecuado para el tratamiento metalúrgico de concentración, no se hacen necesarias etapas posteriores de molienda, siendo prioritario únicamente volar el mineral de la manera óptima y obtener una fragmentación sin chancado.

Los minerales a lixiviar son preparados mecánicamente con una reducción de tamaño adecuada, de modo que se exponga una gran superficie que permita un contacto íntimo entre la solución y la superficie del mineral, además de una etapa de aglomeración en la cual se consigue la adhesión de partículas finas a las más gruesas, permitiendo una distribución uniforme de tamaño en la alimentación a las pilas de lixiviación.

El microfracturamiento de la roca para la lixiviación tiene por objeto incrementar la permeabilidad natural mediante la creación de nuevas grietas o fisuras que sirvan de paso para la circulación del fluido. La fractura por voladura utiliza detonaciones que generan grietas y fracturas iniciales que permiten la exposición del mineral para ser atacado por el líquido que circula a través de él.

Tamaño de partícula

El oro grueso no podrá ser disuelto completamente en el tiempo disponible para llevar a cabo el proceso de cianuración. El tamaño de partícula condiciona el esquema de procesamiento del mineral. Oro fino y limpio: cianuración. Una partícula de oro de 45 micras no tarda más de 12 horas en disolverse y una de 150 micras no tarda más de 48 horas.

Permeabilidad de la pila

La permeabilidad de la pila durante la operación de lixiviación es el principal factor a considerar para obtener la máxima recuperación del mineral. La aglomeración de grandes cantidades de mineral con arcilla mejora la permeabilidad y hace el proceso más efectivo. El método para la aplicación de la solución de lixiviación, como se mencionó anteriormente, puede influir significativamente en la porosidad cerca de la superficie, en el movimiento de la solución a través de esta y en el resultado final al obtener el oro.

Mine to pad

Este nuevo concepto, también llamado *mine to leach*, consiste en fragmentar para lixiviar oro sin chancar ni moler; el material volado es depositado directamente en las pilas de lixiviación para su riego y posterior procesamiento hasta la obtención de la barra de oro. Esta es una de las primeras faenas que innova este concepto para un minado selectivo y errático en los proyectos de voladura.

Historial de las técnicas usadas en la voladura para el microfracturamiento (1996-2008)

2000: implementación del uso del sistema de iniciación no eléctrico.

2002: mejoramiento en las secuencias de salida en los disparos para el microfracturamiento de la roca.

2004: cambio de los retardos de superficie de 800/25 MS a 800/17 MS

2006: aplicación de cámaras de aire en zonas de roca suave y media.

2007: iniciación electrónica en zonas duras de los tajos.

2008: uso de retenedores de energía en todos los tipos de dureza.

2008: proyecto de reemplazo de Anfo Pesado a emulsión gasificada.

Implementación del uso del sistema de iniciación no eléctrico

A inicios de la operación minera de dicho tajo se realizaba la voladura con cordón detonante en todos los diseños. A consecuencia de disparos mal secuenciados, mala fragmentación, baja recuperación metalúrgica y efectos ambientales adversos, se implementó en 2000 el sistema de iniciación no eléctrica, obteniéndose buenos resultados: disminución de los niveles de vibración, mejoramiento de la fragmentación, ligero aumento de la recuperación metalúrgica y minimización de los tiros quedados. Si bien es cierto que se incrementó el costo de voladura, se redujo el costo total de minado.

Mejoramiento en la secuencia de salida mediante el microfracturamiento de la roca

En 2002, se modificaron las secuencias de salida para aprovechar el choque entre el fracturamiento producido entre pozo y pozo, realizando salidas de distintas maneras, con doble y triple salida de taladros en el inicio, para obtener una cara libre mucho mayor y con ángulos de cara libre superiores.

Se obtuvieron mejores resultados que los anteriores, reduciendo el costo total de minado con respecto a los años previos.

Cambio de los retardos de superficie de 800/25 ms a 800/17 ms

En 2004, al modificarse previamente las secuencias de salida, se hizo necesario reducir los retardos de superficie de 800/25 ms a 800/17 ms para aprovechar mejor el proceso de microfracturamiento de la roca entre pozo y pozo durante la voladura.

Ello permitió realizar diseños de salida más amplios, mejorando también el direccionamiento de los polvorazos.

Aplicación de cámaras de aire en zonas de roca suave y media

En 2006, al presentarse dificultades en las proyecciones y *fly rock*, se adicionaron las cámaras de aire únicamente para roca suave y roca media en todos los tajos de la mina. Se redujeron las proyecciones de roca, se disminuyó la carga por pozo y se ampliaron los espaciamientos de los diseños de malla de perforación en los tipos de roca mencionados.

Iniciación electrónica en zonas duras de los tajos

En 2007, ante el desafío de mejorar los diseños en tajos de roca dura y muy dura, se implementó la iniciación electrónica, obteniéndose excelentes resultados, ampliándose el espaciamiento hasta más de 0,40 cm en las mallas mencionadas para incrementar la recuperación metalúrgica del oro en los *pad*s.

Se incrementó considerablemente el costo de voladura, pero se compensó con el costo total de minado; sin embargo, el

aumento del espaciamiento de la malla de perforación también contribuyó a reducir dicho incremento. El microfracturamiento en este sistema fue realmente notable en diversos aspectos: secuencia de salida, reducción del factor de potencia, disminución del costo de perforación y mayor seguridad proporcionada por el sistema electrónico, así como en el costo total de minado.

Uso de retenedores de energía en todos los tipos de dureza (año 2008)

Este tipo de accesorio está aún a prueba; al inicio se probó a 0,40 cm de la carga continua del taladro, para luego reducirlo a 0,30 cm de dicha columna de carga. Ello permitió aprovechar mejor la energía y mejorar la fragmentación en la parte superior del taladro.

Proyecto de reemplazo de Anfo Pesado a emulsión gasificada (año 2008)

Este proyecto recién se está iniciando y está programado para diciembre de este año, contando con diseños preliminares en tajos de dureza media.

Análisis del efecto de la fragmentación con respecto a la lixiviación

En el cuadro que se aprecia se observa claramente cómo los costos de carguío y remoción de mineral en un tajo modelo de una minera de oro disminuyen al aumentar ligeramente el costo de perforación y voladura:



Figura 4. Costo de perforación y voladura vs. costo de carguío y remoción

Fuente: Departamento de Metalurgia - Compañía Minera Aurífera Santa Rosa SA

En el gráfico siguiente, se visualiza el costo de producción US\$/TM mineral puesto en *pad*:

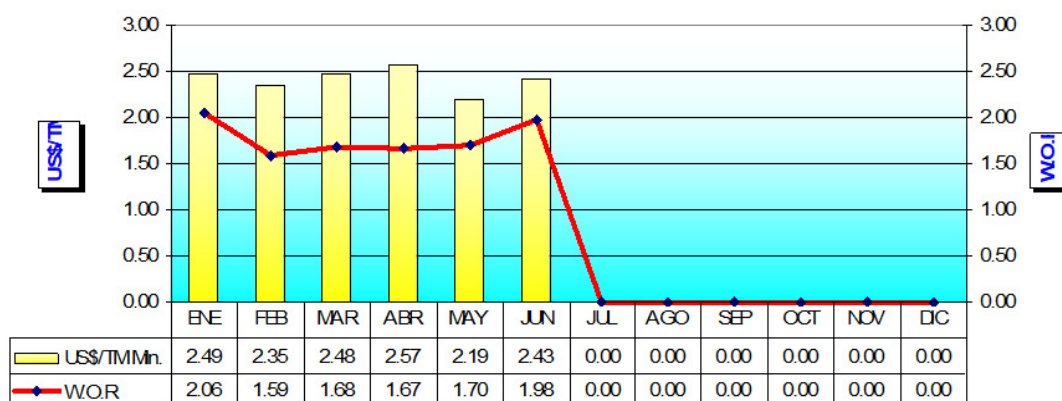


Figura 5. Costo de producción de US\$/TM en mineral puesto en *pad*

Fuente: Departamento de Metalurgia - Compañía Minera Aurífera Santa Rosa SA

Costos (consideraciones)

- Es rentable reducir el espaciamiento de perforación y voladura.
- Un mineral mejor fragmentado será mejor lixiviado.
- Comparar la fragmentación ROM del año 2001 a malla D&B triangular (4,80m x 4,80m) con la fragmentación que obtendríamos reduciendo la malla de perforación y voladura triangular (4,50m x 4,50m).

- Tomar en cuenta que lo importante es el incremento en extracción.

Granulometría por imagen

Realizando un análisis por imagen se muestra el comportamiento de las variables evaluadas para una malla de perforación y voladura de 5,50 m de espaciamiento:

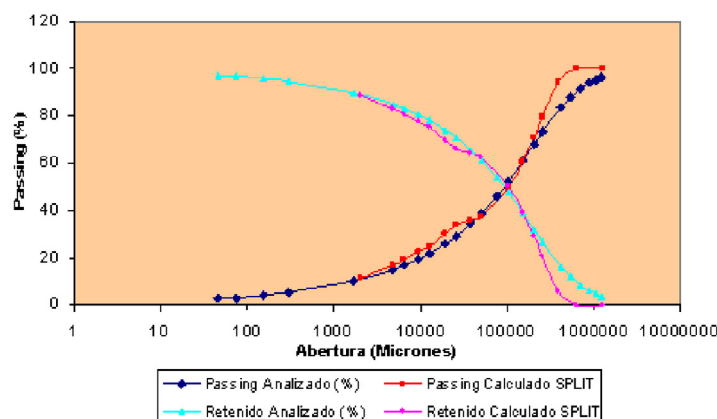


Figura 6. Proyecto 103 malla de voladura 5.50 m

Fuente: Departamento de Metalurgia - Compañía Minera Aurífera Santa Rosa SA

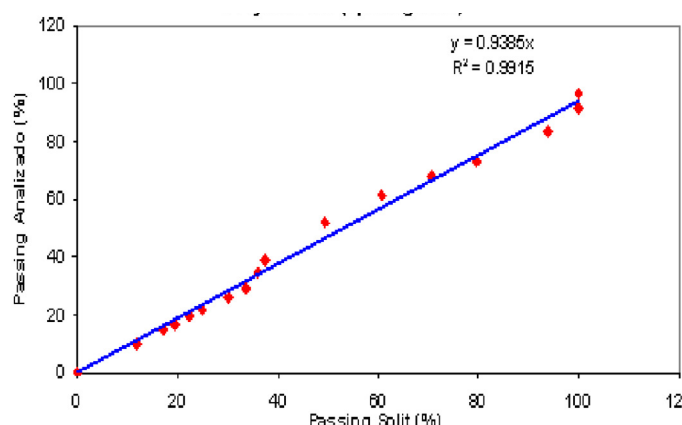


Figura 7. Proyecto 103 (espaciamiento 5.50 m)

Fuente: Departamento de Metalurgia - Compañía Minera Aurífera Santa Rosa SA

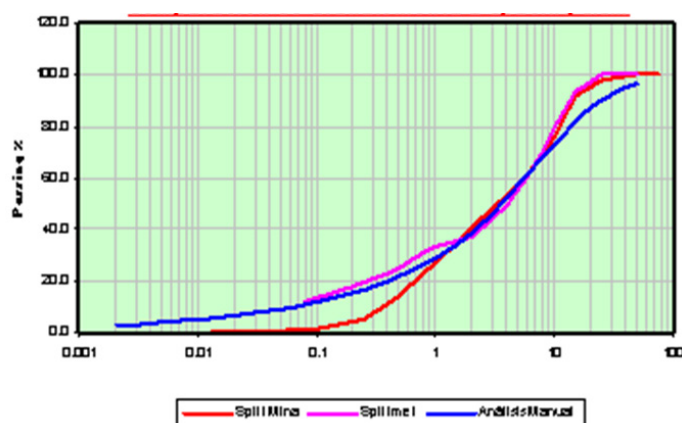


Figura 8. Comparación de granulometría a spacing 5.50 m

Fuente: Departamento de Metalurgia - Compañía Minera Aurífera Santa Rosa SA

Reducción del costo total de minado

A continuación, apreciamos cómo los costos tanto en carguío, transporte y planta se reducen a medida que el costo de

perforación y voladura aumenta en cierta medida, optimizando el costo total de minado.

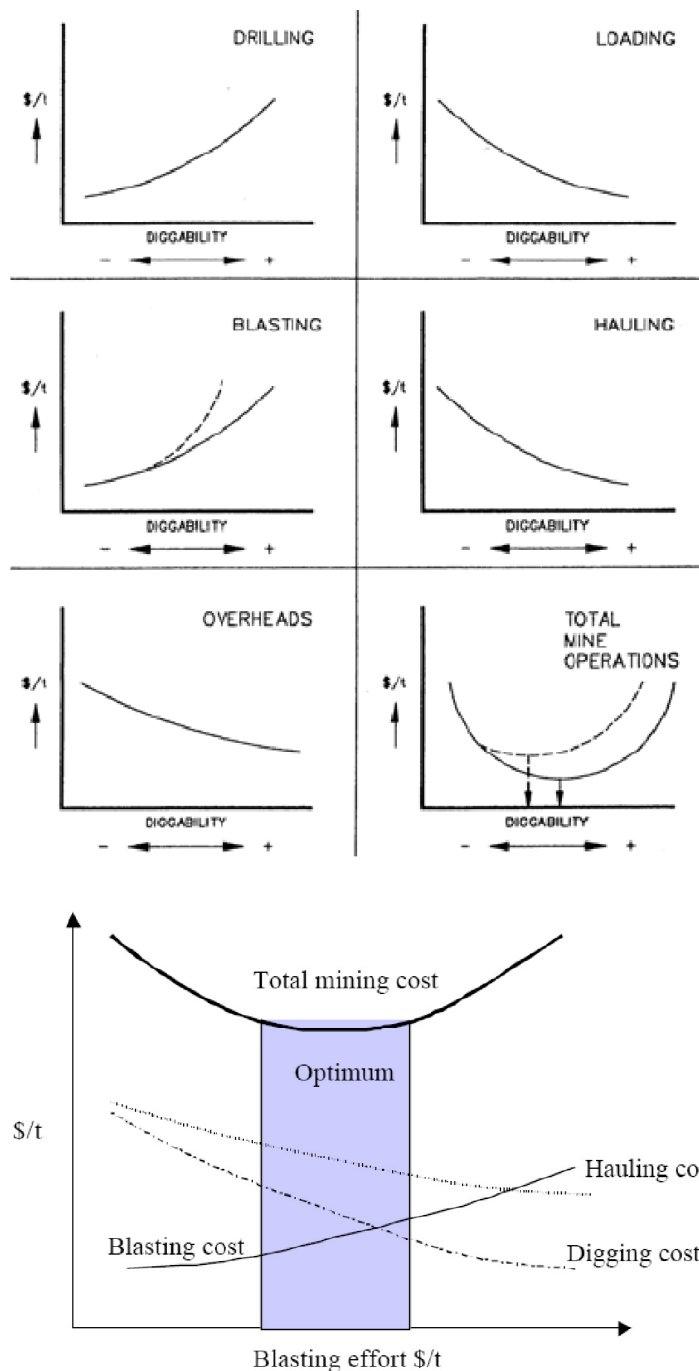


Figura 9. Costo de D&B vs. costo global de minado

Fuente: Departamento de Metalurgia - Compañía Minera Aurífera Santa Rosa SA

Índices de trabajo en los procesos de lixiviación de oro sin chancado

Los índices de trabajo y de gestión muestran el mejoramiento en todos los procesos y en el mencionado:

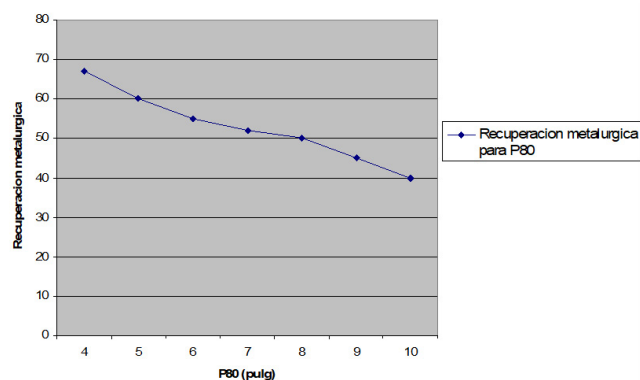


Figura 10. Recuperación metalúrgica de Au en función P80

Fuente: Elaboración Propia

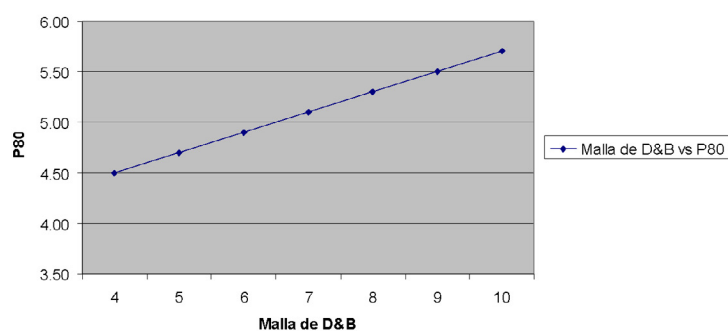


Figura 11. Influencia de la malla de D&B sobre el P80

Fuente: Elaboración Propia

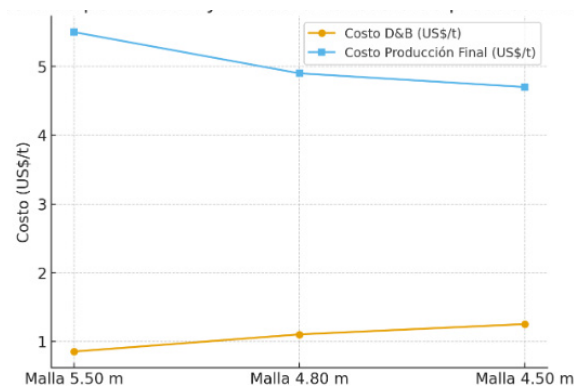


Figura 12. Costo de D&B vs. costo de producción final

Fuente: Elaboración Propia

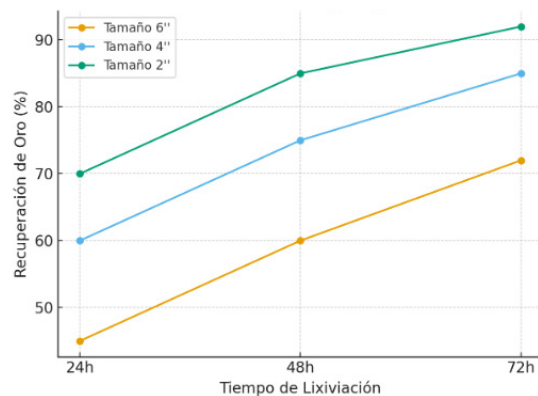


Figura 13. Costo de D&B vs. costo de carguío y remoción mineral

Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS

El estudio permitió demostrar que es posible optimizar el proceso de lixiviación de oro sin necesidad de etapas de chancado o molienda mediante un diseño adecuado de mallas de perforación y la aplicación de tecnologías de detonación orientadas al microfracturamiento de la roca.

En este estudio de caso en la mina Especifica, los resultados muestran que la reducción del espaciamiento de la malla de perforación de 5,50 m a 4,80 m permitió obtener una fragmentación más adecuada, con un P_{80} más fino que favoreció la permeabilidad de las pilas y mejoró la eficiencia del riego, lo que se tradujo en un aumento de la recuperación metalúrgica. Esta mejora se evidenció en los análisis granulométricos por imagen, donde se observó una mayor proporción de partículas porosas y de tamaño cercano a 4 pulgadas, incrementando el área superficial disponible para el contacto con la solución lixiviante. Sin embargo, este hallazgo debe entenderse como propio de este caso particular, ya que su aplicabilidad depende de la geología y la mineralización del yacimiento. Es importante señalar que el método de análisis granulométrico por imagen subestimó la presencia de finos, por lo que futuras investigaciones deberían complementarse con técnicas de muestreo físico o métodos alternativos para obtener una caracterización más precisa.

A nivel económico, si bien se evidenció un aumento en los costos de perforación y voladura debido al uso de tecnologías como la iniciación electrónica y los retenedores de energía, estos fueron ampliamente compensados por la disminución de los costos en las etapas posteriores de carguío, acarreo y procesamiento. El análisis comparativo mostró que el costo total de minado se redujo, validando el enfoque de inversión inicial en la fase de voladura como una estrategia rentable.

Asimismo, se observaron beneficios colaterales importantes: reducción de tiros quedados, menor generación de proyecciones (*flyrock*) al aplicar cámaras de aire en zonas de roca media y suave, y una mejora en la seguridad operativa y en la estabilidad de los *pads*.

Contrario a la expectativa inicial, se identificó una limitación en el análisis granulométrico por imagen, ya que este método subestimó la proporción de finos presentes en algunos casos, lo que sugiere la necesidad de complementar este análisis con muestreo físico para obtener una curva granulométrica más precisa.

La implementación de sistemas de iniciación electrónica en zonas duras permitió ampliar el espaciamiento hasta más de 0,40 m en las mallas, incrementando la recuperación metalúrgica del oro en los *pads*.

A medida que el costo de perforación y voladura aumentaba moderadamente, se observó una disminución significativa en los costos de carguío, transporte y procesamiento en planta, optimizando el costo total de minado.

Finalmente, se confirmó que el microfracturamiento no solo mejora la disolución del oro, sino que también reduce el *work index* del mineral, contribuyendo indirectamente a la eficiencia global del sistema de procesamiento sin chancado.

Esto refuerza la validez del concepto *mine to pad* como una alternativa eficaz para operaciones de oro con leyes medias a bajas y condiciones geológicas favorables.

CONCLUSIONES

Es posible optimizar el proceso de lixiviación de oro sin necesidad de chancado ni molienda, siempre que la voladura se diseñe con criterios que prioricen una fragmentación adecuada y la generación de microfracturas en el mineral. Esto valida el enfoque *mine to pad* como técnica viable en minería aurífera a tajo abierto.

El microfracturamiento inducido por una voladura correctamente secuenciada y técnicamente diseñada mejora sustancialmente la recuperación metalúrgica, al facilitar la penetración de la solución cianurada en el mineral y aumentar su área de reacción. La calidad del riego y la velocidad de disolución están directamente vinculadas a esta condición.

La decisión de invertir más en la etapa de perforación y voladura se justifica plenamente, ya que los beneficios en términos de reducción del costo total de minado, mayor recuperación de oro y mejoras operativas superan el incremento inicial en costos. Este equilibrio económico se confirmó al comparar escenarios con distintas mallas de perforación.

La reducción de espaciamientos en la malla de perforación (de 5,50 m a 4,80 m) permitió mejorar la fragmentación sin generar un exceso perjudicial de finos, demostrando que un control técnico del diseño puede traducirse en mejores índices de recuperación sin penalizar la permeabilidad ni la estabilidad del *pad*.

La aplicación de tecnologías de detonación avanzadas (como iniciación electrónica, retardos ajustados y retenedores de energía) fue clave para alcanzar los objetivos del estudio, aportando precisión, seguridad y eficiencia al proceso de voladura.

Los resultados responden afirmativamente a las interrogantes iniciales: es técnica y económicamente viable fragmentar el mineral adecuadamente desde la voladura para prescindir del chancado, siempre que se apliquen criterios de diseño, control granulométrico y tecnologías apropiadas en campo.

El enfoque *mine to pad*, presentado inicialmente por Yancachajlla Tito en las Jornadas de Tronadura ASIEX 2008 [9], y posteriormente validado en la 52.ª Annual Conference on Explosives & Blasting Technique del ISEE 2026, demuestra su eficacia como alternativa sostenible en la lixiviación aurífera sin chancado, al integrar el control de fragmentación con la optimización metalúrgica y energética del proceso.

En conclusión, este estudio de caso en la mina Especifica confirma la viabilidad técnica y económica del enfoque *mine to pad* bajo condiciones geológicas particulares que favorecen la exposición del oro en granulometrías gruesas. No obstante, los hallazgos no deben extrapolarse a toda la minería aurífera, ya que dependen de la mineralización y de las condiciones de cada yacimiento. Además, resulta importante reconocer que el análisis granulométrico por imagen subestimó la fracción fina, por lo que futuros estudios deberán complementarse con muestreos físicos o métodos alternativos.

REFERENCIAS

- [1] Chaves, A., & Peres, A. (2011). *Mineral liberation and the role of particle size in heap leaching kinetics*. Minerals Engineering, 24(12), 1328-1334. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.06.018>
- [2] Kanchibotla, S. (2003). *Optimum blasting? Is it minimum cost per broken rock or maximum value per tonne?* En The Australasian Institute of Mining and Metallurgy (AusIMM), *Proceedings*. Brisbane.
- [3] Morales, R., & Riquelme, R. (2017). Rock fragmentation and its effect on heap leaching recovery in open-pit gold mining. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 117(8), 765-774. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2017/v117n8a6>
- [4] Torres, C., & Rojas, J. (2019). *Innovaciones en lixiviación aurífera en pilas: Experiencias en Perú y México*. Congreso PERUMIN 34, Arequipa, Perú.
- [5] Yancachajlla Tito, D. (2008). *Mine to Pad: Fragmentación para lixiviación de oro sin chancado*. En *VIII Jornadas de Tronadura ASIEX 2008*. La Libertad, Perú. <https://www.asiex.cl/jornadas2008>
- [6] Yancachajlla Tito, D. (2026, enero 20-25). *Mine to Pad: Fragmentation for Gold Leaching without Crushing*. En *52.ª Annual Conference on Explosives & Blasting Technique (ISEE)*, Reno, Nevada, Estados Unidos. <https://www.isee.org>

ACERCA DEL AUTOR

Dino Yancachajlla Tito

Es ingeniero especializado en operaciones mineras con experiencia en perforación, voladura y optimización de procesos de conminución en minería a tajo abierto. Ha desarrollado estudios aplicados en fragmentación para lixiviación sin chancado y liderado iniciativas orientadas a la eficiencia operativa y reducción de costos en faena. Ha participado como expositor en congresos técnicos nacionales. Actualmente, continúa vinculado al sector minero como consultor y formador técnico.

 dyancachajlla@tecsup.edu.pe

Recibido: 03-06-2025

Revisado: 22-09-2025

Aceptado: 07-10-2025



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.

Machine learning para identificar cuáles son las variables relevantes que causan la deserción estudiantil.



Implementación de modelos de aprendizaje automático para predecir la deserción estudiantil en Tecsups, 2024

Implementation of machine learning models to predict student dropout at Tecsups, 2024

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo principal pronosticar si un estudiante desertará o no en el 2024 en Tecsups implementando para ello distintos modelos de clasificación de *machine learning* y elegir el mejor, además de identificar cuáles son las variables relevantes que causan la deserción estudiantil. La justificación para este estudio es que, de acuerdo con la revisión de literatura, la deserción es un problema que sigue aquejando a las instituciones educativas peruanas y, por esta razón, se quieren tomar medidas preventivas para evitar que un estudiante abandone sus estudios en Tecsups.

El alcance de este estudio es descriptivo; el diseño es no experimental, transversal y descriptivo. La población está conformada por 38 835 registros de estudiantes en el periodo 2019-2022 con información de tipo personal, académica y financiera, entre las más importantes. No se llevó a cabo un muestreo para contar con la mayor cantidad de datos posible y obtener mayor precisión en la predicción. Asimismo, se usaron técnicas estadísticas como mapa de calor, histograma, gráfico de distribución, gráfica de cajas, gráfico de barras, gráfico de barras dobles y tablas; se implementaron ocho distintos modelos de clasificación mediante *Python* a través de *Jupyter Notebook* para su procesamiento.

Por otra parte, dentro de los resultados más destacados tenemos la alta correlación existente (0,92) entre las variables cantidad de cursos cursados y cantidad de cursos aprobados, por lo cual se procedió a eliminar la primera debido a que es la suma de la cantidad de cursos aprobados y cursos desaprobados. Se llevó a cabo un proceso de discretización para las variables cantidad de cursos aprobados, cantidad de cursos desaprobados, edad y estado de pago de pensión a tiempo, quedando al

final con 4, 4, 9 y 2 categorías, respectivamente. Del total de 50 variables numéricas que se obtuvieron luego de un proceso de dummificación, se eligieron 36 de estas como las más relevantes en la deserción. De los ocho modelos de clasificación propuestos (regresión logística, k-NN, árbol de decisión, *random forest*, XGBoost, LightGBM, CatBoost y red neuronal multicapa), finalmente se eligió LightGBM con un valor de exactitud en el conjunto de entrenamiento de 0,9512 y un valor de exactitud en el conjunto de prueba de 0,8892.

Consecuentemente, se puede considerar al modelo LightGBM como uno adecuado para pronosticar la deserción debido a su alta capacidad de generalización por su elevado valor de exactitud en el conjunto de prueba y la ausencia de sobreajuste por su mínima diferencia entre los valores de exactitud en el conjunto de entrenamiento y prueba (0,0619). Además, este modelo posee ventajas como mayor velocidad de entrenamiento, menor uso de memoria y mayor exactitud en comparación con otros modelos de clasificación.

ABSTRACT

The main objective of this study is to predict whether a student will drop out at Tecsups in 2024 by implementing different machine learning classification models and selecting the best one, while also identifying the relevant variables that cause student dropout. The justification for this study is that, according to the literature review, dropout remains a persistent challenge for Peruvian educational institutions, and for this reason, preventive measures are needed to prevent students from abandoning their studies at Tecsups.

The scope of this study is descriptive; the design is non-experimental, cross-sectional, and descriptive. The population consists of 38,835 student records from the 2019-2022 period,



Palabras Claves

Deserción estudiantil, preprocesamiento de datos, modelos de clasificación, predicción, exactitud, aprendizaje automático, minería de datos

Key words

Student dropout, data preprocessing, classification models, prediction, accuracy, machine learning, data mining.

comprising personal, academic, and financial data. No sampling was performed in order to utilize the entire dataset and maximize prediction accuracy. Additionally, exploratory data analysis employed heat maps, histograms, distribution graphs, box plots, bar charts, double bar charts, and tables; eight different classification models were implemented using Python and Jupyter Notebook for processing.

Notably, a high correlation (0.92) was found between the variables "number of courses taken" and "number of courses passed." Therefore, the former was eliminated because it is the sum of the number of courses passed and failed. A discretization process was carried out for the variables "number of courses passed," "number of courses failed," "age," and "on-time tuition payment status," resulting in 4, 4, 9, and 2 categories, respectively. Of the total of 50 numerical variables obtained after generating dummy variables, 36 were selected as the most relevant to dropout rates. Of the eight proposed classification models (logistic regression, k-NN, decision tree, random forest, XGBoost, LightGBM, CatBoost, and multilayer perceptron), LightGBM was ultimately chosen with an accuracy of 0.9512 on the training set and 0.8892 on the test set.

Consequently, the LightGBM model can be considered suitable for predicting dropout due to its high generalization capacity—evidenced by its high accuracy on the test set—and the absence of overfitting, indicated by the minimal difference between the accuracy values on the training and test sets (0.0619). Furthermore, this model has advantages such as faster training speed, lower memory usage, and higher accuracy compared to other classification models.

sus estudios y terminan por abandonarlos. El porcentaje de deserción en Estados Unidos llegó a ser 40 %, mientras que en la Unión Europea alcanzó el 24 % para estudiantes de pregrado según Rudin en el 2019 (citado en [10]). Por otro lado, en América Latina, los porcentajes de deserción en Colombia, Perú y Chile fueron, respectivamente, 31 %, 23 % y 23 % en el 2019 según Behr (citado en [10]).

El primer año de estudios ha sido identificado como crítico en términos de deserción y un tercio de los estudiantes abandona la universidad de acuerdo con Feldman (citado en [11]). Por otra parte, Reason (citado en [11]) afirma que esta cifra llega al 62 %. Braxton (citado en [11]) concluyó que las características preuniversitarias influyen de forma directa en que un estudiante abandone la universidad.

Según Sineace (citado en [19]), de los más de 400 000 estudiantes que cursan estudios en institutos de educación superior, en Lima, con alrededor de 198 196 estudiantes, aproximadamente el 36 % no logró graduarse y cada año 90 000 abandonan sus estudios, de los cuales el 70 % pertenece a instituciones privadas y el resto a instituciones del Estado.

El objetivo de este trabajo es determinar si un estudiante desertará o no en el instituto tecnológico Tecsup en el 2024. Para ello, se implementarán distintos modelos de clasificación para realizar dicha predicción, eligiendo el mejor modelo, además de efectuar un análisis de cuáles son las características más importantes que provocan la deserción estudiantil utilizando datos de las diversas áreas involucradas dentro de la institución.

INTRODUCCIÓN

La interrupción de estudios es un problema que afecta no solo al sistema educativo básico, sino también al superior a nivel mundial. De acuerdo con el Ministerio de Educación (Minedu) [18], en un informe de la Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria (Sunedu) de 2022 y con información de la Encuesta Nacional de Hogares (Enaho) del mismo año, 17,6 % de los estudiantes abandonaron sus estudios debido a que sus padres no contaban con estudios superiores y 14 % cuyos padres tenían estudios superiores completos. Además, 21,9 % desertaron porque contaban con un miembro dependiente del hogar y 13,8 % que no contaban con miembros dependientes, es decir, niños o adultos mayores que requieren cuidados por parte de los estudiantes. Por último, no hubo diferencias en la deserción con respecto al género y los gastos de estos.

Algo más grave que el problema anterior es lo que se conoce como deserción estudiantil, existiendo varias definiciones para esta. Tinto (citado en [26]) afirma que la deserción es una situación en la que un estudiante no logra concretar sus proyectos educativos. Además, Tinto (citado en [26]) considera que no hay una definición exacta y sostiene que los investigadores utilizan aquella que resulte más apropiada para su estudio. Según Díaz (citado en Viale, 2014), a pesar de que no existe una definición precisa, sí hay consenso en caracterizarla mediante distintas categorías de variables como socioeconómicas, individuales, institucionales y académicas.

Source (citado en [10]) afirma que la cantidad de estudiantes que cursan educación superior se ha incrementado de 196 millones a 250 millones en el 2021, pero muchos de ellos no logran culminar

FUNDAMENTOS

En el trabajo titulado «Factores asociados a la deserción estudiantil en el ámbito universitario. Una revisión sistemática 2018-2023», Villegas y Núñez [28] tienen como objetivo realizar una revisión de la literatura para determinar los factores más importantes que influyen en la deserción estudiantil y así reducirla, efectuando una búsqueda en el periodo 2018-2023 en WoS (52 %), Scopus (22 %) y Redalyc (26 %), cuyos resultados mostraron que dichos factores se pueden dividir en aspectos sociológicos, psicológicos y económicos. Además, Pedroza, Chindoy y Rosado [9], en su trabajo titulado «Review of techniques, tools, algorithms and attributes for data mining used in student desertion», tienen como objetivo identificar factores comunes mediante una búsqueda literaria sobre deserción estudiantil, siendo los criterios seguidos las técnicas, algoritmos, herramientas y atributos de la publicación, donde la mayoría de investigaciones se relacionan con el aprendizaje supervisado y la técnica más utilizada es la clasificación, mientras que el algoritmo predominante es J48.

Fernández y Silva [11], en su trabajo titulado «Deserción estudiantil universitaria en el primer semestre. El caso de una institución de educación superior ecuatoriana», tienen como objetivo identificar relaciones entre variables preuniversitarias y la deserción estudiantil en el primer semestre de estudio en una universidad de Ecuador, con base en 1276 registros de estudiantes censados en un diseño transversal. Concluyen que los estudiantes mayores de 20 años y que llevan más de cinco cursos desertan 2,6 veces más que los menores, y también que las variables nota de colegio y nota de examen de admisión no influyen en la deserción. Por otra parte, Aleans [2], en su trabajo titulado «Determinantes de la deserción estudiantil universitaria por niveles de formación en

instituciones de educación superior de la ciudad de Medellín», tiene como objetivo identificar los determinantes influyentes en la deserción estudiantil entre distintos grupos poblacionales en instituciones de educación superior en Medellín, utilizando datos de estudiantes que ingresaron al sistema educativo superior en el año 2006 para construir un modelo probit que identifique las variables significativas en cada nivel de formación. Concluye que las variables socioeconómicas, individuales, tipos de apoyo y aquellas relacionadas con áreas de conocimiento tienen efectos diferentes en los niveles universitario, tecnológico y técnico.

En el trabajo de Rivera [20], titulado «Modelo predictivo para la detección temprana de estudiantes con alto riesgo de deserción académica», el objetivo es comparar cuatro modelos de minería de datos (regresión logística, árboles de decisión, k-NN y red neuronal) para predecir la deserción estudiantil de estudiantes de la Universidad Nacional Intercultural de la Amazonía, utilizando datos socioeconómicos y de rendimiento académico. Los resultados mostraron que los cuatro modelos alcanzaron una exactitud superior al 80 % y se concluyó que su aplicación es altamente beneficiosa para detectar tempranamente a posibles desertores. Asimismo, en el trabajo titulado «Factores de deserción estudiantil: Un estudio exploratorio desde Perú», Viera *et al.* [27] tienen como objetivo identificar cuáles son los factores que causan la deserción estudiantil en la Escuela de Ingeniería Industrial de la UNSA, tomando una muestra de 220 estudiantes y utilizando para ello una metodología causal basada en un modelo de regresión logística. Concluyen que los factores individuales (que incluyen las variables educación del padre y de la madre) y académicos influyen de manera directa en la deserción estudiantil; por el contrario, los factores socioeconómicos e institucionales no resultaron influyentes. Además, estos factores fueron generados mediante la técnica de análisis factorial a partir de 18 variables. En la tesis de Camargo [7], titulada «Modelo para la predicción de la deserción de estudiantes de pregrado, basado en técnicas de minería de datos», cuyo objetivo es crear un modelo para predecir la deserción estudiantil de la Universidad de La Costa mediante distintas fases utilizando datos demográficos, culturales, sociales, familiares, educativos, entre otros, de estudiantes del periodo 2013-2018, con un total de 1606 registros, los resultados mostraron que el modelo *random forest* obtuvo un mejor desempeño con una exactitud de 84,8 %. Por otra parte, González y Arismendi [12], en su trabajo titulado «Deserción estudiantil en la educación superior técnico-profesional: Explorando los factores que inciden en alumnos de primer año», tienen como objetivo determinar las variables más influyentes en la deserción estudiantil en una institución técnico-profesional en el periodo 2014-2016. Se trata de un estudio de alcance explicativo y no experimental con una muestra de 1876 estudiantes, utilizando un modelo lineal generalizado con distribución de errores binomial y función de vínculo logit, donde se probó que las variables más importantes resultaron ser el género, el año de egreso de la enseñanza media y la jornada de estudio, aunque el modelo varía según la escuela de formación.

Alania [1], en su trabajo titulado «Aplicación de técnicas de minería de datos para predecir la deserción estudiantil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión», tiene como objetivo aplicar datos académicos de una universidad para predecir la deserción estudiantil mediante modelos de minería de datos, siendo el modelo de árbol de decisión C4.5 (J48) el que se aplicó sobre los datos de notas finales para determinar si un estudiante deserta o no. Asimismo, se realizó una comparación con un modelo de *random forest*, logrando este último una mayor precisión en la predicción. Además, en el trabajo

titulado «Modelos predictivos de la deserción estudiantil en una universidad privada peruana», Sifuentes [22] tiene como objetivo determinar que el uso de modelos predictivos en asignaturas críticas ayuda a identificar a estudiantes con intención de desertar, utilizando para ello siete modelos mediante la aplicación de la metodología para ciencia de datos CRISP-DM y datos históricos de estudiantes en siete cursos, cuyos resultados mostraron que los modelos propuestos redujeron la deserción entre 25 % y 40 %. Las variables más influyentes fueron la vocación, el número de veces que se matriculan en una asignatura y la nota obtenida en quinto de secundaria.

En el trabajo de Cuji *et al.* [8], titulado «Modelo predictivo de deserción estudiantil basado en árboles de decisión», cuyo objetivo es construir un modelo de deserción estudiantil basado en árboles de decisión para pronosticar la probabilidad de que un estudiante abandone sus estudios utilizando como metodología el Knowledge Discovery in Databases (KDD), se concluyó que el algoritmo Classification and Regression Tree (CART), con cuatro niveles de profundidad y las mismas reglas, fue el más eficiente para la predicción, donde las variables nivel y notas resultaron ser las más influyentes. Por otra parte, Vásquez [25], en su trabajo titulado «Modelo predictivo para estimar la deserción de estudiantes en una institución de educación superior», tiene como objetivo construir un modelo de predicción para detectar desertores entre estudiantes de Ingeniería en Información y Control de Gestión de la Facultad de Economía y Negocios de la Universidad de Chile, basado en la metodología KDD y tomando como referencia el estado académico registrado por la FEN a inicios del semestre 2016. Concluye que las variables más influyentes fueron el rendimiento en la PSU, el número de padres vivos, la evaluación que los alumnos realizan a los profesores de manera semestral y el rendimiento académico universitario, aunque los predictores no son los mismos en cada semestre. Además, se indica que los estudiantes deben agruparse por antecedentes familiares y rendimiento por semestre mediante técnicas de clusterización, siendo cinco de los seis modelos propuestos basados en estas.

Amaya *et al.* [3], en su trabajo titulado «Modelo predictivo de deserción estudiantil utilizando técnicas de minería de datos», tienen por objetivo construir un modelo predictivo de deserción estudiantil de estudiantes de la Universidad Simón Bolívar utilizando modelos basados en árboles de decisión como C4.5 e ID3 bajo distintos contextos y comparando la precisión de un modelo respecto del otro. Con una muestra de 201 registros y 40 variables, concluyeron que el modelo ID3 es más preciso para predecir la deserción, dado que cuenta con una mayor cantidad de reglas que el otro modelo. Además, Sposito *et al.* [23], en su trabajo titulado «Aplicación de técnicas de minería de datos para la evaluación del rendimiento académico y la deserción estudiantil», tienen como objetivo evaluar el rendimiento académico y la deserción estudiantil de estudiantes del área de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas de la UNLaM mediante el proceso de descubrimiento de conocimiento (KDD) en el periodo 2003-2008, utilizando SQL Server para recopilar, integrar y almacenar datos, SPSS para depurar, seleccionar y transformar la información, y Weka para obtener un clasificador de minería de datos. Concluyeron que los árboles de decisión de tipo J48 y FT, basados en un conjunto de variables construidas en las fases anteriores, son adecuados, siendo el modelo FT superior al J48 para clasificar la deserción estudiantil en las categorías inactivo, activo y reincorporado.

Así, este trabajo busca predecir la deserción estudiantil en Tecsup mediante un modelo de clasificación utilizando datos del 2019

al 2022 y determinar cuáles son las variables más influyentes en dicha deserción mediante técnicas basadas en árboles de decisión.

Dentro de las limitaciones encontradas, no se pudieron obtener datos de los años 2023 y 2024 debido a trámites administrativos o porque la información correspondiente a dichos años no contenía todas las variables de estudio.

METODOLOGÍA

Tipo y diseño de investigación

Según Hernández *et al.* [15], la investigación es de tipo cuantitativa y de alcance descriptivo, ya que se busca especificar propiedades y características de un fenómeno. En este estudio se pretende pronosticar la deserción estudiantil mediante modelos de clasificación y se determinará cuáles son las variables que más influyen en ella.

De acuerdo con Hernández *et al.* [15], el diseño es no experimental, pues las variables independientes no fueron manipuladas de forma intencional para observar su efecto en la variable dependiente. Además, según los mismos autores, el estudio es transversal, porque los datos se tomaron en un solo instante de tiempo, y descriptivo, ya que se examinan los niveles de una o más variables en la población.

Se siguió la metodología de Hernández *et al.* [15] debido a que son algunos de los autores más importantes en materia de investigación, aunque, según Tam *et al.* [24], existen muchos tipos de clasificaciones y métodos de investigación.

El uso de algoritmos de aprendizaje automático es apropiado para este estudio, ya que permite identificar patrones multivariados entre factores académicos, socioeconómicos y de comportamiento, en comparación con los métodos tradicionales [6]. Asimismo, los modelos de aprendizaje se actualizan con nuevos datos, lo cual les permite adaptarse a los cambios y mejorar, con el tiempo, su rendimiento [14].

Según Han, Kamber y Pei [13], quienes definen la minería de datos como «el proceso de descubrir patrones y conocimiento relevantes a partir de grandes cantidades de datos», no emplearemos una metodología como tal, ya que la minería de datos forma parte del proceso Knowledge Discovery in Databases (KDD), que consta de las etapas limpieza de datos, integración de datos, selección de datos, transformación de datos, minería de datos, evaluación de patrones y presentación del conocimiento, aunque tomaremos este último como referencia.

Población y muestra

La población de estudio está conformada por 38 835 registros de estudiantes durante el periodo 2019-2022 y cuyas 26 variables se detallan en la tabla 1.

Tabla 1
Variables, descripción y tipo de dato de estudiantes de Tecsup durante el periodo 2019-2022

Variable	Descripción	Tipo de dato
SEMESTRE	Semestre que cursa el estudiante del 2019 a 2022	Alfanumérico
SEDE	Sede en la que cursa estudios el estudiante	Texto
CODIGO	Código Tecsup del estudiante	Alfanumérico
CODORACLE	Código identificador del estudiante	Alfanumérico
CICLO	Ciclo en el que se encuentra el estudiante del primero al sexto	Numérico
SEXO	Sexo del estudiante	Texto
CURSO_CURSADOS	Número de cursos matriculados del estudiante en el semestre en curso	Numérico
CURSO_APROBADOS	Número de cursos aprobados del estudiante en el semestre en curso	Numérico
CURSO_DESAPROBADOS	Número de cursos desaprobados del estudiante en el semestre en curso	Numérico
CURSO_DIFCICLO	Si el estudiante se matriculó en cursos de diferentes ciclos y toma como valores 0 o 1	Numérico
CURSO_FALLO_INASISTENCIA	Si el estudiante tuvo algún curso en el que no asistió en más del 30 % de las clases y toma como valores 0 o 1	Numérico
CURSO_INASISTENCIAS	Si el estudiante tuvo inasistencias en el semestre y toma como valores 0 o 1	Numérico
DESERTOR_ESTADO	Si el estudiante desertó o no y toma como valores 0 o 1	Numérico
PROMEDIO_GENERAL	Promedio general del estudiante en el semestre que cursa	Numérico

Variable	Descripción	Tipo de dato
APROBADO_ESTADO	Estado de aprobado del estudiante en el semestre que cursa y toma como valores 0 o 1	Numérico
DESAPROBADO_ESTADO	Estado de desaprobado del estudiante en el semestre que cursa y toma como valores 0 o 1	Numérico
CONCREDITO_ESTADO	Si el estudiante cuenta con un crédito y toma como valores 0 o 1	Numérico
EDAD_ANIOS	Edad del estudiante en años	Numérico
ESTADO_PAGO_A_TIEMPO_MAT	Si el estudiante pagó a tiempo la matrícula en el semestre que cursa y toma como valores 0 o 1	Numérico
ESTADO_PAT_DIAS_MAT	Número de días que el estudiante pagó con anticipación la matrícula en el semestre que cursa	Numérico
ESTADO_PAGO_TARDANZA_MAT	Si el estudiante no pagó a tiempo la matrícula en el semestre que cursa y toma como valores 0 o 1	Numérico
ESTADO_PTA_DIAS_MAT	Número de días que el estudiante se tardó en pagar la matrícula en el semestre que cursa	Numérico
ESTADO_PAGO_A_TIEMPO_PEN	Si el estudiante pagó a tiempo las pensiones en el semestre que cursa y toma como valores 0 o 1	Numérico
ESTADO_PAT_DIAS_PEN	Número de promedio de días que el estudiante pagó con anticipación las pensiones en el semestre que cursa	Numérico
ESTADO_PAGO_TARDANZA_PEN	Si el estudiante no pagó a tiempo las pensiones en el semestre que cursa y toma como valores 0 o 1	Numérico
ESTADO_PTA_DIAS_PEN	Número de promedio de días que el estudiante se tardó en pagar las pensiones en el semestre que cursa	Numérico

Fuente: Gestión de Performance, Tecsup, 2024.

Para poder contar con la mayor cantidad de datos, no se realizará un muestreo, siendo este no probabilístico por conveniencia y, según Arias-Gómez *et al.* [4], menos costoso que el muestreo probabilístico, aunque la muestra puede no ser representativa y, por ende, no sería recomendable realizar generalizaciones.

Técnicas de recolección de datos

La fuente de datos es secundaria, ya que incluye información publicada en agencias del gobierno, estatales y locales, según Malhotra (2008). Los datos fueron obtenidos de diversas áreas de Tecsup como Servicios Educativos, Finanzas y Tecnologías de Información, entre otras, y fueron gestionados por personal del área de Gestión de Performance para su acceso.

Debido a ello, no se utilizó un instrumento de recolección de datos; estos se encontraban en bases de datos relacionales y archivos en formato CSV o Excel, que posteriormente se integraron en varios archivos en formato CSV que contienen información sobre estudiantes de Tecsup con diferentes atributos durante el periodo 2019-2022.

Análisis de los datos

El análisis de la información se realizó mediante mapa de calor, histograma, gráfico de distribución, gráfica de cajas, gráfico de barras, gráfico de barras dobles y tablas para la parte descriptiva y

el conteo de categorías. Se emplearán también tablas para realizar comparaciones entre los diferentes modelos de clasificación propuestos mediante sus métricas de exactitud obtenidas para los conjuntos de entrenamiento y prueba.

Se utilizó el *software* Python en su versión 3.11.0 por medio de la interfaz web Jupyter Notebook en su versión 7.0.8 de la distribución Anaconda, de la cual se emplearon librerías como pandas para crear y manipular data frames; matplotlib y seaborn para crear visualizaciones de datos; numpy para crear y manipular arreglos y emplear funciones matemáticas, y sklearn para realizar preprocesamiento de datos, implementar modelos de machine learning y calcular métricas de clasificación.

RESULTADOS

Se procedió a eliminar las variables CODIGO, CODORACLE, DESAPROBADO_ESTADO, ESTADO_PAT_DIAS_MAT, ESTADO_PAGO_TARDANZA_MAT, ESTADO_PAT_DIAS_PEN y ESTADO_PAGO_TARDANZA_PEN, puesto que los valores de las dos primeras son únicos para cada estudiante; DESAPROBADO_ESTADO contiene valores opuestos a la variable APROBADO_ESTADO, y las cuatro últimas se utilizaron para crear otras variables, quedando al final lo que se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2

Variables, descripción y tipo de dato de estudiantes de Tecsup durante el periodo 2019-2022 luego de la primera depuración

Variable	Descripción	Tipo de dato
SEMESTRE	Semestre que cursa el estudiante (2019-1, 2019-2, 2020-1, 2020-2, 2021-1, 2021-2, 2022-1 o 2022-2)	Alfanumérico
SEDE	Sede en la que cursa estudios el estudiante (A, L o T)	Texto
CICLO	Ciclo en el que se encuentra el estudiante (1, 2, 3, 5, 5 o 6)	Numérico
SEXO	Sexo del estudiante (M o F)	Texto
CURSO_CURSADOS	Número de cursos matriculados del estudiante en el semestre en curso	Numérico
CURSO_APROBADOS	Número de cursos aprobados del estudiante en el semestre en curso	Numérico
CURSO_DESAPROBADOS	Número de cursos desaprobados del estudiante en el semestre en curso	Numérico
CURSO_DIFCICLO	Si el estudiante se matriculó en cursos de diferentes ciclos y toma como valores 0 o 1	Numérico
CURSO_FALLO_INASISTENCIA	Si el estudiante tuvo algún curso en el que no asistió en más del 30% de las clases y toma como valores 0 o 1	Numérico
CURSO_INASISTENCIAS	Si el estudiante tuvo inasistencias en el semestre y toma como valores 0 o 1	Numérico
PROMEDIO_GENERAL	Promedio general del estudiante en el semestre que cursa	Numérico
APROBADO_ESTADO	Estado de aprobado del estudiante en el semestre que cursa y toma como valores 0 o 1	Numérico
DESAPROBADO_ESTADO	Estado de desaprobado del estudiante en el semestre que cursa y toma como valores 0 o 1	Numérico
CONCREDITO_ESTADO	Si el estudiante cuenta con un crédito y toma como valores 0 o 1	Numérico
EDAD_ANIOS	Edad del estudiante en años	Numérico
ESTADO_PAGO_A_TIEMPO_MAT	Si el estudiante pagó a tiempo la matrícula en el semestre que cursa y toma como valores 0 o 1	Numérico
ESTADO_PAGO_A_TIEMPO_PEN	Si el estudiante pagó a tiempo las pensiones en el semestre que cursa y toma como valores 0 o 1	Numérico

Fuente: Elaboración propia.

Tomando en cuenta la definición de cada variable se dividieron en un grupo de variables categóricas, y otra en numéricas de acuerdo a la tabla 3.

Tabla 3
Variables y tipo de estudiantes de Tecsup durante el periodo 2019-2022

Variable y tipo	
Catégorica	Númérica
SEMESTRE	
SEDE	
CICLO	
SEXO	
	CURSO_CURSADOS
	CURSO_APROBADOS
	CURSO_DESAPROBADOS
CURSO_DIFCICLO	
CURSO_FALLO_	
INASISTENCIA	
CURSO_INASISTENCIAS	
	PROMEDIO_GENERAL
APROBADO_ESTADO	
DESAPROBADO_ESTADO	
CONCREDITO_ESTADO	
	EDAD_ANIOS
ESTADO_PAGO_A_TIEMPO_	
MAT	
ESTADO_PAGO_A_TIEMPO_	
PEN	

Fuente: Elaboración propia.

Se procedió a realizar un análisis de la correlación entre las variables numéricas, con base a la información de la tabla 3.



Figura 1. Mapa de calor de las variables numéricas de estudiantes de Tecsup durante el periodo 2019-2022

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 1, podemos observar que existe una alta correlación (0,92) entre las variables CURSO_CURSADOS y CURSO_APROBADOS, por lo que procedemos a eliminar la primera debido

a que esta es la suma de las variables CURSO_APROBADOS y CURSO_DESAPROBADOS.

Tabla 4
Variables discretizadas de estudiantes de Tecsup durante el periodo 2019-2022

Variable nueva	Categorías
CURSO_APROBADOS_AGRUP	0
	1-3
	4-6
	7-9
CURSO_DESAPROBADOS_AGRUP	0
	1-3
	4-6
	7-10
	14-19
	20-24
	25-29
EDAD_ANIOS_AGRUP	30-34
	35-39
	40-44
	45-49
	50-54
	55-59
ESTADO_PAGO_A_TIEMPO_PEN	0
	1

Fuente: Elaboración propia.

Debido a la alta diferencia en las frecuencias de las variables CURSO_APROBADOS y CURSO_DESAPROBADOS, se procedió a discretizarlas en cuatro categorías para cada una. Asimismo, se construyeron nueve rangos para la variable EDAD_ANIOS y dos categorías para la variable ESTADO_PAGO_A_TIEMPO_PEN, asignándoles nuevos nombres y eliminando las variables originales, quedando como se muestra en la tabla 4.

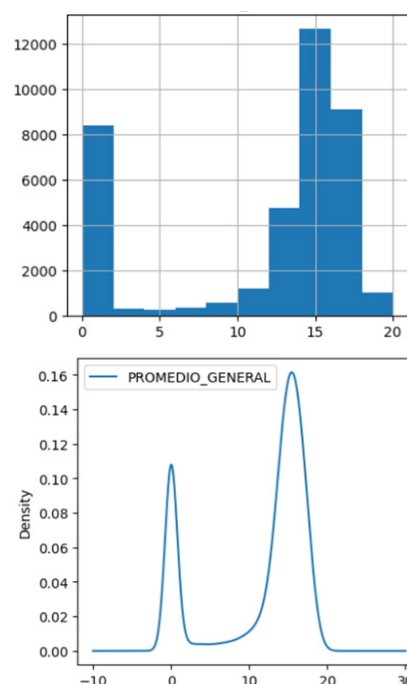


Figura 2. Histograma y gráfico de densidad de la variable PROMEDIO_GENERAL de estudiantes de Tecsup durante el periodo 2019-2022

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 2 se observa que la distribución de datos de la única variable numérica PROMEDIO_GENERAL no es normal, puesto que la mayoría de valores se concentran a la derecha y, a la izquierda, se registran muchos valores iguales a cero (8007), lo cual corresponde no solo a estudiantes que han desertado, sino también a aquellos que se matricularon y reprobaron por inasistencias o por bajo rendimiento.

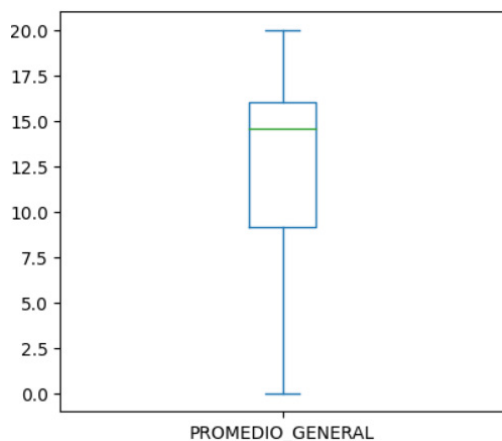


Figura 3. Diagrama de caja de la variable PROMEDIO_GENERAL de estudiantes de Tecsup durante el periodo 2019-2022

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3, podemos observar que no existen problemas con valores atípicos, por lo cual no será necesario utilizar alguna técnica para tratar estos.

Tabla 5

Cantidad de variables categóricas y numéricas antes y después de estudiantes de Tecsup durante el periodo 2019-2022

Tipo de variable	Cantidad	
	Antes	Después
Categórica	16	0
Númérica	1	50
Total	17	50

Fuente: Elaboración propia.

Estandarizamos la variable PROMEDIO_GENERAL y convertimos las variables categóricas en *dummies* para poder incluirlas en un modelo de clasificación. Tomando en cuenta la información de las Tablas 3 y 4, se obtuvo finalmente un total de 42 variables numéricas.

Tabla 6

Variables originales y seleccionadas mediante random forest de estudiantes de Tecsup durante el periodo 2019-2022

Tipo	Variables	Cantidad
Originales	PROMEDIO_GENERAL	50
	SEMESTRE_2019-1, SEMESTRE_2019-2, SEMESTRE_2020-1, SEMESTRE_2020-2, SEMESTRE_2021-1, SEMESTRE_2021-2, SEMESTRE_2022-1, SEMESTRE_2022-2, SEDE_A, SEDE_L, SEDE_T, CICLO_1, CICLO_2, CICLO_3, CICLO_4, CICLO_5, CICLO_6, SEXO_F, SEXO_M, CURSO_DIFCICLO_0, CURSO_DIFCICLO_1, CURSO_FALLO_INASISTENCIA_0, CURSO_FALLO_INASISTENCIA_1, CURSO_INASISTENCIAS_0, CURSO_INASISTENCIAS_1, APROBADO_ESTADO_0, APROBADO_ESTADO_1, CONCREITO_ESTADO_0, CONCREITO_ESTADO_1, EDAD_ANIOS_AGRUP_0, EDAD_ANIOS_AGRUP_1, EDAD_ANIOS_AGRUP_2, EDAD_ANIOS_AGRUP_3, EDAD_ANIOS_AGRUP_4, EDAD_ANIOS_AGRUP_5, ESTADO_PAGO_A_TIEMPO_MAT_0, ESTADO_PAGO_A_TIEMPO_MAT_1, ESTADO_PAGO_A_TIEMPO_PEN_0, ESTADO_PAGO_A_TIEMPO_PEN_1, CURSO_APROBADOS_AGRUP_0, CURSO_APROBADOS_AGRUP_1-3, CURSO_APROBADOS_AGRUP_4-6, CURSO_APROBADOS_AGRUP_7-9, CURSO_DESAPROBADOS_AGRUP_0, CURSO_DESAPROBADOS_AGRUP_1-3, CURSO_DESAPROBADOS_AGRUP_4-6, CURSO_DESAPROBADOS_AGRUP_7-10	

Fuente: Elaboración propia.

Tipo	Variables	Cantidad
Seleccionadas	PROMEDIO_GENERAL	36
	SEMESTRE_2019-1, SEMESTRE_2019-2, SEMESTRE_2020-1,	
	SEMESTRE_2020-2,	
	SEMESTRE_2021-1, SEMESTRE_2021-2	
	SEMESTRE_2022-2	
	SEDE_A, SEDE_T	
	CICLO_1, CICLO_2, CICLO_3,	
	CICLO_4, CICLO_5, CICLO_6	
	SEXO_F, SEXO_M	
	CURSO_FALLO_INASISTENCIA_0,	
	CURSO_FALLO_INASISTENCIA_1	
	APROBADO_ESTADO_0, APROBADO_ESTADO_1	
	EDAD_ANIOS_AGRUP_0, EDAD_ANIOS_AGRUP_1,	
	EDAD_ANIOS_AGRUP_2	
	ESTADO_PAGO_A_TIEMPO_MAT_0,	
	ESTADO_PAGO_A_TIEMPO_MAT_1,	
	ESTADO_PAGO_A_TIEMPO_PEN_0, ESTADO_PAGO_A_TIEMPO_PEN_1	
	CURSO_APROBADOS_AGRUP_0,	
	CURSO_APROBADOS_AGRUP_1-3,	
	CURSO_APROBADOS_AGRUP_4-6,	
	CURSO_DESAPROBADOS_AGRUP_0,	
	CURSO_DESAPROBADOS_AGRUP_1-3,	
	CURSO_DESAPROBADOS_AGRUP_4-6,	
	CURSO_DESAPROBADOS_AGRUP_7-10	

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 6, se observan las variables más relevantes que fueron seleccionadas mediante la técnica de selección de características (o variables) basada en modelos y secuenciales [21], la cual elimina aquellas que se encuentran por debajo de un umbral (*threshold*) que debe especificarse. Además, se debe incluir

un modelo para llevar a cabo este proceso, siendo el elegido *random forest*, el cual se utiliza para determinar la importancia de características con base en impurezas, resultando ideal para eliminar variables no relevantes.

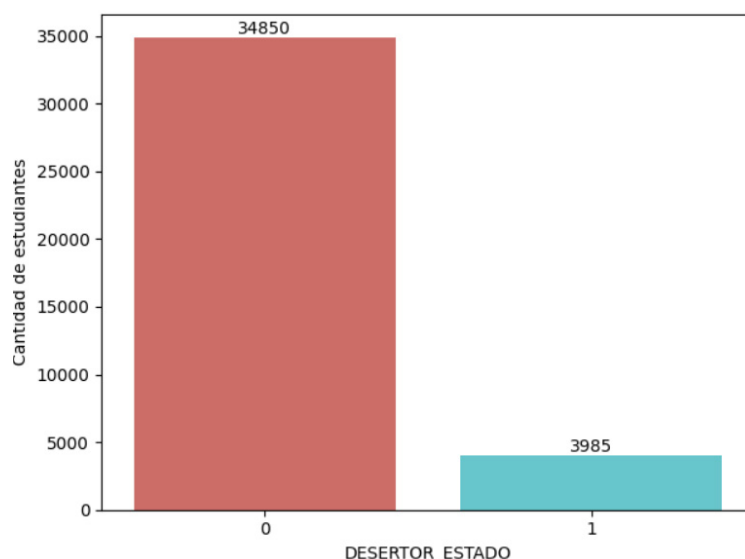


Figura 4. Diagrama de barras de las categorías 0 y 1 de la variable DESERTOR_ESTADO de estudiantes de Tecsup durante el periodo 2019-2022

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4, se observa que existe una mayor cantidad de estudiantes que no son desertores (34 850) frente a quienes sí lo son (3985), siendo la proporción de aproximadamente 8,74. Debido a ello, se realizó una validación cruzada con una partición

de 5 (CV = 5) para compensar la disparidad entre las categorías 0 y 1 de la variable DESERTOR_ESTADO, junto con un ajuste de hiperparámetros para los ocho modelos de clasificación propuestos.

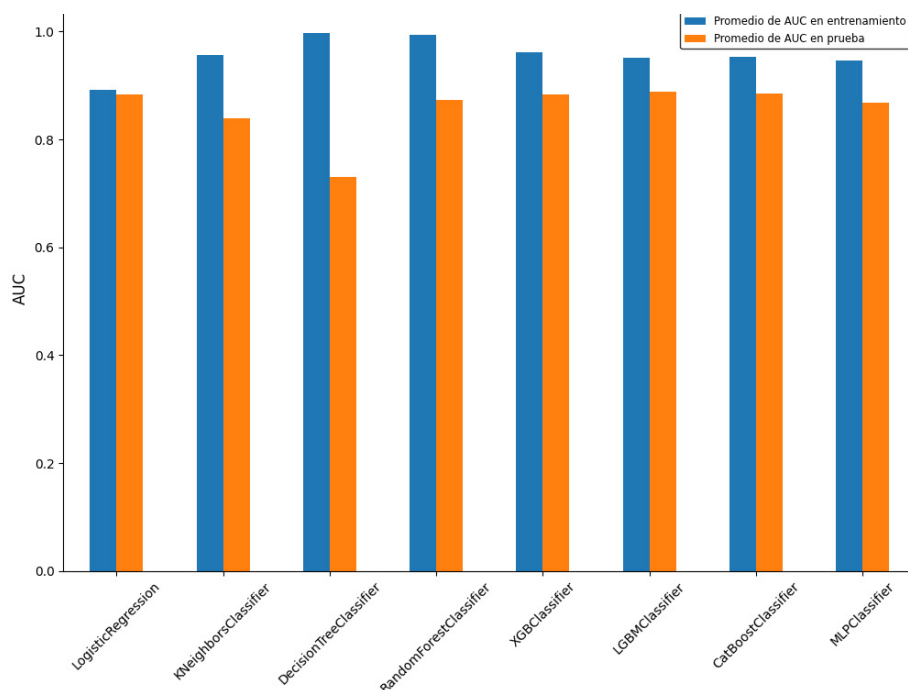


Figura 5. Diagrama de barras doble de las exactitudes de entrenamiento y prueba para los diferentes modelos de clasificación de estudiantes de Tecsup durante el periodo 2019-2022

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5, se observa que el modelo de regresión logística parece ser el más equilibrado, puesto que su promedio de exactitud (AUC) en el entrenamiento es mayor que en el de prueba por un margen muy reducido. Otros modelos que presentan un mejor desempeño que el anterior, aunque menos equilibrados

respecto de sus promedios de exactitud en entrenamiento y prueba, son XGBoost, LightGBM y CatBoost, los cuales están basados en árboles de decisión y presentan buen rendimiento, escalabilidad y versatilidad [16].

Tabla 7

Valores promedio de las exactitudes de entrenamiento y prueba para los diferentes modelos de clasificación de estudiantes de Tecsup durante el periodo 2019-2022

Modelo	Promedio de AUC en entrenamiento	Promedio de AUC en prueba	Diferencia de promedio de AUC
Regresión logística	0,8915	0,8831	0,0084
k-NN	0,9567	0,8393	0,1173
Árbol de decisión	0,9973	0,7312	0,2660
Random forest	0,9930	0,8715	0,1215
XGBoost	0,9620	0,8825	0,0795
LightGBM	0,9512	0,8892	0,0619
CatBoost	0,9527	0,8853	0,0673
Red neuronal multicapa	0,9449	0,8715	0,0734

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 7, analizando los valores promedio de exactitud en el entrenamiento y en la prueba, se elegirá el mejor modelo. Tomando en cuenta el mayor valor promedio de exactitud en el conjunto de prueba (0,8892), el mejor modelo sería LightGBM y, respecto de la diferencia entre los valores promedio de exactitud en los conjuntos de entrenamiento y prueba, el modelo de regresión logística presenta la menor diferencia (0,0084), seguido por el modelo LightGBM (0,0619). Considerando su

mejor capacidad de generalización debido a su mayor promedio de exactitud en el conjunto de prueba [17] y que no presenta un sobreajuste significativo, dada la segunda menor diferencia promedio de exactitud, el modelo elegido sería LightGBM, el cual también ofrece una serie de ventajas como mayor velocidad de entrenamiento y eficiencia, menor uso de memoria, mayor exactitud y capacidad para gestionar datos a gran escala, entre otras [5].

CONCLUSIONES

En una primera etapa del preprocesamiento de datos, se eliminaron siete variables de un total de 26 que había originalmente, siendo la principal causa el hecho de que algunas tenían valores únicos, pues representaban códigos, y otras eran redundantes con respecto a variables que se encontraban mejor definidas. Además, se eliminó la variable CURSO_CURSADOS debido a que estaba altamente correlacionada con la variable CURSO_APROBADOS.

En una segunda etapa, se procedió a discretizar las variables CURSO_APROBADOS y CURSO_DESAPROBADOS debido a la marcada diferencia entre sus categorías, y también se discretizó la variable EDAD_ANIOS para captar mejor la deserción a través de rangos de edad. Asimismo, al analizar la variable PROMEDIO_GENERAL, se pudo observar que existía una cantidad importante de estudiantes cuyos promedios eran cero, posiblemente reprobados por inasistencia o bajo rendimiento. Por otro lado, después de la discretización, se tuvo una mayor predominancia de variables categóricas (16) respecto de las variables numéricas (1) y, al realizar la dummificación, se obtuvieron en total 50 variables numéricas.

Utilizando una técnica de selección de mejores variables basada en modelos y secuenciales, se eligieron 36 variables del total de 50. Como variables más influyentes para pronosticar la deserción se identificaron: promedio general, semestres (menos el 2022-2), sede (menos Lima), ciclo, sexo, curso reprobado por inasistencia, estado de aprobado, edad (menos los que tienen de 30 a 59 años), estado de pago de matrícula a tiempo, estado de pago de pensión a tiempo, cursos aprobados (menos quienes aprobaron de 7 a 9) y cursos desaprobados.

Existe una mayor cantidad de estudiantes que no desertaron respecto de quienes sí lo hicieron, razón por la cual se empleó la validación cruzada con cinco particiones para compensar esta diferencia. Así, se entrenaron ocho modelos de clasificación (regresión logística, k-NN, árbol de decisión, *random forest*, XGBoost, LightGBM, CatBoost y red neuronal multicapa), de los cuales se calcularon sus respectivas exactitudes y se realizó lo mismo para los conjuntos de prueba, siendo en un principio los modelos XGBoost, LightGBM y CatBoost seleccionados como los mejores debido a sus mínimas diferencias entre las exactitudes en entrenamiento y prueba.

Tomando en cuenta el mayor valor de exactitud en el conjunto de prueba, lo cual permite una mejor capacidad de generalización para el modelo, y la segunda menor diferencia entre las exactitudes en los conjuntos de entrenamiento y prueba, lo cual evidencia que no existe un sobreajuste, el mejor modelo para predecir la deserción estudiantil sería LightGBM.

Una de las limitaciones más importantes encontradas durante el desarrollo de este estudio fue no poder contar con datos de los años más recientes, específicamente 2023 y 2024, debido principalmente a que estos datos se encuentran dispersos en diferentes áreas de Tecsup, almacenados en diversos repositorios y requieren una gestión previa para acceder a ellos. Una posible solución para evitar esta situación y realizar un futuro estudio sobre deserción que sea más preciso sería implementar un almacén de datos (*data warehouse*) en el que se integren y preprocesen todos los datos de la institución, ya sea a través de un servidor local o mediante una implementación en la nube.

A nivel institucional, la deserción estudiantil siempre generará un impacto negativo económico y/o académico, razón por la cual se pueden adoptar medidas como realizar cambios o actualizaciones en las mallas curriculares acorde con el mercado laboral, llevar a cabo un seguimiento minucioso a los estudiantes de los primeros ciclos atendiendo a las dificultades que puedan presentar, indagar por qué existen estudiantes que faltan continuamente durante el semestre académico e implementar políticas que permitan cumplir con los pagos de matrículas o pensiones a tiempo, entre las más importantes.

REFERENCIAS

- [1] Alania, P. (2018). Aplicación de técnicas de minería de datos para predecir la deserción estudiantil de la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión [Tesis para obtener el grado de magíster]. Repositorio Institucional UNDAC.
- [2] Aleans, K. (2012). *Determinantes de la deserción estudiantil universitaria por niveles de formación en instituciones de educación superior de la ciudad de Medellín*. Universidad EAFIT.
- [3] Amaya, Y., Barrientos, E., & Heredia, D. (2014). *Modelo predictivo de deserción estudiantil utilizando técnicas de minería de datos*. RedCLARA. <https://documentos.redclara.net/bitstream/10786/759/1/124-22-3-2014-Modelo%20predictivo%20de%20deserci%C3%B3n%20estudiantil%20utilizando%20t%C3%A9cnicas%20de%20miner%C3%ADa%20de%20datos.pdf>
- [4] Arias-Gómez, J., Villasís-Keever, M., & Miranda, M. (2016). El protocolo de investigación III: la población de estudio. *Alergia México*, 201-206.
- [5] Banerjee, P. (2020). *LightGBM classifier in Python*. Kaggle. <https://www.kaggle.com/code/prashant111/lightgbm-classifier-in-python>
- [6] Berens, J., Schneider, K., Görtz, S., Oster, S., & Burghoff, J. (2019). Early detection of students at risk—predicting student dropouts using administrative student data and machine learning methods. *Journal of Educational Data Mining*, 1-41.
- [7] Camargo, A. (2020). *Modelo para la predicción de la deserción de estudiantes de pregrado, basado en técnicas de minería de datos* [Tesis para obtener el grado de magíster]. Repositorio Universidad de La Costa.
- [8] Cuji, B., Gavilanes, W., & Sánchez, R. (2017). Modelo predictivo de deserción estudiantil basado en arboles de decisión. *Revista Espacios*, 17-25.
- [9] Díaz, K., Chindoy, B., & Rosado, A. (2019). Review of techniques, tools, algorithms and attributes for data. En *Journal of Physics: Conference Series* (pp. 1-6). IOP Publishing.
- [10] Escalante, J., Medina, C., & Vásquez, A. (2023). La deserción universitaria: un problema no resuelto en el Perú. *Revista Hacedor*, 60-72.

- [11] Fernández, X., & Silva, E. (2014). Deserción estudiantil universitaria en el primer semestre. El caso de una institución de educación superior ecuatoriana. *Cuadernos del Contrato Social por la Educación*, 34-48.
- [12] González, F., & Arismendi, K. (2018). Deserción estudiantil en la educación superior técnico-profesional: Explorando los factores que inciden en alumnos de primer año. *Revista de la Educación Superior*, 109-137.
- [13] Han, J., Kamber, M., & Pei, J. (2012). *Data mining: Concepts and techniques*. Elsevier Inc.
- [14] Hellas, A. et al. (2018). Predicting academic performance: A systematic literature review. En *Proceedings Companion of the 23rd Annual ACM Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education (ITICSE '18 Companion)* (pp. 175-199).
- [15] Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill Education.
- [16] Iljin, V. (2023, 4 de mayo). *Comparing the Titans of Machine Learning: XGBoost, CatBoost and LightGBM*. LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/comparing-titans-machine-learning-xgboost-catboost-lightgbm-iljin/>
- [17] James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2021). *The elements of statistical learning with applications in R*. Springer.
- [18] Ministerio de Educación (Minedu). (2024). *Resolución Viceministerial N° 095-2024-MINEDU*. https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/6894408/5957002-rvm_n-_095-2024-minedu.pdf
- [19] Mori, J. (2021). Factores asociados al riesgo en la deserción estudiantil en un instituto de educación superior tecnológico público. *Revista de Investigación de la Universidad Norbert Wiener*, 59-72.
- [20] Rivera, K. (2021). Modelo predictivo para la detección temprana de estudiantes con alto riesgo de deserción académica. *Revista Innovación y Software*, 6-13.
- [21] scikit-learn. (s. f.). *Feature selection*. scikit-learn. https://scikit-learn.org/stable/modules/feature_selection.html
- [22] Sifuentes, O. (2018). Modelos predictivos de la deserción estudiantil en una universidad privada peruana. *Revista Industrial Data*, 47-52.
- [23] Sposito, O., Etcheverry, M., Ryckeboer, H., & Bossero, J. (2010). *Aplicación de técnicas de minería de datos para la evaluación del rendimiento académico y la deserción estudiantil*. <https://repositoriocyt.unlam.edu.ar/handle/123456789/1267>
- [24] Tam, J., Vega, G., & Oliveros, R. (2008). Tipos, métodos y estrategias de investigación científica. *Pensamiento y Acción*, 145-154.
- [25] Vásquez, J. (2016). *Modelo predictivo para estimar la deserción de estudiantes en una institución de educación superior* [Tesis para obtener el grado de magíster]. Repositorio Académico Universidad de Chile.
- [26] Viale, H. (2014). Una aproximación teórica a la deserción estudiantil universitaria. *Revista Digital de Investigación en Docencia Universitaria*, 59-75.
- [27] Viera, D., Flores, M., & Pachari-Vera, E. (2020). Factores de deserción estudiantil: Un estudio exploratorio desde Perú. *Interiencia*, 586-591.
- [28] Villegas, B., & Núñez, L. (2024). Factores asociados a la deserción estudiantil en el ámbito universitario. Una revisión sistemática 2018-2023. *Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, 14(28).

ACERCA DEL AUTOR

José Luis Espinoza Melgarejo

Magíster en Docencia Universitaria e Investigación Pedagógica de la Universidad San Pedro de Chimbote (USP), Perú; licenciado en Matemática de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), Perú. Docente de educación superior con más de 11 años de experiencia laborando en instituciones como IDAT, Tecsup, Universidad Privada del Norte, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Universidad Tecnológica del Perú y Universidad de Ingeniería y Tecnología. Ha dictado diversos cursos en ciencia de datos, matemática, estadística, finanzas entre otros. Especialista en estadística y ciencia de datos que cuenta con estudios de posgrado en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM), Perú y actualmente estudiante de doctorado en Estadística Matemática de la Universidad Nacional del Santa (UNS), Perú.

@jespinozame@tecsup.edu.pe

@josespijoin@yahoo.com

Recibido: 26-04-2025

Revisado: 06-10-2025

Aceptado: 17-10-2025



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.

PILARES DEL MODELO

Estos le dan apertura, dinamismo y flexibilidad, lo que orienta nuestra función formativa de manera articulada y coherente con nuestros principios, abordando las tendencias globales en educación tecnológica para transformar y modernizar nuestro futuro.



Articulación con la empresa y con el mundo



Aprendizaje inmersivo
con docentes que inspiran



Experiencia estudiantil
transformadora



Innovación
y emprendimiento



Flexibilidad
educativa



Infraestructura y
equipamiento moderno

El procedimiento permite valorizar un residuo algal, reducir el impacto ambiental y obtener un bioproducto de alto valor para las industrias alimentaria y farmacéutica.



Recuperación sostenible de carragenina a partir de residuos de *Chondracanthus chamissoi* en Pisco, Perú

*“Sustainable Recovery of Carrageenan from *Chondracanthus chamissoi* Residues in Pisco, Peru”*

RESUMEN

La carragenina es un hidrocoloide de alto valor presente en el alga roja *Chondracanthus chamissoi* («yuyo»), abundante en Pisco, Perú. Durante la selección manual para comercialización, grandes cantidades son descartadas en playa, generando contaminación costera.

Este estudio desarrolló un proceso sostenible para recuperar carragenina a partir de dichas algas desechadas mediante extracción alcalina, precipitación por cambio de solvente, decoloración y secado. La carragenina obtenida se caracteriza por FT-IR, y se confirma su estructura química característica.

El procedimiento permite valorizar un residuo algal, reducir el impacto ambiental y obtener un bioproducto de alto valor para las industrias alimentaria y farmacéutica. Los resultados sientan las bases para una industria local de biorrefinería alineada con la economía circular y el desarrollo sostenible.

ABSTRACT

Carrageenan is a high-value hydrocolloid found in the red alga *Chondracanthus chamissoi* (locally known as “yuyo”), which is abundant in Pisco, Peru. During manual sorting for commercialization, large quantities are discarded on the beach, causing coastal pollution.

This study developed a sustainable process to recover carrageenan from these discarded algal residues using alkaline extraction, precipitation via solvent exchange, decolorization, and drying. The obtained carrageenan was characterized by FT-IR spectroscopy, confirming its characteristic chemical structure.

The procedure allows for the valorization of an algal waste product, reduces environmental impact, and yields a high-value bioproduct for the food and pharmaceutical industries. The results lay the foundation for a local biorefinery industry aligned with the principles of the circular economy and sustainable development.



Palabras Claves

Carragenina, yuyo, *Chondracanthus chamissoi*, biorrefinería, FT-IR (espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier), Pisco, Perú

Key words

Carrageenan, yuyo, *Chondracanthus chamissoi*, biorefinery, FT-IR (Fourier Transform Infrared spectroscopy), sustainability, Pisco, Peru.

INTRODUCCIÓN

La carragenina es un hidrocoloide sulfatado de alto valor comercial, ampliamente utilizado en las industrias alimentaria, farmacéutica y cosmética por sus propiedades gelificantes, espesantes y estabilizantes [2, 4]. En Perú, una de sus principales fuentes es el alga roja *Chondracanthus chamissoi*, conocida localmente como «yuyo» y valorada tanto como ingrediente tradicional en la gastronomía costera (ceviche, tiradito) como recurso industrial [3, 5]. En Pisco (Ica), durante la selección manual para consumo humano y comercialización nacional, un porcentaje significativo de biomasa algal es descartado directamente en la playa por no cumplir estándares organolépticos o de calidad comercial. Estos residuos generan contaminación costera, malos olores y afectan el paisaje y la salud pública [2, 6]. Al mismo tiempo, representan una fuente subutilizada de carragenina de tipo κ de alto valor.

El presente estudio optimizó un proceso sostenible de recuperación de carragenina a partir de algas *C. chamissoi* desechadas, empleando extracción alcalina seguida de caracterización estructural mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR). Los resultados permiten valorizar un residuo costero, reducir el impacto ambiental y sentar las bases para una biorrefinería marina local que combine conservación del recurso algal, protección del litoral y desarrollo de una industria biotecnológica responsable y competitiva.

Las carrageninas son galactanos, es decir, polisacáridos formados por galactosa y anhidrogallactosa sulfatados, estas se presentan unidas entre sí por enlaces β -1,4 y α -1,3, con distintos grados de sulfatación [5].



Figura 1. Alga roja conocida en la mayoría del Perú como yuyo (*Chondracanthus chamissoi*)

Fuente: Elaboración propia.

Las carrageninas se presentan en la naturaleza bajo tres formas tres formas kappa, iota y lambda.

- Kappa-carragenina (a): Forma geles firmes con potasio; contiene un grupo sulfato por disacárido tal como se muestra en la figura 2.
- Iota-carragenina (b): Forma geles suaves y elásticos con calcio; tiene dos grupos sulfato por disacárido.
- Lambda-carragenina (c): No forma geles, solo aumenta la viscosidad; tiene tres grupos sulfato por disacárido.

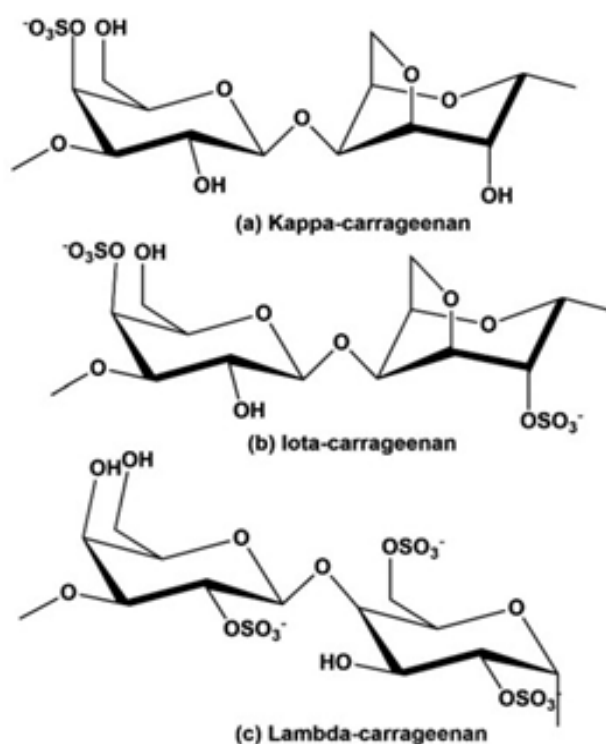


Figura 2. Tipos de carrageninas en algas rojas

Fuente: [6].

- Iota-carragenina (ι): Forma geles suaves y elásticos con calcio; tiene dos grupos sulfato por disacárido.
- Lambda-carragenina (λ): No forma geles, solo aumenta la viscosidad; tiene tres grupos sulfato por disacárido.

Investigaciones previas han demostrado que *Chondracanthus chamissoi* contiene altas concentraciones de carragenina, cuya estructura depende del método de extracción [4]. Salas *et al.* [4] reportaron la obtención de κ -carragenina y λ -carragenina de esta alga para aplicaciones alimentarias, como puede verse en la figura 2.

METODOLOGÍA

La figura 3 representa el diagrama del proceso de extracción de carragenina a partir de desechos de algas conocidas como yuyo donde se proporciona las etapas que se aplicaron para finalmente obtener la carragenina.

Se aplicó el protocolo adaptado por [4], que incluyó lo siguiente: preparación y secado de algas; tratamiento alcalino con KOH al 6 % [3]; decoloración con hipoclorito al 5 % [6]; fraccionamiento térmico y químico; y secado controlado [2], donde se presentan las etapas de proceso de obtención de carragenina para, finalmente, realizar la caracterización.

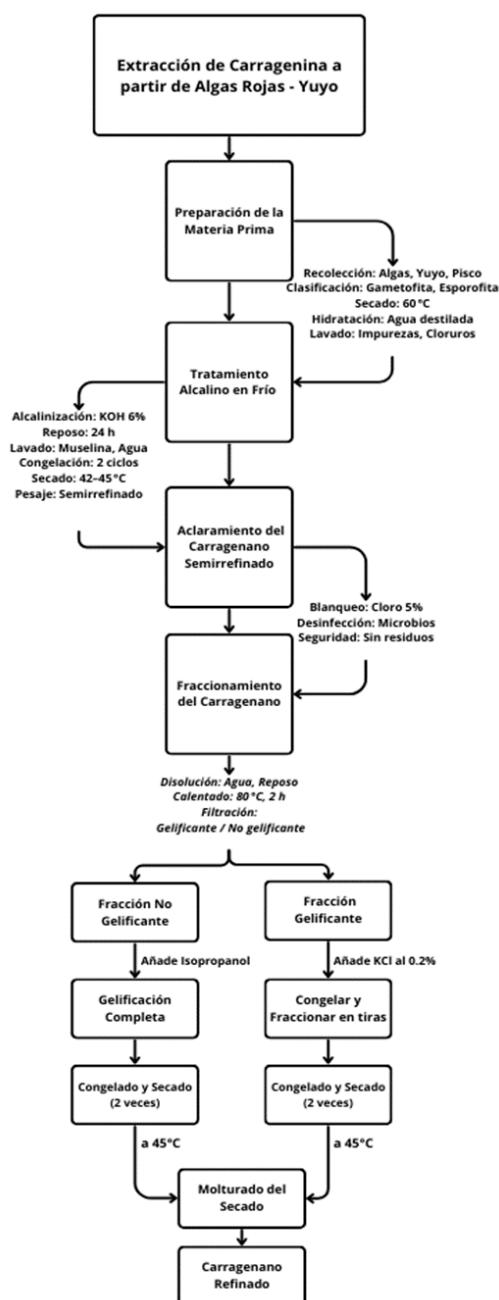


Figura 3. Proceso general de extracción de carragenina en *Chondracanthus chamissoi*

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

Caracterización de la carragenina

Para la caracterización, se empleó una prueba cualitativa preliminar de reconocimiento preliminar de azúcar reductor por acción de la hidrólisis de la carragenina para el reconocimiento de azúcar reductor (galactosa) [3].

Se pesó 0,5 g de carragenina se diluyó en solución al 2 % de ácido clorhídrico en 20 ml y se llevó a ebullición por 3 horas. Luego, se tomó 2 ml de la solución y se realizó la reacción de Fehling. También se realizó la prueba cualitativa con reactivo de Tollens.

La carragenina se analizó por FT IR equipo Bruker Model Alpha FT-IR Spectrometer, obteniendo el respectivo espectro para su identificación.

Tabla 1
Valores del número de onda (cm^{-1}) y asignaciones

Pico (cm^{-1})	Asignación aproximada	Grupo funcional asociado	Observación
1666 – 1667	Estiramiento C=O (carbonilo)	Posible impureza de proteínas o grupos urónicos	No característico de carragenina pura, pero puede estar presente por residuos.
1440 – 1442	Deformación angular C-H o asimétrica COO ⁻	Anillos de galactosa o residuos carboxílicos	Asociado con vibraciones del anillo de galactosa.
1230	Estiramiento asimétrico S=O (sulfato)	Grupo sulfato ($-\text{SO}_3^-$)	Característico de carrageninas sulfatadas.
1077	Estiramiento C–O–C (éter)	Enlace glicosídico	Común en polisacáridos, refleja la estructura de galactanos.

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

Los resultados de la prueba de Fehling generaron un precipitado rojizo de óxido cuproso demostrando la presencia de azúcares reductores. La reacción de Tollens generó un espejo de plata en el tubo de ensayo por tanto presencia de azúcares reductores como derivados de la hidrólisis de los galactanos.

La caracterización por métodos espectroscópicos se obtuvo los siguientes picos de los grupos presentes en el hidrocoloide mostrados en la tabla 1 según el número de onda y sus respectivas asignaciones.

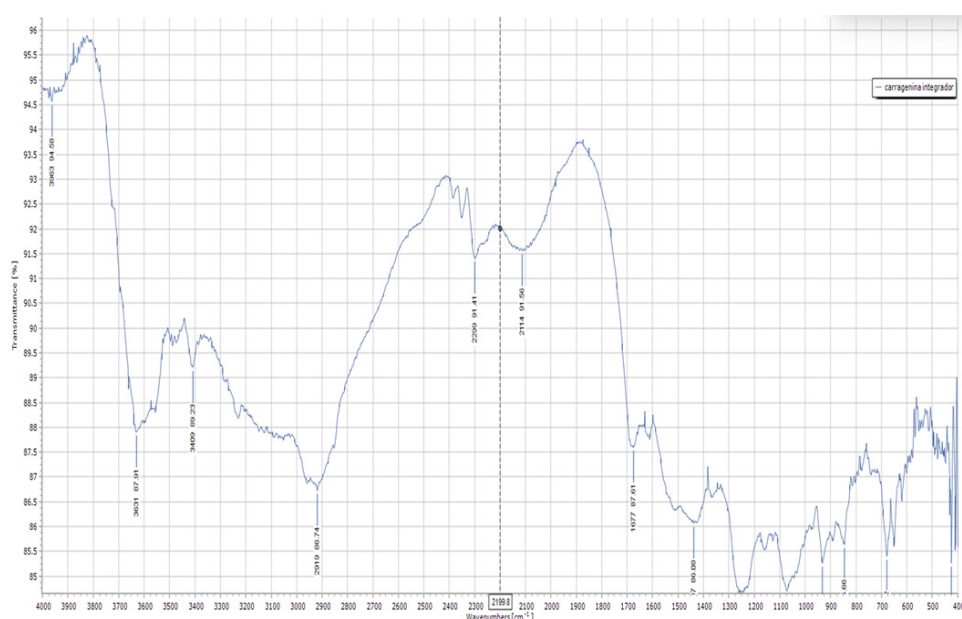


Figura 4. Espectro IR de la muestra de carragenina en el equipo Bruker Model Alpha FT-IT Spectrometer

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Se confirmó de manera contundente que el polisacárido extraído de *Chondracanthus chamissoi* («yuyo») es carragenina sulfatada, mediante la liberación de azúcares reductores en las pruebas de Fehling y Tollens, y la presencia inequívoca de las bandas diagnósticas en el espectro FT-IR: 1220–1230 cm⁻¹ (sulfato), 1070–1080 cm⁻¹ (enlace glicosídico) y 1430–1445 cm⁻¹ (anillo de galactosa). Estos resultados demuestran que el biopolímero obtenido corresponde al estándar estructural de las carrageninas comerciales extraídas de algas rojas.
2. Se desarrolló y validó un proceso de extracción simple, de bajo costo, 100 % acuoso y libre de solventes orgánicos tóxicos, capaz de recuperar carragenina de alta calidad a partir de biomasa algal fresca o, más importante aún, de residuos actualmente desechados por la industria pesquera y acuícola peruana.
3. Este trabajo demuestra que un residuo orgánico, considerado contaminante en las costas del Perú, se puede transformar en un producto de alto valor agregado utilizado globalmente en las industrias alimentaria, farmacéutica y cosmética. Esto sienta las bases para una verdadera economía circular en el sector marino-costero.

RECOMENDACIONES

1. Optimizar las condiciones de extracción (temperatura, tiempo, pH, relación alga/solvente y agente precipitante) utilizando diseño de experimentos para maximizar el rendimiento y la pureza del polisacárido.
2. Evaluar cuantitativamente la eficiencia del proceso mediante indicadores como rendimiento (g de carragenina / 100 g de alga seca), contenido de sulfato, porcentaje de proteína residual y costo por kg de producto obtenido.
3. Completar la caracterización estructural avanzada del polisacárido mediante: Espectroscopia de RMN-¹H, RMN-¹³C y experimentos 2D (HSQC, HMBC, COSY) para asignar completamente las señales y determinar la posición exacta de los grupos sulfato.
4. Dicroísmo circular (CD) para identificar el tipo de carragenina (κ , ι , λ o híbridos).
5. Cromatografía de exclusión por tamaño (SEC) acoplada a detectores multiángulo de dispersión de luz (MALS) para determinar peso molecular y distribución.

6. Incorporar etapas de purificación adicionales de bajo costo y evaluar su efecto sobre la calidad final del producto.
7. Comparar la carragenina obtenida de alga fresca versus residuos de acuicultura en términos de rendimiento, pureza y propiedades funcionales.
8. Promover, a mediano plazo, la creación de biorrefinerías costeras integradas que aprovechen los grandes volúmenes de residuos de *Chondracanthus chamissoi* generados por la acuicultura y la industria pesquera peruana, permitiendo la producción simultánea de carragenina, fertilizantes orgánicos y otros metabolitos de valor, en el marco de una bioeconomía azul sostenible.

REFERENCIAS

- [1] Gómez Ordóñez, E., & Rupérez, P. (2011). FTIR-ATR spectroscopy as a tool for polysaccharide identification in edible brown and red seaweeds. *Food Hydrocolloids*, 25(6), 1514–1520. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2010.12.021>
- [2] Kong, L., Stapleton, J., & Ziegler, G. R. (2017). Characterization of macromolecular orientation in κ -carrageenan fibers using polarized Fourier-transform infrared spectroscopy. *Vibrational Spectroscopy*, 94, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2017.12.004>
- [3] López, V., Torres, M., & Méndez, M. (2012). Secado y conservación de macroalgas para uso industrial. *Revista de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 10(1), 45–52.
- [4] McHugh, D. (2003). *A guide to the seaweed industry* (FAO Fisheries Technical Paper N.º 441, pp. 1–105). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).
- [5] Salas de la Torre, N., Córdova, C., & Estrada, A. (2008). Obtención de κ -Carragenano y λ -Carragenano a partir de macroalga *Chondracanthus chamissoi* y su aplicación en la industria alimentaria. *Industrial Data*, 11(2), 45–52.
- [6] Yashaswini Devi, G., Venkatesan, J., & Hawkins, S. A. (2021). Hydrocolloids from marine macroalgae: Isolation and applications. En *Algae for Food* (pp. 190–205). https://www.researchgate.net/publication/354452774_Hydrocolloids_from_Marine_Macroalgae_Isolation_and_Applications

ACERCA DEL AUTOR

Laurence Rommel Salmon Barrantes


Químico farmacéutico egresado de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM), y de la maestría en química por la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Posee experiencia en la industria farmacéutica y cosmética, ha sido asesor en el Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (Indecopi) y docente en la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), la PUCP, la Escuela Naval del Perú (ESNA) y la Universidad Peruana Los Andes (UPLA). Además, ha desarrollado este rol desde 2013, en Tecsup, en cursos de química, química orgánica, química inorgánica. Además, dicta cursos en bioquímica, farmacología, microbiología, industrias alimentarias, química industrial y radioquímica.

 lsalmon@tecsup.edu.pe

Anderson Jair Álvarez Benito

Preprofesional de Procesos Químicos y Metalúrgicos en Tecsup, Lima. Se desempeñó como técnico en química en Quimpac.

Actualmente, se desempeña en el área de Laboratorio Minero Metalúrgico en Alfred King Callao.

 anderson.alvarez@tecsup.edu.pe

Recibido: 16-07-2025

Revisado: 30-09-2025

Aceptado: 30-10-2025



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.



↗ INDEXADOS EN LATINDEX 2.0



La Revista I+i ahora forma parte del Catálogo 2.0
de Latindex, **sello internacional de calidad
editorial.**



Comparación de la eficacia de la gamificación frente a los métodos tradicionales en la capacitación en Seguridad y Salud en el Trabajo.



Capacitaciones en seguridad y salud en el trabajo: análisis comparativo entre gamificación y métodos convencionales

“Occupational Safety and Health Training: A Comparative Analysis of Gamification and Conventional Methods”

RESUMEN

Las capacitaciones en Seguridad y Salud en el Trabajo enfrentan con frecuencia el problema de la baja retención del conocimiento y el reto de garantizar que este se aplique eficazmente por parte de los trabajadores, debido al uso de metodologías convencionales centradas en la exposición teórica. Ante esta situación, surge la necesidad de implementar estrategias más dinámicas e interactivas que favorezcan un aprendizaje significativo y duradero.

El objetivo del presente estudio consistió en comparar la eficacia de la gamificación frente a los métodos tradicionales en la capacitación en Seguridad y Salud en el Trabajo, evaluando su impacto en la retención de información, la aplicación de habilidades y la satisfacción de los trabajadores con la capacitación recibida.

La investigación adoptó un diseño experimental de tipo pretest y postest, con grupo control y grupo experimental. De una población de 1371 trabajadores, se seleccionó una muestra de 100, distribuidos aleatoriamente en dos grupos. Se emplearon cuestionarios para evaluar tres dimensiones: retención de información, aplicación práctica de los conocimientos adquiridos y satisfacción con la capacitación.

Los resultados mostraron que el grupo que recibió capacitación mediante gamificación presentó una mejora promedio del 35,06 % en sus calificaciones postest frente al pretest, mientras que el grupo capacitado con el método tradicional mostró un incremento del 16,69 %. Asimismo, la aceptación del método fue notablemente mayor en el grupo gamificado (96 %) que en el grupo tradicional (32 %).

En conclusión, los hallazgos demuestran que la gamificación es considerablemente más efectiva que los métodos convencionales para la capacitación en Seguridad y Salud en el Trabajo, favoreciendo una mayor retención del conocimiento, un mejor desarrollo de habilidades prácticas y un elevado nivel de satisfacción en los trabajadores. Estos resultados respaldan la incorporación de estrategias lúdicas como una herramienta sólida para optimizar la efectividad de las capacitaciones en seguridad.

ABSTRACT

Occupational Safety and Health (OSH) training programs often face low knowledge retention and the challenge of ensuring that workers effectively apply what they learn, largely due to the use of conventional methodologies focused on theoretical exposition. This situation highlights the need for more dynamic and interactive strategies that promote meaningful and lasting learning.

The objective of this study was to compare the effectiveness of gamification with traditional methods in OSH training by evaluating their impact on information retention, skills application, and worker satisfaction.

The research employed a pre-test/post-test experimental design with a control group and an experimental group. From a population of 1,371 workers, a sample of 100 was randomly selected and assigned to the two groups. Questionnaires were used to assess three dimensions: information retention, practical application of the knowledge acquired, and satisfaction with the training.

The results showed that the group trained through gamification achieved an average improvement of 35.06% between the pre-test and post-test, whereas the group trained with traditional methods showed an increase of 16.69%. Additionally, acceptance



Palabras Claves

Capacitación en seguridad, gamificación, técnicas lúdicas, aplicación de habilidades, retención de información, satisfacción de la capacitación, seguridad y salud en el trabajo.

Key words

Safety training, gamification, game-based techniques, skills application, information retention, training satisfaction, Occupational Safety and Health.

of the method was significantly higher in the gamified group (96%) than in the traditional group (32%).

In conclusion, the findings demonstrate that gamification is considerably more effective than conventional methods for OSH training, as it fosters greater knowledge retention, improved development of practical skills, and higher levels of worker satisfaction. These results support the incorporation of game-based strategies as a robust tool for enhancing the effectiveness of safety training.

INTRODUCCIÓN

Las capacitaciones en seguridad y salud en el trabajo (SST) enfrentan un reto recurrente: mantener el compromiso de los trabajadores y asegurar que lo aprendido se traduzca efectivamente en prácticas seguras. Los métodos convencionales, como presentaciones o conferencias, suelen resultar monótonos y poco efectivos en términos de retención y participación activa.

En este contexto, la gamificación, que introduce elementos propios del diseño de juegos (puntos, recompensas, retroalimentación inmediata, niveles, entre otros), ha emergido como una estrategia innovadora para dinamizar los procesos formativos y potenciar la motivación, la retención y el compromiso de los participantes [2, 3].

Desde una perspectiva legal y organizacional, la Ley 29783 de Seguridad y Salud en el Trabajo y su reglamento (D. S. 005-2012-TR) establecen que las capacitaciones deben ser eficaces y garantizar la competencia del trabajador. A nivel económico, la mejora en la efectividad de las capacitaciones contribuye a reducir los costos asociados a accidentes laborales, ausentismo y rotación de personal. Asimismo, desde un enfoque comunitario y medioambiental, las capacitaciones efectivas fortalecen la cultura preventiva y promueven prácticas sostenibles que protegen tanto al trabajador como a su entorno.

Del mismo modo, normas internacionales como ISO 45001 y ANSI/ASSE Z490.1 destacan la importancia de la formación continua y medible para fortalecer la cultura preventiva.

En contextos de capacitación laboral, varios estudios recientes han demostrado los beneficios de la gamificación:

- Un estudio cuasiexperimental en empresas italianas reveló que el uso de «*live-action role-play*» mejoró significativamente el conocimiento en seguridad laboral, observándose mayores puntuaciones poscapacitación [12].
- En el ámbito de la formación online sobre seguridad vial, incorporar elementos gamificados (puntos, niveles, insignias, cronómetro) se asoció con una mejor retención del conocimiento y un mayor compromiso del usuario [16,5].

No obstante, también se han identificado limitaciones: algunas revisiones sistemáticas advierten que ciertas mecánicas pueden generar una motivación superficial basada en recompensas externas más que en el aprendizaje en sí [2].

En el actual escenario, caracterizado por una creciente exigencia de evidencia empírica, aún existen vacíos en comparaciones controladas específicas que contrasten la gamificación con

métodos convencionales en capacitaciones en Seguridad y Salud en el Trabajo, especialmente considerando variables clave como la retención de conocimiento, la aplicación práctica y la satisfacción del participante.

Diversas revisiones de la literatura han demostrado que la gamificación tiene un impacto positivo en la motivación y el aprendizaje, aunque sus efectos varían según el diseño y el contexto de aplicación [9].

Por ello, el presente estudio, desarrollado en un contexto industrial en la ciudad de Arequipa, tiene como objetivo comparar la eficacia de la gamificación frente a los métodos convencionales de capacitación en seguridad y salud en el trabajo, evaluando su impacto en la retención de información, la aplicación práctica y la satisfacción de los trabajadores.

FUNDAMENTOS

Gamificación y su base teórica

La gamificación, también denominada ludificación, se define como la aplicación de mecánicas y dinámicas propias de los juegos, como sistemas de puntos, recompensas, niveles, retroalimentación inmediata y narrativas interactivas, en contextos no lúdicos con el propósito de estimular la motivación, la participación y la retención del conocimiento [19]. En los últimos años, este enfoque ha sido ampliamente adoptado en entornos educativos y laborales, con resultados que evidencian mejoras en la implicación de los participantes y en el logro de competencias específicas.

Su fundamento teórico se encuentra en corrientes motivacionales como la teoría de la autodeterminación, que postula que las personas incrementan su nivel de compromiso cuando se satisfacen necesidades básicas de competencia, autonomía y vinculación social [4]. La gamificación, al proporcionar retroalimentación inmediata, metas claras y sentido de logro, genera un entorno propicio para estas condiciones. Además, se asocia a enfoques constructivistas, donde el aprendizaje se entiende como un proceso activo, experiencial y situado en contextos significativos.

En el campo formativo, la gamificación ha evolucionado más allá de una moda tecnológica para consolidarse como una metodología pedagógica estratégica. Investigaciones recientes destacan que no basta con añadir mecánicas de juego se requiere diseñar experiencias formativas con coherencia pedagógica, donde los elementos lúdicos estén subordinados a los objetivos de aprendizaje y no al revés.

Esta idea resulta especialmente crítica en ámbitos sensibles como la seguridad y salud en el trabajo, donde los errores pueden tener consecuencias directas sobre la integridad de las personas.

Evidencia empírica en seguridad laboral

De acuerdo con la Ley 29783 y el D. S. 005-2012-TR, los empleadores deben asegurar que la capacitación sea efectiva y documentada. A nivel internacional, el estándar ANSI/ASSE Z490.1 establece lineamientos para la evaluación de la eficacia de los programas de entrenamiento en seguridad. Estudios previos han demostrado que los entornos gamificados favorecen

la retención del conocimiento y el cumplimiento normativo [6, 17, 18, 13].

En esta misma línea, la literatura sobre la gamificación en contextos laborales ha mostrado resultados alentadores, particularmente en lo que respecta a la mejora de la retención de información y la aplicación de conductas seguras.

Un estudio de revisión documental realizado por Zamora-Romero y Meneses-Cuy (2022) analizó la aplicación de la gamificación en la formación en SST y concluyó que las organizaciones han comenzado a incorporar incentivos, retos virtuales y entornos lúdicos para fortalecer el aprendizaje y la participación de sus colaboradores [19]. Esta revisión, aunque exploratoria, refleja el creciente interés de las instituciones en transformar procesos de capacitación tradicionalmente monótonos en experiencias dinámicas.

De manera complementaria, Condori Colán *et al.* (2023) realizaron una revisión sistemática de estudios sobre gamificación en entrenamientos ocupacionales. Si bien identificaron aplicaciones exitosas en diversas industrias, también evidenciaron que aún falta robustez metodológica en los diseños de investigación, lo que limita la generalización de los resultados [4]. Esta limitación abre un campo fructífero para la investigación experimental en SST, como la que desarrolla el presente trabajo.

Por otra parte, en ámbitos corporativos, Bitrián y Buil (2024) demostraron que los programas de capacitación gamificada aumentaron la autoeficacia de los trabajadores y mejoraron conductas relacionadas con la seguridad de la información y la protección de datos [3]. Aunque el estudio se centra en ciberseguridad, sus conclusiones resultan extrapolables a la formación en SST, donde la autoeficacia percibida es un factor determinante para el cumplimiento de normas de prevención de riesgos.

En sectores de alto riesgo como la construcción civil, Guimarães *et al.* (2024) diseñaron un programa de capacitación apoyado en realidad virtual (VR) y gamificación. El estudio mostró que los trabajadores no solo adquirieron conocimientos técnicos, sino que también desarrollaron conciencia de los riesgos al simular situaciones críticas en entornos controlados [6]. Estos hallazgos refuerzan la hipótesis de que la gamificación, combinada con tecnologías inmersivas, puede generar experiencias de aprendizaje más seguras y efectivas que los métodos convencionales.

Finalmente, revisiones más amplias sobre tecnologías aplicadas a la formación en seguridad destacan el potencial de los juegos serios y la gamificación para promover una cultura de seguridad en sectores como la agricultura y la minería. Pedrosa-Esteban *et al.* (2021), en un análisis sistemático, concluyeron que estas herramientas favorecen la interiorización de normas y la reducción de incidentes, aunque subrayan la necesidad de fortalecer la evidencia empírica mediante ensayos controlados [18, 11].

Gamificación tecnológica: Realidad virtual y entornos inmersivos

La combinación de gamificación con entornos de realidad virtual (RV) constituye una de las líneas más innovadoras en la capacitación en SST.

Loh *et al.* (2022) realizaron una revisión sistemática de entrenamientos basados en RV en industrias de alto riesgo,

concluyendo que esta modalidad no solo mejora la satisfacción de los trabajadores, sino que también incrementa la transferencia de aprendizaje hacia el puesto de trabajo en comparación con métodos convencionales [18]. Al situar al trabajador en un entorno inmersivo donde debe tomar decisiones en tiempo real, la RV gamificada permite entrenar habilidades de manera segura y repetible.

En esta misma línea, Vercelli *et al.* [18] desarrollaron un simulador de RV gamificado para entrenar protocolos de emergencia en refinerías. Los resultados mostraron un alto nivel de satisfacción entre los participantes y una mayor confianza para actuar frente a situaciones críticas. Este tipo de hallazgos confirman que la gamificación, potenciada por tecnologías emergentes, puede transformar la capacitación en entornos laborales complejos, aumentando tanto el aprendizaje cognitivo como la preparación conductual.

Desafíos y limitaciones

Pese a los resultados positivos, la gamificación no está exenta de limitaciones. Almeida *et al.* [2] llevaron a cabo un mapeo sistemático sobre los efectos negativos de la gamificación en contextos educativos y profesionales. Entre los riesgos detectados se incluyen el exceso de énfasis en recompensas externas, la desmotivación al eliminar los estímulos, la superficialidad en la comprensión de contenidos e incluso conductas orientadas a «jugar con el sistema» en lugar de aprender de forma significativa [2].

En el ámbito de la SST, este riesgo cobra especial relevancia, ya que una motivación basada únicamente en recompensas podría generar una falsa sensación de seguridad. Por ello, diversos autores sugieren que la gamificación debe diseñarse con base en objetivos pedagógicos claros, reforzada por contenidos relevantes y acompañada de evaluaciones que garanticen la transferencia de los aprendizajes a la práctica diaria.

Síntesis integradora

En suma, la literatura académica muestra lo siguiente:

- La gamificación cuenta con fundamentos teóricos sólidos, apoyados en teorías motivacionales y constructivistas [19, 4].
- Existen evidencias empíricas positivas en la formación laboral, aunque aún escasas y con limitaciones metodológicas en SST [17].
- Las tecnologías inmersivas como la VR fortalecen el potencial de la gamificación en contextos de alto riesgo [18, 9].
- Los desafíos críticos obligan a diseñar con rigor metodológico para evitar efectos adversos como la motivación superficial [2].

Con base en estos hallazgos, el presente estudio justifica su pertinencia al comparar la efectividad de la gamificación frente al método tradicional en capacitaciones de SST, evaluando dimensiones de retención de información, aplicación práctica y satisfacción de los participantes.

METODOLOGÍA

Alcance de la investigación

La investigación se enmarca en un estudio aplicado, explicativo y de enfoque mixto, orientado a evaluar la efectividad de la técnica de gamificación en comparación con los métodos convencionales en las capacitaciones de SST de los trabajadores de un laboratorio industrial de la ciudad de Arequipa.

El alcance explicativo se justifica en la medida en que no solo se busca describir los resultados obtenidos, sino también explicar las causas y efectos de la intervención. Así, se determina de qué manera las técnicas lúdicas influyen en la retención de información, la aplicación práctica de habilidades y la satisfacción de los participantes.

Métodos

El diseño de investigación fue experimental, longitudinal y comparativo. Se trabajó con dos grupos de 50 trabajadores cada uno, seleccionados de forma aleatoria simple en el área de producción de la empresa.

- **Grupo control:** recibió la capacitación tradicional (presentaciones y contenidos expositivos).
- **Grupo experimental:** recibió la capacitación mediante la técnica de gamificación (dinámicas grupales, juegos educativos y simulaciones).

Tabla 1
Distribución de la muestra

Grupos para recibir capacitación	n.º de trabajadores	Porcentaje
Grupo 1	50	50.00
Grupo 2	50	50.00
Total	100.00	100.00

Fuente: Elaboración propia.

Ambos grupos fueron evaluados con un pretest y un posttest para medir la retención de información, además de evaluaciones prácticas y encuestas de satisfacción. Se aplicaron pruebas estadísticas (t de Student para muestras independientes) con el fin de identificar diferencias significativas entre ambos métodos.



Figura 1. Resultados de la evaluación del pre-test con método convencional

Fuente: Elaboración propia.

El gráfico presenta los resultados de la evaluación pretest del grupo 1 que se seleccionó para recibir la capacitación con el método convencional.

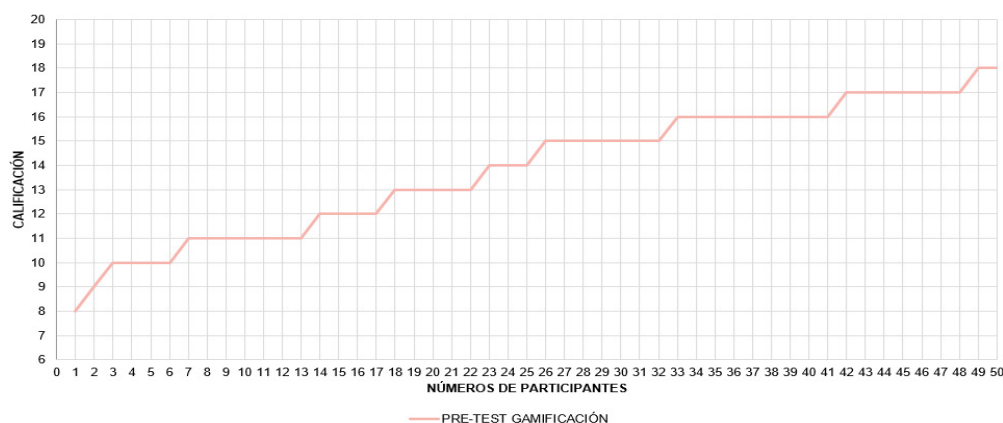


Figura 2. Resultados de la evaluación del pretest con gamificación

Fuente: Elaboración propia.

El gráfico presenta los resultados de la evaluación pretest del grupo 2 que se escogió para recibir la capacitación con gamificación.

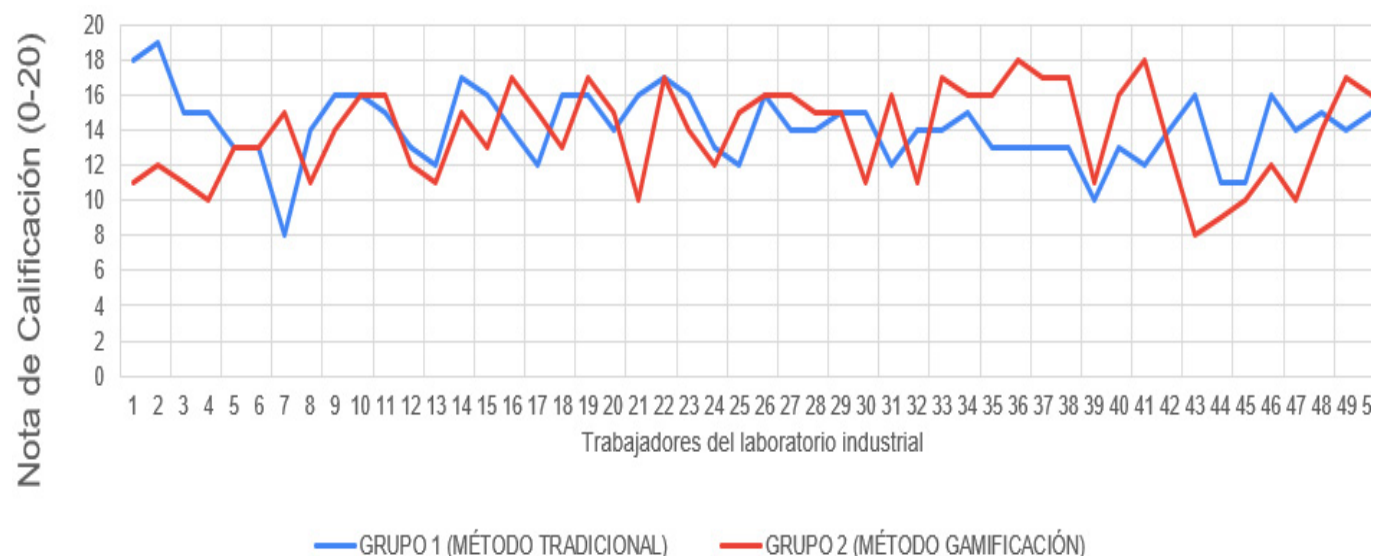


Figura 3. Comparación de la evaluación pretest de ambos grupos

Fuente: Elaboración propia.

El gráfico muestra las calificaciones iniciales obtenidas por los trabajadores del laboratorio industrial antes de iniciar la capacitación. Se comparan dos grupos: el grupo 1, que recibió capacitación mediante el método tradicional, y el grupo 2, que se capacitó utilizando gamificación. Las notas, que varían entre

0 y 20, indican el nivel de conocimiento preexistente en cada grupo. Esta evaluación inicial es crucial para establecer una línea de base que permita medir el impacto de los métodos de capacitación en el aprendizaje y la retención de información de los participantes.

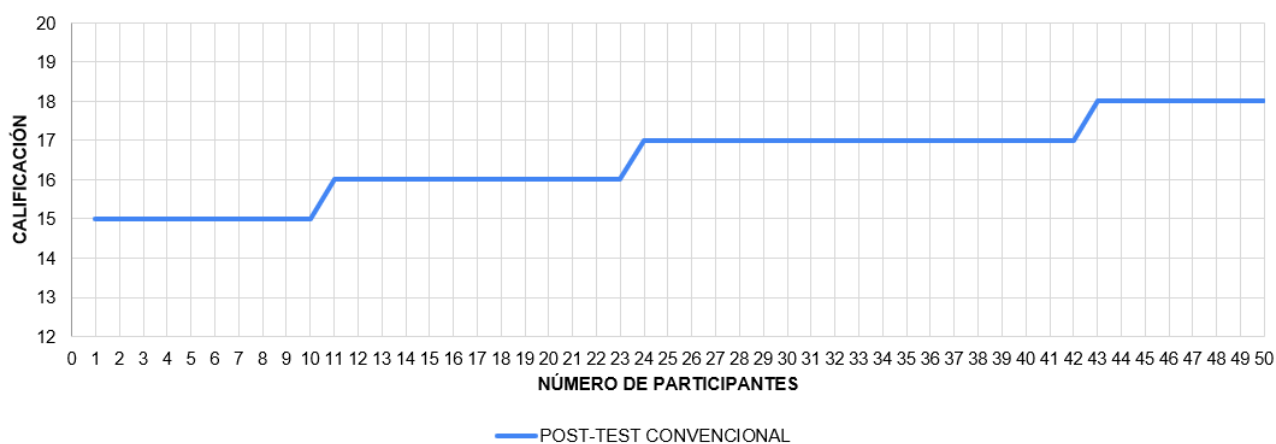


Figura 4. Resultados de la evaluación de posttest con método convencional

Fuente: Elaboración propia.

El gráfico presenta los resultados de la evaluación posttest del grupo 1 que fue seleccionado para recibir la capacitación con el método convencional.

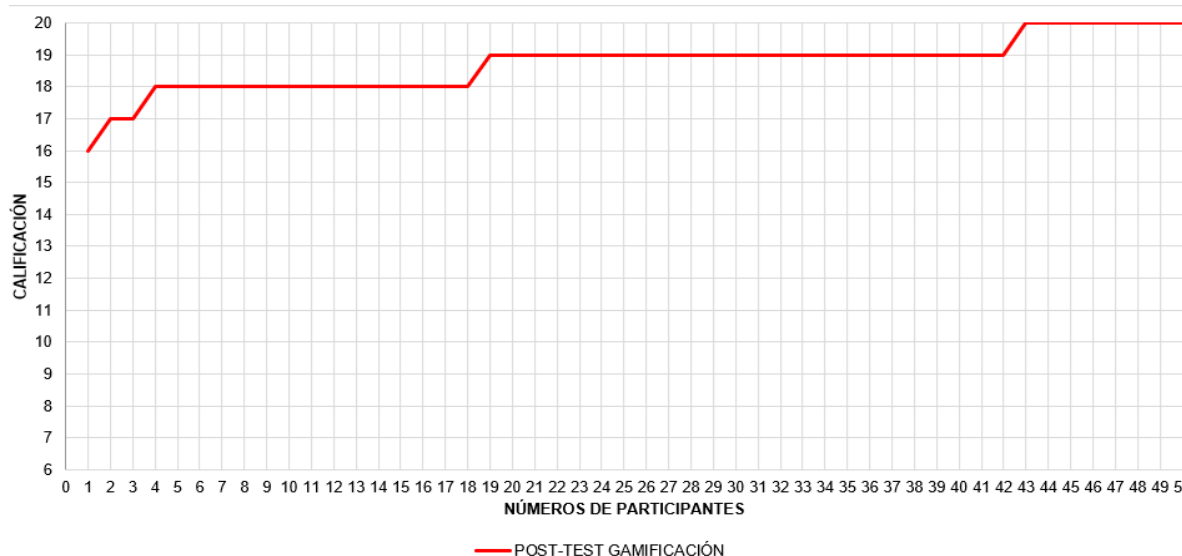


Figura 5. Resultados de la evaluación de posttest con gamificación

Fuente: Elaboración propia.

El gráfico presenta los resultados de la evaluación posttest del grupo 2 que fue seleccionado para recibir la capacitación con gamificación.

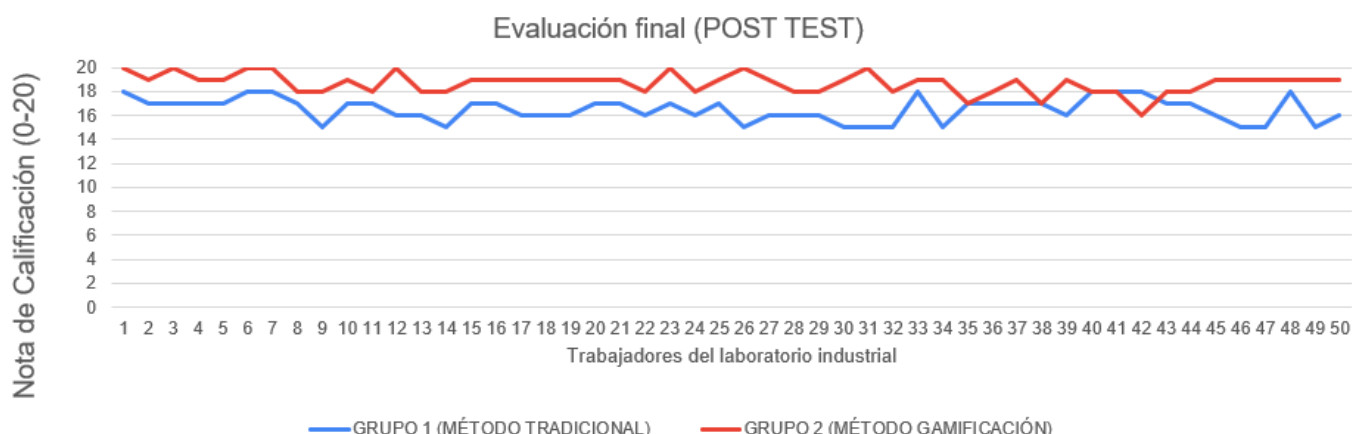


Figura 6. Comparación de la evaluación de posttest de los dos grupos

Fuente: Elaboración propia.

En la evaluación final del posttest se observan diferencias notables en las calificaciones de los trabajadores del laboratorio industrial según el método de capacitación utilizado. El grupo 1, que fue capacitado mediante el método tradicional, muestra una tendencia constante con calificaciones entre 15 y 18 puntos, sin alcanzar el máximo de 20 puntos. En contraste, el grupo 2, que recibió capacitación con gamificación, demuestra un desempeño superior, con la mayoría de sus miembros obteniendo calificaciones entre 19 y 20 puntos.

Técnicas y herramientas

- **Cuestionarios estructurados:** aplicados en modalidad de pretest y posttest para evaluar la retención de conocimientos.

- **Observación directa:** registro del grado de participación, motivación y desempeño práctico de los trabajadores durante las sesiones.
- **Encuestas de satisfacción:** administradas tras la capacitación para medir la percepción de los participantes.
- **Análisis estadístico:** comparación de promedios y aplicación de pruebas t de Student.
- **Instrumentos digitales y dinámicos:** utilizados para implementar la metodología lúdica (juegos de rol, simulaciones de riesgo, dinámicas de equipo).

Análisis de los resultados

Estos resultados indican una mejora significativa en la retención de información y la comprensión de los contenidos por parte de los trabajadores capacitados mediante gamificación en

comparación con el método tradicional. La consistencia en las altas calificaciones del grupo 2 resalta la efectividad de incorporar técnicas lúdicas e interactivas en las capacitaciones de seguridad y salud en el trabajo, favoreciendo un aprendizaje más sólido y duradero.

Tabla 2
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales

	Método convencional	Método de gamificación
Media	16,5	18,72
Varianza	0,989795918	0,736326531
Observaciones	50	50
Varianza agrupada	0,863061224	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	98	
Estadístico t	-11,948192	
P(T<=t) una cola	0,005350	
Valor crítico de t (una cola)	1,660551217	
P(T<=t) dos colas	0,0145	
Valor crítico de t (dos colas)	1,984467455	

Fuente: Elaboración propia.

En la evaluación final del postest se evidencia una mejora significativa en el desempeño de los trabajadores del laboratorio industrial, dependiendo del método de capacitación aplicado. El grupo 1, que recibió capacitación mediante el método tradicional, mantuvo calificaciones en un rango de 15 a 18 puntos, con una ligera mejora en comparación con el pretest, pero sin alcanzar el puntaje máximo de 20 puntos.

Por otro lado, el grupo 2, que se capacitó utilizando gamificación, mostró un aumento considerable en sus calificaciones. Antes de la capacitación, los puntajes del grupo 2 fluctuaban entre

8 y 18 puntos, pero en la evaluación postest la mayoría de los trabajadores obtuvo calificaciones entre 19 y 20 puntos.

Análisis inferencial

El análisis de la efectividad de la gamificación frente al método convencional en las capacitaciones de seguridad para trabajadores de un laboratorio industrial en Arequipa muestra resultados positivos. La gamificación mejora la retención de información, la aplicación de habilidades prácticas de los conocimientos y la satisfacción de los participantes.

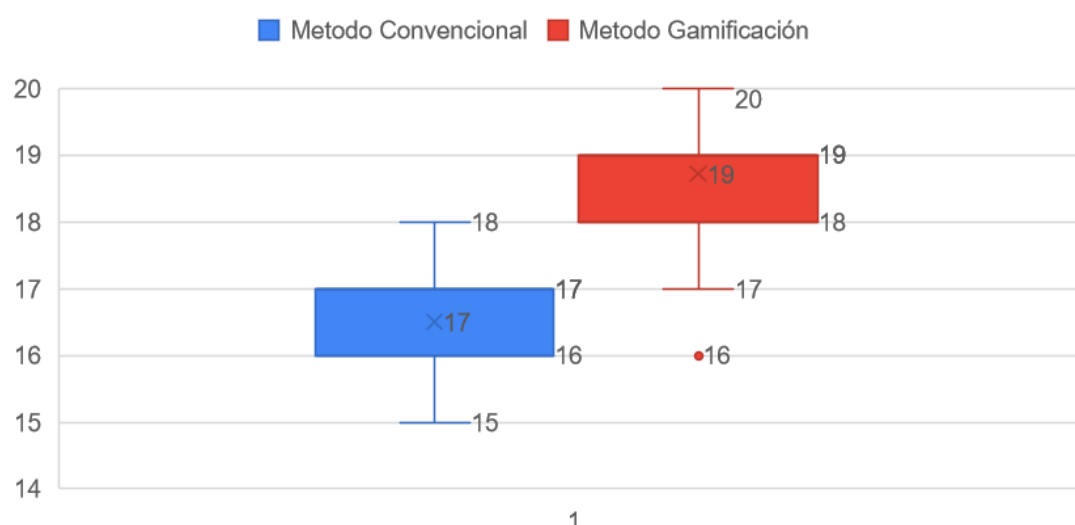


Figura 7. Comparación de la evaluación de posttest de los dos grupos

Fuente: Elaboración propia.

En este gráfico, observamos que el grupo capacitado con gamificación obtuvo calificaciones más altas y un rango de calificaciones más estrecho, lo que indica una mayor consistencia en los resultados. La calificación promedio para el grupo con gamificación es aproximadamente 19, con un rango entre 17 y 20, lo que representa un aumento en comparación con el grupo convencional. Este último muestra una calificación promedio cercana a 17, con un rango de 15 a 18. Esto sugiere que el método de gamificación no solo ha mejorado las calificaciones promedio de los participantes, sino que también redujo la variabilidad de los resultados, reflejando una efectividad superior en la formación proporcionada a los trabajadores.

Limitaciones de la investigación

1. **Tamaño de la muestra:** se trabajó solo con 100 trabajadores de un área específica, lo que puede limitar la generalización de los resultados al resto de la empresa.
2. **Tiempo de intervención:** el estudio tuvo una duración limitada, lo que impidió evaluar la permanencia de los efectos en el largo plazo.

3. **Recursos disponibles:** la implementación de la gamificación requirió materiales y espacios que no siempre se encontraban en condiciones óptimas.

4. **Sesgo de participación:** algunos trabajadores mostraron resistencia inicial frente a las dinámicas lúdicas, lo que pudo influir en los resultados de motivación.

RESULTADOS

Encuesta a participantes

Según los datos recopilados, los trabajadores del grupo que recibió capacitación mediante gamificación mostraron un nivel de satisfacción del 96 %, mientras que solo el 32 % de los trabajadores del grupo convencional manifestaron una valoración positiva. Estos resultados coinciden con el metaanálisis de Johnson et al., que reporta mejoras sustanciales en retención y percepción gracias a metodologías lúdicas centradas en la experiencia del usuario [9].

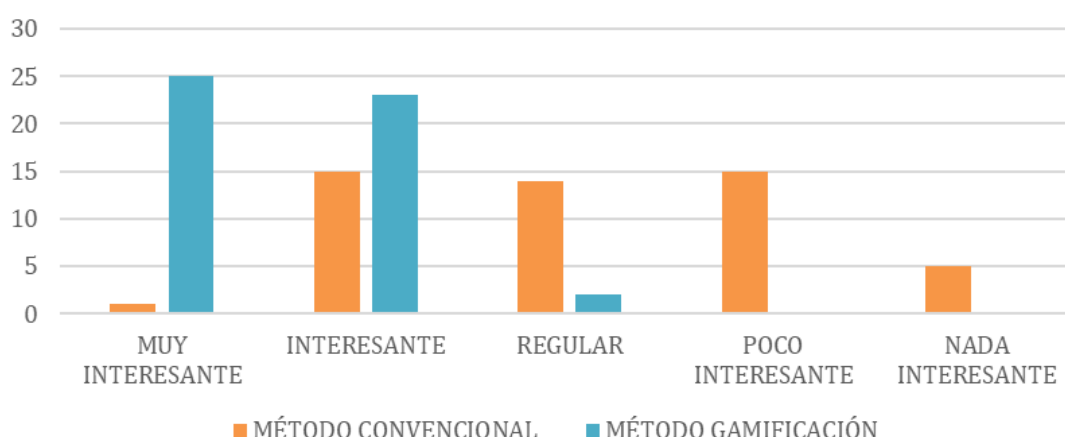


Figura 8. Comparación de satisfacción en la capacitación

Fuente: Elaboración propia.

Según la encuesta aplicada a los trabajadores que recibieron la capacitación con el método convencional, solo el 2 % la consideró muy interesante, un 30 % la encontró interesante, un 28 % la calificó como regular, un 30 % como poco interesante y un 10 % como nada interesante. Esto sugiere que, aunque algunos trabajadores encontraron la capacitación muy interesante e interesante, la mayoría no estuvo satisfecha.

En el caso de los trabajadores que recibieron la capacitación con gamificación, se obtuvo que el 50 % la calificó como muy interesante, el 46 % como interesante, el 4 % como regular y ninguno la consideró poco o nada interesante. En el resultado se observa que la capacitación con gamificación fue más satisfactoria en comparación con el método convencional, ya que un 96 % de los participantes la calificó como muy interesante e interesante, frente al 32 % del grupo que recibió la capacitación de manera convencional.

Evaluación longitudinal: Retención de información

El análisis pretest-posttest evidenció una mejora del 35,06 % en el grupo de gamificación frente al 16,69 % del grupo convencional. Esto es similar a las tendencias reportadas en revisiones de Ho et al. [8] y demuestra la relevancia del diseño gamificado en la seguridad laboral.

Aplicación práctica y desempeño

En contextos de entrenamiento práctico, el grupo gamificado exhibió un desempeño notablemente superior: el 92 % alcanzó un alto nivel de ejecución de las tareas simuladas, frente al 68 % del grupo convencional. Esto se alinea con la evidencia empírica que señala que la gamificación mejora las conductas seguras al involucrar más activamente al participante [1].

Revisión comparativa con literatura científica

- Guimarães *et al.* [6] analizaron en *Work* el uso de tecnologías y juegos serios en capacitaciones de seguridad civil, concluyendo que estas estrategias fomentan una mayor conexión y compromiso con el contenido [6].
- En el ámbito corporativo, se ha demostrado que la gamificación reduce comportamientos de riesgo, como ocurre con la evaluación de conciencia cibernética que demuestra mejoras en conductas seguras tras intervenciones gamificadas [3].

La convergencia entre los resultados empíricos de este estudio y las evidencias publicadas en revistas confirma la superioridad de la gamificación para lograr aprendizajes más sólidos, una mayor participación y una mayor satisfacción, proponiéndola como una estrategia prioritaria para los programas de formación en seguridad laboral.

CONCLUSIONES

- La técnica de gamificación resultó significativamente más efectiva que el método convencional en la retención de información, con un incremento del 35,06 % frente al 16,69 % del grupo control.
- Los trabajadores que participaron en capacitaciones lúdicas mostraron un mejor desempeño en la aplicación de habilidades prácticas, alcanzando un 92 % de resultados altos en comparación con el 68 % del grupo convencional.
- La satisfacción de los trabajadores fue considerablemente mayor en el grupo de gamificación (96 % positiva) frente al grupo convencional (32 %), lo que indica que la metodología lúdica no solo enseña, sino que también motiva.
- Los instructores destacaron la utilidad y aplicabilidad de la técnica, manifestando un alto interés en su implementación continua.

Estos resultados coinciden con estudios internacionales, reforzando la evidencia de que las metodologías lúdicas favorecen aprendizajes más duraderos y efectivos en contextos de seguridad laboral.

RECOMENDACIONES

1. Implementación sistemática de gamificación en programas de capacitación

Se recomienda la adopción formal y sostenida de metodologías gamificadas en los programas de seguridad y salud en el trabajo (SST). La evidencia muestra que «la gamificación aumenta significativamente la motivación y el compromiso de los participantes, generando un aprendizaje más efectivo que los métodos convencionales» [7].

2. Capacitaciones periódicas con refuerzo gamificado

La literatura respalda que «la gamificación no solo impacta en la retención inmediata, sino que el refuerzo periódico permite

consolidar conocimientos y mantener la motivación a lo largo del tiempo» [8]. Por ello, se recomienda implementar sesiones recurrentes que incluyan dinámicas interactivas y simulaciones.

3. Expansión del enfoque a otros sectores e industrias

Estudios recientes sostienen que «las estrategias de gamificación aplicadas a la seguridad ocupacional en distintos sectores han mostrado mejoras en la retención de información y en la reducción de conductas de riesgo» [1]. Esto respalda la necesidad de evaluar su aplicación en diferentes contextos industriales.

4. Integración de tecnologías digitales

Según investigaciones en entornos industriales, «el uso de plataformas digitales y simuladores de realidad virtual potencia la efectividad de la gamificación al proporcionar experiencias inmersivas con bajo riesgo» [11]. Se recomienda incorporar estas herramientas en futuras capacitaciones.

5. Evaluación longitudinal del impacto

La evidencia sugiere que «los estudios longitudinales permiten observar no solo el aprendizaje inmediato, sino también la transferencia de habilidades a contextos reales de trabajo» [15]. Por lo tanto, se sugiere ampliar el horizonte temporal del análisis.

6. Personalización de la gamificación

Se recomienda adaptar las dinámicas a las características de los trabajadores, ya que «los programas de gamificación deben considerar el perfil sociodemográfico y cultural de los participantes para maximizar su impacto» [5].

7. Fomento de la cultura preventiva

Finalmente, «la gamificación no debe limitarse a una técnica puntual de formación, sino integrarse dentro de una estrategia más amplia que fomente la cultura de seguridad organizacional» [14].

REFERENCIAS

- [1] Ajaka, C., RazaviAlavi, S. R., Kaushik, A. K., & Martinez, P. (2024). *Gamification of safety training in construction: A UK professional perspective*. In *Proceedings of the 2024 European Conference on Computing in Construction*. <https://doi.org/10.35490/EC3.2024.295>
- [2] Almeida, C., Kalinowski, M., Uchoa, A., & Feijó, B. (2023). *Negative effects of gamification in education software: Systematic mapping and practitioner perceptions*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2305.08346>
- [3] Bitrián, P., & Buil, I. (2024). Gamification in workforce training: Improving employees' self-efficacy and information security and data protection behaviours. *Journal of Business Research*, 179, 114685. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2024.114685>
- [4] Condori Colán, C., Barco Peralta, D., Villanueva Flores, R. M., & Morales Gomero, J. C. (2023). *Gamification in occupational safety training: A systematic literature review*.

In *Proceedings of the 4th South American International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM)*. IEOM Society International.

companies. *New Solutions: A Journal of Environmental and Occupational Health Policy*, 32(2), 144–154. <https://doi.org/10.1177/10482911221105785>

- [5]** Eymerich, L., Seixas, G., & Alves, M. (2022). The effects of personalized gamification on students' flow experience, motivation, and enjoyment. *Smart Learning Environments*, 9, Article 16. <https://doi.org/10.1186/s40561-022-00194-x>
- [6]** Guimarães, A., Cavalcanti, M., & Vasconcelos, B. M. (2024). Gamification using technologies for occupational safety training in the civil construction sector. *Work*, 77(2), 477–485. <https://doi.org/10.3233/WOR-220685>
- [7]** Hamari, J., Koivisto, J., & Sarsa, H. (2014). Does gamification work? A literature review of empirical studies on gamification. In *Proceedings of the 47th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)* (pp. 3025–3034). <https://doi.org/10.1109/HICSS.2014.377>
- [8]** Ho, A., Tsang, E., Lee, A., Ching, A., & Sum, R. (2025). *The effect of gamification on learning engagement: The case of using interactive app in workplace safety training*. In *Proceedings of HAC Convention 2025* (Submission ID: HAC787).
- [9]** Johnson, D., Deterding, S., Kuhn, K.-A., Staneva, A., Stoyanov, S., & Hides, L. (2016). Gamification for health and wellbeing: A systematic review of the literature. *Internet Interventions*, 6, 89–106. <https://doi.org/10.1016/j.invent.2016.10.002>
- [10]** Nawaz, I., Cuenen, A., Wets, G., Paul, R., Ahmed, T., & Janssens, D. (2024). Evaluating the effectiveness of an online gamified traffic safety education platform for adolescent motorcyclists in Pakistan. *Applied Sciences*, 14(19), Article 8590. <https://doi.org/10.3390/app14198590>
- [11]** Rey-Becerra, E., Barrero, L. H., Ellegast, R., & Kluge, A. (2023). Improvement of short-term outcomes with VR-based safety training for work at heights. *Applied Ergonomics*, 112, Article 104077. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2023.104077>
- [12]** Ricci, F., & Bravo, G. (2022). Live-action role playing for safety training: Effectiveness evaluation in two Italian companies. *New Solutions: A Journal of Environmental and Occupational Health Policy*, 32(2), 144–154. <https://doi.org/10.1177/10482911221105785>
- [13]** Scorgie, D., Feng, Z., Paes, D., Parisi, F., Yiu, T. W., & Lovreglio, R. (2024). Virtual reality for safety training: A systematic literature review and meta-analysis. *Safety Science*, 171, 106372. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106372>
- [14]** Silic, M., & Lowry, P. B. (2020). Using design-science based gamification to improve organizational security training and compliance. *Journal of Management Information Systems*, 37(1), 129–161. <https://doi.org/10.1080/07421222.2019.1705512>
- [15]** Sun, R., Wang, Y., Wu, Q., et al. (2024). Effectiveness of virtual and augmented reality for cardiopulmonary resuscitation training: A systematic review and meta-analysis. *BMC Medical Education*, 24, Article 730. <https://doi.org/10.1186/s12909-024-05720-8>
- [16]** Toda, A. M., Klock, A. C. T., Oliveira, W., et al. (2020). Analysing gamification elements in educational environments using an existing gamification taxonomy. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2008.05473>
- [17]** Toyoda, R., Russo-Abegão, F., & Glassey, J. (2022). VR-based health and safety training in various high-risk engineering industries: A literature review. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 19, Article 42. <https://doi.org/10.1186/s41239-022-00349-3>
- [18]** Vercelli, G., Iacono, S., Martini, L., Zardetto, M., & Zolezzi, D. (2024). *From risk to readiness: VR-based safety training for industrial hazards* (arXiv preprint). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.13725>
- [19]** Zamora-Romero, D., & Meneses-Cuy, S. P. (2022). La gamificación como estrategia de formación en seguridad y salud en el trabajo: Una revisión documental. *Revista Venezolana de Gerencia*, 27(98), 456–470. <https://www.produccioncientificaluz.org/index.php/rvg/article/view/38867>

ACERCA DE LOS AUTORES

Fernando Hugo Humpiri Montoya

Ingeniero industrial. Actualmente, curso la maestría en Docencia Universitaria y Gestión Educativa en la Universidad Tecnológica del Perú. Se encuentra certificado como Técnico en Emergencias Médicas en Argentina. Asimismo, posee una especialización en Higiene Laboral por la Universidad ESAN y en Gamificación de Procesos Educativos y Empresariales por la Escuela de Posgrado de la Universidad San Ignacio de Loyola (USIL), Especialización en Prevención de Riesgos Laborales por CEEUR de España. Especialista en Ergonomía Laboral por la Universidad Continental y CENEA en España. Instructor del Programa Internacional Stop The Bleed®. Certificación Internacional como Entrenador lúdico en SST por la Asociación Latinoamericana de Seguridad e Higiene en el trabajo (ALASEHT). Instructor de Seguridad y Salud

en el Trabajo desde 2012 para empresas de gran minería del sur del Perú. Ha liderado con éxito el desarrollo de cursos y programas de capacitación para empresas mineras. Actualmente, se desempeña como docente de la carrera Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo en Tecsup - Arequipa.

 fhumpiri@tecsup.edu.pe

Recibido: 22-09-2025

Revisado: 22-10-2025

Aceptado: 10-11-2025



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.

Implementación de la metodología Lego® Serious Play® en las carreras profesionales de formación regular en instituto técnico de educación superior.



Lego® Serious Play®: Una nueva forma de enseñanza

Lego® Serious Play®: A new way of teaching

RESUMEN

El presente artículo tiene como objetivo principal medir la satisfacción de los alumnos del Programa de Formación Continua (PFR) de Tecsup - Sede Sur mediante la implementación de la metodología Lego® Serious Play® en las carreras profesionales de PFR. La investigación es del tipo aplicada, el nivel es explicativo, con un enfoque cuantitativo; asimismo, es una investigación de campo, ya que se obtuvo la información del lugar de los hechos. La población consiste en estudiantes de PFR de Tecsup - Sede Sur y la muestra estuvo compuesta por estudiantes de los cursos de Desarrollo Personal, Soporte de Hardware y Software, Ciencias Básicas Aplicadas, Técnicas de Expresión Oral y Escrita, Investigación de Mercados, Comprensión y Producción de Textos, Ondas y Calor, Mejora Continua en el Diseño, Calidad y Mejora Continua, Investigación e Innovación Tecnológica, Diseño de Innovación de Proyectos, Emprendimiento, Desarrollo Profesional y Sociedad y Desarrollo Sostenible. Para medir el desarrollo de la metodología Lego® Serious Play®, se aplicaron encuestas a los estudiantes de las carreras de PFR para saber el nivel de satisfacción de los alumnos al finalizar los talleres.

Los resultados muestran que un 59 % de los alumnos opinaron que se sintieron «muy satisfechos» con la metodología Lego® Serious Play®, el 34 % indicaron que sintieron «Satisfechos», por lo que solo en ambos se tiene un 93 % de aceptación que muestra que los estudiantes estuvieron complacidos con la metodología. Además, se observó que, en 2023, alrededor de 1,865 alumnos se beneficiaron al experimentar con la metodología, debido a que aprendieron haciendo, es decir, construyeron modelos y retos, y crearon historias alrededor de esos modelos en grupo. Además, en 2024, hubo un crecimiento abarcando 3,956 alumnos superándolo en 112 %, este incremento refleja que la institución y los docentes perciben que a LSP como una metodología bien aceptada por ellos, lo que refuerza la decisión de seguir aplicándolas en los siguientes semestres académicos. Se concluye que la metodología atrae, retiene y multiplica la participación estudiantil, reforzándolo con los resultados de la encuesta quienes manifestaron estar muy conformes con la experiencia.

ABSTRACT

The main objective of this study is to measure the satisfaction of students in the Continuing Education Program (PFR) at Tecsup - Southern Campus through the implementation of the Lego® Serious Play® (LSP) methodology in PFR professional programs. The research employs an applied, explanatory design with a quantitative approach; furthermore, it is classified as field research since data were collected on-site. The population comprised PFR students from Tecsup - Southern Campus and the sample was composed of students from the following courses: Personal Development, Hardware and Software Support, Applied Basic Sciences, Oral and Written Expression Techniques, Market Research, Text Comprehension and Production, Waves and Heat, Continuous Improvement in Design, Quality and Continuous Improvement, Technological Research and Innovation, Project Innovation Design, Entrepreneurship, Professional Development, and Society and Sustainable Development. To evaluate the Lego® Serious Play® methodology, surveys were administered to students to determine their level of satisfaction at the end of the workshops.

The results show that 59% of students felt "Very satisfied" with the LSP methodology, and 34% indicated that they felt "Satisfied"; combined, this represents a 93% acceptance rate, demonstrating that students were pleased with the methodology. Additionally, it was observed that in 2023, approximately 1,865 students benefited from the methodology, learning through a "learning-by-doing" approach involving model building, challenges, and group storytelling. Furthermore, in 2024, participation grew to 3,956 students, representing a 112% increase. This increase reflects that the institution and teachers perceive LSP as a highly accepted methodology, which reinforces the decision to continue applying it in subsequent academic semesters. It is concluded that the methodology attracts, retains, and multiplies student participation, a finding reinforced by the results of the survey, in which respondents expressed being very satisfied with the experience.



Palabras Claves

Lego Serious Play, habilidades blandas, satisfacción, trabajo colaborativo, participación, gamificación

Key words

Lego Serious Play, soft skills, satisfaction, collaborative work, participation, gamification

INTRODUCCIÓN

Medir la satisfacción de los estudiantes en el uso de la metodología Lego® Serious Play® (LSP) resulta fundamental para evaluar su efectividad en los estudiantes como herramienta de gamificación. Esta metodología, basada en la construcción de desafíos y retos, busca fomentar la comunicación, fortalecer el trabajo en equipo, facilitar una reflexión profunda y desarrollar la creatividad e innovación en las personas. Ante ello, en 2016, *The Wall Street Journal* realizó un estudio sobre las habilidades blandas a más 900 ejecutivos entre gerentes y directores de empresas. De todos ellos, el 92 % afirmó que las habilidades blandas o no técnicas (como la comunicación, la iniciativa, el trabajo en equipo, el liderazgo y la gestión de conflictos, entre otras) son tan relevantes como las habilidades duras o técnicas para que un colaborador se pueda desempeñar laboralmente. Asimismo, en el estudio, también se encontró que el 89 % de los gerentes concluyó que se dificulta encontrar colaboradores con este tipo de habilidades; en ese sentido, medir la satisfacción en cuanto a LSP es importante, pues su enfoque busca precisamente fortalecer dichas habilidades [15].

En el mundo educativo a nivel internacional, la medición de la satisfacción de la metodología LSP mostró resultados muy positivos. Diversos estudios demuestran su utilidad para mejorar la comunicación, la creatividad, la innovación y resolución de problemas [20]. Asimismo, las instituciones adoptan metodologías como los aprendizajes basados en casos, el pensamiento en el diseño, aprendizaje basado en proyectos y, finalmente, la gamificación los cuales están siendo adoptadas con mucho éxito [5].

En el ámbito nacional, el Ministerio de Educación del Perú sigue fortaleciendo el desarrollo de competencias transversales en la educación superior tecnológica y se enfocan en las habilidades como trabajo en equipo, el pensamiento crítico y la innovación de los estudiantes para que, en un corto plazo, se puedan insertar en su campo laboral [12]. A pesar de esto, en múltiples investigaciones, se continúan reportando limitaciones en las aplicaciones de dichas competencias, debido a que hay mucha distancia entre la teoría y la práctica [17]. En ese sentido, muchas instituciones aplican la metodología LSP en sus distintas carreras y los resultados reflejan un alto nivel de satisfacción en los estudiantes. Así, la metodología LSP resulta una alternativa.

En Tecsup Sede Sur, en las carreras del Programa de Formación Regular (PFR), como Electrónica y Automatización Industrial, Operaciones Mineras, Operación de Plantas de Procesamiento de Minerales, Administración de Redes y Comunicaciones, Gestión y Mantenimiento de Maquinaria Pesada, Electricidad Industrial con Menciones en Sistemas Eléctricos de Potencia, Diseño y Desarrollo de Software y Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo desarrollan cursos como Desarrollo Personal y Desarrollo Profesional donde fortalecen sus competencias como liderazgo, trabajo en equipo, comunicación efectiva, liderazgo entre otros. Asimismo, en 2023, se decidió implementar el desarrollo de la metodología LSP en diferentes cursos de las carreras técnicas que brinda Tecsup y, con ello, se consiguió la información sobre nivel de satisfacción y porcentaje de participación.

FUNDAMENTOS

Lego® Serious Play® se trata de una metodología de gamificación que inició en 1996, cuando los profesores del Instituto para el Desarrollo de la Gerencia (IMD), Johan Roos y Bart Víctor, crearon el concepto y el proceso de «juego serio». Este método es el resultado de 15 años de investigación, fue pensado como uso interno y luego como una manera de permitir a los gerentes describir, crear y desafiar sus puntos de vista sobre sus negocios para liberar la creatividad y potencial humano de una organización.

En 2020, Lego® convirtió el método en *open source* (fuente abierta). Esta decisión creó una gran comunidad de practicantes y, hoy en día, de forma imparable, el método prospera en una amplia gama de aplicaciones [2].

La importancia de la metodología LSP en la educación radica en los diferentes aspectos:

Estimula la creatividad y ayuda a resolver problemas

La metodología LSP en el tiempo se ha convertido en una herramienta muy útil de gamificación en el ámbito educativo y, además, permite pensar con las manos. Al construir con las diferentes piezas de Lego, tanto docentes como estudiantes pueden crear y representar variedad de ideas complejas de una forma sencilla y visual que permitan que las personas imaginen. Esto ayuda a mirar los problemas desde diferentes puntos y a encontrar posibles soluciones más creativas e innovadoras. Además, cuando uno manipula físicamente los bloques, recuerda esa etapa de niño donde se activan procesos mentales que fortalecen la capacidad de análisis mediante las fichas de LSP [9].

Aprendizaje significativo y participativo

Una de las principales fortalezas de la metodología LSP consiste en su capacidad para generar un aprendizaje activo y participativo. La construcción de modelos con piezas lego fomenta una implicación emocional con el conocimiento y el pensamiento crítico lo que potencia la retención y comprensión del contenido [7]. Además, según la metodología, al narrar el significado de sus modelos o construcciones, los estudiantes desarrollan habilidades comunicativas, reflexionan sobre sus experiencias de sí mismos o del grupo y se apropian del aprendizaje, lo cual responde a enfoques constructivistas y centrados en el estudiante.

Inclusión y equidad en el aula

LSP ofrece una forma inclusiva de participación, ya que permite a todos los estudiantes expresar sus ideas y opiniones, incluso a aquellos que podrían sentirse inhibidos (personas tímidas). Las dinámicas de la metodología promueven la igualdad de voz y la democratización del conocimiento dentro del aula, lo que facilita que las contribuciones individuales se valoren por igual y también en grupo [6]. Esto resulta muy importante en contextos de diversidad, donde la participación de todos los estudiantes resulta crucial para que desarrollen diferentes habilidades blandas.



Figura 1. Taller Lego® Serious Play® – Bangkok ofrecido por lasia Thailand

Fuente: Lego Serious Play.

Desarrollo de habilidades socioemocionales y trabajo en equipo

El uso de LSP contribuye al fortalecimiento de habilidades socioemocionales esenciales para la formación integral de los estudiantes, como la empatía, la comunicación asertiva, la escucha activa y la colaboración. Al trabajar en grupos, alrededor de una mesa los participantes no solo comparten sus modelos, sino experiencias que logran que comprendan las perspectivas de los demás, promoviendo un ambiente de respeto, trabajo en equipo y cooperación [11]. Estas habilidades de trabajo en equipo, hoy en día, son muy importantes, debido a que los estudiantes en su futuro tendrán que trabajar y lidiar con entornos laborales complejos.

Aplicación en distintos niveles y áreas del conocimiento

La versatilidad de LSP permite su aplicación en diversos niveles educativos y disciplinas, desde la educación básica hasta la educación superior, y en áreas tan variadas como la ingeniería, la psicología, la administración o las humanidades. Esta adaptabilidad convierte a LSP en una herramienta poderosa para innovar en la enseñanza, promover la interdisciplinariedad y fomentar un aprendizaje profundo y contextualizado [9]. De este modo, se alinea con las demandas contemporáneas de una educación más experiencial y centrada en el estudiante.

En la actualidad, la educación superior enfrenta el reto de formar egresados que no solo dominen contenidos técnicos, sino que también posean habilidades blandas como liderazgo, pensamiento crítico, creatividad, comunicación efectiva y trabajo en equipo. Estas competencias, esenciales para el desempeño profesional en un entorno laboral cambiante, no siempre se desarrollan mediante métodos de enseñanza tradicionales [13].

Frente a este desafío, la metodología LSP ha cobrado protagonismo como una herramienta lúdica y estructurada que promueve el aprendizaje activo y significativo. Varios estudios recientes han demostrado su eficacia en contextos técnicos

y universitarios. Por ejemplo, Cardoso *et al.* [3] implementaron LSP en un curso de ingeniería de una universidad portuguesa y observaron una mejora sustancial en la colaboración, la creatividad y la toma de decisiones de los estudiantes. Asimismo, un estudio en México por Soto *et al.* [18] en una universidad tecnológica mostró que los participantes que usaron LSP en proyectos grupales desarrollaron mayor empatía, habilidades de liderazgo y comunicación asertiva.

En América Latina, Pérez y Gómez [14] analizaron la aplicación de LSP en cursos de emprendimiento en universidades peruanas, concluyendo que la metodología permitió a los estudiantes representar ideas abstractas, explorar soluciones innovadoras y fortalecer su autoconfianza. En este sentido, el juego se convierte en un medio para la reflexión crítica y la construcción de conocimiento colectivo [16].

Desde una perspectiva educativa, LSP se basa en el aprendizaje constructivista y la teoría del juego serio. A través de la construcción de modelos con piezas de Lego, los estudiantes externalizan ideas complejas, negocian significados y participan activamente en discusiones profundas. Esto favorece el desarrollo de habilidades metacognitivas y socioemocionales [10]. Además, estudios como el de Castillo y Ríos [4] señalan que los egresados que participaron en talleres de LSP durante su formación académica reportaron una mejor adaptación al entorno laboral y mayor capacidad para resolver conflictos interpersonales.

En el contexto de la educación técnica, donde se prioriza la formación práctica, LSP representa una herramienta valiosa para integrar competencias blandas sin desatender los contenidos curriculares. Torres *et al.* [19], en una experiencia en un instituto técnico en Colombia, identificaron que los estudiantes que usaron LSP en el curso de gestión de calidad mejoraron su pensamiento crítico y su capacidad para trabajar bajo presión en equipo.

Estas evidencias refuerzan la necesidad de incorporar metodologías innovadoras como LSP en programas de formación técnica. Su implementación no solo incrementa la participación activa y el compromiso estudiantil, sino que también aporta

a la formación de profesionales más competentes, reflexivos y preparados para los desafíos del mundo laboral.

METODOLOGÍA

El estudio es una investigación del tipo aplicada debido a que se utiliza la metodología LSP para solucionar o mejorar una situación educativa específica (el fortalecimiento de competencias). El enfoque es cuantitativo, ya que se recogen datos en forma numérica (mediante encuestas de satisfacción) para luego analizarlos de forma estadística. El diseño corresponde a la estrategia que orienta la recolección y el análisis de datos. En este caso, se trata de un diseño no experimental, de tipo transversal, porque no se manipulan variables independientes, sino que se observa la satisfacción de los alumnos en un momento determinado, después de la aplicación de la metodología LSP. El alcance resulta, principalmente, descriptivo, ya que busca caracterizar el nivel de satisfacción de los alumnos. No obstante, también posee un matiz exploratorio, dado que el uso de LSP en contextos educativos peruanos resulta todavía limitado [8]. Se trata de una investigación aplicada ya que busca generar soluciones prácticas en el ámbito educativo ya que consiste en la búsqueda de conocimientos con miras a su utilización

inmediata en la solución de problemas prácticos [1]. Asimismo, consiste en una investigación de campo ya que recabó información primaria en el lugar de los hechos o en un contexto natural en el cual ocurren los fenómenos objeto de estudio y esto nos permite tener un contacto más directo con la realidad, recoger información de primera fuente y estudiar el fenómeno en todo su ámbito. El proyecto «Implementación de la Metodología Lego® Serious Play® para el fortalecimiento de competencias claves en estudiantes de PFR» se dio en varios cursos transversales como son Desarrollo Personal, Comprensión y Producción de Textos, Calidad y Mejora Continua, Investigación e Innovación Tecnológica, Diseño de Proyectos de Innovación y Emprendimiento.

Los beneficiarios directos fueron los estudiantes de Tecsup Sede Sur, alcanzando a 5821 participantes entre 2023 y 2024. Las actividades se estructuraron según las fases del PMBOK: inicio, planificación, ejecución, monitoreo y cierre. Se aplicaron encuestas de satisfacción al término de cada taller para evaluar la percepción de los estudiantes.

Actividades por etapa del proyecto

Las actividades que involucran el desarrollo del proyecto se han organizado con base en la Guía de Gestión de Proyectos PMBOK.

Tabla 1
Fases del proyecto de implementación de la metodología Lego® Serious Play®

Inicio	Planificación	Ejecución	Monitoreo y Control	Cierre
Elaboración del proyecto «Instalación de la Metodología Lego® Serious Play®».	Elaboración de formatos de trabajo para el desarrollo de talleres: Lineamientos, Registro de Préstamo y Encuesta de Satisfacción.	Desarrollo de talleres complementarios a los cursos de PFR	Préstamos de kits de Lego® a docentes	Procesamiento de encuesta de satisfacción de alumnos
Presentación del proyecto a Dirección Académica (2023)				
Adquisición de 15 kits de Serious Play® - 234 pcs.	Diseño de las guías de talleres para cursos de PFR	Toma de asistencia a los alumnos		Elaboración de informe y difusión de resultados del semestre
Taller de capacitación a docentes en la metodología Lego®	Cronograma	Encuesta a los alumnos de PFR	Recepción y revisión de kits	

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

Luego de la implementación progresiva de la metodología LSP en los cursos del PFR de Tecsup Sede Sur, se procedió a evaluar la experiencia de los estudiantes de los periodos académicos 2023-1, 2023-2, 2024-1 y 2024-2, involucrando a diferentes carreras técnicas y también diferentes niveles académicos. Los resultados muestran un crecimiento constante en la participación de los estudiantes: de los 514 alumnos que vivieron la experiencia LSP en el 2023-1, se llegó a 1848 en el 2024-2. Este aumento no solo refleja una mayor cobertura, sino también el interés progresivo que despertó la metodología para que los docentes apliquen en la comunidad estudiantil. Los hallazgos permiten afirmar que la metodología LSP ha sido bien recibida y apreciada por los estudiantes del programa, consolidándose como una herramienta pedagógica que enriquece la vivencia de aprendizaje y que responde a las expectativas de quienes la experimentan.

A continuación, se muestran los datos procesados para su interpretación:

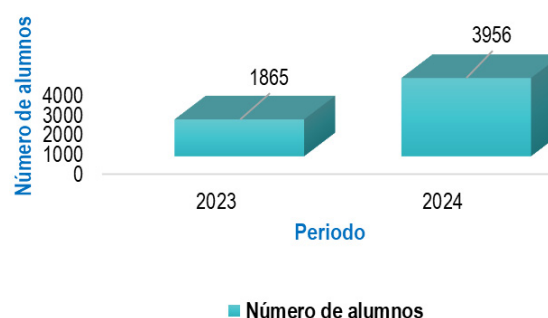


Figura 2. Número de alumnos que llevaron Lego® Serious Play® por año

Fuente: Elaboración propia.

La figura 2 muestra un aumento significativo en la cantidad de estudiantes que participaron en talleres de LSP, pasando de 1865 en 2023 a 3956 en 2024. Este crecimiento refleja una mayor

aceptación e institucionalización de la metodología en el programa PFR, así como un fortalecimiento progresivo de las competencias blandas en los estudiantes.

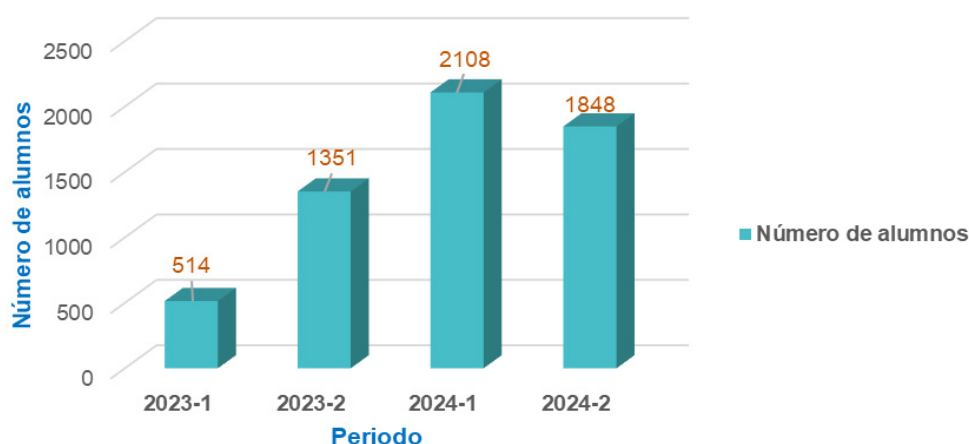


Figura 3. Número de alumnos que llevaron Lego® Serious Play® por periodo

Fuente: Elaboración propia.

Se observa en la figura 3 un crecimiento sostenido en cada periodo académico, con un salto notable de 514 estudiantes en 2023-1 a 2,108 en 2024-1. Esto evidencia no solo una expansión

de la implementación, sino también una demanda creciente por parte de los cursos y semestres, consolidando la metodología como una estrategia pedagógica transversal.

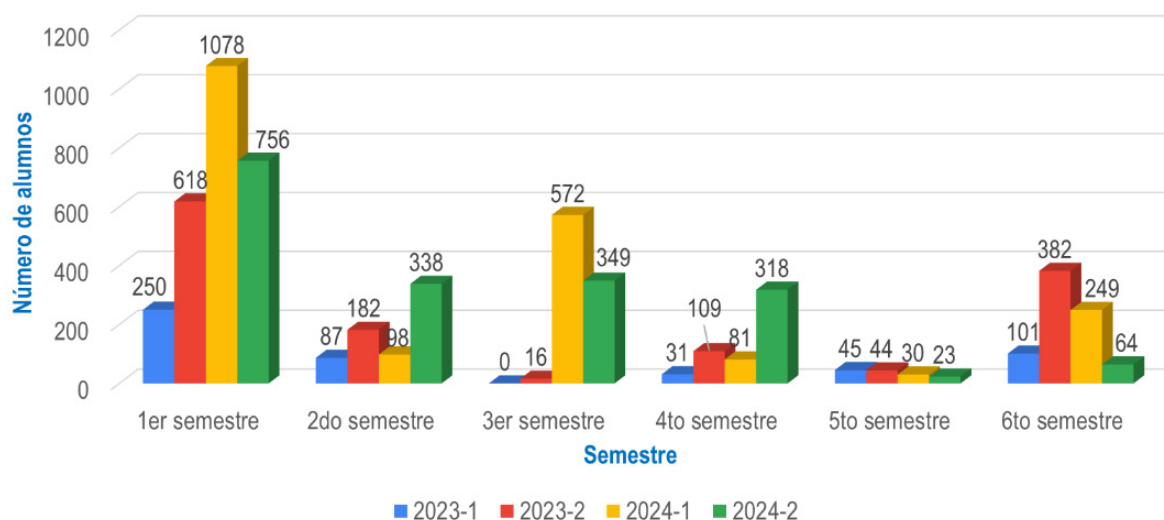


Figura 4. Número de alumnos por semestre que llevaron Lego® Serious Play®

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4, se desagrega la participación por semestre, destacando que los estudiantes del primer semestre fueron los más involucrados en 2024-1 (1078 alumnos). También se aprecia

un aumento generalizado en todos los semestres a lo largo del tiempo, lo que indica una integración gradual de la metodología en distintas etapas del plan de estudios.

Tabla 2
Desarrollo de Talleres Lego® Serious Play® por carrera

Cursos	Semestre	Cant. Estudiantes que desarrollaron talleres por carrera			
		2023-1	2023-2	2024-1	2024-2
Desarrollo Personal	1	228	411	922	537
Soporte de Hardware y Software	1	22	22	0	0
Ciencias Básicas Aplicadas	1	0	57	0	0
Técnicas de expresión oral y escrita	1	0	128	156	219
Investigación de Mercados	2	74	0	0	105
Comprensión y Producción de Textos	2	13	153	98	233
Ondas y Calor	2	0	29	0	0
Mejora Continua en el Diseño	3	0	0	82	0
Calidad y Mejora Continua	3	0	16	490	349
Investigación e Innovación Tecnológica	4	31	109	81	318
Diseño de Innovación de Proyectos	5	45	44	30	23
Emprendimiento	6	26	40	0	13
Desarrollo Profesional	6	75	309	249	28
Sociedad y Desarrollo Sostenible	6	0	33	0	23
Total		514	1351	2108	1848

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 2 muestra que el curso Desarrollo Personal tuvo la mayor participación con 2,098 estudiantes, seguido del curso de Calidad y Mejora Continua con 855 participantes y luego el curso de Investigación e Innovación Tecnológica con 539 participantes. Esto indica que la estrategia se orientó hacia asignaturas que fomentan espacios de interacción y reflexión grupal, condiciones necesarias para el desarrollo de competencias blandas, aunque

no implica, por sí mismo, que dichas competencias se hayan fortalecido. También destaca Técnicas de Expresión Oral y Escrita con 503 participantes. En cambio, cursos técnicos como Soporte de Hardware y Software y Ondas y Calor mostraron baja participación. A pesar de que se implementó solo en algunos cursos de los diferentes semestres, se observa un importante crecimiento entre los años 2023 y 2024.

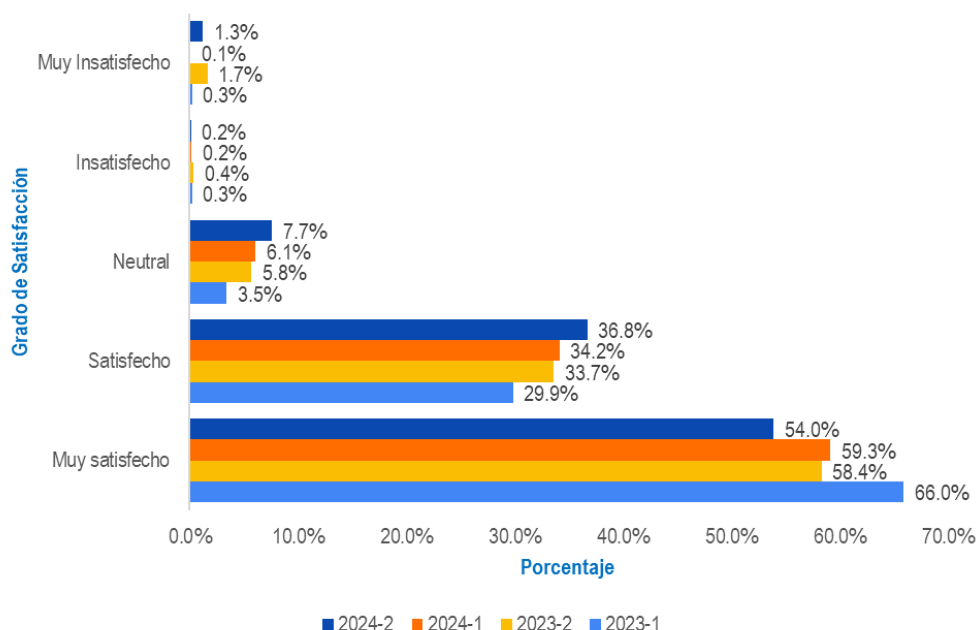


Figura 5. Encuesta de satisfacción de los alumnos que llevaron Lego® Serious Play®

Fuente: Elaboración propia.

La figura 5 presenta los resultados de la encuesta de satisfacción aplicada a los estudiantes que participaron en talleres Lego® Serious Play® durante los periodos 2023 y 2024. Se observa un predominio de opiniones positivas: el porcentaje de alumnos muy satisfechos se mantiene elevado con un promedio del 59,42 % en los cuatro periodos, también un promedio de 33,67 % correspondiente a satisfechos lo que evidencia una alta aceptación general de la metodología. Asimismo, un 5,78 % se mostraron neutrales y un 1,13 % opinaron estar insatisfechos o muy insatisfechos en promedio.

Asimismo, los estudiantes definieron con las siguientes palabras el Taller Lego como *divertido, creatividad, interesante, entretenido, asombroso, innovador, genial, increíble, estrategia, imaginación, dinámico, didáctico, satisfactorio, maravilloso, compañerismo y espectacular*.

Estos resultados indican que la implementación de LSP ha sido bien recibida por los alumnos, generando experiencias de aprendizaje significativas y motivadoras en distintos contextos formativos.

CONCLUSIONES

La implementación de la metodología LSP en el PFR de Tecsup Sede Sur evidenció un alto nivel de aceptación y satisfacción estudiantil, más que una medición directa del fortalecimiento de competencias blandas. Los datos muestran que, en los cuatro periodos académicos analizados (2023-1, 2023-2, 2024-1 y 2024-2), más del 85 % de los estudiantes se declaró satisfecho o muy satisfecho con los talleres. Este resultado es consistente y sostenido, lo que indica que la metodología generó un ambiente de aprendizaje valorado por los participantes y percibida como una experiencia activa, lúdica y motivadora.

Los resultados muestran que un 59% de los alumnos opinaron que se sintieron «Muy satisfechos» con la metodología LSP, el 34 % indicaron que sintieron «Satisfechos», por lo que solo en ambos se tiene un 93% de aceptación que muestra que los estudiantes estuvieron complacidos con la metodología. Además, se observó que en el 2023 alrededor de 1865 alumnos se beneficiaron, pero en un 2024 hubo crecimiento abarcando 3956 alumnos superándolo en 112 %. Además, observamos que la efectividad del impacto en las competencias blandas no puede ser confirmada a partir de los datos obtenidos, ya que los instrumentos utilizados como la encuesta solo permitió medir la satisfacción, pero esta información será necesaria para futuras investigaciones que incluyan instrumentos de evaluación específicas que permitan medir el liderazgo, comunicación efectiva, resolución de problemas, creatividad y el trabajo en equipo.

Asimismo, se constató que la metodología fue particularmente efectiva en cursos como Desarrollo Personal, Soporte de Hardware y Software, Ciencias Básicas Aplicadas, Técnicas de expresión oral y escrita, Investigación de Mercados, Comprensión y Producción de Textos, Ondas y Calor, Mejora Continua en el Diseño, Calidad y Mejora Continua, Investigación e Innovación Tecnológica, Diseño de Innovación de Proyectos, Emprendimiento, Desarrollo Profesional y Sociedad y Desarrollo Sostenible, lo que confirma su versatilidad para integrarse tanto en asignaturas de desarrollo humano como en contenidos técnicos.

REFERENCIAS

- [1] Arias, F. (2012). El proyecto de investigación. Editorial Episteme.
- [2] Blair, S., y Rillo, M. (2016). *Seriouswork: Cómo facilitar reuniones y talleres con el método Lego® Serious Play®*. Prometeo.
- [3] Cardoso, J., Dias, G., & Almeida, P. (2021). Developing soft skills in engineering education through Lego® Serious Play®: A case study. *European Journal of Engineering Education*, 46(4), 601–615. <https://doi.org/10.1080/03043797.2020.1849025>
- [4] Castillo, R., & Ríos, L. (2023). Impacto del uso de Lego Serious Play en egresados de educación superior: Una perspectiva desde la empleabilidad. *Revista Latinoamericana de Educación y Tecnología*, 22(1), 87–101.
- [5] Deterding, S., Dixon, D., Khaled, R., & Nacke, L. (2011). From game design elements to gamefulness: Defining “gamification”. In *Proceedings of the 15th International Academic MindTrek Conference: Envisioning Future Media Environments* (pp. 9–15). ACM.
- [6] Frick, E., Tardini, S., y Cantoni, L. (2013). *White paper on Lego® Serious Play®: A state of the art of its applications in Europe*. Università della Svizzera italiana. <https://www.researchgate.net/publication/272507735>
- [7] Gauntlett, D. (2007). *Creative explorations: New approaches to identities and audiences*. Routledge.
- [8] Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). Metodología de la investigación.
- [9] James, A. (2013). Lego® Serious Play®: A three-dimensional approach to learning development. *Journal of Learning Development in Higher Education*, (6), 1–18. <https://doi.org/10.47408/jldhe.v0i6.208>
- [10] James, A. (2019). LEGO® Serious Play®: Thinking about teaching and learning through play. *International Journal of Play*, 8(1), 19–32. <https://doi.org/10.1080/21594937.2019.1582845>
- [11] Kristiansen, P., & Rasmussen, R. (2014). *Building a better business using the LEGO® Serious Play® method*. Wiley.
- [12] Ministerio de Educación del Perú (Minedu). (2022). *Lineamientos para la mejora de la educación técnico-productiva y tecnológica*. <https://www.minedu.gob.pe>
- [13] OECD. (2021). *Skills outlook 2021: Learning for life*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/0ae365b4-en>
- [14] Pérez, M., y Gómez, F. (2020). Aprendizaje experiencial mediante Lego Serious Play en la educación superior peruana. *Revista de Innovación Educativa*, 14(2), 55–70.

- [15] Perna, M. (2021). Aquí están las 5 habilidades blandas principales que busco en los candidatos. *Revista Forbes*.
- [16] Resnick, M. (2017). *Lifelong kindergarten: Cultivating creativity through projects, passion, peers, and play*. MIT Press.
- [17] Sánchez, J., y Rengifo, A. (2020). Limitaciones en la implementación de metodologías activas en institutos tecnológicos del Perú. *Revista de Educación y Tecnología*, 15(2), 45–60.
- [18] Soto, A., Hernández, M., y López, D. (2022). Aplicación de la metodología Lego Serious Play en el desarrollo de habilidades blandas en estudiantes de ingeniería. *Revista de Tecnología Educativa de México*, 28(3), 123–135.
- [19] Torres, P., Valdés, H., & Herrera, J. (2022). Lego Serious Play como metodología activa en institutos técnicos: Evidencias desde Colombia. *Revista Iberoamericana de Educación Técnica*, 9(2), 34–48.
- [20] Zenk, L., Hynek, N., Schreder, G., Zenk, A., Pausits, A., & Steiner, G. (2018). Diseño de cursos de innovación en educación superior con LEGO® SERIOUS PLAY®. *Revista Internacional de Gestión e Investigación Aplicada*, 5(4), 245-263. <https://doi.org/10.18646/2056.54.18-019>

ACERCA DEL AUTOR(ES):

Dr. José Eduardo Rojas Gómez

Asesor y Consultor de Proyectos de Inversión con más de 20 años de experiencia en diferentes sectores de la industria, Docente, Investigador y Conferencista. Doctor en Economía y Negocios de la Universidad Católica Santa María, Maestro en Ingeniería Industrial con mención en Gestión de la Producción Universidad Nacional de San Agustín, Economista (UCSM), Scrum Master Certified SMC™ (ID 713453), Entrenador Certificado en Gerencia de Proyectos – STS S.A. Suiza, Mentor Incubadora JAKU – Universidad San Agustín, FellowHip Perú – Hexágono de la Innovación Pública - Laboratorio del Gobierno de Aragón (España), Certificación Internacional en Advanced Customer Experience - CX Latam Institute – Florida Global University USA, Kanban Management Professional (KPM) USA. Actualmente se desempeña como Jefe de Departamento de Estudios Generales de Tecsup Sede Sur.

Ing. Raul Alexander Cayra Sutta

Profesional en Ingeniería Industrial en la Universidad Nacional de San Agustín, Maestría concluida en Ciencias: Ingeniería Industrial, con mención en Gerencia de Seguridad y Medio Ambiente en la Universidad Nacional de San Agustín, Especializado en Ingeniería de Proyectos en la Universidad Nacional de San Agustín. Colegiado en CIP: 270587. Experiencia como coordinador general en diferentes I.E.P. Experiencia laboral como supervisor de seguridad y salud en el trabajo en empresas industriales. Actualmente Planner de CPE en el Departamento de Estudios Generales y docente de las materias de Diseño de proyectos e innovación, Calidad y Mejora Continua y Cálculo.

Recibido: 19-06-2025

Revisado: 22-08-2025

Aceptado: 07-10-2025



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.

Tecsup

Sede Norte

Mz. A Sub lote 1 Urbanización Tecsup
Víctor Larco Herrera, Trujillo - Perú
informestrujillo@tecsup.edu.pe

T. (044) 485420

Sede Centro

Av. Cascanueces 2221
Santa Anita, Lima - Perú
informeslima@tecsup.edu.pe

T. (51-1) 317-3900

Sede Sur

Urb. Monterrey Lote D-8
José Luis Bustamante y Rivero,
Arequipa - Perú
informesarequipa@tecsup.edu.pe

T. (54) 426610

F. (54) 426654

www.tecsup.edu.pe

