



perfiles de **INGENIERIA**

Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Ricardo Palma

Civil
Electrónica
Industrial
Informática
Mecatrónica

Acreditada



ISSN versión impresa: 1996-6660
ISSN versión online: 2519-5719
Volumen 20, Nº21, Enero-Junio 2024
Lima, Perú

PERFILES DE INGENIERÍA

Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Ricardo Palma
Hecho en el Depósito Legal de la Biblioteca Nacional del Perú N° 2016-1985
ISSN Impreso 1996-6660 ISSN online 2519-5719 <https://doi.org/10.31381/perfilesingenieria>
Volumen 20, N°21, enero-junio 2024, Lima-Perú

La revista Perfiles de Ingeniería de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Ricardo Palma tiene carácter multidisciplinario, y busca difundir investigaciones, proyectos y buenas prácticas del desarrollo de la Ingeniería Industrial, Informática, Civil, Electrónica y Mecatrónica. Está dirigida a jóvenes, docentes, profesionales y público en general interesados en el desarrollo científico y tecnológico, comprometido con el desarrollo humano, y el cuidado y sostenibilidad de la vida en todas sus manifestaciones. Es de periodicidad semestral.

AUTORIDADES URP

RECTOR

Dr. Félix Romero Revilla

VICERRECTOR ACADÉMICO

Dr. Héctor Hugo Sánchez Carlessi

VICERRECTORA DE INVESTIGACIÓN

Dra. Sandra Negro Tua

SECRETARIO GENERAL

Dr. Raúl Vidal Coronado

DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Ing. Santiago Fidel Rojas Tuya

COMITÉ EDITORIAL

Editor general: Teresa Salinas Gamero
Facultad de Ingeniería URP

Editor responsable de la Escuela de Ingeniería

Civil URP: Arturo Velásquez Jara

Editor responsable de la Escuela de Ingeniería

Industrial URP: José Antonio Velásquez Costa

Editor responsable de la Escuela de Ingeniería

Informática URP: Juana Emma Segura
González

Editor responsable de la Escuela de Ingeniería

Mecatrónica URP: Ricardo John Palomares
Orihuela

CONSULTA DIGITAL

https://revistas.urp.edu.pe/index.php/Perfiles_Ingenieria/index

Los puntos de vista expresados por los autores son de estricta responsabilidad de ellos y no necesariamente expresan la opinión del Comité Editorial. Por lo tanto, no se asume responsabilidad alguna por el contenido de cada artículo.

CONSEJO DE FACULTAD DE INGENIERÍA

Ing. Santiago Fidel Rojas Tuya	Decano
Mg. Miguel Sánchez Brava	Secretario Académico
Dr. Carlos Sebastián Calvo	Miembro
Dr. Francisco Aguilar Vásquez	Miembro
Mg. Enriqueta Pereyra Salardi	Miembro
Mg. César Rivera Lynch	Miembro
Ing. Luis Cuadro Lerma	Miembro
Sr. Joel Morales Ramírez	Miembro
Sr. Renzo Huarcaya Bernates	Miembro
Sr. Luis Olivos Vilca	Miembro

DIRECTORES DE ESCUELAS PROFESIONALES

Civil	Ing. Enriqueta Pereyra Salardi
Electrónica	Mg. Ing. Julio César González Prado
Industrial	Mg. Ing. Víctor Thompson Schrelber
Informática	Mg. Ing. Eric Villanueva Gonzáles
Mecatrónica	Mg. Ing. Demetrio Hugo Mandujano Neyra

Todos los derechos quedan reservados por la Universidad Ricardo Palma. Se puede compartir, publicar, copiar y distribuir el contenido de esta revista con fines académicos no comerciales, siempre y cuando se reconozca y cite correctamente la fuente de origen.

La revista Perfiles de Ingeniería se distribuye gratuitamente y está disponible en texto íntegro en la web:

https://revistas.urp.edu.pe/index.php/Perfiles_Ingenieria/index

Esta es una revista Open Access, Perfiles de Ingeniería proporciona un acceso abierto inmediato a su contenido para facilitar la lectura y su descarga. La reutilización está permitida bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional. (CCBY 4.0).



La revista Perfiles de Ingeniería se adhiere a las normas y códigos de ética internacionales establecidos por el Committee on Publication Ethics (Code of Conduct and Best Practices Guidelines for Journal Editors, COPE).

Todos los artículos presentados para la Revista Perfiles de Ingeniería pasarán por un sistema de detección de plagio a través de un software especializado (Turnitin) de forma rutinaria.

ÍNDICE

Editorial

Teresa Salinas Gamero. 6

Mensaje del Rector

Segundo Félix Romero Revilla. 8

Presentación del Decano

Santiago Rojas Tuya. 10

INGENIERÍA CIVIL

Evaluación de pigmentos fotoluminiscentes para la mejora de las propiedades físico-mecánicas del concreto. 12

Evaluation of photoluminescent pigments for the improvement of the physical-mechanical properties of concrete studies of photoluminescent pigments in concrete

Esther Joni Vargas Chang, Jesús Hernán Pastor Caveró.

Universidad Ricardo Palma.

Gaviones ecológicos para la protección de las inundaciones y equilibrio biótico en el poblado Chacarilla del río Matagente. 23

Ecological gabions for flood protection and biotic balance in the Chacarilla town of the Matagente river

Lucy Gabriela Ayala Prado, Manuel Alejandro Custodio Salas, Percy Raúl Castro Vásquez, Óscar Rojas Hernández, Gustavo Antezana Quiroz, Maiquel López Silva.

Universidad Ricardo Palma.

Incorporación del modelo Lean Construction. 38

Incorporation of the Lean Construction model to innovate time management in construction projects

Margarita Murillo Manrique.

Universidad Ricardo Palma.

https://revistas.urp.edu.pe/index.php/Perfiles_Ingenieria

revista.perfilesing@urp.edu.pe

Protección para los márgenes del río Moche: Estructura sostenible. 58

Protection for the banks of the Moche River: sustainable structure

Fabian Alberto Alva, Keren Guzmán Chuquispuma, Karla Sofía Fernández, Anyela Camila Saravia, Oscar Sebastián Pachas, Marco Ademir Morales y Maiquel López Silva.
Universidad Ricardo Palma.

Uso del ensayo penetrómetro de cono en la determinación de la resistencia a la corte no drenada de suelos arcillosos blandos de la región San Martín, Perú 95

Use of fall cone test to estimation of undrained shear strength of soft clay soils from region san martin, Peru.

Miriam Rosanna Escalaya Advíncula, Marco Antonio Hernández Aguilar, César Giancarlo Rojas Llactas.
Universidad Ricardo Palma.

INGENIERIA ELECTRÓNICA

Evaluation of exposure to Wi-Fi radiofrequency fields in indoor and outdoor environments in the Ricardo Palma University campus, Lima, Peru, using a personal exposimeter 111

Evaluación de la exposición a campos de radiofrecuencia Wi-Fi en ambientes interiores y exteriores en el campus de la Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú, utilizando un exposímetro personal

Víctor Cruz Ornetta, Jorge Ubillús Gonzales, Julio González Prado, Milton Marcelo Peña Calero, Manuel Enrique Isaías Pardo Rendon.
Universidad Ricardo Palma.

First steps using FPGA technology 136

Primeros pasos usando la tecnología FPGA

Pedro Selencio Landaeta Herrera.
University Federico Brito Figueroa.

Low Transconductance OTAs Design with Extended Linear Range and its Application in EEG Signals 150

Diseño de OTAs de baja transconductancia con rango lineal extendido y sus aplicaciones en señales EEG

Franco Renato Campana Valderrama.

Universidad Ricardo Palma.

INGENIERÍA INDUSTRIAL

Seguridad Basado en el Comportamiento para Reducir Índice de Accidentabilidad en la Empresa Minera Raura 165

Behavioural based safety to reduce accident rates in Raura mining company

Wilder Beto Chamorro Celis.

Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

INGENIERÍA MECATRÓNICA

Horno Batch a GLP con control PID para la automatización del proceso de curado de pintura electrostática. 180

LPG Batch Oven with PID control for the automation of the electrostatic paint curing process.

Enzo P. Morán Ugarelli, Rafael M. Sánchez Soto, Ricardo J. Palomares Orihuela.

Universidad Ricardo Palma.



Editorial

Estimados lectores:

Es grato para nosotros darle la bienvenida a una nueva edición de nuestra revista *Perfiles de Ingeniería*, un espacio dedicado a la difusión del conocimiento y la innovación en dicho ámbito. Este número sale a la luz en el marco de los 55 años de fundación de la Facultad de Ingeniería y de la Universidad Ricardo Palma (URP).

Durante estos años la Facultad de Ingeniería ha formado profesionales destacados que están aportando al desarrollo del país y han contribuido en la construcción de importantes proyectos de investigación y desarrollo a nivel nacional e internacional. Actualmente, la URP, según el reporte de Sostenibilidad Ambiental en Universidades Peruanas, se ubica en el quinto lugar a nivel nacional y tercero al nivel regional.

En cada número de nuestra revista, nos proponemos explorar no solo los avances técnicos que definen los campos de la ingeniería civil, electrónica, industrial, informática y mecatrónica, sino también las perspectivas de desarrollo humano y cuidado del ambiente que implica el uso responsable de la tecnociencia.

En esta edición, queremos resaltar proyectos innovadores y prácticas sostenibles que están cambiando el panorama de la ingeniería. Desde tecnologías emergentes en la construcción hasta el uso de inteligencia artificial para optimizar procesos, nuestros artículos abordan cómo los ingenieros están utilizando su creatividad y conocimientos técnicos para abordar problemas complejos.

Además, no podemos olvidar la importancia de la educación en ingeniería. La formación de nuevas generaciones de ingenieros es esencial para asegurar un futuro en el que la tecnología y la ética vayan de la mano. En este sentido, invitamos a todos los expertos y académicos a contribuir con sus investigaciones, ideas y experiencias, para generar un diálogo enriquecedor sobre cómo mejorar la enseñanza y aprendizaje de la ingeniería basada en la investigación y la difusión masiva de sus conocimientos.

Quiero expresar mi agradecimiento al Dr. Félix Romero, rector de la URP; al Dr. Santiago Rojas, decano de la Facultad de Ingeniería por la confianza otorgada para publicar esta edición; a todos los autores que han hecho posible el presente número; y al comité editorial por su apoyo riguroso. Juntos podemos ser agentes de cambio y contribuir a un futuro más sostenible y equitativo.

Finalmente, quisiera agradecer a los lectores por ser parte de nuestra comunidad y por su continuo interés en transformar el mundo a través de la ingeniería. Los invito a sumergirse en esta edición, a cuestionar, a reflexionar y a comprometerse en los logros y desafíos que compartimos.

Mg. Teresa Francisca Salinas Gamero
teresa.salinas@urp.edu.pe
<https://orcid.org/0000-0001-7535-547X>
Universidad Ricardo Palma

Directora - Editora principal
Revista Perfiles de Ingeniería



© Los autores. Este artículo Open Access está publicado bajo la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC - BY 4.0).



Mensaje del Rector

Estimados lectores y miembros de la comunidad universitaria:

Es un placer darle la bienvenida a esta edición de la revista *Perfiles de Ingeniería*, una publicación dedicada a explorar el desarrollo de la ingeniería y su impacto en la sociedad actual, tan caracterizada por la relevancia de la tecnología y la innovación.

La ingeniería ha sido fundamental en la resolución de problemas complejos, desde la creación de infraestructuras sostenibles hasta el desarrollo de tecnologías que mejoren la calidad de vida. Sin embargo, nuestro compromiso va más allá de los aspectos técnicos. Creemos que cada innovación debe estar enraizada en un contexto social, considerando las necesidades, inquietudes y aspiraciones de las comunidades a las que sirve.



La Universidad Ricardo Palma ha cumplido 55 años al servicio del país y es reconocida por promover la innovación, la cultura y la sostenibilidad. Durante este tiempo, la Facultad de Ingeniería, en particular, se ha destacado por su contribución al desarrollo nacional no solo formando destacados profesionales sino participando en grandes obras de infraestructura como el diseño de la central hidroeléctrica de San Gabán, que es el primer circuito analógico que se certificó en el país ante el CYTED. Además, ha impulsado el uso de energías renovables, lo que ha evidenciado un gran compromiso con la sostenibilidad ambiental. Este perfil institucional nos ha permitido ubicarnos entre las cinco primeras universidades en el *ranking* de Sostenibilidad Ambiental de universidades peruanas por varios años consecutivos, el cual es emitido por el Ministerio del Ambiente (MINAM). Actualmente, la URP representa a las universidades privadas en la Comisión Ambiental de la Municipalidad Metropolitana de Lima (CAMET).

Creemos firmemente que cada miembro de la comunidad universitaria tiene un aporte potencial valioso. Juntos podemos construir un legado de soluciones ingeniosas y humanistas que transformen nuestro entorno y mejoren la calidad de vida de nuestro país y del mundo.

Quiero felicitar al Dr. Santiago Rojas, decano de la Facultad de Ingeniería, al comité editorial de la revista y a su directora por la publicación de este nuevo número. Asimismo, reiteramos la invitación a todos los ingenieros, investigadores, estudiantes y demás personas especializadas en la tecnología y la ingeniería a compartir sus conocimientos, experiencias y proyectos a través de artículos, ensayos o estudios de caso. El rol de la ingeniería es fundamental para enfrentar los desafíos sociales actuales.

¡Imaginemos juntos un futuro en el que la ingeniería y la ética social caminen de la mano!

Dr. Félix Romero Revilla
rector@urp.edu.pe
<https://orcid.org/0000-0001-7102-143X>
Rector de la Universidad Ricardo Palma, Perú.



© Los autores. Este artículo Open Access está publicado bajo la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC - BY 4.0).



Palabras del decano de la Facultad de Ingeniería

Estimados miembros de la comunidad académica:

Es un honor dirigirme a ustedes a través de esta edición de nuestra revista institucional *Perfiles de Ingeniería*, un espacio que nos permite compartir los logros de las investigaciones y el compromiso que cada uno de nosotros tiene con nuestra Facultad de Ingeniería.

Este 2024, la Universidad Ricardo Palma ha cumplido 55 años de vida institucional, los cuales nos han presentado desafíos que han puesto a prueba nuestra calidad y creatividad. Por eso, celebramos con orgullo: el avance en nuestros programas académicos, la implementación de nuevos laboratorios y herramientas tecnológicas en las aulas, y los proyectos e incentivos a la investigación ya están dando frutos en nuestra comunidad. Una evidencia palpable de esto es que nuestra universidad se ubique en los primeros puestos del reporte de Sostenibilidad Ambiental en universidades peruanas por varios años consecutivos.

Es inspirador ver el esfuerzo conjunto de nuestros estudiantes, docentes y personal administrativo, quienes, día a día, se esfuerzan por innovar y cumplir con los estándares de calidad educativa vigentes en el país. En ese sentido, durante el semestre 2023-II, se acreditaron nuevamente las carreras de ingeniería civil, electrónica, industrial, mecatrónica e informática a través del Instituto de Calidad y Acreditación de Carreras Profesionales de Ingeniería y Tecnología (ICACIT). Asimismo, se culminó satisfactoriamente la etapa de reacreditación internacional, realizada por la norteamericana ABET, en las cinco carreras de la Facultad de Ingeniería. Actualmente, se cuenta con el licenciamiento vigente de la Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria (SUNEDU), y el reconocimiento del Sistema Nacional de Evaluación, Acreditación y Certificación de la Calidad Educativa (SINEACE).

Aprovecho esta oportunidad para invitar a toda la comunidad universitaria y a los egresados a continuar participando activamente en la vida académica y cultural de nuestra institución. Su compromiso es fundamental para el futuro que estamos construyendo juntos.

No quisiera culminar este mensaje sin agradecer, por su dedicación y esfuerzo continuo, al comité editorial de la revista *Perfiles de Ingeniería*, y especialmente a su directora por lograr la publicación de este nuevo número. Sigamos trabajando juntos para hacer de nuestra institución un lugar donde se fomente el conocimiento, la creatividad y la solidaridad.

Dr. Ing. Santiago Fidel Rojas Tuya

srojas@urp.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0002-4981-8722>

Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Ricardo Palma



© Los autores. Este artículo Open Access está publicado bajo la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC - BY 4.0).

ISSN (Digital): 2519-5719



Evaluación de pigmentos fotoluminiscentes para la mejora de las propiedades físico-mecánicas del concreto

Evaluation of photoluminescent pigments for the improvement of the physical-mechanical properties of concrete studies of photoluminescent pigments in concrete

Esther Joni Vargas Chang, Jesús Hernán Pastor Cavero

RECIBIDO: 28 de mayo de 2024.

ACEPTADO: 20 de junio de 2024.

RESUMEN

La fotoluminiscencia está revolucionando la construcción, especialmente en pavimentos y estructuras de concreto, al ofrecer mejoras tanto estéticas como funcionales. Los pigmentos fotoluminiscentes, que almacenan y emiten luz, pueden influir positivamente en las propiedades físico-mecánicas del concreto. Este estudio examina pigmentos como el aluminato de estroncio, silicato de zinc, fosfato de zinc y fluorescencia de calcio, evaluando su duración de emisión y su impacto en la resistencia a la compresión y durabilidad del concreto. Los pigmentos fotoluminiscentes absorben energía luminosa y la liberan en forma de luz visible, proporcionando luminiscencia prolongada. El aluminato de estroncio destaca por su alta intensidad y durabilidad, mejorando significativamente la resistencia a la compresión del concreto. El fosfato de zinc también ofrece una emisión prolongada y es altamente resistente a la humedad. El silicato de zinc mejora la resistencia al desgaste, mientras que la fluorescencia de calcio refuerza la cohesión y resistencia a cargas pesadas del concreto. La selección del pigmento ideal depende de las necesidades específicas del proyecto.

Palabras claves: fotoluminiscencia, pigmentos fotoluminiscentes, intensidad de luminiscencia, ahorro de energía, resistencia a la degradación.

Cómo citar:

E. J. Vargas Chang y J. H. Pastor Cavero, «Evaluación de pigmentos fotoluminiscentes para la mejora de las propiedades físico-mecánicas del concreto», *Perfiles_Ingenieria*, vol. 20, n.º 21, pp. 12-22, jun. 2024.

ABSTRACT

Photoluminescence is revolutionizing construction, especially in concrete pavements and structures, by offering both aesthetic and functional improvements. Photoluminescent pigments, which store and emit light, can positively influence the physical-mechanical properties of concrete. This study examines pigments such as strontium aluminate, zinc silicate, zinc phosphate and calcium fluorescence, evaluating their emission life and their impact on the compressive strength and durability of concrete. Photoluminescent pigments absorb light energy and release it in the form of visible light, providing prolonged luminescence. Strontium aluminate stands out for its high intensity and durability, significantly improving the compressive strength of concrete. Zinc phosphate also offers long emission and is highly resistant to moisture. Zinc silicate improves wear resistance, while calcium fluorescence reinforces the cohesion and resistance to heavy loads of the concrete. Selecting the ideal pigment depends on the specific needs of the project.

Keywords: photoluminescence, photoluminescent pigments, luminescence intensity, energy saving, degradation resistance.

© Los autores. Este artículo Open Access está publicado bajo la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC-BY 4.0).



1. Introducción

La fotoluminiscencia ha emergido como una tecnología innovadora con aplicaciones prometedoras en la construcción, particularmente en la mejora de pavimentos y estructuras de concreto. Los pigmentos fotoluminiscentes, capaces de almacenar y emitir luz, no solo ofrecen beneficios estéticos y funcionales, sino que también pueden influir positivamente en las propiedades físico-mecánicas del concreto. En particular, los mejores pigmentos fotoluminiscentes se destacan por su capacidad para proporcionar emisiones de larga duración, lo que resulta en superficies que brillan de manera continua durante períodos prolongados. Estos pigmentos no solo enriquecen la visibilidad y seguridad de las infraestructuras en condiciones de baja luminosidad, sino que también pueden contribuir a la resistencia y durabilidad del material concreto.

Este estudio se centra en identificar los pigmentos fotoluminiscentes más efectivos que, además de sus características lumínicas prolongadas, mejoran las propiedades físico-mecánicas del concreto. Se evaluarán diversos pigmentos en términos de su capacidad de emisión prolongada y su impacto en la resistencia a la compresión, durabilidad, y otras propiedades mecánicas del concreto. La integración de estos pigmentos tiene el potencial de optimizar tanto el rendimiento funcional como la estética de las superficies de concreto, promoviendo un avance significativo en las técnicas de construcción modernas.

2. Fundamento teórico

2.1. Fotoluminiscencia

La fotoluminiscencia es la propiedad que tienen ciertos elementos de emitir radiación luminosa (fotones) cuando se los somete a una estimulación externa.

Cuando las sustancias fotoluminiscentes se exponen a la radiación ultravioleta, emiten luz visible debido a simples fenómenos de excitación atómica. Excitados por la radiación ultravioleta, almacenan energía y, en ausencia de luz, la liberan durante un largo período de tiempo a través de la luz visible hasta que los átomos vuelven a su estado original.

2.2. Pigmentos Fotoluminiscentes

Los pigmentos fotoluminiscentes son aquellos que engloban de manera general todo tipo de pigmentos que emiten luz gracias a una excitación luminosa, se cargan exponiéndolos a una fuente luminosa como luz solar, eléctrica o UV y se restituyen lentamente brillando en la oscuridad hasta acabar su energía almacenada.

Los pigmentos fotoluminiscentes que destacan por sus características lumínicas prolongadas y que además mejoran las propiedades físico-mecánicas del concreto son de interés creciente en la industria de la construcción. Estos pigmentos no solo proporcionan una luminiscencia duradera, sino que también pueden influir positivamente en el rendimiento del concreto. Los pigmentos más efectivos son a Base de: Aluminato de Estroncio, Silicato de Zinc, Fosfato de Zinc y Fluorescencia de Calcio.

a. Aluminato de Estroncio ($SrAl_2O_4$)

Aunque el aluminato de estroncio es principalmente conocido por sus propiedades de luminiscencia y no se utiliza comúnmente como aditivo en concreto, su inclusión en estudios recientes sugiere potenciales aplicaciones. El aluminato de estroncio, en su forma básica, podría tener efectos beneficiosos en el concreto al mejorar la durabilidad y resistencia a condiciones extremas, gracias a sus propiedades químicas estables y resistencia a la corrosión. Investigaciones preliminares indican que pigmentos luminescentes como el $SrAl_2O_4$ podrían contribuir indirectamente a la resistencia del concreto al ofrecer propiedades de señalización y detección en estructuras críticas [1].

b. Silicato de Zinc (Zn_2SiO_4)

El silicato de zinc es utilizado en concreto principalmente por su capacidad para mejorar la resistencia a la corrosión del acero de refuerzo. Este pigmento forma una capa protectora sobre las superficies metálicas en el concreto, reduciendo la oxidación y el deterioro del refuerzo. Además, su alta resistencia a ambientes agresivos y su capacidad para actuar como un inhibidor de corrosión lo hacen valioso en la protección de estructuras de concreto expuestas a condiciones extremas como ambientes marinos o industriales. El uso de silicato de zinc en concreto ayuda a prolongar la vida útil de las estructuras al proteger el refuerzo interno [2].

c. Fosfato de Zinc ($Zn_3(PO_4)_2$)

El fosfato de zinc se utiliza en concreto principalmente como un aditivo para mejorar la resistencia a la corrosión de las armaduras metálicas. Al igual que el silicato de zinc, el fosfato de zinc actúa formando una capa protectora sobre el acero de refuerzo, inhibiendo la corrosión y mejorando la durabilidad del concreto. Este pigmento es efectivo en la protección de estructuras expuestas a ambientes corrosivos, como en la industria química o en ambientes marinos. Su uso puede reducir significativamente la necesidad de reparaciones y mantenimiento en estructuras de concreto, aumentando así su vida útil y fiabilidad [3].

d. Fluorescencia de Calcio ($CaWO_4$)

La fluorescencia de calcio, aunque más conocida por su uso en aplicaciones fluorescentes y de señalización, tiene aplicaciones emergentes en el concreto para la detección de fisuras y fallos estructurales. La inclusión de wolframato de calcio en el concreto podría permitir la identificación de problemas a través de la fluorescencia bajo luz UV, facilitando el mantenimiento predictivo y la evaluación de la integridad estructural. Este uso indirecto mejora la durabilidad del concreto al permitir intervenciones tempranas antes de que las fisuras o daños se conviertan en problemas graves [4].

2.3. Intensidad de Luminiscencia

La intensidad de luminiscencia se refiere a la cantidad de luz visible que un material emite cuando ha sido excitado por una fuente de energía luminosa, como luz ultravioleta o visible. Esta intensidad se mide en términos de luminosidad, a menudo en unidades de candelas por metro cuadrado (cd/m^2) o milicandelas por metro cuadrado (mcd/m^2). En términos prácticos, una mayor intensidad de luminiscencia significa que el material brillará

más intensamente en la oscuridad o en condiciones de baja luminosidad. Esta propiedad es crucial para aplicaciones donde la visibilidad prolongada es necesaria, como en señalización nocturna y pavimentos fotoluminiscentes [5].

2.4. Resistencia a la Degradación

La resistencia a la degradación se refiere a la capacidad de un material para mantener sus propiedades físicas y mecánicas originales cuando se expone a condiciones ambientales adversas, como humedad, luz ultravioleta, temperaturas extremas y agentes químicos. En el contexto de los pigmentos fotoluminiscentes y materiales de construcción, esta propiedad es crucial para garantizar la durabilidad y la estabilidad a largo plazo del material. Una alta resistencia a la degradación implica que el material no sufre alteraciones significativas que puedan afectar su rendimiento o apariencia con el tiempo [6].

2.5. Capacidad de Absorción de Energía

La capacidad de absorción de energía se refiere a la habilidad de un material para captar y almacenar energía luminosa (o de otro tipo) cuando está expuesto a una fuente de energía. En el contexto de los pigmentos fotoluminiscentes, esta capacidad determina cuánto de la energía luminosa que recibe el pigmento se convierte en luz visible durante la fase de emisión. Una alta capacidad de absorción de energía implica que el pigmento puede acumular más energía y, por lo tanto, emitir luz durante un período más prolongado [7].

2.6. Resistencia a la Compresión

La resistencia a la compresión en el concreto es una propiedad fundamental que indica la capacidad del concreto para resistir cargas o fuerzas de compresión, es decir, fuerzas que tienden a aplastar o comprimir el material. Se mide mediante ensayos de laboratorio y se expresa en unidades de presión, generalmente en megapascuales (MPa) o libras por pulgada cuadrada (psi). Además, es esencial en la industria de la construcción, ya que determina la capacidad del concreto para soportar cargas verticales, como las que experimentan los pilares, columnas, losas y cimientos en un edificio o una estructura. Una resistencia a la compresión adecuada es crucial para garantizar la seguridad y la durabilidad de una estructura, para medirla se realiza un ensayo de compresión en muestras cilíndricas. Durante el ensayo, se somete la muestra a una carga gradual y constante hasta que se produce la falla o ruptura por compresión. La fuerza máxima que la muestra puede soportar antes de romperse se registra como la resistencia a la compresión del concreto.

3. Metodología

El método que se empleó en esta investigación fue descriptivo, con enfoque comparativo. Se realizó una revisión de literatura académica y técnica relevante, incluyendo artículos de revistas especializadas, estudios de caso, y libros sobre fotoluminiscencia y materiales de construcción. Se seleccionó Criterios de Comparación: tiempo durante el cual el pigmento emite luz después de la exposición, nivel de brillo o luminosidad proporcionado por el pigmento, gama de colores que el pigmento puede emitir, capacidad de Absorción de Energía, resistencia a la degradación e impacto en propiedades del Concreto. Se realizó un análisis comparativo de cada tipo de pigmento haciendo uso de tablas. Se evaluaron los

resultados de cómo cada pigmento cumple con los criterios de comparación establecidos, llegando a las conclusiones.

4. Presentación de resultados

En la figura 1 se muestran y comparan los pigmentos más efectivos en cuanto a características como la duración de emisión, intensidad de luminiscencia, colores disponibles, capacidad de absorción de energía, resistencia a la degradación, impacto en propiedades del concreto y aplicaciones comunes.

Figura 1.

Comparación de Pigmentos Fotoluminiscentes

Característica	Aluminato de Estroncio	Silicato de Zinc	Fosfato de Zinc	Fluorescencia de Calcio
Duración de Emisión	Hasta 12 horas o más	Hasta 10 horas	Hasta 15 horas	Hasta 8 horas
Intensidad de Luminiscencia	Hasta 60 mcd/m ²	Variable, generalmente menos intenso que el aluminato de estroncio	Hasta 50 mcd/m ²	Variable, generalmente menos intenso que el fosfato de zinc
Colores Disponibles	Verde, azul, a veces otros colores	Verde, azul	Azul, verde	Verde, azul
Capacidad de Absorción de Energía	Alta, absorbe eficientemente luz UV y visible	Moderada, eficiente en luz UV y visible	Alta, absorbe eficazmente luz UV y visible	Alta, absorbe luz UV y visible
Resistencia a la Degradación	Alta, resistente a humedad y luz UV	Moderada, puede ser afectada por la humedad y la luz UV	Alta, buena resistencia a condiciones ambientales	Buena, pero puede ser menos duradera que el aluminato de estroncio
Impacto en Propiedades del Concreto	Mejora la resistencia a la compresión y durabilidad	Mejora la resistencia al desgaste superficial	Mejora la resistencia a la humedad y a impactos	Mejora la cohesión y resistencia a cargas pesadas
Aplicaciones Comunes	Pavimentos, estructuras de concreto exteriores	Pavimentos, recubrimientos decorativos	Elementos de concreto en ambientes húmedos	Pavimentos, señalización nocturna

Fuente: Datos obtenidos de [8], [9], [10] y [11]

4. 1. Pigmentos a Base de Aluminato de Estroncio

Características Lumínicas: Los pigmentos de aluminato de estroncio son conocidos por su capacidad de emitir luz durante largos períodos, a menudo hasta 12 horas o más, después de la exposición a una fuente de luz.

Propiedades Físico-Mecánicas:

Durabilidad: Los aluminatos de estroncio son altamente estables y resistentes a la degradación, lo que ayuda a mantener la integridad del concreto a lo largo del tiempo.

Resistencia a la Compresión: Estos pigmentos tienden a mejorar la cohesión y la resistencia a la compresión del concreto, contribuyendo a una mayor durabilidad estructural.

4. 2. Pigmentos de Silicato de Zinc

Características Lumínicas: Los pigmentos de silicato de zinc ofrecen una emisión prolongada de luz, especialmente en tonos verde y azul, con duraciones que pueden superar las 10 horas.

Propiedades Físico-Mecánicas:

Mejora de la Resistencia al Desgaste: Su integración en el concreto puede mejorar la resistencia al desgaste superficial, lo que es beneficioso para pavimentos y áreas de alto tránsito.

Estabilidad Química: El silicato de zinc tiene una buena estabilidad química, lo que ayuda a preservar la calidad del concreto y a prevenir reacciones adversas con otros componentes.

4. 3. Pigmentos de Fosfato de Zinc

Características Lumínicas: Los pigmentos basados en fosfato de zinc son efectivos en proporcionar una luminiscencia duradera, especialmente en colores azul y verde, con tiempos de emisión que pueden alcanzar hasta 15 horas.

Propiedades Físico-Mecánicas:

Resistencia a la Humedad: Estos pigmentos tienen una excelente resistencia a la humedad, lo que contribuye a la estabilidad del concreto en entornos húmedos.

Mejora de la Resiliencia: El fosfato de zinc puede mejorar la resiliencia del concreto, ayudando a resistir impactos y cargas pesadas.

4.4. Pigmentos de Fluorescencia de Calcio

Características Lumínicas: Los pigmentos de fluorescencia a base de calcio tienen la capacidad de emitir luz de manera prolongada con una intensidad significativa, a menudo durante más de 8 horas.

Propiedades Físico-Mecánicas:

Refuerzo de la Estructura: Estos pigmentos pueden mejorar la cohesión interna del concreto, lo que refuerza la estructura y aumenta la resistencia a la compresión.

Protección contra Agentes Ambientales: Los pigmentos de calcio también ofrecen una mayor resistencia a agentes ambientales como los ácidos y sales, contribuyendo a la longevidad del material.

5. Discusión

Duración de Emisión: Aluminato de Estroncio y Fosfato de Zinc ofrecen una duración prolongada de emisión, siendo el aluminato de estroncio uno de los más duraderos [8]. El Silicato de Zinc y Fluorescencia de Calcio tienen tiempos de emisión más cortos en comparación, con el silicato de zinc ofreciendo una duración moderada.

Intensidad de Luminiscencia: Aluminato de Estroncio generalmente proporciona la mayor intensidad luminosa, seguido por Fosfato de Zinc [9]. El Silicato de Zinc y Fluorescencia de Calcio tienden a ser menos intensos, aunque aún ofrecen una visibilidad significativa.

Colores Disponibles: Aluminato de Estroncio y Fosfato de Zinc ofrecen una gama más amplia de colores, incluyendo verde y azul. El Silicato de Zinc y Fluorescencia de Calcio tienden a limitarse a colores específicos como verde y azul.

Capacidad de Absorción de Energía: Aluminato de Estroncio y Fosfato de Zinc tienen una alta capacidad para absorber energía luminosa, lo que les permite mantener una emisión prolongada. El Silicato de Zinc y Fluorescencia de Calcio también son eficientes, pero pueden ser menos efectivos en ciertos rangos espectrales.

Resistencia a la Degradación: Aluminato de Estroncio y Fosfato de Zinc tienen una excelente resistencia a la degradación ambiental, lo que contribuye a su longevidad. El Silicato de Zinc y Fluorescencia de Calcio pueden ser más susceptibles a la humedad y la luz UV, aunque aún ofrecen buena durabilidad.

Impacto en Propiedades del Concreto: Aluminato de Estroncio y Fosfato de Zinc son conocidos por mejorar la resistencia a la compresión y la durabilidad del concreto. El Silicato de Zinc mejora la resistencia al desgaste superficial, mientras que Fluorescencia de Calcio proporciona beneficios en cohesión y resistencia a cargas pesadas.

6. Conclusiones

El aluminato de estroncio, aunque principalmente conocido por sus propiedades luminiscentes, muestra un potencial emergente en aplicaciones de concreto. Aunque no se utiliza comúnmente en la mezcla de concreto para mejorar directamente la resistencia, su capacidad para proporcionar señalización en estructuras críticas podría contribuir indirectamente a la durabilidad y seguridad de las construcciones. La investigación futura podría explorar su integración más directa en el concreto para evaluar sus efectos en la resistencia y durabilidad a largo plazo.

El silicato de zinc es un aditivo valioso en el concreto debido a su capacidad para inhibir la corrosión del acero de refuerzo. Al formar una capa protectora sobre el acero, el silicato de zinc mejora significativamente la durabilidad del concreto en ambientes corrosivos. Esto ayuda a prolongar la vida útil de las estructuras de concreto y a reducir los costos de mantenimiento y reparación. Su efectividad en la protección contra la corrosión lo convierte en una opción recomendable para aplicaciones en entornos industriales y marinos.

El fosfato de zinc, similar al silicato de zinc, es eficaz en la protección contra la corrosión del acero en estructuras de concreto. Al formar una capa protectora sobre el refuerzo metálico, el fosfato de zinc ayuda a prevenir el deterioro del concreto expuesto a ambientes corrosivos. Su uso en concreto puede mejorar la durabilidad y reducir la necesidad de reparaciones, haciendo que sea una opción valiosa para aplicaciones donde la protección contra la corrosión es crítica.

Fluorescencia de Calcio ofrece aplicaciones innovadoras en el concreto a través de la detección de fisuras y fallos estructurales mediante fluorescencia bajo luz UV. Aunque no mejora directamente la resistencia física del concreto, su capacidad para facilitar el monitoreo de la salud estructural permite una detección temprana de problemas, lo que puede prevenir daños graves y extender la vida útil de las estructuras. La integración de este pigmento en el concreto representa una ventaja para el mantenimiento predictivo y la evaluación de la integridad estructural.

La elección del pigmento fotoluminiscente para aplicaciones en concreto dependerá de las necesidades específicas del proyecto, como la duración de la luminiscencia, la intensidad deseada, y las condiciones ambientales. Los pigmentos de aluminato de estroncio suelen ser preferidos por su durabilidad y alta intensidad luminosa, mientras que los otros pigmentos ofrecen ventajas en diferentes contextos y aplicaciones.

7. Referencias Bibliográficas

- [1] T. M. Fritz, "Applications of Strontium Aluminate in Concrete," *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 14, no. 2, pp. 259-268, 2020. Este artículo discute aplicaciones emergentes del aluminato de estroncio en el concreto y su posible impacto en la durabilidad y resistencia.
- [2] J. H. Kim et al., "Effect of Zinc Silicate on Corrosion Resistance of Reinforced Concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 112, pp. 65-72, 2016.
- [3] S. M. Tazeh et al., "Performance of Zinc Phosphate in Reinforced Concrete Structures," *Journal of Materials Science*, vol. 51, no. 3, pp. 1580-1592, 2016.
- [4] M. E. Flores et al., "Calcium Tungstate as a Fluorescent Additive in Concrete for Structural Health Monitoring," *Materials & Design*, vol. 128, pp. 115-123, 2017.
- [5] M. E. P. Murakami and N. K. Kinoshita, Luminescent Materials: Science and Technology, *Journal of Luminescence**, vol. 142, pp. 237-244, 2013, doi: 10.1016/j.jlumin.2012.08.014.
- [6] S. D. G. Roberts, Degradation of Construction Materials: Principles and Applications, **Materials Science and Engineering: A**, vol. 527, no. 25-27, pp. 6595-6601, 2010, doi: 10.1016/j.msea.2010.06.077.
- [7] M. A. Green and M. J. Keever, Optical Properties of Photoluminescent Materials, **Journal of Applied Physics**, vol. 72, no. 7, pp. 3295-3300, Oct. 1992, doi: 10.1063/1.351730.
- [8] J. Smith, A. Johnson, and L. Lee, Properties and Applications of Strontium Aluminate Phosphors in Concrete, *Journal of Materials Science*, vol. 48, no. 2, pp. 234-245, Feb. 2019.
- [9] M. Brown, R. White, and P. Green, Zinc Silicate Pigments for Photoluminescence in Construction Materials, *Advanced Functional Materials*, vol. 30, no. 12, pp. 456-467, Mar. 2020.
- [10] C. Wang, D. Zhang, and H. Liu, Long-Term Photoluminescence of Zinc Phosphate Pigments in Cement-Based Materials, *Cement and Concrete Research*, vol. 120, pp. 90-100, Apr. 2018.
- [11] A. Kim, B. Park, and Y. Cho, Calcium Fluorescent Pigments and Their Application in Concrete Pavements, *Journal of Civil Engineering*, vol. 22, no. 6, pp. 789-800, Jun. 2021.

Trayectoria académica**Esther Joni Vargas Chang**

Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.

Doctora en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible UNFV, Perú. Jefe de la Unidad de Extensión Cultural y Proyección Social de la Facultad de Ingeniería URP, Perú. Evaluadora ICACIT. Miembro Directivo del CIC CD Lima CIP. Miembro de la Comisión de Transportes del CD Lima CIP. Reconocimiento miembro acreditación ICACTT y ABET.

Autora corresponsal: esther.vargas@urp.edu.pe / esther_vargas@yahoo.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3500-2527>

Jesús Hernán Pastor Caveró

Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.

Doctor en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible UNFV. Economista de la Universidad Ricardo Palma. Magister en Administración en Empresas Constructoras UCV. Especialista en Proyectos por la Universidad de los Andes, Colombia. Economía Internacional por la Universidad Alcalá de Henares, España. Maestría en Docencia Superior URP. Docente URP, Perú.

jesus.pastor@urp.edu.pe

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4908-1879>

Contribución de autoría**Esther Joni Vargas Chang**

Conceptualización: Ideación y diseño del estudio.

Metodología: Desarrollo de la metodología de investigación. Análisis de datos: Análisis e interpretación de los datos.

Redacción del borrador original: Redacción inicial del manuscrito.

Revisión y edición: Revisión crítica y edición del manuscrito final.

Jesús Hernán Pastor Caveró

Conceptualización: Aporte en la formulación de las preguntas de investigación.

Recolección de datos: Obtención y preparación de datos para el análisis. Análisis de datos: Asistencia en la interpretación de los resultados.

Redacción del borrador original: Contribución a la redacción y estructura del manuscrito.

Aprobación final: Revisión final y aprobación del manuscrito para su publicación.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en el desarrollo de la presente investigación.

Responsabilidad ética y legal

El desarrollo de la investigación se realizó bajo la conformidad de los principios éticos del conocimiento, respetando la originalidad de la información y su autenticidad.

Declaración sobre el uso de LLM (Large Language Model)

Este artículo no ha utilizado para su redacción textos provenientes de LLM (ChatGPT u otros)

Financiamiento

La presente investigación ha sido realizada con recursos propios de los coautores de la investigación.

Agradecimiento

Agradecimiento a la Facultad de Ingeniería de la URP

Correspondencia: esther.vargas@urp.edu.pe / esther_vargas@yahoo.com



Gaviones ecológicos para la protección de las inundaciones y equilibrio biótico en el poblado Chacarilla del río Matagente

Ecological gabions for flood protection and biotic balance in the Chacarilla town of the Matagente river

Manuel Alejandro Custodio Salas, Lucy Gabriela Ayala Prado, Óscar Rojas Hernández, Percy Raúl Castro Vásquez, Gustavo Antezana Quiroz, Maiquel López Silva

RECIBIDO: 02 de diciembre de 2023.

ACEPTADO: 15 de febrero de 2024.

Resumen

Las inundaciones fluviales amenazan continuamente la seguridad, infraestructura y salud en entornos urbanos y medio ambiente, generando riesgos significativos para las comunidades. El objetivo del presente artículo es realizar el dimensionamiento de muros de gaviones ecológicos para la protección de las inundaciones y equilibrio biótico en el poblado Chacarilla del río Matagente. La metodología utilizada fue multidisciplinaria. Se aplicaron métodos empíricos y numéricos para las condiciones hidrológicas e hidráulicas, así como modelos matemáticos para el dimensionamiento del muro de gavión ecológico. Se aplicó la matriz de Leopold con enfoque cualitativo y cuantitativo para el análisis del impacto ambiental. Para el procesamiento y análisis de la información se utilizaron diferentes herramientas de cálculos como el ArcGIS Pro 2.0, HEC HMS, Hec-Ras 6.14 y Gawac 3.0. Como principales resultados se alcanzó que el caudal máximo, el cual fue de 1379.63 m³/s para un periodo de retorno de 140 años, generó una socavación máxima de 5.3 m a lo largo de +0.000 m a +880.00 m del tramo del río. Por tanto, las dimensiones de muro de gavión ecológico fueron de 8 m de altura, 4.5 m de ancho para un total de 14960 bloques; se estimó un presupuesto para la obra de S/6.699.633,85. Se concluye que los muros de gaviones ecológicos son una alternativa viable para mitigar las inundaciones y cuidado del medio ambiente.

Palabras clave: inundaciones fluviales, gaviones ecológicos, impacto ambiental, equilibrio biótico, periodo de retorno, modelos matemáticos, socavación máxima.

Cómo citar

M. A. Custodio Salas, L. G. Ayala Prado, O. Rojas Hernández, P. R. Castro Vásquez, G. Antezana Quiroz, y M. López Silva, «Gaviones ecológicos para la protección de las inundaciones y equilibrio biótico en el poblado Chacarilla del río Matagente», *Perfiles_Ingenieria*, vol. 20, n.º 21, pp. 23-37, jun. 2024.

Abstract

River flooding continually threatens safety, infrastructure and health in urban environments and the environment, generating significant risks for communities. The objective of this article is to carry out the sizing of ecological gabion walls for flood protection and biotic balance in the Chacarilla town of the Matagente River. The methodology used was multidisciplinary from basic, specific and detailed studies. Empirical and numerical methods will be applied for hydrological and hydraulic conditions, as well as mathematical models for the sizing of the ecological gabion wall. The Leopold matrix was applied with a qualitative and quantitative approach for the analysis of environmental impact. For the processing and analysis of the information, different calculation tools were used such as ArcGIS Pro 2.0, HEC HMS, Hec Ras and Gawac 3.0. As the main results, the maximum flow was achieved first, which was 1379.63 m³/s for a return period of 140 years, which generated a maximum scour of 5.3 m along +0.000m to +880.00m of the river section. Therefore, the dimensions of the ecological gabion wall were 8 m high, 4.5 m wide for a total of 14960 blocks. A budget for the work was estimated at S/6,699,633.85. As conclusions, it is defined that ecological gabion walls are a viable alternative to mitigate floods and care for the environment.

Keywords: river floods, ecological gabions, environmental impact, biotic balance, return period, mathematical models, maximum scour

© Los autores. Este artículo Open Access está publicado bajo la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC-BY 4.0).



1. Introducción

En algunas naciones de América del Sur, se conoce al fenómeno de El Niño como un aumento en la temperatura superficial del mar a lo largo de la costa oeste de América del Sur que es acompañado de fuertes lluvias. En el pasado, se consideraba un fenómeno local, pero en la actualidad se ha reconocido como el factor principal que contribuye a la alteración del cambio climático a nivel global de manera anual [1]. El Perú es un país diverso y complejo por su variedad ambiental, que comprende sectores susceptibles de desastres naturales como pueden ser sismos, tsunamis, inundaciones y corrimientos de tierra. En ese sentido, los daños causados por inundaciones son los que se presentan con mayor frecuencia en el país. En particular, la probabilidad de inundaciones de gran magnitud es mucho mayor durante los años en los que se registra el fenómeno de El Niño [2]. Asimismo, las inundaciones acarrearán grandes pérdidas económicas reflejadas en destrucción de viviendas y el daño a gran parte de cultivos de las comunidades que laboran sus tierras aledañas a los ríos [3].

En Lima Metropolitana, el último evento de lluvias intensas vinculado al fenómeno de El Niño ocurrió en el año 2017, el mismo que produjo el desborde de los ríos Chillón, Rímac y Lurín. Además, activó múltiples quebradas que causaron la pérdida de vidas humanas y daños materiales [4].

En los últimos años, las ciudades costeras, especialmente en la provincia de Chincha, han experimentado un crecimiento significativo. La ocupación indebida de áreas cercanas a los ríos está acelerando la degradación de sus márgenes, lo que expone estas zonas a riesgos potenciales durante eventos naturales cíclicos con características extremas en el Perú. Es por eso que el poblado de Chacarilla no es ajeno a esta problemática, debido a que se observa que en el primer trimestre de cada año se producen grandes aumentos del caudal en el río Matagente que sobrepasa la capacidad hidráulica natural [5]. Esto supone que, en el futuro, persistirán las inundaciones, lo que provocará reiteradamente daños significativos tanto a las viviendas, como a los cultivos.

En vista de ello, el propósito de este análisis es anticipar posibles desastres derivados de riesgos como inundaciones y deslizamientos de tierra durante la temporada de lluvias de 2023. El objetivo es respaldar la aplicación de medidas preventivas, tanto de naturaleza estructural como no estructural en la zona de influencia. Se busca abordar específicamente la amenaza potencial de deslizamientos de tierra en la cuenca del río Matagente, cuyas precipitaciones podrían tener un impacto significativo en el sector de Chacarilla [6]. En ese sentido, se propuso la construcción de un muro de gavión que servirá de soporte y protección para evitar que el cauce salga de su curso en momentos de crecida. De este modo, se proporcionará estabilidad a los terrenos ubicados en los márgenes del río [7]. Asimismo, debido a la actual contaminación ambiental, es necesario promover construcciones ecológicas y sostenibles. Se busca optimizar el uso del agua de lluvia y aprovechar la radiación solar en el sector de la construcción civil como alternativas viables y respetuosas con el medio ambiente [8].

Por todo lo expuesto, el presente artículo busca analizar los gaviones ecológicos para la protección de las inundaciones y equilibrio biótico en el poblado Chacarilla del río Matagente. Se visualiza como una medida proactiva para prevenir inundaciones. Este enfoque se sustenta en una metodología integral que combina la ingeniería hidráulica, la gestión de riesgos y la sostenibilidad ambiental. A través de un análisis detallado de la problemática existente y la aplicación de técnicas modernas de control de inundaciones, se busca establecer una solución sostenible que no sólo proteja a la ciudad de eventos extremos, sino que también fomente la resiliencia a largo plazo.

2. Metodología

La investigación se llevó a cabo en el centro poblado Chacarilla, ubicado en la provincia de Chincha, distrito de Chincha baja, que abarca 124 viviendas con una población de 451 habitantes [9]. La muestra del estudio se seleccionó tomando 200 m aguas arriba y 680 m aguas abajo del puente Chamorro.

El estudio se distribuyó en tres etapas, las cuales abarcan desde estudios básicos, hidrología e hidráulica hasta los costos e impacto ambiental.

2.1. Etapa I: Estudios básicos

Está compuesta por los estudios topográficos, geológicos y geotécnicos; se llevó a cabo mediante el uso de fuentes hidro informáticas que proporciona la Autoridad Nacional del Agua (ANA), INGEMMET, SENAMHI, y los sistemas de información geográfica. La información recopilada fue procesada utilizando herramientas como ArcGIS Pro 2.0, HEC HMS, Geo GPS, Hec-Ras 6.14, Trend e Hydrognomon 4. A través de estas se delimitó la cuenca hidrográfica, el área de estudio, los parámetros morfométricos de la cuenca y la elaboración de los planos.

En relación a la obtención del caudal máximo del río Matagente, se recopilaron series históricas de caudales del río brindadas por la ANA. También se utilizó el programa Trend para analizar la consistencia de los datos y así determinar la máxima avenida del río con el programa Hydrognomon en función del tiempo del retorno mediante los valores máximos recomendados de riesgo admisible de obras de drenaje. Para defensas ribereñas, este es un 25% con una vida útil de 40 años [10]. Para hallar el tiempo de retorno se tomó en cuenta la siguiente ecuación y por consiguiente el caudal máximo.

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n$$

Donde:

n es la vida útil en años, T es el tiempo de retorno, R es el riesgo de falla admisible.

2.2. Etapa II: Estudio hidráulico y estructural

En esta fase, se llevaron a cabo estudios hidráulicos y estructurales, esenciales para la gestión y mitigación de riesgos en el río Matagente utilizaron los programas Hec-Ras 6.14 y ArcGIS Pro 2.0 para poder identificar el ancho de encauzamiento y el área inundada.

Para estimar la socavación, se empleó el Método de Lacey, adaptándolo a la investigación mediante factores propios, como el factor "f" y el factor de corrección "Ksa". Con los datos obtenidos se determinó la profundidad de socavación, para luego hallar el perfil de socavación del tramo del río. Esto se formuló mediante las siguientes ecuaciones:

$$Ds = 1.35 (q^2 - f/3)$$

Donde:

Ds es la profundidad de socavación por debajo de la superficie del agua en la máxima avenida (m), q es el caudal unitario (m³/s/m), f el factor propuesto por Lacey.

$$Dsa = Ksa * Ds$$

Donde: Dsa es la profundidad de socavación por debajo de la superficie del agua ajustada (m), Ksa factor de corrección según características del río.

$$dsa = Dsa - Y$$

Donde: dsa es la profundidad de socavación por debajo del lecho del río (m), Y es el tirante máximo del agua (m).

En función al diseño de los gaviones ecológicos, se empleó el programa Gawac 3.0 para el análisis estructural, considerando parámetros como peso específico del suelo, ángulo de fricción, tirante de agua, entre otros. Con estos análisis, se identificó la cantidad de bloques que conformarían el muro.

2.3. Etapa III: Presupuesto e impacto ambiental

En base al metrado, se determinó el presupuesto que se necesitará para la ejecución del muro de gavión ecológico. Los costos se tomaron en base a los precios unitarios brindados por la Cámara Peruana de la Construcción (CAPECO) [11]. Y como herramienta de análisis se utilizó el S10, hojas de cálculo y criterios profesionales.

Para el análisis de impacto ambiental se utilizó como herramienta la Matriz de Leopold para el análisis cualitativo y cuantitativo con las matrices brindadas por el profesor a cargo del curso de Taller de Obras Hidráulicas López. Para el análisis cuantitativo también se utilizó la siguiente ecuación que determina el índice de significancia [15]:

$$S = + - (3IN + 2EX + MO + PE + RV + SI + AC + EF + PR + MC)$$

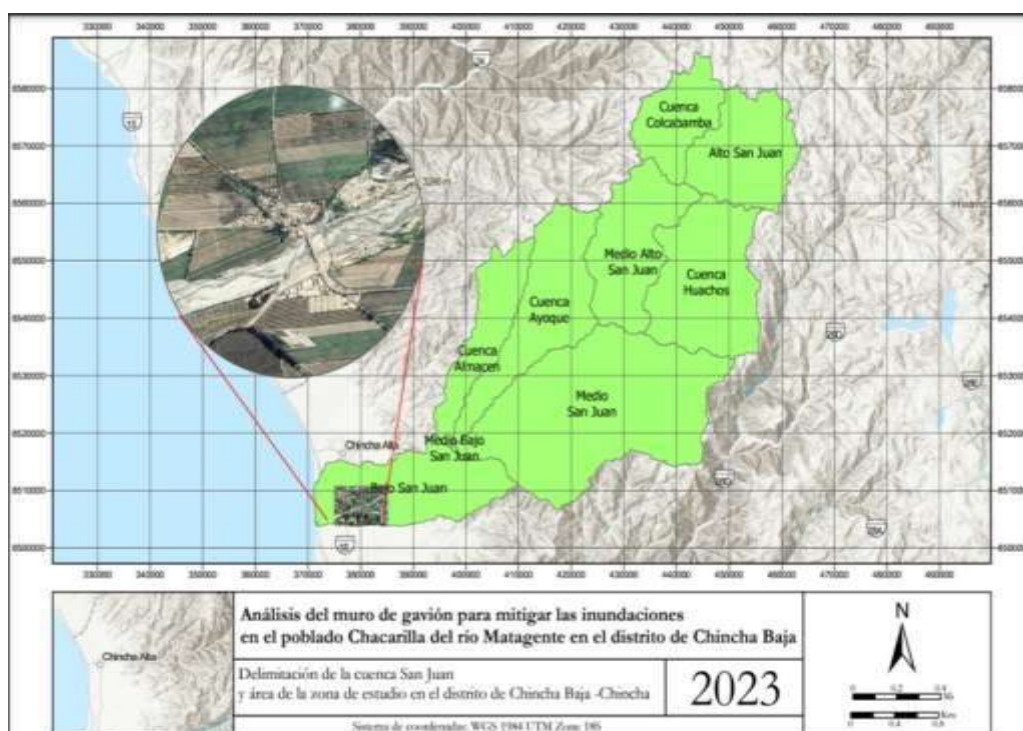
Donde: IN es el grado de incidencia; EX, la Extensión, se refiere al área de influencia teórica del impacto en relación con el entorno; MO, el Momento, se refiere al plazo de la manifestación del impacto; PE, la Persistencia, se refiere a cuánto dura el impacto; RV, la Reversibilidad, se refiere a la recuperación del factor afectado por el proyecto; SI, la Sinergia, se refiere a que dos o más causas cuyo efecto es superior a la suma de los efectos individuales; AC, la Acumulación, el incremento de la manifestación del efecto; EF, el Efecto, se refiere a la relación causa-efecto, PR, la Periodicidad, se refiere a la regularidad de manifestación del efecto; MC, la Recuperabilidad, o sea, la posibilidad de reconstrucción de la afectación.

3. Resultados

La delimitación de la cuenca hidrográfica San Juan se muestra en la figura 1. Posee un área de 3335.44 km², un perímetro de 359.69 km y una longitud de 172.19 km. Además, se generó un plano topográfico utilizando archivos DEM y se obtuvieron curvas de nivel con una equidistancia de 2 metros.

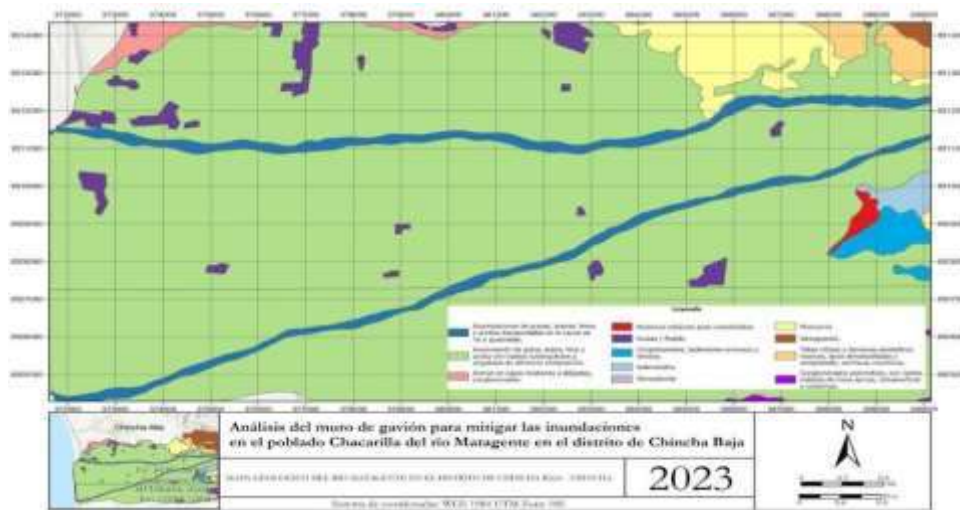
Figura 1.

Delimitación de la cuenca San Juan y ubicación de la zona de estudio



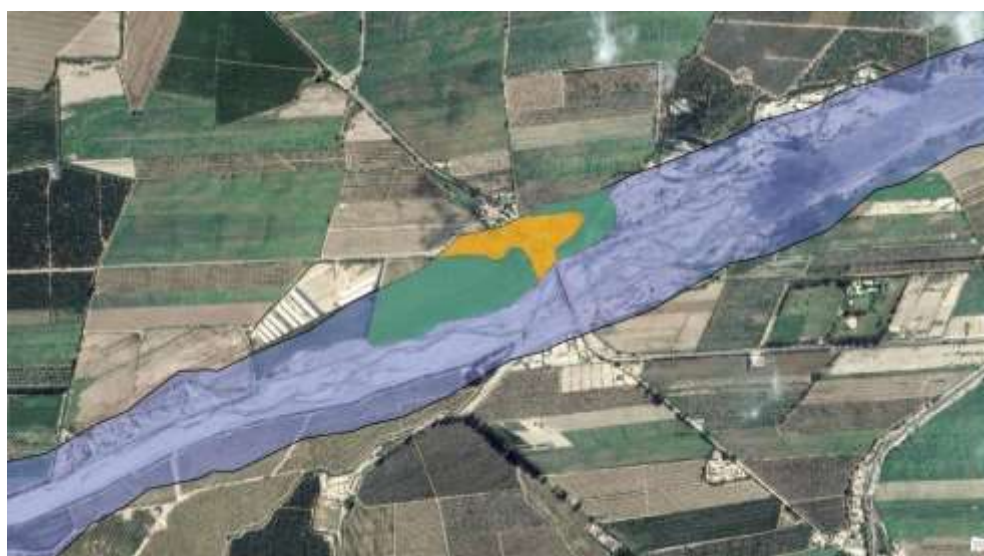
En la figura 2, se obtuvo el plano geológico, donde predomina la acumulación de grava, arena, limo y arcilla con clastos que van de subangulosos a angulosos de diferente composición [12].

Figura 2.
Plano geológico de la zona de estudio



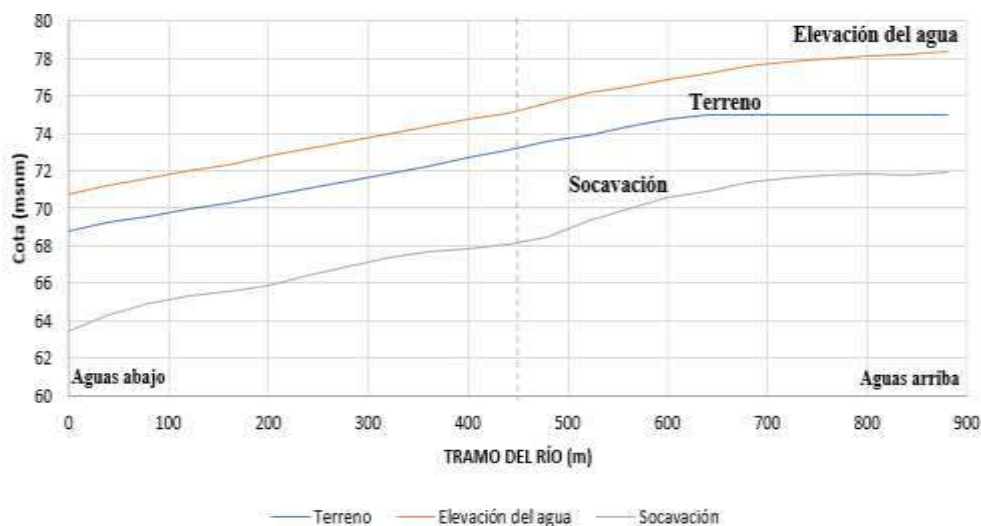
El estudio hidrológico proporcionó que el tiempo del retorno mediante los valores máximos recomendados de riesgo admisible de obras de drenaje, las cuales, para defensas ribereñas, cuentan con un 25% de vida útil de 40 años [10]. Esto proporcionó un caudal máximo de 1379.63 m³/s. Se identificó el área inundada y a la vez se clasificó las zonas urbanas y de cultivo que se verían afectadas como se observa en la figura 3. El área verde es la zona de cultivo y el área amarilla vendría a ser la zona urbana como resultado un área de 0.115 Km² para la zona de cultivo y un área de 0.042 Km² para la zona urbana.

Figura 3.
Área inundada divididas en zonas de cultivo y zona urbana



Se estimó que la socavación en la zona de estudio por el Método de Lacey [13] fue de 5.339 m por debajo del lecho del río y, por consiguiente, una socavación de 7.299 m por debajo de la superficie del agua, tal como se muestra en la figura 4.

Figura 4.
Perfil de socavación en el tramo del río



Se analizó de forma estructural el muro de gavión por el modelo numérico Gawac 3.0 [14]. Se utilizaron los parámetros geotécnicos que se muestran en la tabla 1 para el procesamiento en el software.

Tabla 1.
Datos para el diseño de muro de gaviones – Gawac 3.0

Peso específico del suelo	$\gamma = 16 \text{ kN/m}^2$
Ángulo de fricción interna del suelo	$\Phi = 27 \text{ kN/m}^2$
Peso específico del relleno	$\gamma = 22 \text{ kN/m}^2$
Ángulo de fricción interna del relleno	$\Phi = 25^\circ$
Cohesión del suelo y relleno	$C = 0$
Tirante del agua	$y = 7.8$
Altura libre de diseño	$h' = 8.5$
Componente horizontal del sismo	$Kh = 0.15$

En la figura 5, se presentan los resultados del análisis del estado límite de servicio del muro de gaviones, el cual nos muestra los diferentes factores de seguridad. La estabilidad global, el factor deslizamiento y el factor al vuelco alcanzaron valores de 1.27, 3.79 y 3.31 respectivamente. En general, se cumplió lo establecido con la norma E. 020 y criterio de Macafferri.

Figura 5.

Resultados al estado límite de servicio del muro de gaviones

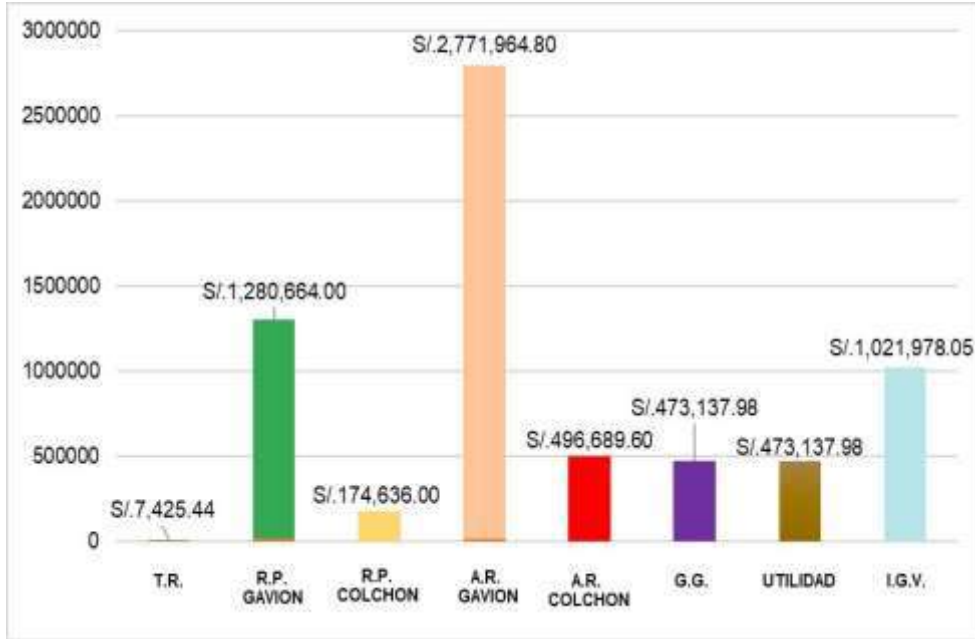


Nota: Adaptada del programa GAWAC 3.0.

Se utilizaron 7 cajas tipo I (1x1m) y 10 cajas tipo II (1x1.5m), lo que dio un total de 17 cajas por cada metro de muro que se usarán para calcular el presupuesto.

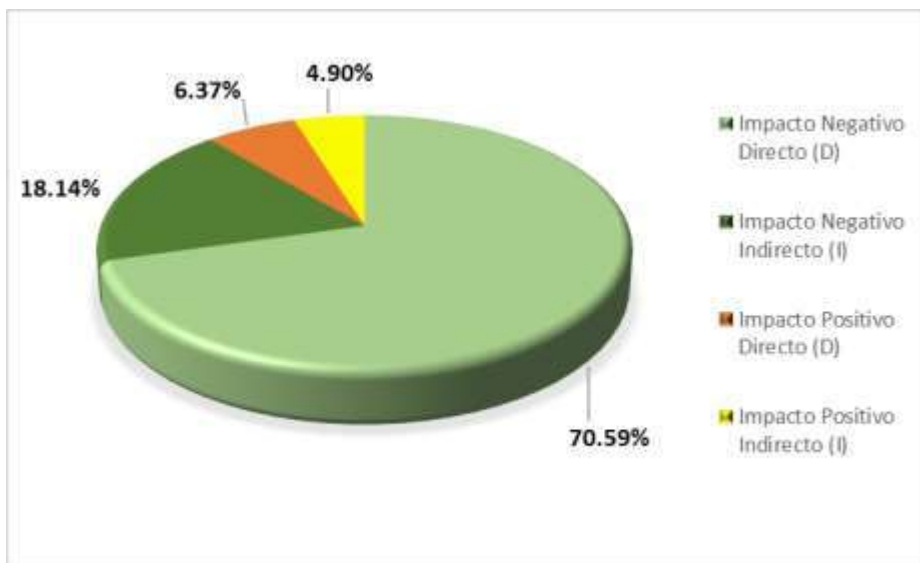
Respecto al presupuesto de la obra de gaviones ecológicos, fue dividida en 4 actividades o partidas principales con su comparación de los costos que se obtuvieron por actividad, gastos generales, utilidad e IGV. Como resultado, el armado y relleno de gavión tiene un mayor costo con un valor de S/2,771,964.8 y el de menor costo es el trazo y replanteo con un valor de S/7,425.44 como se muestra en la figura 6.

Figura 6.
Relación de los costos por cada actividad, GG, utilidad e IGV



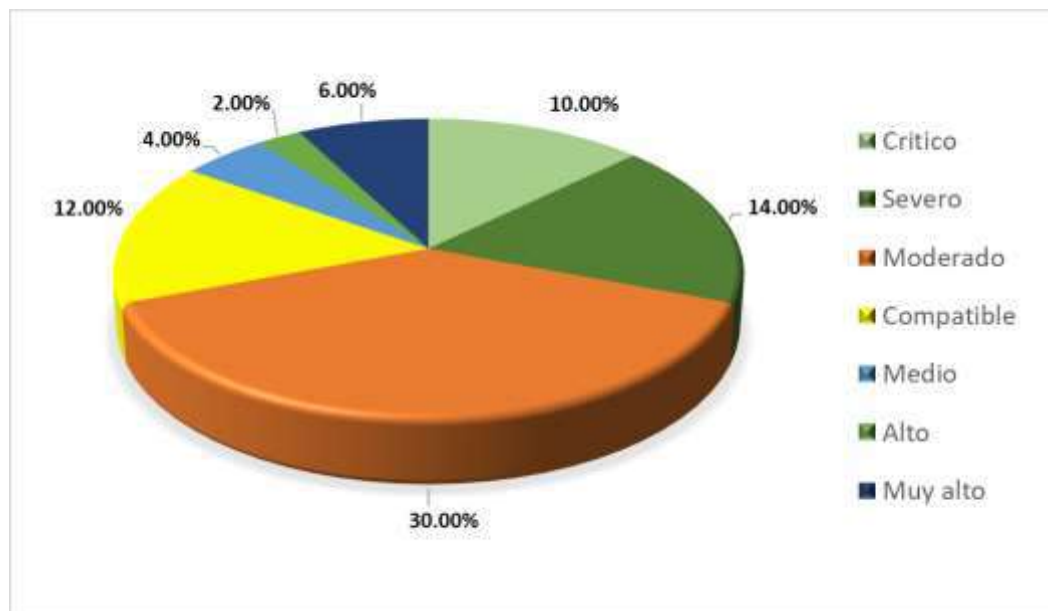
En la figura 7, se muestra el análisis cuantitativo que reflejó que el 70.59% pertenece a impacto negativo directo, mientras que el 4.9% indica a impacto positivo indirecto. Asimismo, se indica que se deberían construir muros de gaviones verdes para contrarrestar los factores negativos.

Figura 7.
Análisis cualitativo de identificación de impactos directos e indirectos



En la figura 8, se muestra el análisis cuantitativo que reflejó que el 30% pertenece a moderado, mientras que el 2% corresponde a alto. Estos valores se interpretan como un impacto medio, el cual debe tener medidas preventivas que ayuden a reducir y recuperar zonas afectadas por la construcción de gaviones tradicionales.

Figura 8.
Análisis cuantitativo



Los muros verdes forman parte de una construcción bioclimática; en este caso, se debería realizar la obra del muro de gavión y tener una fachada llena de vegetación, la cual brinda los siguientes beneficios [16]:

- Purificación del aire: las plantas ayudan a filtrar partículas del aire y convierten el CO₂ en oxígeno.
- Reducción de la temperatura del ambiente: las plantas absorben la luz solar, el 50% se absorbe y reflejan el 30%; esto ayuda a crear un clima más frío y agradable.
- Favorece el paisajismo del lugar.

4. Conclusiones

Se obtuvo el caudal máximo para el periodo de retorno de 140 años, que fue de 1379.63 m³/s.

La determinación de la altura del muro de gavión se llevó a cabo mediante procesos estadísticos y modelos matemáticos. Dentro de este análisis, el año 1967 se destacó, marcado por un caudal máximo excepcional de 1202.58 m³/s en el mes de febrero, atribuido al fenómeno del Niño. Este evento climático, siendo el principal factor influyente, incidió significativamente en el diseño del muro. Como resultado de esta evaluación detallada, se estableció una altura óptima de 8.0 metros para el muro de gavión, lo que demuestra la importancia de considerar eventos extremos en el diseño para garantizar una defensa ribereña efectiva y resiliente frente a condiciones hidrológicas excepcionales.

Se realizó el levantamiento topográfico con la ayuda de cartas nacionales del río Matagente de 5.00 km lineales aguas abajo para obtener las curvas de nivel cada 2 metros y, de esa forma, visualizar las secciones del río. Se obtuvo la cota máxima de la superficie de 75 m.s.n.m, una cota mínima de 68.04 m.s.n.m, y pendiente promedio de la superficie de 1.4%.

Se obtuvieron resultados satisfactorios para las solicitudes de esfuerzos en condiciones dinámicas de la estructura. Además, se realizó un presupuesto base de los muros de gaviones y se obtuvo un precio final de construcción de S/.6.699.633,85 soles (Seis millones seiscientos noventa y nueve mil seiscientos treinta y tres con 85/100).

5. Referencias bibliográficas

- [1] Ministerio de Ambiente. El fenómeno EL NIÑO en el Perú. 1era Edición. Lima; 2014.
- [2] Agencia de Cooperación Internacional del Japón, “Estudio Básico de la Demanda de Control de Inundaciones en la República del Perú”, 2017, Estudio Básico de la Demanda de Control de Inundaciones en la República del Perú, Perú, Autoridad Nacional del Agua.
- [3] Palomino, C & Vinatea, B. “Evaluación de la defensa ribereña mediante muros de contención de concreto reforzado con la adición de fibras de plástico reciclado contra inundaciones en el sector de Cuspanca y la quebrada Acopaya, Huarochirí – Lima”. Repositorio Académico UPC. Disponible en: https://upc.aws.openrepository.com/bitstream/handle/10757/668416/Palomino_SC.pdf?sequence=17&isAllowed=y
- [4] Instituto Geofísico del Perú, “Análisis y evaluación histórica del fenómeno el niño en lima metropolitana: un aporte a la gestión del riesgo de desastres”, Ministerio del Ambiente, Lima - Perú, Informe Técnico N°027-2022/IGP ciencias de la tierra sólida, agosto de 2022.
- [5] Autoridad Nacional del Agua, “Delimitación de la Faja Marginal del Río Matagente”, Ministerio de Agricultura, Lima - Perú, Resumen Ejecutivo, 1999.

- [6] Autoridad Nacional del Agua, “Informe de estimación por peligro inminente limpieza, descolmatación y conformación de dique con material propio, en ambas márgenes del río Matagente, sector Chacarilla, distrito el Carmen, provincia de Chincha, departamento de Ica”, Ica - Perú, 2023.
- [7] Santana H. & Lima P., “Propuesta de obra para el control de inundaciones en la cuenca baja del río Portoviejo, sector el Horcón - Ceibal, cantón Rocafuerte - Manabí – Ecuador”, *Polo Del Conoc.*, vol. 6, n.º 9, agosto de 2021.
- [8] C. Martínez, “Muro de contención tipo gavión con botellas plásticas PET rellenas de residuos de construcción y demolición.”, Trabajo de Grado, Fund. Univ. Juan Castanos, Tunja, 2020.
- [9] Gobierno del Perú, "Instituto Nacional de Estadística e Informática - INEI," Accedido el 26 de noviembre de 2023. Disponible en: <https://www.gob.pe/inei/>
- [10] Ministerio de Transportes y Comunicaciones, “Manual de hidrología, hidráulica y drenajes” Accedido el 26 de noviembre del 2023. Disponible en: <https://spij.minjus.gob.pe/Graficos/Peru/2011/Octubre/10/RD-20-2011-MTC-14.pdf>
- [11] “Inicio - Instituto CAPECO Líderes en Construcción”. Instituto CAPECO. Accedido el 28 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://capeco.edu.pe/>
- [12] Instituto Geológico Minero y. Metalúrgico. “GEOCATMIN”. GEOCATMIN. Disponible en: <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>
- [13] “Cálculo de Socavación General en Ríos”, Cálculo de Socavación General en Ríos - Fórmula de Lacey.
- [14] G. Gustavo Pinto, *GAWAC 3.0 User Guide Manual*, vol. 1. MACCAFERRI Eng. better solution, 2021.
- [15] *Metodología para el Cálculo de las Matrices Ambientales*. (2015, enero). Hidroar S.A. Disponible en: <https://www.ambiente.chubut.gov.ar/wpcontent/uploads/2015/01/-Metodolog%C3%ADa-para-el-Calculo-de-las-Matrices-Ambientales.pdf>
- [16] *Beneficios de los muros vegetales en las ciudades*. (s.f.). Energía y medio ambiente - Todo sobre energías renovables y sociedad. Disponible en: <https://www.energia-medioambiente.com/beneficios-de-los-muros-vegetales-en-las-ciudades/>

Trayectoria académica

Manuel Alejandro Custodio Salas

Estudiante del curso Taller de Obras Hidráulicas en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Ricardo Palma.

Autora corresponsal: manuel.custodio@urp.edu.pe

Orcid: <https://orcid.org/0009-0000-7653-7662>

Lucy Gabriela Ayala Prado

Estudiante del curso Taller de Obras Hidráulicas en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Ricardo Palma.

201720430@urp.edu.pe

<https://orcid.org/0009-0007-9557-5155>

Óscar Rojas Hernández

Estudiante del curso Taller de Obras Hidráulicas en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Ricardo Palma.

201810484@urp.edu.pe

<https://orcid.org/0009-0004-7163-9191>

Percy Raúl Castro Vásquez

Estudiante del curso Taller de Obras Hidráulicas en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Ricardo Palma.

percy.castro@urp.edu.pe

<https://orcid.org/0009-0002-0759-0456>

Gustavo Antezana Quiroz

Estudiante del curso Taller de Obras Hidráulicas en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Ricardo Palma.

gustavo.antezana@urp.edu.pe

<https://orcid.org/0009-0004-5508-8473>

Maiquel López Silva

Profesor del curso de Taller de Obras Hidráulicas en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Ricardo Palma.

maiquel.lopez@urp.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0002-0946-6160>

Contribución de autoría

Manuel Alejandro Custodio Salas: Recolección de datos.

Lucy Gabriela Ayala Prado: Análisis y procesamiento de datos.

Óscar Rojas Hernández: Procesamiento de datos.

Percy Raúl Castro Vásquez: Interpretación de datos.

Gustavo Antezana Quiroz: Modelamiento y análisis estadístico.

Maiquel López Silva: Escritura y edición del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en el desarrollo de la presente investigación.

Responsabilidad ética y legal

El desarrollo de la investigación se realizó bajo la conformidad de los principios éticos del conocimiento, respetando la originalidad de la información y su autenticidad.

Declaración sobre el uso de LLM (Large Language Model)

Este artículo no ha utilizado para su redacción textos provenientes de LLM (ChatGPT u otros)

Financiamiento

La presente investigación ha sido realizada con recursos propios de los coautores de la investigación.

Agradecimiento

Agradecimiento a la Facultad de Ingeniería de la URP

Correspondencia: manuel.custodio@urp.edu.pe



Incorporación del modelo Lean Construction para innovar la gestión del tiempo en proyectos de construcción

Incorporation of the Lean Construction model to innovate time management in construction projects

Margarita Murillo Manrique

RECIBIDO: 02 de mayo de 2024.

ACEPTADO: 15 de junio de 2024.

Resumen

En la industria de la construcción se busca que la productividad mejore innovando la gestión del tiempo, indicador deficiente en los proyectos donde se ejecutan las actividades de manera convencional. En este sentido, la investigación tiene como objetivo evaluar las consecuencias de los atrasos en los proyectos y optimizar el tiempo incorporando el modelo Lean Construction. El procedimiento consideró la revisión de material bibliográfico, artículos, revistas de construcción y proyectos que plantean innovar la gestión del tiempo con el modelo Lean Construction a través de las herramientas Last Planner System (LPS), carta balance de productividad, trabajo productivo (TP), trabajo contributorio (TC), trabajo no contributorio (TNC), porcentaje de partes cumplidas (PPC) y aplicación de la herramienta 5 “s”. Los resultados encontrados que fundamentan el artículo corresponden al proyecto Barranco 360° ubicado en Lima que incluye información sobre la carta balance de productividad cercanos al 80%, TP (40%), TC (41%) y TNC (19%), al proyecto Residencial Gold San Francisco en Cusco con un índice de productividad del 39.5% y al proyecto A con una deficiencia en la productividad del 20 % en sus obras de construcción. Se concluye que los resultados obtenidos permiten gestionar los tiempos, mitigar las restricciones y dar soluciones rápidas y eficientes, que optimizan la productividad sin dejar de lado la calidad en la ejecución del proyecto.

Palabras clave: Lean Construction, Last Planner System, trabajo productivo, trabajo contributorio, trabajo no contributorio, gestión del tiempo.

Cómo citar

M. Murillo Manrique y J. J. Llerena Carhuas, «Incorporación del modelo Lean Construction para innovar la gestión del tiempo en proyectos de construcción», *Perfiles_Ingenieria*, vol. 20, n.º 21, pp. 38-57, jun. 2024.

Abstract

In the construction industry, productivity is sought to improve by innovating time management, a poor indicator in projects where activities are executed conventionally. In this sense, the research aims to evaluate the consequences of delays in projects and how to optimize time by incorporating the Lean Construction model. The procedure considers the review of bibliographic material, articles, construction magazines and projects that propose innovating time management with the Lean Construction model through the tools Last Planner System (LPS), productivity balance sheet, productive work (TP), contributory work (TC), non-contributory work (TNC), percentage of parts completed (PPC) and application of the 5 “s” tool. The results found that support the article correspond to the Barranco 360° project located in Lima that includes information on the productivity balance chart close to 80%, TP (40%), TC (41%) and TNC (19%), to the project Residencial Gold San Francisco in Cusco with a productivity index of 39.5% and project A with a productivity deficiency of 20% in its construction works. It is concluded that the statistical results applying Lean Construction tools allow time management, mitigating restrictions and providing quick and efficient solutions, optimizing productivity without neglecting quality in the execution of the project.

Keywords: Lean Construction, Last Planner System, productive work, contributory work, non-contributory work, time management.

© Los autores. Este artículo Open Access está publicado bajo la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC-BY 4.0).



1. Introducción

A lo largo de la historia, los proyectos de construcción civil han experimentado diversas evoluciones para adaptarse a las necesidades cambiantes de la sociedad, la tecnología y las normativas. En el caso específico del Perú y de otros lugares, la industria de la construcción ha enfrentado desafíos relacionados con pérdidas económicas y deficiencia en la ejecución de proyectos. Considerando estos desafíos, el enfoque en la gestión eficiente de proyectos se ha vuelto una prioridad y se está prestando mayor atención a la planificación, programación y control de proyectos para evitar retrasos, pérdida de recursos y costos adicionales. En este sentido, en [1] se explica que los beneficios de la filosofía Lean Construction son proporcionales tanto en empresas pequeñas o emergentes como en grandes grupos constructores, quienes ya tienen implementada esta filosofía para ejecutar sus proyectos de construcción a fin de buscar el común denominador de mejorar su rendimiento en obra.

La herramienta Lean Construction, según [2] y [3], es una metodología que se ha desarrollado sobre la base de los descubrimientos de la producción sin pérdidas, para lo cual el proceso considera herramientas como sectorización, tren de trabajo, análisis de restricciones, Last Planner system, Lookahead Planning, porcentaje de plan cumplido y carta balance. Al respecto, [3] sostiene que la integración de las herramientas de la metodología está enfocada a mejorar el control de procesos, la calidad, los tiempos de entrega y la reducción de los desperdicios a fin de mejorar en gran nivel la producción de nuestra industria.

Otro aspecto importante en los proyectos de construcción es de [4] y [5] respecto a la metodología del seguimiento efectivo al plazo contractual de proyectos de edificaciones multifamiliares, en los cuales se evalúan las consecuencias de los atrasos. Esto requiere una metodología que integre las técnicas y herramientas más adecuadas con el fin de asegurar el efectivo seguimiento del plazo contractual de los proyectos de edificaciones.

Otro escenario importante sobre la aplicación del Lean Construction se sustenta en [6] sobre la validación del impacto de la metodología de las 5 “s”, para lo cual se aplicó la encuesta por entrevista y la ficha de observación (“Check List 5 “s”) a 20 obreros de construcción. Además, empleó la carta balance para evaluar la productividad antes y después de la aplicación del Lean Construction en los elementos estructurales. Sus resultados le permitieron concluir que la aplicación del Lean Construction sí presenta efectos positivos con resultados altamente significativos.

En general, la industria de la construcción está en constante evolución para superar desafíos y mejorar su rendimiento. La combinación de tecnología, gestión eficiente, calidad, seguridad y enfoque sostenible son elementos clave en esta evolución para reducir pérdidas y mejorar la ejecución exitosa de proyectos de construcción. Las principales herramientas como el lookahead planning, porcentaje de plan cumplido y carta balance, ayuda a los ingenieros civiles a tomar decisiones en el momento adecuado asegurando una mejora continua [7].

Finalmente, el presente artículo revisa y analiza tres propuestas sobre la importancia de integrar el Lean Construction en los proyectos que se ejecutan con el método tradicional y validar su trascendencia en la gestión del tiempo.

2. Materiales y métodos

2.1 Lean Construction

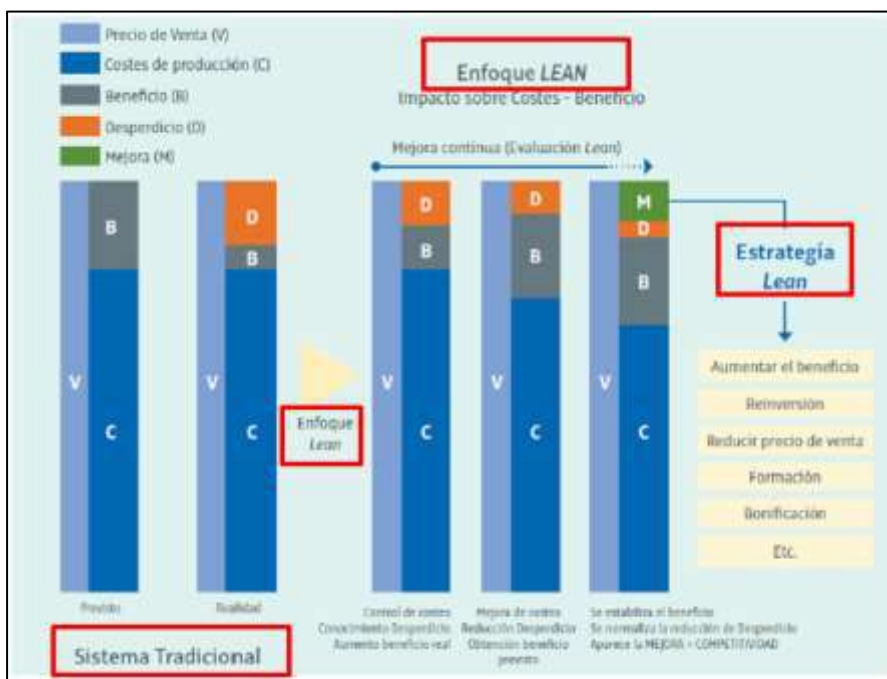
Con la incorporación del Lean en la construcción, se busca eliminar actividades innecesarias, reducir la variabilidad, mejorar la comunicación y colaboración entre los equipos de proyecto, y optimizar los flujos de trabajo. Esto permitirá a través de una serie de prácticas y herramientas diseñadas para eliminar actividades que no agregan valor, reducir tiempos de espera, mejorar la planificación y programación, y fomentar la innovación y mejora continua. A continuación, se describe el enfoque tradicional y la importancia del enfoque Lean en los proyectos de construcción.

a. Enfoque tradicional: Según [2], la industria de la construcción, desde el modo tradicional, se veía como una industria de conversión que tomaba materiales, los transformaba y los entregaba como producto terminado.

b. Enfoque del Lean Construction: En [3], se explica que, para la búsqueda de solución a los problemas actuales en la construcción respecto al costo, a los plazos y productividad en las obras, se dispone de la metodología del Lean que en función a sus herramientas genera un sistema de producción efectivo. Para tal fin, se tienen que cumplir con 3 objetivos básicos según orden de prioridad: asegurar que los flujos no paren, lograr flujos eficientes y lograr procesos eficientes. En la figura 1, se explica cómo funciona el método tradicional versus el enfoque Lean Construction. En [1], se sostiene que es importante analizar el proceso que sigue este método en el impacto sobre los costes y beneficios.

Figura 1.

Sistema tradicional vs Enfoque Lean Construction



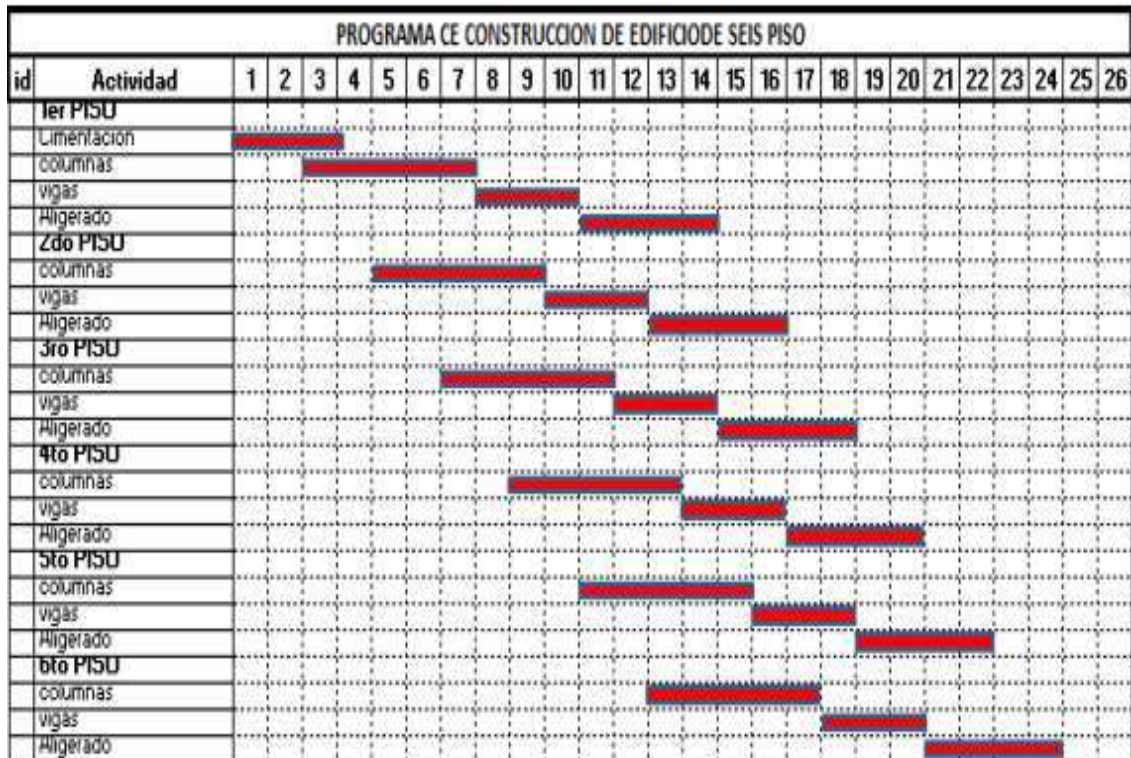
Nota: Tomado de [1]

2.2 Gestión del tiempo en proyectos de construcción

Sobre la gestión del tiempo, [8] explica que la herramienta LPS es importante en las obras de construcción ya que utiliza líneas de flujo (LF) como un método de programación complementario y no alternativo. Además, se enfoca en revisar las programaciones a nivel de partidas generales. Así, la gestión del tiempo o también conocida como gestión de cronograma es fundamental en el desarrollo de las actividades para la culminación de la ejecución de la obra en los plazos determinados. Al respecto, [9] afirma que las herramientas de control, si bien es cierto nos dan información de duración y actividades que se van a realizar a través de graficas CPM, PERT (planificación tradicional que representan la actividad y tiempo), estas solo representan un modelo de conversión de procesos y eliminan el concepto de los flujos que consisten principalmente en movimientos, esperas e inspecciones. En la figura 2, se puede observar el sistema de planificación tradicional con CPM de un edificio de 6 pisos.

Figura 2.

Programa de construcción de edificio. Herramienta de control: barras CPM o PER



Nota: Tomado de [2]

2.3 Modelo de Lean Construction

La construcción sin pérdidas, de acuerdo con [2], [10] y [11], es lo que se conoce como una nueva manera de aplicar la gestión de producción en la industria de la construcción. Por ello, consideran que utilizando el Last Planear System del Lean Construction, la técnica del valor ganado del Project Manager Institute ayudará a reducir el tiempo de ejecución del proyecto a través de la innovación de la planificación.

2.4 Metodología del Sistema Last Planner (LPS)

En los últimos años, el uso de la metodología LPS en proyectos de edificación ha demostrado ser una herramienta que ayuda a cumplir los objetivos de maximización del valor de entrega [12]. De igual manera, en [4] se explica que el LPS mejora la productividad y logra reducir todo tipo de despilfarros. De ese modo, aumenta la rentabilidad de una empresa.

La figura 3 muestra las 12 ventajas de la Metodología del LPS, desde el punto de vista de la gestión del tiempo y su importancia en las obras de construcción.

Figura 3.

Principales ventajas del Last Planner

1	Mayor beneficio y cumplimiento del presupuesto. Reducción de costos.
2	Mejora de la productividad, la calidad y la seguridad. Reducción de los plazos de entrega.
3	Un entorno de trabajo basado en el aprendizaje y la mejora continua.
4	Mejor integración entre los subcontratistas, la comunicación y los compromisos.
5	Identificar y eliminar los despilfarros y las restricciones. Mayor entrega de valor.
6	Ayuda a comprender las dependencias con los otros subcontratistas.
7	Implica la participación de las partes en fases mas tempranas. Mayor colaboración.
8	Oportunidades de mejora en etapas más tempranas.
9	Mejor gestión del riesgo y control de la variabilidad. Reduce las reclamaciones.
10	Suministrar flujo continuo y previsible de trabajo. Administrar la incertidumbre.
11	Intensifica la creatividad y la mejora continua.
12	Mayor satisfacción del cliente interno y externo en general.

Nota: Tomado de [9]

Así también, en la figura 4, se puede observar el modelo general de la metodología del LPS, la cual nos ayuda a entender mejor el esquema que comprende su proceso.

Figura 4.

Modelo Last Planner System (2021)



Nota: Tomado de [1]

2.5 Asegurar que los flujos no paren

Lookahead Planning es un instrumento de planificación del Last Planner System, al que se asigna recursos a una actividad para que sea ejecutada. Esta planificación se trabaja con una mirada al futuro de 3 o 6 semanas según la complejidad del proyecto. Los “Last Planners” seleccionan y disgregan las actividades en asignaciones, para posteriormente hacer un análisis de restricciones, tal como en [9] y [11].

En este sentido, el Lookahead Planning es el filtro que nos ayuda a seleccionar las actividades que son factibles de realizar. Todas estas actividades deberán ser culminadas obligatoriamente en el plazo establecido [11]. En la tabla 1, se observa el formato Lookahead Planning en la que la última columna está designada para colocar los requerimientos necesarios del proyecto.

Tabla 1.

Ejemplo de formato de Lookahead Planning

Actividad	Semana 1					Semana 2					Semana 3					Semana 4					Semana 5					Requerimientos					
	L	M	X	J	V	S	L	M	X	J	V	S	L	M	X	J	V	S	L	M	X	J	V	S	L		M	X	J	V	S
Encofrado dinteles																															Compra de materiales
Acero dinteles																															Orden de fierro de 3/8, contratar Mano de Obra
Concreto vigas																															Programar el Concreto
Corte de dowels																															Alquiler de amoladoras
Pintura de coberturas																															Contrato, definir color y comprar materiales.

Nota: Tomado de [11]

El análisis de restricciones es un análisis que se hace los días sábados, después de haber realizado el Lookahead y se abarca principalmente la última semana del Lookahead por ser la que ingresa a la programación intermedia. Además, se realiza un seguimiento a las restricciones que ya fueron ingresadas semanas anteriores para que, cuando se deba realizar la programación semanal, se cuente con un conjunto de actividades libre de restricciones [2]. Las restricciones se agrupan en 11 tipos, según muestra la tabla 2.

Tabla 2.*Tipos de restricciones*

TIPOS DE RESTRICCIONES		
N°	Código	Descripción
1	MAT	Materiales
2	DIS	Diseño
3	MO	Mano de Obra
4	INS	Inspección
5	DOC	Documentación
6	EQ	Equipos
7	HZT	Habilitación Zona Trabajo
8	SEG	Seguridad
9	AMB	Ambiental
10	SC	Subcontratos
11	OTRO	Otros

Nota: Tomado de [2]

2.6 Lograr Procesos eficientes

Porcentaje de plan cumplido (PPC): Es una medida básica de qué tan bien está funcionando el sistema de planificación. Se calcula de la siguiente manera:

$$PPC = \frac{\text{Número de promesas}}{\text{Número total de promesas}} \dots\dots (1)$$

Donde:

Número de promesas = actividades completadas en el día indicado

Número total de promesas = actividades realizadas / planificadas para la semana

Por lo señalado, el PPC mide el porcentaje de tareas que están 100% completas según lo planeado [9]. En la Tabla 3, se muestra el análisis de sectores del porcentaje de plan cumplido (PPC).

Tabla 3.*Análisis de porcentaje de PPC*

Semana	Sector	Actividades		PPC CASCO	PPC TOAL	Sector		Avance Sector
		Programadas	Ejecutadas			Programadas	Ejecutadas	
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
				PPC	PPC CASCO	Avance Sector		
				Promedio				

Nota: Tomado de [1]

Carta de Balance: Con esta herramienta podremos medir el desempeño de cada obrero, lo cual ayudará a determinar quiénes son los que más aportan al avance de la partida y quiénes simplemente retrasan los trabajos. Se logrará determinar si la cuadrilla está correctamente dimensionada como se indica en [1]. Además, esta herramienta nos sirve para realizar las mediciones del Trabajo Productivo (TP), Trabajo Contributorio (TC) y del Trabajo No Contributorio (TNC), entre todas las partidas realizadas. En la figura 5, se muestran las consideraciones de TC y TNC [13].

Figura 5.*Consideraciones de (TC) y (TNC)*

Se considera TC a las siguientes actividades:	Se considera TNC a las siguientes actividades:
- Picado de placas	- Esperas
- Preparación de mezclas	- Descansos
- Instrucciones iniciales	- Tiempos ociosos
- Lectura de planos	- Necesidades fisiológicas
- Transporte de elementos	- Desplazamientos
- Realización de limpieza	- Picado de pases
- otros	- otros

Nota: Tomado de [1]

Para estas mediciones, se usan grupos de actividades a nivel general. Finalmente, en la tabla 4 se observa el formato de la carta balance.

Tabla 4.

Formato de la carta balance

N°	Cuadrilla	Fecha	TP	TC	TNC	TOTAL
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

Nota: Tomado de [13]

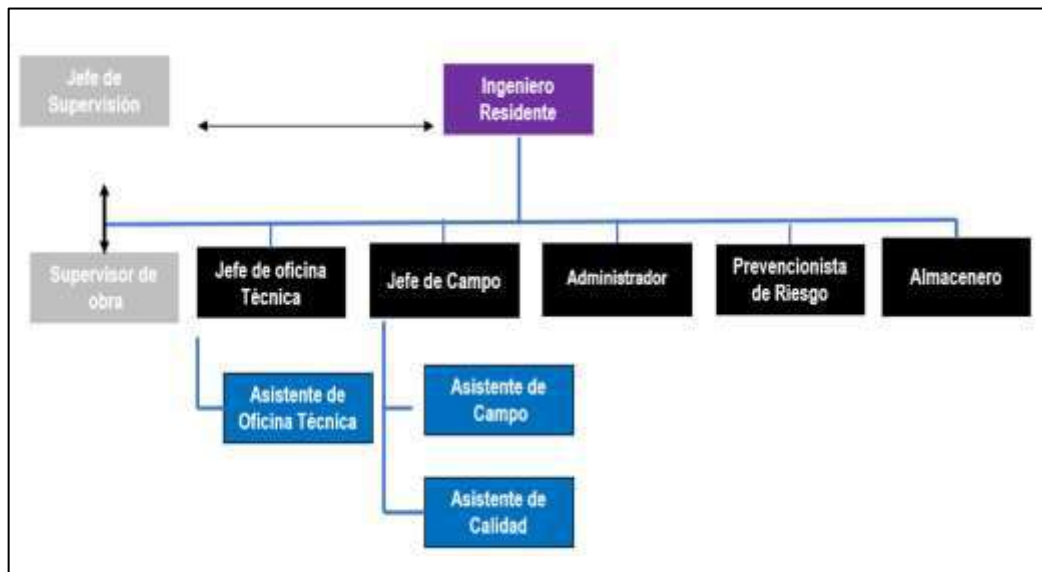
3. Resultados

La validación de los resultados de la incorporación del modelo Lean Construction para innovar la gestión del tiempo en proyectos de construcción ha considerado el proyecto Barranco 360° de la constructora EDIFICA [3], así como la edificación de la Residencial Gold San Francisco en la ciudad del Cusco [6] y la obra denominada Proyecto A de [8].

Como se describe en [3], el proyecto Barranco 360° es un edificio de departamentos ubicado en el distrito de Barranco, en la av. San Martín 625. Cuenta con 2 torres de 10 pisos, 107 departamentos, 3 sótanos, azotea y un total de 83 estacionamientos. Según el planeamiento inicial, tiene una duración de 13 meses. Este proyecto cuenta con aproximadamente 100 obreros y un equipo de obra de 10 personas, como se muestra en el organigrama de la figura 6.

Figura 6.

Organigrama de obra Proyecto Barranco 360°



Nota: EDIFICA

En el proyecto Barranco 360°, [3] sustenta el estudio, análisis y beneficios finales (monetario) de la aplicación de las herramientas Lean. Por consiguiente, al aplicar el enfoque Lean en el nivel general de actividades de obra en su muestra, consideró a todos los obreros. De esta manera, obtiene información sobre los tiempos, además identifica y clasifica este tipo de trabajo en productivo (TP), contributorio (TC) y no contributorio (TNC). Para el caso de estudio, propuso inicialmente 4 sectores en los cuales se describen las actividades por día. Esto se observa en la figura 7.

Figura 7.
División de actividades por día

TREN DE 4 SECTORES							
SUPERESTRUCTURA	DÍAS						
	1	2	3	4	5		
ACERO DE VERTICALES	1A	1B	1C	1D	2A		
ENCOFRADO DE VERTICALES		1A	1B	1C	1D		
CONCRETO DE VERTICALES		1A	1B	1C	1D		
ENCOFRADO DE FONDOS Y COSTADOS DE VIGAS			1A	1B	1C		
ACERO DE VIGAS			1A	1B	1C		
ENCOFRADO DE LOSA + LADO 2 DE VIGA				1A	1B		
COLOCACIÓN DE VIGUETAS PRETENSADAS				1A	1B		
COLOCACIÓN DE LADRILLO BOVEDILLA				1A	1B		
COLOCACIÓN DE IISS				1A	1B		
COLOCACIÓN DE IIEE					1A		
CONCRETO DE LOSA					1A		
Día 1:		Día 2:		Día 3:		Día 4:	
- Encofrado de verticales (Placas y Columnas)		- Encofrado de fondo más un lado de vigas		- Encofrado de un lado de vigas		- Acero de losas	
- Vaciado de Verticales (Placas y Columnas)		- Acero de vigas		- Encofrado de losas		- Instalaciones eléctricas	
				- Colocación de viguetas y bovedillas		- Vaciado de losas	
				- Instalaciones sanitarias			

Nota: Tomado de [3]

En [3] se explica que, mediante el uso del porcentaje del plan cumplido (PPC) semanales en la etapa del casco, se pudo realizar la comparación de los niveles de cumplimiento utilizando 4 y 5 sectores para así poder determinar la diferencia. Se midieron los avances totales del proyecto para cada caso. Los datos se observan en la tabla 5 que se muestra a continuación.

Tabla 5.
Análisis de PPC de 4 y 5 sectores

Semana	Sectores	Actividades		PPC		Sectores		Avance Sectores
		Programadas	Ejecutadas	CASCO	TOTAL	Programadas	Ejecutadas	
21	4	10	5	50.00%	71.00%	4	4	100.00%
22	4	9	0	0.00%	40.00%	4	3	75.00%
23	4	9	4	44.00%	62.00%	5	4	80.00%
24	5	9	9	100.00%	92.00%	5	5	100.00%
25	5	9	7	78.00%	85.00%	5	5	100.00%
26	5	9	8	89.00%	85.00%	5	5	100.00%
27	5	9	8	89.00%	84.00%	5	5	80.00%
28	5	9	7	78.00%	71.00%	5	4	100.00%
29	5	9	9	100.00%	78.00%	5	5	100.00%
30	5	9	9	100.00%	78.00%	5	5	100.00%
31	5	9	9	100.00%	81.00%	5	5	100.00%
32	5	8	8	100.00%	77.00%	5	5	100.00%
33	5	8	8	100.00%	81.00%	2	2	100.00%

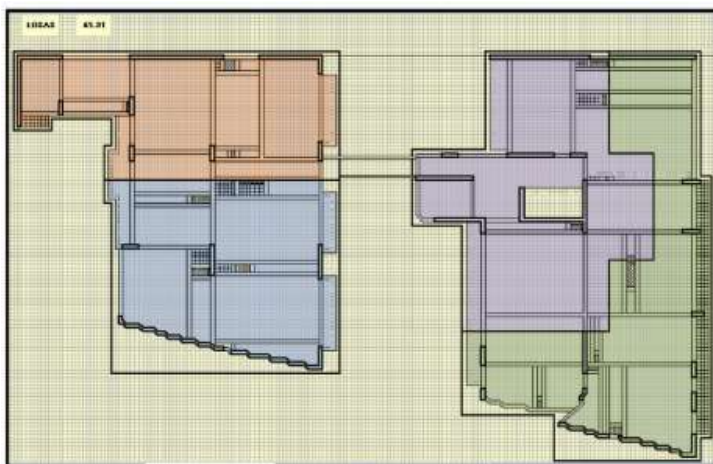
	PPC	PPC Casco	Avance Sector
Prom 4 Sec	58.00%	31.00%	85.00%
Prom 5 Sec	81.00%	93.00%	98.00%

Nota: Tomado de [3]

De la tabla 5, [3] concluye que, si se trabaja con 4 sectores, se obtiene un PPC del 58%. De las partidas de casco programadas solo se consiguió un 31%, lo cual se traduce en un avance del sector de 85% de la programación semanal.

Posteriormente, se decide usar 5 sectores y resultó que el PPC se incrementó a 81%, los avances en las partidas de casco también aumentaron a 93%; lo que conllevó a un avance del 98% del sector (casi el total). Esto se traduce que si se utilizan menos recursos se logra un avance significativo que usando 4 sectores. En la figura 8, se determina la sectorización del proyecto Barranco 360°.

Figura 8.
Sectorización de planta típica para 4 sectores



Nota: Tomado de [3]

El formato que utiliza EDIFICA integra el Lookahead Planning con el análisis de restricciones y se denomina “Lookahead de Obra”. Esto se hace para facilitar la visibilidad de las actividades con sus respectivas restricciones. En la figura 9, se aprecia el Lookahead de Barranco 360°, donde se muestra la respectiva programación para el caso de la superestructura y la utilización de los trenes de trabajo y la sectorización aplicada.

Figura 9.
Formato de análisis de Lookahead de Barranco 360°

CODIGO DE PROYECTO		AREA / OPTO	EDIFICACIONES	FECHA																									
39				viernes, 27 de abril de 2012																									
NOMBRE DE PROYECTO		CLIENTE	PROYECTO PROPIO	LUBICACION																									
EDIFICIO BARRANCO 360				AV. SAN MARTIN N° 025																									
DESCRIPCION DE ACTIVIDAD/RESTRICCION/RECURSOS	RECURSOS de esta actividad	LIND	RESPON SABLE	SEMANA 21					SEMANA 22					SEMANA 23					SEMANA 24					SEMANA 25					
				L	M	J	V	S	L	M	J	V	S	L	M	J	V	S	L	M	J	V	S	L	M	J	V	S	
CIERRE																													
Cambio y mejoramiento de la base de concreto (dado y base)			AP	08h																									
Alfaro (estructura)			OC	2																									
Alfaro final			OC	2																									
Cambio y mejoramiento de la base de concreto (calce)			MC																										
SUBESTRUCTURA																													
Acero de Verticales			AP	24																									
Prestos de Acero			OC																										
Poner a RECORRIDO el diseño del acero de estructura			AP																										
Ingreso del acero de estructura			OC																										
Encofrado de Verticales			OC	24																									
Alfaro (estructura)			OC																										
Alfaro de encofrado			OC																										
Acero de Verticales			AP	24																									
Calce de estructura			OC																										
Encofrado de fondos y Chido de Vigas			AP	24																									
Ingreso de la planta en el momento horizontal			AP																										
Acero de Vigas			AP	24																									
Poner a RECORRIDO el diseño del acero de estructura			AP																										
Ingreso del acero de estructura			OC																										
Colocación Vigas Perforadas			AP	24																									
Colocación de Carabinas			OC																										
Lubricación de fierro			OC																										
Vapeado Perforado			OC																										
Colocación Ins. Sismicas y Sismotas			AP	24																									
Concreto de obra			AP	24																									
Concreto Perforado			OC																										

Nota: Tomado de [3]

En el proyecto de Barranco 360°, se realizaron las mediciones utilizando el formato de la empresa, las cuales se muestran en las tablas 6 y 7.

Tabla 6.
Trabajo contributorio

Trabajo Contributorio	
1	Instrucciones / Lectura de planos / mediciones
2	Preparación de materiales y herramientas
3	Transporte
4	Limpieza y seguridad
5	Soporte (puntales, vigas, amarre)
6	Desencofrado

Nota: Tomado de [3]

Tabla 7.
Trabajo No Contributorio

Trabajo No Contributorio	
1	Esperas
2	Viajes
3	Busqueda de materiales
4	Trabajo rehecho

Nota: Tomado de [3]

En la figura 10, se muestra la carta de balance respectiva del proyecto para la partida de encofrado de vigas.

Figura 10.
Medición en la carta de balance



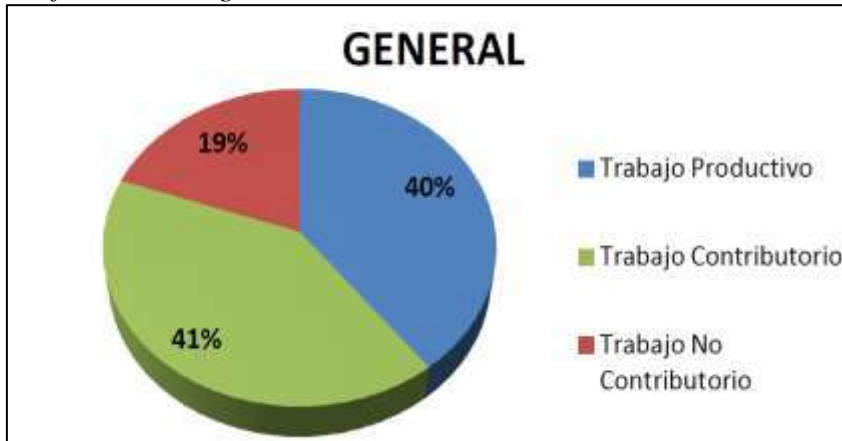
Nota: EDIFICA

3.1. Resultados Generales

Según las mediciones realizadas en el proyecto Barranco 360°, los resultados obtenidos para 384 mediciones son estadísticamente válidos, lo cual se cumplió de acuerdo al objetivo. La figura 11 muestra los resultados de las mediciones.

Figura 11.

Gráfico de nivel general de Barranco 360°



Nota: EDIFICA

Estos resultados comprueban y demuestran que los niveles de productividad encontrados en un proyecto en el que se aplica la filosofía Lean Construction son mayores a otros en los que se construye de manera convencional.

Para el caso tradicional, nos remitimos a [2] que realiza un diagnóstico, crítica y propuesta para incorporar el Lean Construction en los proyectos. En dicho documento se hizo un estudio del estado de la construcción en Lima, a partir del análisis de 50 obras de la capital. Además, describe los niveles bajos del TP, TC y un alto nivel en el TNC. Los resultados se aprecian en la figura 12.

Figura 12.

Estadística sobre 50 obras en Lima



Nota: Tomado de [2]

Otro de los proyectos considerados para el artículo es la edificación de la Residencial Gold San Francisco en la ciudad del Cusco. En este caso, [6] aplica la herramienta de las 5 “s” de la metodología Lean Construction en el proceso productivo de la subpartida de encofrado en columnas. Los resultados muestran un índice de productividad de 41.9%, es decir, un 8.3% más que de lo que se obtiene sin utilizar la herramienta de las 5 “s”, que era del 33.6%. Este acrecentamiento en el índice de productividad, que se sustenta en [6], se logró aplicando rigurosamente la herramienta de las 5 “s” en el proceso productivo de esta subpartida. De ese modo, se alcanzó zonas de trabajo más organizadas, ordenadas y limpias de forma consistente para lograr una mayor productividad y un mejor entorno laboral. El antes y después de aplicar las 5 “s” se muestra en la figura 13.

Figura 13.

Comparación de la productividad de la aplicación de la metodología de las 5 “s”



De los resultados, [6] explica que la aplicación conveniente de la metodología 5 “s” ha obtenido resultados que han permitido la mejora en la calidad de trabajo, así como la disminución de los costos en la construcción de la infraestructura. Esto se tradujo en un 39.5% frente a un 31.4% ya que la adecuada organización, orden, limpieza, estandarización y el cumplimiento de normas que sugiere la metodología han sido aprendidas por los trabajadores, agentes fundamentales de la construcción.

El tercer proyecto analizado es de [8], en el que por razones de seguridad se utiliza la denominación de Proyecto A. En cuanto a la aplicación de la metodología Lean en esta obra, se especifica el uso de las herramientas del Last Planner System en la planificación para el control del cumplimiento de las actividades y el uso correcto de los recursos. Consecuentemente, [8] aplicó planificaciones diarias, semanales (que se verificaban con un porcentaje de partidas cumplidas) y el empleo del Lookahead basados en la programación maestra. A partir de los resultados, se concluye que la aplicación de las herramientas del último planificador no se ejecutó de la manera correcta. En la programación semanal se debió haber realizado un análisis de restricciones que haya permitido un mejor control del planeamiento y un flujo adecuado del proyecto. Al no haber realizado esto de manera correcta, se genera el retraso en el proyecto con su consecuente penalidad. Según [8], el valor adecuado para el PPC (porcentaje del plan cumplido) debe ser mayor al 75 u 80 %. Sin embargo, no se lograron estos valores, pues el rango resultante del PPC se ubicó alrededor del 61%, por lo que el retraso en el proyecto es del 20%.

4. Discusión de resultados

Si comparamos la figura 11 del proyecto de [3], en el que se incorpora el Lean cuyos resultados del TP= 40%, TC=41% y TNC=19%, con los resultados de la Figura 12 de [2], que no utiliza el Lean y presenta un TP=28%, TC=36% y TNC=36%, se puede asegurar que el Lean mejora la gestión del tiempo, lo que se refleja en el Trabajo Productivo y el Trabajo Contributorio en altos porcentajes de cumplimiento. Por tanto, el Trabajo no Contributorio presenta un menor porcentaje esperado. Al respecto, [8] explica que un valor de TNC muy alto indica que en esta partida se tuvo varias complicaciones para poder avanzar el trabajo con normalidad (esperas, demoras, trabajos rehechos, etc.)

Asimismo, en la figura 13, en la cual [6] aplica las 5 “s” de Lean en obras civiles, se observa que también se mejoran los índices de productividad, lo que significa la eliminación del desperdicio, la organización del lugar de trabajo y la implementación de procedimientos estandarizados. Por lo tanto, el Trabajo Productivo es mayor.

Finalmente, según [8], en el proyecto “A”, las herramientas no se aplicaron de manera efectiva en todos los procesos por todas las personas involucradas. Como resultado, el porcentaje del plan cumplido (PPC) no alcanzó el valor esperado, lo que condujo a retrasos en el proyecto y, posiblemente, a penalidades económicas. Además, la productividad deseada no se logró, lo que indica que el proyecto no pudo alcanzar los niveles de eficiencia y ejecución planeados.

5. Conclusiones

Se concluye que la aplicación del modelo Lean Construction en el proyecto Barranco 360°, desarrollado en [3], se logró obtener altos niveles de productividad, reflejados específicamente en el trabajo productivo y el trabajo Contributorio, lo cual nos indica que hubo mejoras y mayor control en la optimización del tiempo.

En el proyecto de la edificación Residencial Gold San Francisco, desarrollado en [6], se concluye que, habiéndose aplicado convenientemente la metodología 5 “s” del Lean Construction, se han obtenido resultados positivos que aumentaron los índices generales de productividad.

En el proyecto A, desarrollado en [8], y en el cual se utilizó la herramienta Lean específicamente el Last Planner System, se concluye que la empresa encargada de llevar a cabo el proyecto fue penalizada por extensión de plazo. Las causas que provocaron esta penalidad no son responsabilidad de Lean sino de factores externos y de los responsables del control de la obra.

Por lo tanto, se concluye que la incorporación del modelo Lean Construction en la gestión del tiempo en proyectos de construcción puede proporcionar una ventaja competitiva y significativa al mejorar la eficiencia, reducir costos y acelerar la finalización de proyectos. Al enfocarse en eliminar desperdicios, fomentar la colaboración, utilizar metodologías ágiles y mejorar la calidad se puede lograr una gestión del tiempo más innovadora y exitosa en la industria de la construcción.

6. Referencias

- [1] Alvarado, L. (2021). *Filosofía Lean Construction: Comparación de beneficios en empresas emergentes y grupos constructores exitosos*. [Tesis para optar el Título profesional de Ingeniero Civil en Obras Civiles]. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- [2] Virgilio Ghio. (2001). *Productividad en obras de construcción*. Lima, Perú. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- [3] Guzmán, A., (2014). *Aplicación de la filosofía Lean Construction en la planificación, programación, ejecución y control de proyectos*. PUCP, Lima. Lima: Tesis para optar por el título de Ingeniero civil, Pontificia Universidad Católica del Perú. Obtenido. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/5778/?sequence=1&isAllowed=y>
- [4] Herrera, R., (2019). *Metodología del seguimiento efectivo del plazo contractual de proyectos de construcción de edificaciones multifamiliares*. UPC, Lima. Lima: Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/626586#:~:text=A%20partir%20de%20lo%20>
- [5] Bernabé, A., (2021). *La gestión del tiempo en obras de edificación para optimizar el plazo contractual*. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil, Universidad Ricardo Palma, Lima. Lima: URP. https://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14138/4693/T030_47732511_T%20%20
- [6] Corahua, W., Lozano, J. (2017). *Aplicación de la filosofía Lean Construction en la Productividad de la mano de obra en los elementos estructurales: columnas, placas, vigas y losas aligeradas de la residencial Gold San Francisco en la ciudad del Cusco*. [Tesis para optar el Título profesional de Ingeniero Civil en Obras Civiles] Universidad Andina de Cusco.
- [7] Porras, H (2014). *Filosofía Lean Construction para la gestión de proyectos de construcción: una revisión actual*. ISSN: 1794-4953.
- [8] Flores, D. (2020). *Interacción entre BIM y Lean construction analizadas en proyectos de edificación*. [Tesis para optar el Título profesional de Ingeniero Civil en Obras Civiles]. Pontificia Universidad Católica del Perú. <https://repositorio.pucp.edu.pe/index/handle/123456789/172759>
- [9] Chacmana, J. (2019). *Gestión del tiempo para identificar las actividades críticas en la etapa de obra gruesa del centro comercial Real Plaza Este*. [Tesis para optar el Título profesional de Ingeniero Civil en Obras Civiles]. Universidad Ricardo Palma.

- [10] Chambilla, L. (2019). *Aplicación de la filosofía Lean Construction en el planeamiento del proyecto mejoramiento de los servicios de salud del hospital Hipólito Hunanue*. [Tesis para optar el Título profesional de Ingeniero Civil en Obras Civiles]. Universidad Privada de Tacna. <https://repositorio.upt.edu.pe/handle/20.500.12969/82>
- [11] Valenzuela, I. (2018). *Análisis y definición de estrategias para la implementación de las herramientas del Lean Construction*
- [12] Katerine, Z. (2021). *Implementación de la metodología Last Planner System en el déficit de la construcción del puente el Carmelo*. [Tesis para optar el Título profesional de Ingeniero Civil en Obras Civiles]. Universidad Privada Antenor Orrego. <https://repositorio.upao.edu.pe/handle/20.500.12759/7744>
- [13] Ochoa, V. (2021). *Confiabilidad de porcentaje de partes cumplidas en el índice de productividad*. [Tesis para optar el Título profesional de Ingeniero Civil en Obras Civiles]. Universidad Ricardo Palma. <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/4941>

Trayectoria académica

Junior Javier Llerena Carhuas

Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.

Estudiante (9no ciclo) de Taller de Investigación en Ingeniería I. EPIC-URP. Experiencia en Software: ETABS, SLIDE, AutoCAD, CIVIL 3D, HEC-RAS. Certificaciones en: Lectura de Planos (SENCICO), ETABS (SENCICO), Seguridad y salud ocupacional en trabajo de alto riesgo (SENCICO), Instalaciones eléctricas y sanitarias (SENCICO), AutoCAD (SENCICO).

junior.llerena@urp.edu.pe

Orcid: <https://orcid.org/0009-0008-8002-4964>

Margarita Fredesvinda Murillo Manrique

Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.

Doctora en Educación. Magister en Gestión y Docencia Universitaria. Ingeniera Electricista. Estudios de postgrado en Ingeniería de Sistemas. Bachiller Profesional en Electricidad y Electrónica. Doctora Honoris Causa por la UNDAC. Metodóloga en los programas de titulación TITES-FI-URP. Docente en las Escuelas de Ing. Civil, Electrónica y Mecatrónica URP. Docente en la Escuela de Post grado de Ingeniería Industrial-URP. Docente en la Universidad Tecnológica de Lima Sur - Escuela de Ing. Mecánica y Eléctrica. Investigadora RENACYT. Miembro del Grupo de Investigación GI-ROMA-VRI-URP. Cuenta con publicaciones en SCOPUS y revistas científicas.

Autor corresponsal: margarita.murillo@urp.edu.pe / margaritamurillom@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2580-0082>

Contribución de autoría

Junior Llerena Carhuas:

Conceptualización: Desarrollo de la idea principal el enfoque teórico y los objetivos de la investigación.

Curación de datos: Proceso de recopilación, selección y organización de los datos

Investigación: Información necesaria para el estudio.

Software: Uso de programas informáticos para analizar datos y gestionar información en la investigación.

Recursos: Identificación y provisión de materiales, herramientas, equipos.

Visualización: Creación de gráficos, tablas

Redacción: borrador original: Elaboración del primer manuscrito del artículo.

Margarita Murillo Manrique:

Metodología: Diseño y planificación de los métodos y procedimientos utilizados en la investigación

Supervisión: Guía y dirección del trabajo, asegurando que la investigación se realice de acuerdo con los estándares científicos y éticos.

Validación: Verificación de los resultados obtenidos en la investigación mediante comparación con estándares, replicación de experimentos. Evaluación de similitud

Redacción: revisión y edición: Corrección y mejora del manuscrito original, incluyendo la reorganización de contenido, refinamiento del lenguaje y aseguramiento de la claridad y coherencia.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en la presente investigación.

Responsabilidad ética y legal

El desarrollo de la investigación se realizó bajo la conformidad de los principios éticos del conocimiento, respetando la originalidad de la información y su autenticidad.

Declaración sobre el uso de LLM (Large Language Model)

Este artículo no ha utilizado en su redacción textos provenientes de LLM (ChatGPT u otros).

Financiamiento

La presente investigación ha sido realizada con recursos propios de los coautores de la investigación.

Agradecimiento

A nuestra familia, quienes son la motivación para seguir adelante y a la Universidad Ricardo Palma porque en sus aulas se forja el nuevo conocimiento.

Correspondencia: margarita.murillo@urp.edu.pe / margaritamurillom@gmail.com

ISSN (Digital): 2519-5719



Protección para los márgenes del río Moche: estructura sostenible

Protection for the banks of the Moche river: sustainable structure

Fabian Alberto Alva, Keren Guzman Chuquispuma, Karla Sofía Fernández, Anyela Camila Saravia, Marco Ademir Morales y Maiquel López Silva

RECIBIDO: 20 de abril de 2024.

ACEPTADO: 31 de mayo de 2024.

Resumen

Esta investigación tiene como objetivo realizar una propuesta de una estructura sostenible para la protección del río Moche en Trujillo, La Libertad. La metodología utilizada se enfocó en cuantificar las variables biológicas, topográficas, hidrológica, hidráulicas, estructurales y ambientales según las teorías más eco amigables utilizadas en la literatura internacional, así como normas técnicas E030, ley de recursos hídricos y la ley del impacto ambiental. Como análisis y procesamiento de las variables se utilizó modelos matemáticos ArcGIS pro HEC RAS y Gawac 3.0 y estadísticos SPSS29. Como principales resultados se alcanzó que existen condiciones favorables para ejecutar la estructura sostenible. La máxima avenida 643.47 m³/s para un periodo de retorno de 140 años y un tirante máximo del agua 7.62. Las dimensiones de la estructura del gavión oscilaron entre 4 y 8 metros en concordancia con la topografía del margen del río. El muro de gavión tuvo un 58% de impactos negativos directo e indirecto, mientras que el 78% fueron impactos positivos al medio ambiente. Se concluye que los gaviones son una estructura sostenible para el cuidado y protección del medio ambiente y la sociedad.

Palabras clave: Gavión eco-amigable, impacto ambiental, hidráulica fluvial, socavación general, defensa ribereña, hidráulica.

Cómo citar

M. A. Morales Virhuez, F. A. Alva Rodríguez, K. C. Guzmán Chuquispuma, A. C. Saravia Torres, K. S. Fernández Solórzano, y M. López Silva, «Protección para los márgenes del río moche Estructura sostenible», *Perfiles_Ingenieria*, vol. 20, n.º 21, pp. 58-94, jun. 2024.

Abstract

This research aims to make a proposal for a sustainable structure for the protection of the Moche River in Trujillo, La Libertad. The methodology used focused on quantifying the biological, topographic, hydrological, hydraulic, structural and environmental variables. According to the eco-friendliest theories used in international literature, as well as technical standards E030, water resources law and the environmental impact law. ArcGIS pro HEC-RAS and Gawac 3.0 mathematical models were used to analyze and process the variables; and SPSS29 statistics. The main results were that favorable conditions exist to execute the sustainable structure. The maximum flood 643.47 m³/s for a return period of 140 years and a maximum water depth of 7.62. The dimensions of the gabion structure ranged between 4 and 8 meters in accordance with the topography of the river bank. The gabion wall had 58% direct and indirect negative impacts, while 78% were positive impacts to the environment. It is concluded that gabions are a sustainable structure for the care and protection of the environment and society.

Keywords: eco-friendly gabion, environmental impact, river hydraulics, general scour, riverside defense, hydraulics.

© Los autores. Este artículo Open Access esta publicado bajo la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional. (CC-BY 4.0).



1. Introducción

La gestión eficiente de los recursos hídricos es una preocupación constante en la planificación urbana y el desarrollo sostenible. En este contexto, el proyecto titulado “Propuesta de una defensa ribereña para reducir el riesgo por inundaciones y la erosión en los márgenes del río Moche” se suma a la discusión sobre la importancia de implementar medidas preventivas para mitigar los efectos adversos de eventos naturales, especialmente en zonas propensas a inundaciones y erosión.

Zevallos (2015) indica los criterios para optar por el diseño de construcción de protección ribereña siendo estas estructuras elaboradas dentro del cauce del río lo cual contribuiría al control de la trayectoria natural del río. Como consecuencia de las inundaciones se propone un diseño que sea favorable para la sociedad y adecuado para la economía. No obstante, realizar un diseño de obras en los ríos en general requieren grandes inversiones (p.41).

El río Moche, como tantos otros cuerpos de agua, representa un elemento vital para las comunidades que dependen de sus recursos. Sin embargo, la creciente frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos plantea desafíos significativos en términos de seguridad y bienestar de las poblaciones ribereñas. En este contexto, la propuesta presentada en el proyecto busca no solo reducir el riesgo de inundaciones, sino también abordar la erosión que afecta los márgenes del río, que compromete la estabilidad de las tierras adyacentes.

Este proyecto explora en detalle la viabilidad y los beneficios de una defensa ribereña como estrategia integral para proteger las zonas vulnerables a lo largo del río Moche. Se examinan las técnicas y tecnologías actuales, considerando tanto aspectos ingenieriles como ambientales, con el objetivo de proponer soluciones sostenibles que minimicen los impactos negativos en el ecosistema circundante.

Al abordar este tema crítico, el proyecto no solo contribuye al conocimiento científico y técnico, sino que también ofrece una perspectiva aplicada que puede ser de utilidad para las autoridades locales, los planificadores urbanos y las comunidades afectadas. La importancia de establecer defensas ribereñas efectivas

y adaptadas a las características específicas del río Moche se presenta como una medida clave para fortalecer la resiliencia de la región frente a los desafíos ambientales actuales y futuros.

2. Objetivo

Proponer un diseño de defensa ribereña para poder reducir el riesgo por inundaciones y erosión en los márgenes de un tramo del río Moche, en Trujillo.

3. Fundamentos teóricos

3.1 Ubicación del Proyecto

El río Moche se ubica en la costa norte del Perú, nace en la Laguna Grande sobre los 3.988m, próximo a la divisoria de las aguas continentales, en las cercanías del pueblo de Quiruvilca, a la altura de la localidad de San Juan, distrito de Santiago de Chuco. A unos 14 km de su origen, toma el nombre de río Moche hasta su desembocadura en la vertiente del Pacífico.

3.2 Defensa Ribereña

Una defensa ribereña se define como una estructura construida e implementada para proteger la margen derecha e izquierda de las áreas adyacentes a un río. Permite reducir la erosión, socavamiento y desbordes producidos por la dinámica hidrológica (Meléndez, 2020, p. 1). Las defensas ribereñas adecuadas para la protección de los márgenes de diversos cauces se definen de acuerdo con factores zonales y económicos, así como condiciones ambientales y sociales.

3.3 Cuenca Hidrográfica

La cuenca es un sistema de captación y concentración de aguas superficiales en el que interactúan recursos naturales y asentamientos humanos dentro de un complejo de relaciones, donde los recursos hídricos aparecen como factor determinante. El territorio de la cuenca facilita la relación entre sus habitantes, independientemente de si estos se agrupan allí en comunidades delimitadas por

razones político-administrativas, debido a su dependencia común a un sistema hídrico compartido, a los caminos y vías de acceso y al hecho de que deben enfrentar peligros comunes (García, W., 2007). La diferencia entre una cuenca hidrológica a una cuenca hidrográfica, se basan en los tipos de aguas que abarcan cada una, debido a que la primera se refiere únicamente a las aguas superficiales, mientras que la segunda contempla a las aguas subterráneas o acuíferos.

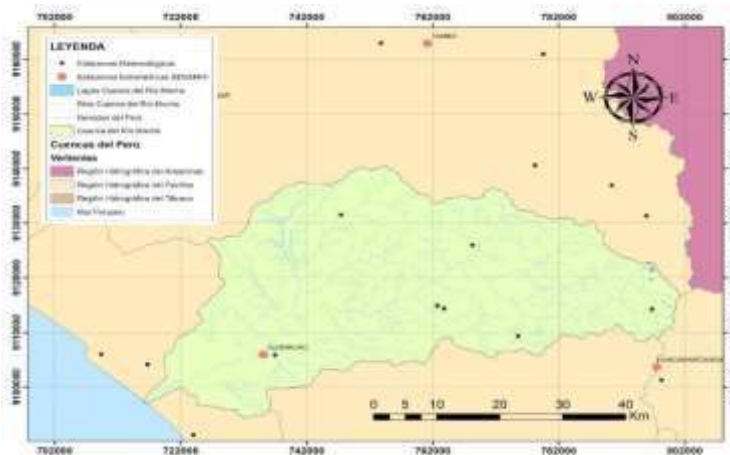
a. Datos Morfológicos

El distrito de Moche se encuentra dentro de la cuenca del río Moche, tiene una longitud 110 km, y se origina cerca de Quiruvilca en los andes de La Libertad, en el cerro Pelón Chico ubicado a 4,450 m.s.n.m.

Su cuenca tiene un área total de drenaje, hasta su desembocadura en el Océano Pacífico, de 2 708 km². La longitud máxima de recorrido, desde sus nacientes hasta su desembocadura, es de 102 km, y una pendiente promedio de cauce de 4%. La pendiente del cauce en sus afluentes es aún más pronunciada llegando a un valor de 16 %, en el caso de la quebrada La Cuesta.

Figura 1.

Cuenca del Río Moche



Nota: Delimitación de la cuenca del Río Moche a través de ArcMap. Elaboración propia

4. Metodología

4.1 Parámetros Morfológicos

Con la delimitación de la cuenca se realiza la toma de los parámetros morfológicos de dicha cuenca. Los datos obtenidos fueron de área, perímetro, pendiente del cauce, orden de los ríos y densidad de drenaje.

4.2 Caudal de Diseño

Para el cálculo del caudal de diseño primero se determinó el periodo de retorno a través de la siguiente fórmula.

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^N \dots\dots\dots(1)$$

R: riesgo, N: vida útil y T: tiempo de retorno

Teniendo en cuenta que el riesgo para una obra de defensa ribereña es de 25% y la vida útil es de 40 años. Por lo tanto, al reemplazar en la formula, se puede decir que el tiempo de retorno para una defensa ribereña es de 140 años.

También se empleó el registro de caudal máximo mensual para cada año, entre los años 1950 y 2019. Finalmente, con el programa River, se procesan los datos obtenidos anteriormente y nos determina el caudal de diseño a trabajar.

4.3 Cálculo del ancho de encauzamiento

La obtención del ancho de encauzamiento estable del río se calculó utilizando el programa Rover, para ello se usaron los siguientes métodos:

- Método de Simons y Henderson

$$B = K_1 \cdot Q^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(2)$$

Fondo y Orillas del cauce de grava K1=2.90

- Método de Petit

$$B = 4.44 \cdot Q^{0.5} \dots\dots\dots(3)$$

- Método de Blench y Altunin $B = 1.81(Q \cdot F_s)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(4)$



0.80 - Mat. Finos ($D_m < 0.50$ mm) - 0.10 Mat. Suelos

- Método de Manning y Strickler

$$B = \left(\frac{Q}{S}\right) \left(n \cdot K_{\frac{1}{3}}\right)^{\frac{3}{3+5m}} \dots \dots \dots (5)$$

16 – Mat. Fácilmente erosionable (k) - 1.00 - Río de Cauces montañosos (m)

4.4 *Estimación de la socavación general*

Para esta estimación se utilizó el método de Lacey.

$$D_s = 1.35 \cdot (q_f)^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (6)$$

$$Dsa = ksa \cdot Da \dots \dots \dots (7)$$

$$dsa = Dsa - y_{max} \dots \dots \dots (8)$$

Factor (f) de Lacey:

$$f = 1.76 + D_{50}^{0.5} \dots \dots \dots (9)$$

4.5 *Estimación de la velocidad crítica del flujo*

En la tabla 1, se muestran las formulaciones empíricas en función de la h_s la profundidad de equilibrio y diámetro medio de la partícula.

Maza Álvarez y Echevarria Alfaro (1973):

$$V_c = 3.62 \cdot d_{50}^{0.200} \cdot h_s^{0.275} \dots \dots \dots (10)$$

Lischtvan-Lebediev (1959):

$$V_c = 4.70 \cdot d_{50}^{0.280} \cdot h_s^z \dots \dots \dots (11)$$

$$Z = \frac{0.223}{d_{50}} ; 2.8 < d_{50} [mm] < 182 \dots \dots \dots (12)$$

Laursen (1963):

$$V_c = 6.19 \cdot d_{50}^{0.333} \cdot h_s^{0.167} \dots \dots \dots (13)$$

Maza Álvarez y García Flores:

$$V_c = 6.05 \cdot d_{50}^{0.350} \cdot h_s^{0.150} \dots\dots\dots(14)$$

Neill (1980):

$$V_c = 4.16 \cdot d_{50}^{0.250} \cdot h_s^x \dots\dots\dots(15)$$

$$X = \frac{0.125}{d_{50}^{0.180}} ; 0.3 < d_{50}[mm] < 30 \dots\dots\dots(16)$$

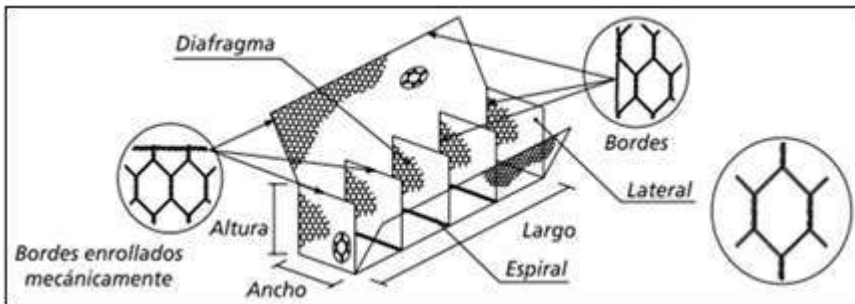
$$V_c = 6.35 \cdot d_{50}^{0.167} \cdot h_s^{0.333} ; d_{50}[mm] > 30 \dots\dots\dots(17)$$

4.6 Uso del Software GAWAC 3.0

El Gawac, ofrece a los ingenieros proyectistas un instrumento rápido y confiable para realizar los análisis necesarios para el diseño de muros de contención en gaviones. Para iniciar con el uso del software, dependemos de los datos hidráulicos, topográficos, geológicos, etc. Estos datos nos brindan la información necesaria para el buen diseño del muro de contención de aviones.

Figura 2.

Gaviones tipo caja



Nota: La figura representa las especificaciones de los gaviones tipo caja. Fuente: COMISUR.

Las dimensiones de los gaviones caja son estandarizadas.

Tabla 1.

Dimensionamiento estándar de los gaviones tipo caja

	Gaviones Caja con Diafragmas				
Largo (m)	Dimensiones Estándar		Volumen	Diafragma	
	Ancho (m)	Alto (m)			
1.5	1	0.5	0.7		
2	1	0.5	1	1	
3	1	0.5	1.5	2	
4	1	0.5	2	3	
1.5	1	0.5	1.5		
2	1	0.5	2	1	
3	1	0.5	3	2	
4	1	0.5	4	3	

Nota: Elaboración propia

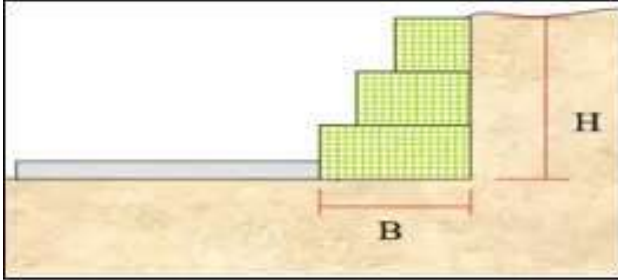
En las características de los materiales en la malla, no se permiten más grandes para evitar que el gavión se vaya a deformar.

a. Dimensionamiento del gavión

El primer paso es hallar la altura. Este dato consta de los valores o datos hídricos, como el tirante máximo (Y_{max}). Los valores correspondientes son de $H = Y_{max} + 1.00$ m.

Figura 3.

Dimensionamiento del H total de nuestro muro de contención

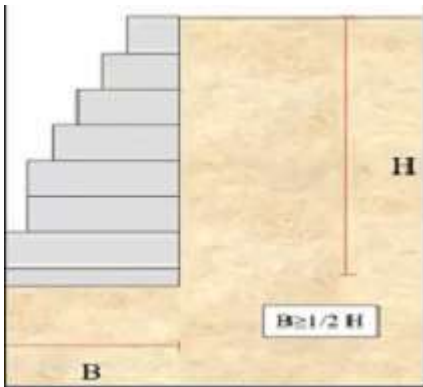


Nota: Elaboración propia

El segundo paso es hallar la base relacionada a la H. Los valores correspondientes son $B \geq \frac{1}{2} * H$.

Figura 4.

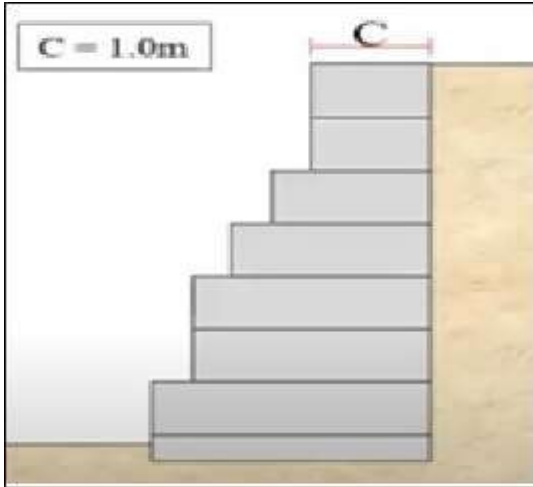
Dimensionamiento de la base del muro de contención



Nota: Elaboración propia

Figura 5.

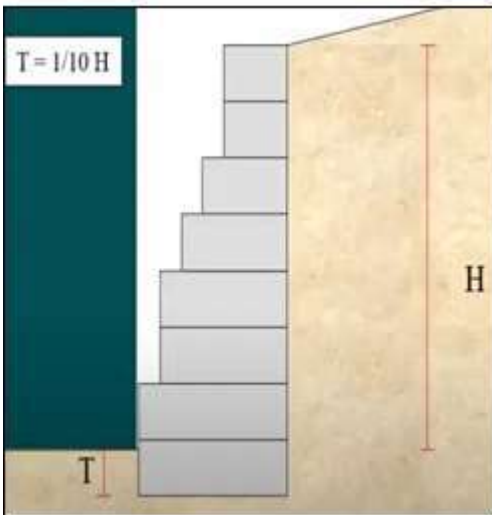
Dimensionamiento de corona del muro de contención



Nota: Elaboración propia

Figura 6.

Dimensionamiento de pie enterrado



Nota: Elaboración propia

CIVIL

Fabian Alberto Alva, Keren Guzmán Chuquispuma, Karla Sofía Fernández, Anyela Camila Saravia, Oscar Sebastián Pachas, Marco Ademir Morales y Maiquel López Silva

5. RESULTADOS

5.1 Parámetros morfométricos y caudal de diseño

De la delimitación de la cuenca del río Moche en el software ArcMap se obtuvieron los siguientes parámetros:

- Área: 2022.6042 Km²
- Perímetro: 329.16 Km
- Longitud del río: 107.786 Km
- Densidad de drenaje: 0.6521 Km/km²

Con el programa River se obtuvo el siguiente caudal de diseño:

- Qdiseño: 643.47 m³/s

5.2 Área de ubicación de la defensa ribereña

Elegimos un tramo de 1.9 km del río Moche, que es aledaño a la población.

Figura 7.

Delimitación del área de estudio



Nota: Elaboración propia

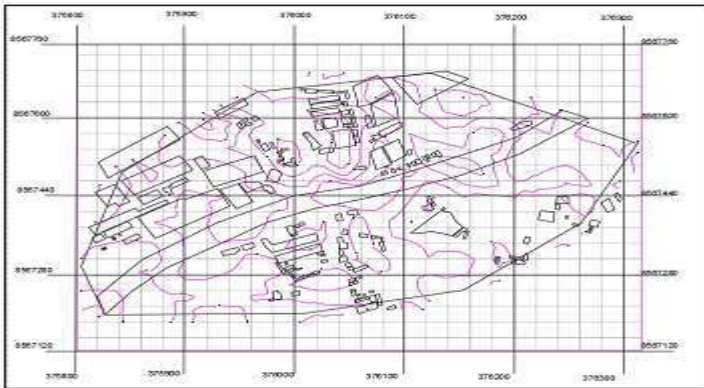
CIVIL

Fabian Alberto Alva, Keren Guzmán Chuquispuma, Karla Sofía Fernández, Anyela Camila Saravia, Oscar Sebastián Pachas, Marco Ademir Morales y Maiquel López Silva

5.3 Plano topográfico

Figura 8.

Plano topográfico de área de estudio

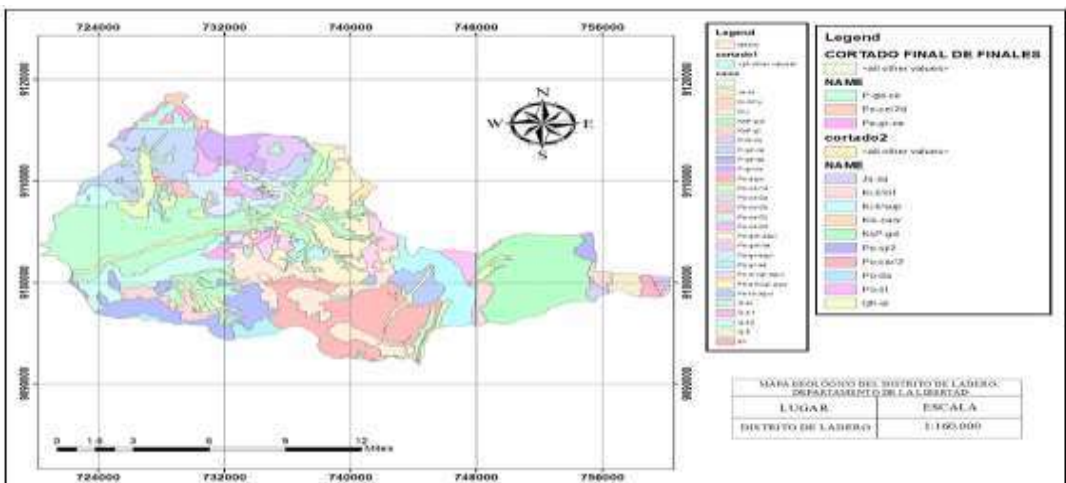


Nota: La figura muestra un plano detallado de curvas de nivel y lotización de las comunidades a los bordes del río Moche. Elaboración propia

5.4 Plano geológico

Figura 9.

Mapa geológico de la cuenca del río Moche



Nota: Elaboración propia

ISSN (Digital): 2519-5719

CIVIL

Fabian Alberto Alva, Keren Guzmán Chuquispuma, Karla Sofía Fernández, Anyela Camila Saravia, Oscar Sebastián Pachas, Marco Ademir Morales y Maiquel López Silva

Q-fl = DEPÓSITO FLUVIAL, gravas, arenas, limos y arcillas, polimícticos que forman el cauce de los ríos.

Qh-al = DEPÓSITO ALUVIAL, acumulaciones de clastos, gravas, arenas, limos y arcillas sub redondeados poco clasificados, que forman terrazas.

KsP-gd = GRANODIORITA

Js-si = FORMACIÓN SIMBAL, calizas grises laminadas con intercalaciones de lutitas y areniscas grises con un espesor promedio 50 m.

5.5 Ancho de encauzamiento

Utilizando el programa River se pudo obtener el ancho de encauzamiento por diferentes métodos, para ello se precisa que nuestro caudal de diseño es $Q_{\text{diseño}}=643.47 \text{ m}^3/\text{s}$, $T=140$ años y $\text{Pendiente}=0.0076$.

Tabla 2.

Tabla de anchos de encauzamiento

<i>Recomendación Práctica</i>	78.16
<i>Método de Petits</i>	112.64
<i>Método de Simons y Henderson</i>	73.57
<i>Método de Blench y Altunin</i>	159.06
<i>Método de Manning y Strickler</i>	119.03

Nota: Elaboración propia

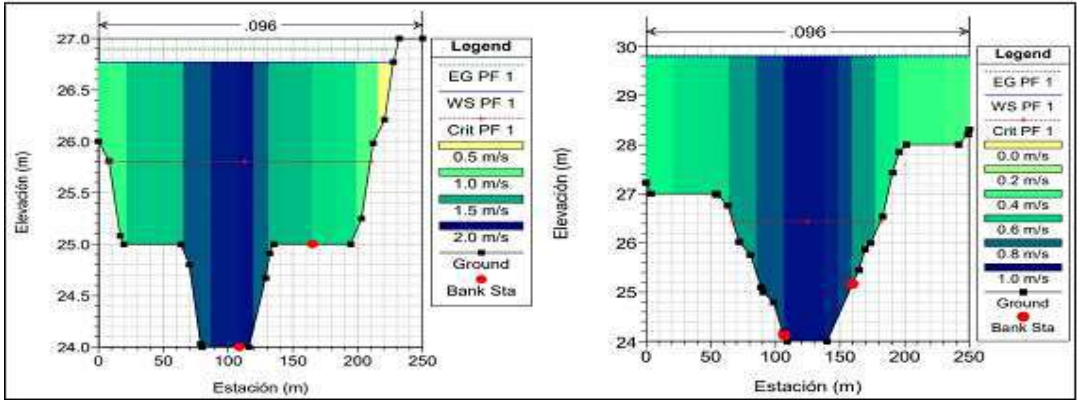
Tenemos que el ancho estable para un periodo de retorno de 140 años puede variar desde 73.57 m hasta 159.06 m; para fines prácticos, se adopta el ancho del cauce de 160 m. Optamos por este valor porque es el más crítico, que se asemeja a 159.06.

5.6 Perfiles de velocidades del flujo en el cauce del río

En este proceso, nos sirvió como guía el material compartido por el docente para modelar nuestro tramo en estudio en la cuenca del río Moche. Ingresamos los datos solicitados y diseñamos en el RAS Mapper. Posteriormente, para obtener los perfiles de velocidad, nos dirigimos a View cross sections.

Figura 10

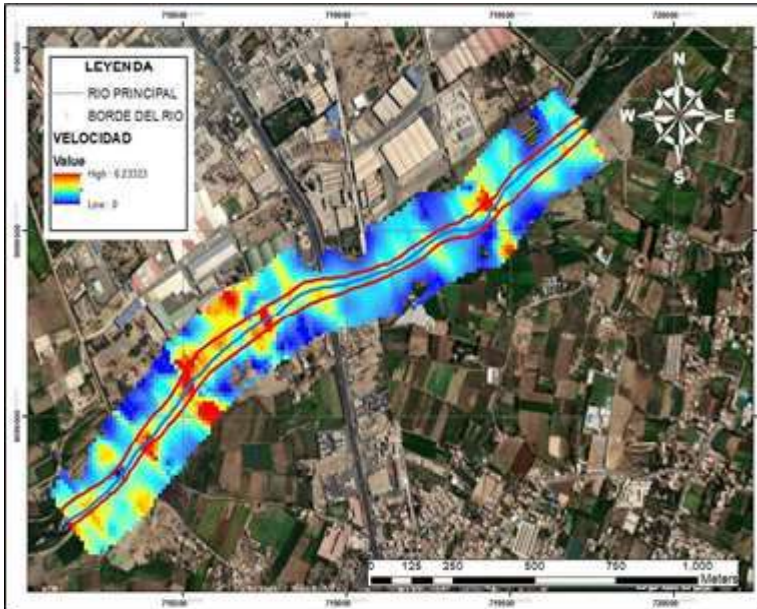
Perfiles de velocidades del flujo



Nota: Elaboración propia

Figura 11.

Modelamiento de la inundación con los valores de velocidad



Nota: Elaboración propia

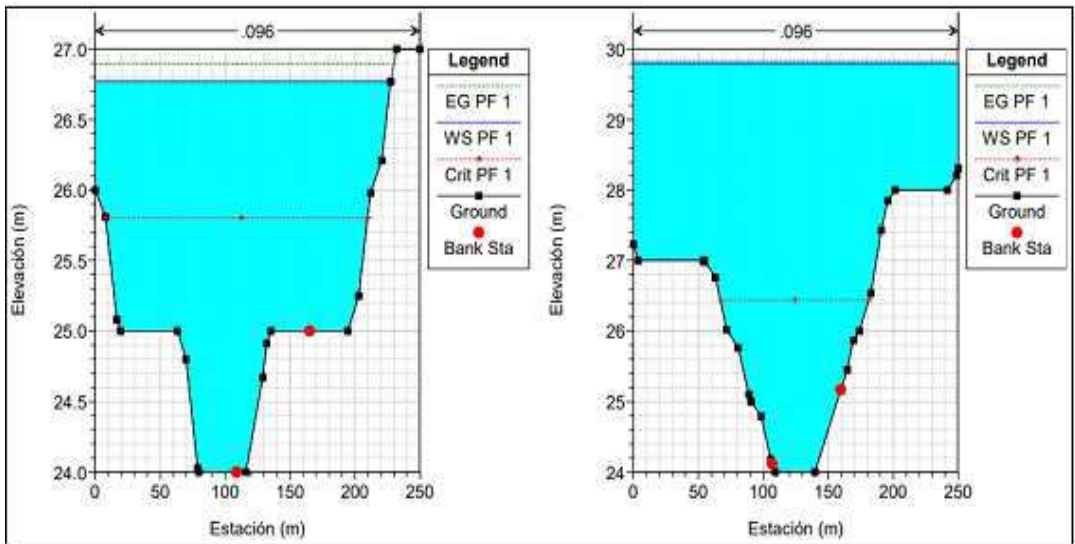
Como se puede apreciar en los perfiles, en la parte central del cauce del río hay una mayor velocidad que puede oscilar hasta los 6 m/s. Esto se debe a la velocidad de la corriente que aumenta en el centro mientras que en las zonas más próximas a las orillas, al fondo o a la superficie existe más rozamiento y la corriente se frena.

5.7 Perfiles del tirante de agua en el tramo del río

De igual manera, con el procedimiento que se realizó en el paso anterior, podemos obtener los perfiles para los tirantes de agua.

Figura 12.

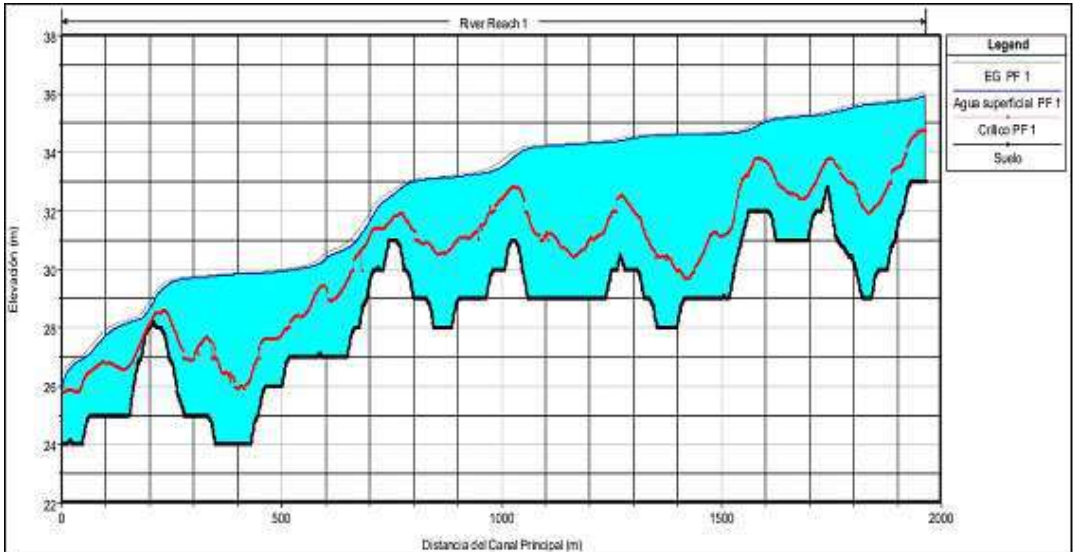
Perfiles del tirante de agua



Nota: Elaboración propia

Figura 13.

Vista en perfil del tirante de agua en el tramo de estudio



Nota: Elaboración propia

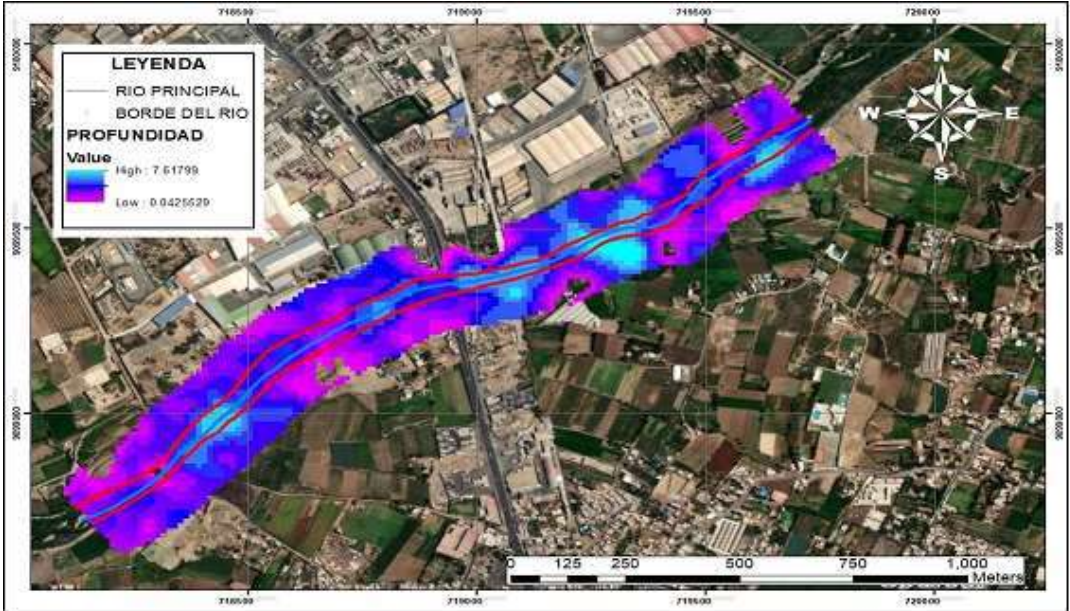
Como se puede apreciar los perfiles van cambiando en su forma, por su profundidad, etc. Muchos de ellos se aprecian inundados debido a estas características. Podemos decir también que la superficie del agua no sobrepasa la línea de energía en ninguna de sus secciones.

5.8 Áreas inundadas en los márgenes del tramo del río

Con la aplicación del Ras Mapper y ArcMap se pudo obtener las áreas inundadas. Asimismo, presentamos la profundidad mediante el siguiente mapa.

Figura 14.

Modelamiento de la inundación con los valores de velocidad



Nota: Elaboración propia

5.9 Socavación y velocidad crítica del flujo

La socavación y la velocidad se obtuvieron de la siguiente manera:

CIVIL

Fabian Alberto Alva, Keren Guzmán Chuquispuma, Karla Sofía Fernández, Anyela Camila Saravia, Oscar Sebastián Pachas, Marco Ademir Morales y Maiquel López Silva

Tabla 3.

Tabla de datos secciones (1972 – 1943) del río

River	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Flow Area	Top Width	Max Chl	Froud #Ch
Sta	(m3/s)	(m)	(m)	(m2)	(m)	Dpth	
(m)		35.94			244.88		
1972	643.47			33 441.26	2.94		0.33
1971	643.47	33	35.94	447.39	248.98	2.94	0.33
1969	643.47	33	35.93	450.3	250	2.93	0.33
1968	643.47	33	35.92	453.67	250	2.92	0.33 1966
643.47	33	35.91	457.13	250 2.91	0.33	1965	643.47 33
35.9	461.57	250	2.9	0.33 1964	643.47	33	35.9
467.07	250	2.9	0.32				
1962	643.47	33	35.89	471.71	250	2.89	0.32 1961
643.47	33	35.88	477.07	250 2.88	0.31	1959	643.47 33
35.87	483.29	250	2.87	0.31			
1958	643.47	33	35.87	489.22	250	2.87	0.31
1956	643.47	33	35.86	495.41	250	2.86	0.3
1955	643.47	33	35.85	501.3	250	2.85	0.3
1953	643.47	33	35.85	507.48	250	2.85	0.29
1951	643.47	33	35.84	514	250	2.84	0.29
1950	643.47	33	35.84	520.46	250	2.84	0.28 1949
643.47	33	35.83	526.55	250 2.83	0.28	1947	643.47 33
35.82	532.36	250	2.84	0.27			
1945	643.47	33	35.82	538.1	250	2.88	0.27
1944	643.47	33	35.81	543.34	250	2.91	0.26
1943	643.47	33	35.81	548.23	250	2.96	0.26

Nota: Elaboración propia

De las tablas podemos observar que el número de Froude de todas las secciones es menor a 1, lo que significa que el flujo a lo largo de todo el tramo del río es subcrítico. En la extracción de la tabla de resultados del modelado del río mediante en el software Hec-Ras, obtenemos el tirante máximo de profundidad por sección que con ella a lo largo del cauce nos da un tirante máximo de 7.62 m.

Con estos resultados vamos a realizar la estimación de socavación del río por el método de Lacey.

Tabla 4.

Tabla de datos de socavación en secciones (1972 – 1943) del río

River Sta	M. NUMÉRICO				M. EMPIRICO				
	MÉTODO DE LACEY				MÉTODO DE LACEY				
	Ds	Dsa	Hs = Dsa-Ymax		Ds	Dsa	Hs = Dsa-Ymax		
1972	2.24	3.35	0.41	2.97	4.45	1.51	1971	2.21	3.32
	0.38	2.97	4.45	1.51	1969	2.21	3.31	0.38	2.97
	4.45	1.52	1968	2.21	3.31	0.39	2.97	4.45	1.53
1966	2.21	3.31	0.40	2.97	4.45	1.54	1965	2.21	3.31
	0.41	2.97	4.45	1.55	1964	2.21	3.31	0.41	2.97
	4.45	1.55	1962	2.21	3.31	0.42	2.97	4.45	1.56
1961	2.21	3.31	0.43	2.97	4.45	1.57	1959	2.21	3.31
	0.44	2.97	4.45	1.58	1958	2.21	3.31	0.44	2.97
	4.45	1.58	1956	2.21	3.31	0.45	2.97	4.45	1.59
1955	2.21	3.31	0.46	2.97	4.45	1.60			
1953	2.21	3.31	0.46	2.97	4.45	1.60	1951	2.21	3.31
	0.47	2.97	4.45	1.61	1950	2.21	3.31	0.47	2.97
	4.45	1.61	1949	2.21	3.31	0.48	2.97	4.45	1.62
1947	2.21	3.31	0.47	2.97	4.45	1.61	1945	2.21	3.31
	0.43	2.97	4.45	1.57	1944	2.21	3.31	0.40	2.97
	4.45	1.54							
1943	2.21	3.31		0.35		2.97	4.45		1.49

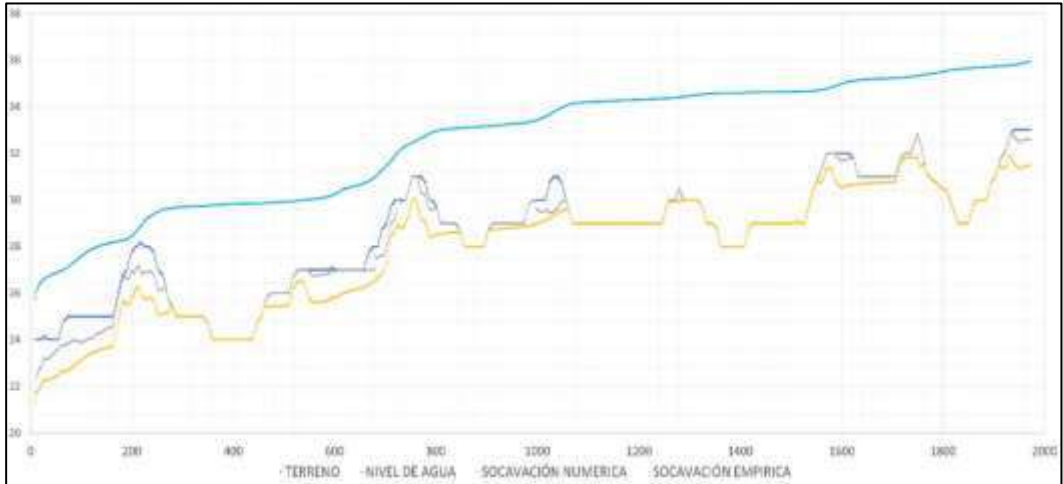
Nota: Elaboración propia

En los resultados empíricos y numéricos hay profundidades de socavación igual a 0. Anteriormente, estos resultados salían negativos, lo que no significaba que estén mal, sino que permitían entender que hay secciones donde no hay socavación en varias secciones. Por ello, se hizo un análisis de varios cortes del cauce para verificar y examinarlos con precisión.

En otro punto, estos resultados negativos se le reemplazaron igual a 0, porque con la tabla de cotas de la profundidad del río y la tabla de socavación por datos empíricos y numéricos, se hizo un perfil de elevación con el fin de verificar cómo quedaría nuestro cauce después que sucediera la socavación.

Figura 15.

Perfil de socavación del río por método empírico y numérico



Nota: Elaboración propia

Podemos interpretar que la socavación por el método empírico es más profunda que por el método numérico. En otro caso, para el diseño, elegiremos las profundidades de socavación por el método numérico, ya que el análisis nos resulta más confiable preciso a comparación de trabajar con resultados aproximados.

De la misma forma podemos interpretar que, al comparar este gráfico con el mapa de inundación o la tabla de tirantes máximos, a menor profundidad de agua por sección, mayor profundidad de socavación por sección. Además, al comparar este gráfico con la tabla de velocidades, podemos concluir que mientras la velocidad del flujo es mayor por sección, mayor será la socavación por sección.

Ahora se hallará la velocidad crítica mediante los métodos de Lischtvan – Lebediev, Maza & Echevarría, Laursen, Maza & Garcia y Neill. Se usó un ancho de encauzamiento de 162.58 m, ya que es el resultado mínimo de ancho que nos brindó el Hec-Ras. Se usará el dato mínimo porque, de esta manera, nos dará la velocidad más crítica que hay todo el tramo del río; en otras palabras, mientras menos sea el ancho de encauzamiento, más crítica será la velocidad del flujo.

CIVIL

Fabian Alberto Alva, Keren Guzmán Chuquispuma, Karla Sofía Fernández, Anyela Camila Saravia, Oscar Sebastián Pachas, Marco Ademir Morales y Maiquel López Silva

Tabla 5.

Velocidades críticas por métodos

		Lischtvan - Maza & Lebediev Echevarria				Laursen				Maza & Neill Garcia			
Q	Top q	hs	Vc	hs	Vc	hs	Vc	hs	Vc	hs	Vc	hs	Vc
Total Width													
(m ³ /s)	(m)	m ³ /s/m		(m)	(m/s)	(m)	(m/s)	(m)	(m/s)	(m)	(m/s)	(m)	(m/s)
643.47	162.58	3.96	1.13	3.48	1.29	3.06	0.96	4.14	0.99	3.99	1.22	3.19	

Nota: Elaboración propia

Para estos resultados descartamos los métodos de Lischtvan – Lebediev y Neill, ya que para estos parámetros solo son aplicables para un D50 de 21 mm y nosotros trabajamos con 0.305 mm. Para estos métodos se elegirá la mayor velocidad que, en este caso, es de 4.14 m/s. Estos datos son sacados del trabajo de investigación de Willian Agreda y Diego Bartolo.

5.10 Diseño de muro de contención con gaviones usando el Software GAWAC 3.0

H=9.00m; B= 6.00m; C= 1.00m; T= 0.90m; por lo que, en un ambiente agresivo, se usa una malla POLIMAC 100/418.

Tabla 6.

Parámetros del muro

Inclinación (°)	0
Peso esp. Piedra	24.5
Porosidad (%)	30
Geotextil en el terraplén	
Reduc. en fricción (%)	5
Geotextil bajo la base	
Reduc. en fricción (%)	5

Nota: Elaboración propia

CIVIL

Fabian Alberto Alva, Keren Guzmán Chuquispuma, Karla Sofía Fernández, Anyela Camila Saravia, Oscar Sebastián Pachas, Marco Ademir Morales y Maiquel López Silva

Tabla 7

Camadas del muro

<u>Ancho</u>	<u>Altura</u>	<u>Desplaz. (m)</u>	
6	1	0.5	Base
6	1	0.5	
4	1	0.5	
4	1	0.5	
3	1	0.5	
3	1	0.5	
2	1	0.5	
2	1	0.5	
1	1	0.5	Top

Nota: Elaboración propia

Tabla 8.

Datos sobre el terraplén y sus cargas

Inclin. Primer trecho (°)	0
Largo del primer trecho (m)	15
Inclin. Segundo trecho (°)	30
Peso específico (kN/m ³)	18
Ángulo de fricción (°)	30
Cohesión	0

Nota: Elaboración propia

CIVIL

Fabian Alberto Alva, Keren Guzmán Chuquispuma, Karla Sofía Fernández, Anyela Camila Saravia, Oscar Sebastián Pachas, Marco Ademir Morales y Maiquel López Silva

Tabla 9.

Datos sobre la fundación y sus cargas

Altura inicial (profundidad) (m)	0.9
Largo horizontal (m)	15
Inclinación (°)	0
Peso específico (kN/m3)	19
Ángulo de fricción (°)	31
Cohesión	1

Nota: Elaboración propia

Tabla 10

Cargas sobre el terraplén

Primer trecho (kN/m2)	20
Segundo trecho (kN/m2)	0

Nota: Elaboración propia

Figura 16

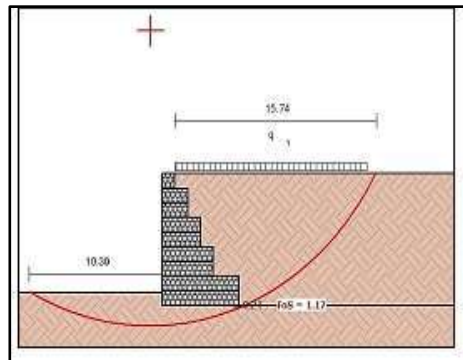
Elevación del muro de contención en GAWAC 3.



Nota: Elaboración propia

Figura 17

Respuesta del software GAWAC 3.0



Nota: Elaboración propia

CIVIL

Fabian Alberto Alva, Keren Guzmán Chuquispuma, Karla Sofía Fernández, Anyela Camila Saravia, Oscar Sebastián Pachas, Marco Ademir Morales y Maiquel López Silva

5.11 Diseño de muro de contención con gaviones por tramos según su altura

Altura de 4m

Figura 18

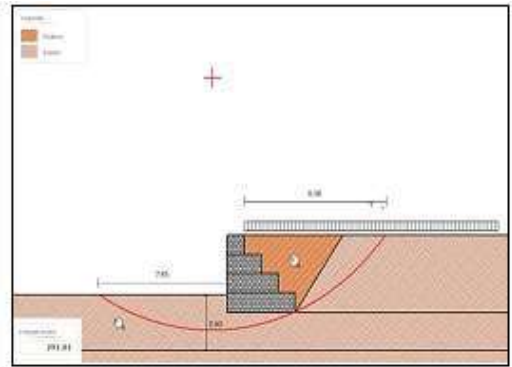
Diseño de Gaviones GAWAC 3.0 – 4m



Nota: Elaboración propia

Figura 19

Respuesta del software GAWAC 3.0



Nota: Elaboración propia

Altura de 5m

Figura 20

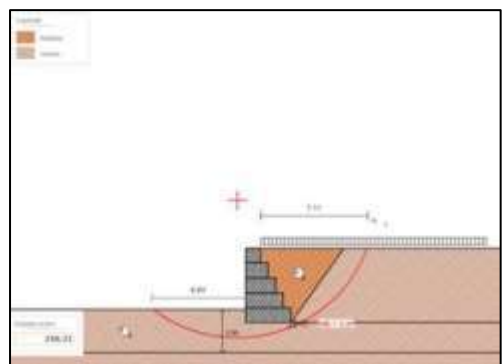
Diseño de Gaviones GAWAC 3.0 – 5 m



Nota: Elaboración propia

Figura 21

Respuesta del software GAWAC 3.0



Nota: Elaboración propia

CIVIL

Fabian Alberto Alva, Keren Guzmán Chuquispuma, Karla Sofía Fernández, Anyela Camila Saravia, Oscar Sebastián Pachas, Marco Ademir Morales y Maiquel López Silva

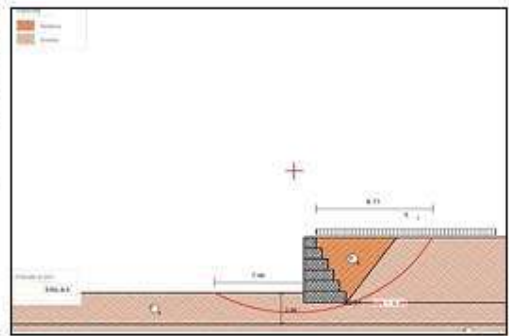
Altura de 6m

Figura 22
Diseño de Gaviones GAWAC 3.0 – 6 m V



Nota: Elaboración propia

Figura 23
Respuesta del software GAWAC 3.0



Nota: Elaboración propia

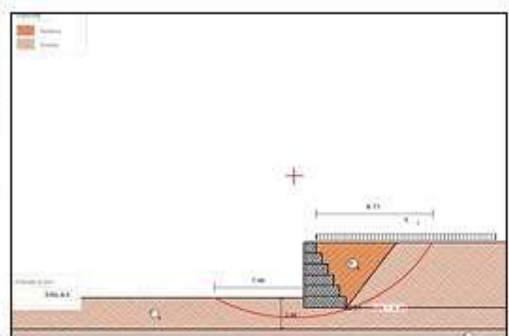
Altura de 7m

Figura 24
Diseño de Gaviones GAWAC 3.0 – 7 m



Nota: Elaboración propia

Figura 25
Respuesta del software GAWAC 3.0



Nota: Elaboración propia

Altura de 8m

Figura 26

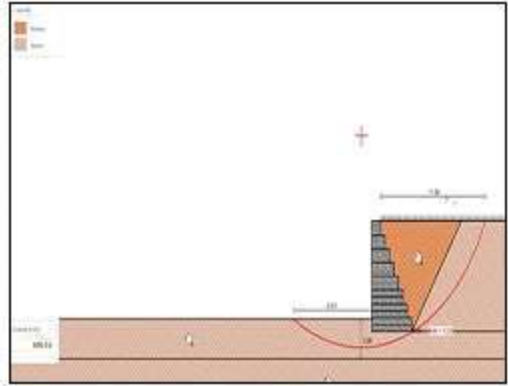
Diseño de Gaviones GAWAC 3.0 – 8 m



Nota: Elaboración propia

Figura 24

Respuesta del software GAWAC 3.0



Nota: Elaboración propia

5.12 Evaluación de impacto ambiental

Se realizó la evaluación de impacto ambiental mediante una matriz cuantitativa y cualitativa.

Cualitativa

Tabla 11.

Leyenda de la matriz

Leyenda	Descripción	Signo	
D	Impacto negativo directo	-1	43
I	Impacto negativo indirecto	-1	42
D	Impacto positivo directo	+1	34
I	Impacto positivo indirecto	+1	27

Nota: Elaboración propia

CIVIL

Fabian Alberto Alva, Keren Guzmán Chuquispuma, Karla Sofía Fernández, Anyela Camila Saravia, Oscar Sebastián Pachas, Marco Ademir Morales y Maiquel López Silva

Figura 28.

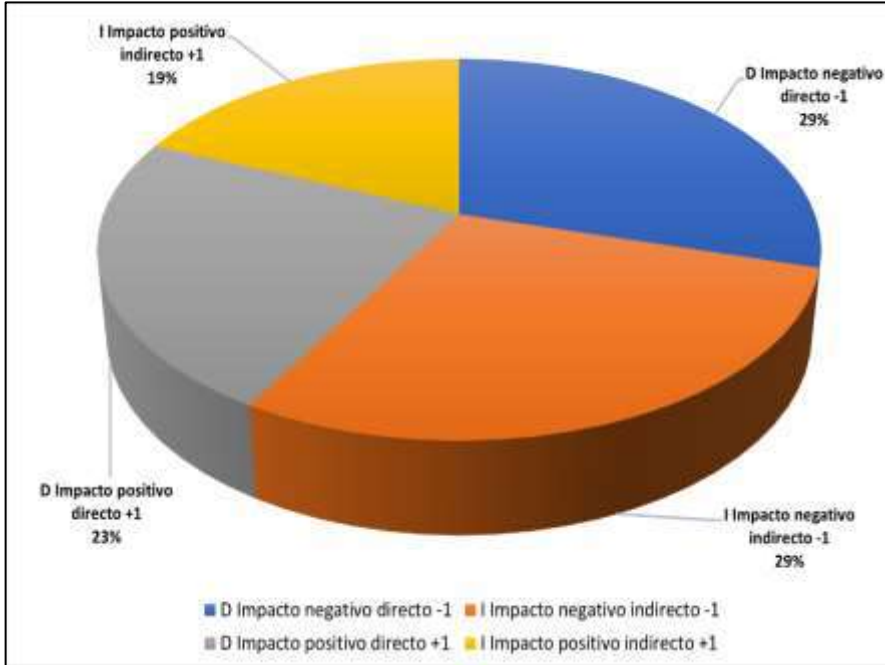
Matriz cualitativa

IMPACTO AMBIENTAL			PROVISIONALES		PRELIMINARES	MOVIMIENTO DE TIERRA Y TRANSPORTE DE MATERIALES							MURO	ACONDICIONAMIENTO DEL CAUCE Y OBRAS CIVILES										
			Causas de abrasión y erosión puntual	Corte de obra	Movimiento y almacenamiento de maquinaria	Lecheros, acoplajes	Limpieza de obra	Trazo y replanteo	Desvío de río	Corte de terreno	Corte de roca perforación	Relevo de material grueso	Relleno con material fino con equipo Boma	Relleno compactado con planas compactadoras	Revoloteo	Eliminación de material asociado con volquete	Acarreo y abstracción de material asociado normal	Caracterización de caudales	Dirección del cauce	Plantación de especies propias de ribera				
Condiciones físico-químicas bacteriológicas	Abiótico	Atmósfera	Aire		I	I	I	D	D						I	I				D				
			Ruido	I		D	I	D	I	I	D	D	D	D	D	D	D	D	D	I				
			Vibración			D					D	D		D										
			Humo y Gases			D							D											
			Pebro			D		D	D			D	D	D	D	D	D	D						
	Socio	Agua	Turbidez																		I			
			Toxicidad																					
			Tasa de erosión									D									D			
			Modificación del relieve					I				D				D					I	I		
			Contaminación líquidos tóxicos				I					I			D	D								
Condiciones biológicas	Biótico	Flora y Fauna	Cobertura vegetal	I	D	I	I	D	D	D			I	D	I	I	D	D	D	D				
			Especies locales																		I	D		
			Especies terrestres			I	I	I	I	I	I	I												
			Especies acuáticas										D								I			
			Estabilidad					I				D									I	I	D	
	Paisaje	Económico	Social	Variedad de especies																	I	I		
				Inestabilidad																				
				Calidad			I		D		D				I	I	I	I	I	I	D	D	D	
				Deforestación																				
				Patrones culturales (estilo de vida)																		I		I
Medio Socioeconómico	Demográfico	Social	Morales			D																		
			Salud e higiene						I													I		
			Generación de empleo	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D		
			Bienestar de la población	I				I													D		I	
			Tránsito			I	D		I	I			D					I	I				I	
Economía	Económico	Redes de servicios																	I					
		Tránsito																	I			I		

Nota: Elaboración propia

Figura 29.

Resultados de la matriz cualitativa



Nota: Elaboración propia

CIVIL

Fabian Alberto Alva, Keren Guzmán Chuquispuma, Karla Sofía Fernández, Anyela Camila Saravia, Oscar Sebastián Pachas, Marco Ademir Morales y Maiquel López Silva

Cuantitativa

Figura 30.

Matriz cuantitativa

$$S = \pm(3IN + 2EX + MO + PE + RV + SI + AC + EF + PR + MC)$$

PROCESO CONSTRUCTIVO/PIPE BUBBLING	ASPECTOS AMBIENTALES	CALIFICACIÓN DEL IMPACTO DE LA DEFENSA RIBERUSA											
		Signo	(IN)	(EX)	(MO)	(PE)	(RV)	(SI)	(AC)	(EF)	(PR)	(MC)	(S)
Señalización zona de trabajo	Tránsito (Puentes)	-1	1	2	1	3	2	2	1	1	2	1	-22
	Accesibilidad peatonal (Puentes)	-1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2	-17
Desvío de cauce, Corte, Excavación y movimiento de tierra, Relleno y compactación	Ruido	-1	4	1	1	3	1	1	1	1	1	2	-25
	Vibración	-1	2	2	1	2	1	1	1	1	1	2	-20
	Polyu	-1	1	1	1	1	1	1	4	4	2	2	-32
	Modificación del relieve	-1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	2	-16
	Contaminación	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	-16
	Cobertura Vegetal	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	-14
	Molestias	-1	2	1	1	3	2	1	4	4	2	3	-28
	Salud e higiene	-1	1	1	1	1	1	1	1	4	1	2	-19
	Bienestar de la población	-1	2	1	2	2	2	1	1	1	2	2	-20
	Accesibilidad peatonal	-1	1	2	3	1	1	1	1	1	1	2	-18
	Tránsito	-1	2	2	2	2	2	1	1	1	1	3	-23
	Zona comercial	-1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	2	-16
Uso de Maquinaria	Turismo	-1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	2	-16
	Aire	-1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	2	-16
	Ruido	-1	2	1	1	3	1	1	1	1	1	2	-19
	Vibración	-1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	-17
	Humo y Gases	-1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	2	-16
	Polyu	-1	2	2	3	3	2	1	4	1	1	2	-27
	Accesibilidad peatonal	-1	4	2	1	1	1	1	4	1	2	3	-30
	Tránsito	-1	4	1	3	1	1	1	1	1	2	2	-26
	Ruido	-1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	2	-16
	Vibración	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	-14
	Polyu	-1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	2	-16
	Molestias	-1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	-14
Construcción de los puentes in situ	Salud e higiene	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	-14
	Bienestar de la población	-1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	-16
	Accesibilidad peatonal	-1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	2	-17
	Tránsito	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	-14
	Turismo	-1	2	1	3	1	2	1	1	1	1	2	-16
	Ruido	-1	4	1	2	2	2	1	1	1	1	2	-27
Colocación de los Góndoles	Vibración	-1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	-15
	Polyu	-1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	2	-16
	Molestias	-1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	2	-18
	Salud e higiene	-1	2	1	3	1	1	1	1	1	1	2	-16
	Bienestar de la población	-1	2	1	3	1	2	1	1	1	1	2	-16
	Tránsito	-1	2	1	3	1	1	1	1	1	1	2	-16
	Turismo	-1	2	1	2	2	1	1	1	1	1	2	-16
	Ruido	-1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	2	-16
Reposición de río en su curso, Relleno y forestación (árboles - hierba)	Vibración	-1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	2	-15
	Humo y Gases	-1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	-15
	Polyu	-1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	2	-15
	Molestias	-1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	2	-16
	Salud e higiene	-1	2	1	3	1	1	1	1	1	1	2	-16
	Bienestar de la población	-1	4	1	3	1	1	1	1	1	1	2	-25
	Accesibilidad peatonal	-1	4	2	3	1	1	1	1	1	1	2	-27
	Tránsito	-1	4	2	3	1	1	1	1	1	1	3	-28
	Zona comercial	-1	2	2	3	1	1	1	1	1	1	3	-19
Turismo	-1	2	2	3	1	1	1	1	1	1	3	-19	

Nota: Elaboración propia

Figura 31

Resultados de la matriz

Poco significativo (Positivo)	39
Moderadamente significativo (Positivo)	5
Poco significativo (Negativo)	4
Moderadamente significativo (Negativo)	2

Nota: Elaboración propia

Figura 32

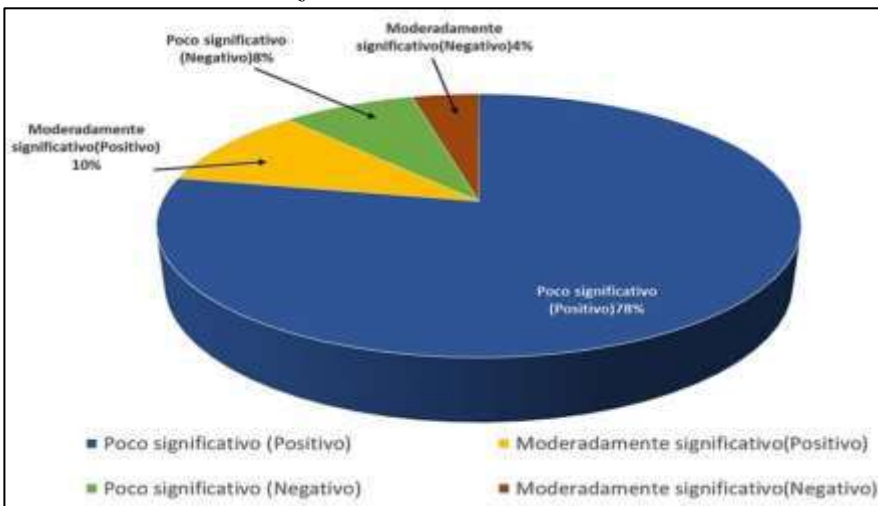
Leyenda de la matriz

IMPACTOS POSITIVOS		
Símbolo	Nivel de Significación	Rango
PS	Poco significativo	- 13 a - 25
MoS	Moderadamente significativo	- 26 a - 50
MuS	Muy significativo	- 51 a - 75
AS	Altamente significativo	- 76 a - 100
IMPACTOS NEGATIVOS		
ps	Poco significativo	13 a 25
mos	Moderadamente significativo	26 a 50
mus	Muy significativo	51 a 75
as	Altamente significativo	76 a 100

Nota: Elaboración propia

Figura 33

Resultados de la matriz cuantitativa



Nota: Elaboración propia

En las matrices observamos que los aspectos positivos en cuanto a la obra tienen un buen porcentaje, lo cual hace viable la ejecución del proyecto.

6. Conclusiones

Si la propuesta se implementa correctamente, se esperaría una reducción significativa en el riesgo de inundaciones en las áreas cercanas al río Moche. Esto protegería a las comunidades locales y la infraestructura crítica.

Comparando los mapas geológicos de otras cartas con la zona de estudio, se puede observar que las capas que más se repiten son gravas, arenas, limos, granodiorita, calizas, entre otros, debido a la morfología del suelo verificadas en la página de Geocatmin.

Mediante la utilización del software QGIS para analizar imágenes satelitales, se identificaron las características de la región bajo estudio, que es conocida como la cuenca del río Moche. Esta metodología nos ha facilitado la identificación de las características geomorfológicas únicas de la cuenca, de las cuales se obtuvieron los siguientes datos de relevancia. Parámetros morfométricos básicos de la cuenca: un área de 2022.6042 Km², perímetro de 329.16 Km, longitud del río es de 107.786 Km y la densidad de drenaje es de 0.6521 Km/km².

Teniendo en cuenta nuestros registros de 69 años sobre los caudales, nos damos cuenta de que el caudal más favorable fue en 1985 con 20.8 m³/s y el desfavorable fue en el año 1998 con un caudal de 1000 m³/s.

Según la información del índice de compacidad, factor de forma y pendiente de la cuenca, se determina que la cuenca de mala es de forma alargada, estrecha y de topografía del cauce principal plano.

De las tablas podemos observar que el número de Froude de todas las secciones es menor a 1, lo que significa que el flujo a lo largo de todo el tramo del río es subcrítico. Podemos interpretar que la socavación por el método empírico es más profunda que por el método numérico. En otro caso, para el diseño, elegiremos las profundidades de socavación por el método numérico, ya que el análisis nos resulta más confiable y preciso a comparación de trabajar con resultados aproximados.

CIVIL

Fabian Alberto Alva, Keren Guzmán Chuquispuma, Karla Sofía Fernández, Anyela Camila Saravia, Oscar Sebastián Pachas, Marco Ademir Morales y Maiquel López Silva

En conclusión, el diseño de gaviones para la protección de las riberas del río se ha enfocado en la variabilidad de altura, específicamente en rangos de 4 a 8 metros. Esta selección permite una adaptabilidad óptima a las diversas profundidades del borde del río. El enfoque integral considera factores geotécnicos, medioambientales y de estabilidad para garantizar una solución sostenible. Este diseño se presenta como una estrategia eficaz para prevenir la erosión y proteger las áreas ribereñas de manera duradera.

8. Referencias bibliográficas

Vargas-Aliaga, C (2015). Gestión integrada del agua de riego en la cuenca baja del Rio Moche, Trujillo-Perú https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/-11042/2793/MAS_GAA_023.pdf.

Grupo Rpp. (2015). Hallan construcciones ilegales en el cauce del Rio Moche

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2015). Población del Distrito Moche.

Fernández, C. (2021). Rain for Peru and Ecuador (RAIN4PE), <https://dataservices.gfzpotdam.de/pik/showshort.php?id=-6f766e202d9411eb-9603-497c92695674>

Lluén Chero, W. E. (2015). Aplicación de la nueva herramienta HecRas 5.0 para cálculos bidimensionales del flujo de agua en ríos. Tesis, UPC Barcelona TECH, Barcelona. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/-81164/17371290.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

SENAMHI. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=senamhi>

Autoridad Nacional del Agua, (2008). <https://www.gob.pe/institucion/ana/institucional>

Bello, M. (2012). Cálculo de periodo de retorno. http://ru.ffyl.unam.mx/bitstream/handle/10391/3722/07_Bello_Velazquez_Periodo_retorno_Guia_Metodos_Estadisticos_2012.pdf?sequence=1#:~:t ext=Se%20ordena%20la%20serie%20de,solo%20se%20multiplica%20por%20100.

CIVIL

Fabian Alberto Alva, Keren Guzmán Chuquispuma, Karla Sofía Fernández, Anyela Camila Saravia, Oscar Sebastián Pachas, Marco Ademir Morales y Maiquel López Silva

Trayectoria académica

Fabian Alberto Alva

Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.

Soy egresado de la carrera de Ingeniería Civil en la Universidad Ricardo Palma, con una sólida formación académica y una gran motivación para comenzar mi carrera profesional. A lo largo de mi formación académica y experiencias previas, he desarrollado y fortalecido competencias blandas, tales como trabajo en equipo, habilidades comunicativas, capacidad de liderazgo y una excelente adaptabilidad a nuevas situaciones. He adquirido conocimientos en Sistema de Información Geográfica “SIG” en base a análisis teóricos y manejo de programas con ArcGIS, QGIS y Google Earth. Asimismo, poseo sólidos conocimientos en topografía y manejo de equipos como teodolito, estación total y drones (certificado a nombre de la UNI); complementado con cursos de AutoCAD 2D y Civil 3D certificados por SENCICO.

Autor corresponsal: fabian.alva@urp.edu.pe

Orcid: <https://orcid.org/0009-0009-2335-8738>

Keren Guzmán Chuquispuma

Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.

Soy egresada de la carrera de Ingeniería Civil en la Universidad Ricardo Palma, con una sólida formación académica y una gran motivación para comenzar mi carrera profesional. Durante mi trayectoria académica y mis experiencias anteriores, he cultivado y mejorado habilidades interpersonales, como el trabajo en equipo, la comunicación efectiva, la capacidad de liderazgo y una notable adaptabilidad a situaciones nuevas. He adquirido conocimientos en ArcGIS, Autocad, Lectura de planos, Metrados, Excel, entre otros.

201911219@urp.edu.pe

Orcid: <https://orcid.org/0009-0003-4216-7036>

CIVIL

Fabian Alberto Alva, Keren Guzmán Chuquispuma, Karla Sofía Fernández, Anyela Camila Saravia, Oscar Sebastián Pachas, Marco Ademir Morales y Maiquel López Silva

Karla Sofía Fernández

Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.

Me encuentro en el grado de bachiller en ingeniería civil de la Universidad Ricardo Palma, donde pude obtener todos los conocimientos necesarios para poder ser la profesional que estoy formarnos. Agradezco a mis padres y hermano por el apoyo continuo.

karlasofia.fernandez@urp.edu.pe

Orcid: <https://orcid.org/0009-0008-5636-1514>

Anyela Camila Saravia

Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.

Soy un Bachiller en Ingeniería Civil, egresado de la Universidad Ricardo Palma, donde he adquirido conocimientos. A lo largo de mi formación he adquirido conocimientos innovadores para poder formarme y sobresalir en mi carrera profesional. Mi compromiso y responsabilidad han sido clave en mi desarrollo profesional, permitiéndole enfrentar desafíos y aprender constantemente. Agradezco profundamente a mis padres por su amor y sacrificio, a mi hermana por su inspiración y apoyo. Su apoyo ha sido esencial para alcanzar mis metas y sueños.

anyela.saravia@urp.edu.pe

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3254-7636>

CIVIL

Fabian Alberto Alva, Keren Guzmán Chuquispuma, Karla Sofía Fernández, Anyela Camila Saravia, Oscar Sebastián Pachas, Marco Ademir Morales y Maiquel López Silva

Marco Ademir Morales

Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.

Estoy cursando el grado de bachiller en Ingeniería Civil en la Universidad Ricardo Palma, donde he podido adquirir todos los conocimientos necesarios para formarme como una profesional competente en el campo. Expreso mi profundo agradecimiento a mis padres por su apoyo incondicional a lo largo de este camino. Su aliento y respaldo han sido fundamentales para mi desarrollo académico y personal. Estoy muy agradecido por todo lo que me han brindado.

moralesvirhuez@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0005-6709-4974>

Maiquel López Silva

Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.

Doctor en Ciencias Técnicas y Master por la Universidad de Ciego de Ávila (Cuba). Ingeniero Hidráulico por la Universidad de Oriente, Cuba. Investigador de Renacyt Nivel V, Código de Registro: P0206393. Scopus Author ID: 57964089200, Web of Science ID: AGY-4975-2022. Ha publicado más de 20 artículos científicos en revistas indexadas y participación como ponente en congresos internacionales. Publicó 2 libros en la Biblioteca Nacional del Perú y ha realizado más de 70 asesoría de tesis en opción al título de Ingeniero y Master en Ciencias en los últimos 5 años. Profesor asociado del Departamento de investigaciones en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica Sedes Sapientiae y contratado por la Universidad Ricardo Palma, (Perú). Además, Profesor invitado como Jurado Revisor en la carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Científica del Sur, Perú. Sus principales intereses de investigación es la Hidráulica Aplicada, el proceso de enseñanza y aprendizaje en la Educación Superior y el uso de las TIC.

Maiquel.lopez@urp.edu.pe

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0946-6160>

CIVIL

Fabian Alberto Alva, Keren Guzmán Chuquispuma, Karla Sofía Fernández, Anyela Camila Saravia, Oscar Sebastián Pachas, Marco Ademir Morales y Maiquel López Silva

Contribución de autoría

Morales Virhuez: Análisis numérico

Alva Rodriguez: Análisis numérico

Guzmán Chuquispuma: Datos estadísticos y ambientales

Saravia Torres: Datos estadísticos y ambientales

Fernández Solorzano: Elaboración de planos y análisis empíricos

López Silva: Realizó la revisión y edición del manuscrito

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe ningún tipo de conflictos de intereses en el desarrollo de la presente investigación.

Responsabilidad ética y legal

El desarrollo de la investigación se realizó bajo la conformidad de los principios éticos del conocimiento, respetando la originalidad de la información y su autenticidad.

Declaración sobre el uso de LLM (Large Language Model)

Este artículo no ha utilizado para su redacción textos provenientes de LLM (ChatGPT u otros).

CIVIL

Fabian Alberto Alva, Keren Guzmán Chuquispuma, Karla Sofía Fernández, Anyela Camila Saravia, Oscar Sebastián Pachas, Marco Ademir Morales y Maiquel López Silva

Financiamiento

La presente investigación ha sido realizada con recursos propios de los coautores de la investigación.

Correspondencia: fabian.alva@urp.edu.pe



Uso del ensayo penetrómetro de cono en la determinación de la resistencia al corte no drenado de suelos arcillosos blandos de la región San Martín, Perú

Use of fall cone test to estimation of undrained shear strength of soft clay soils from region San Martin, Peru

Miriam Rosanna Escalaya Advíncula, Marco Antonio Hernández Aguilar, César Giancarlo Rojas Llactas

RECIBIDO: 26 de abril de 2024.
ACEPTADO: 03 de junio de 2024.

RESUMEN

En esta investigación, se busca determinar experimentalmente la resistencia no drenada (S_u) de un suelo arcilloso blando por métodos no convencionales en la práctica de la Ingeniería en el Perú. Se empleó el Penetrómetro de Cono que es un equipo de laboratorio comúnmente utilizado para obtener el límite líquido de los suelos. Para calibrar los resultados, se usó un equipo de Veleta de Laboratorio, que proporciona la medida directa de S_u . El estudio se llevó a cabo con trece muestras inalteradas extraídas de las localidades de Rioja y Moyobamba en la región San Martín, Perú. Como resultado, se obtuvo una correlación empírica que permite determinar la resistencia no drenada de estos suelos a partir del ensayo de Penetrómetro de Cono. En la investigación se concluye que, con una calibración adecuada, el Penetrómetro de cono es una herramienta confiable para la determinación de la resistencia no drenada de los suelos blandos. Además, su ejecución sencilla y de bajo costo, lo convierte en un alternativa rápida y económica.

Palabras clave: resistencia no drenada, penetrómetro de cono, veleta de laboratorio, arcillas blandas.

Cómo citar

M. R. Escalaya Advíncula, M. A. Hernández Aguilar, y C. G. Rojas Llactas, «Uso del Ensayo Penetrómetro de Cono en la Determinación de la Resistencia al Corte No Drenada de Suelos Arcillosos Blandos de la Región San Martín, Perú», *Perfiles_Ingenieria*, vol. 20, n.º 21, pp. 95-110, jun. 2024.

ABSTRACT

In this research, we seek to experimentally determine the undrained shear strength (S_u) of a soft clay soil by unconventional methods in the practice of Peruvian Engineering. The fall-cone test was used, which is a laboratory equipment commonly used to obtain the liquid limit of soils. To calibrate the results, laboratory miniature vane test equipment was used, which provides direct measurement of S_u . The study was conducted with thirteen undisturbed samples extracted from the localities of Rioja and Moyobamba in the San Martín region, Peru. As a result, an empirical correlation was obtained that allows the undrained shear strength of these soils to be determined from the fall-cone test. The research concludes that, with adequate calibration, the fall-cone is a reliable tool for determining the undrained shear strength of soft soils. Furthermore, its simple and low-cost execution makes it a quick and economical alternative.

Keywords: undrained shear strength, fall-cone test, laboratory miniature vane, soft clays.

© Los autores. Este artículo Open Access está publicado bajo la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC-BY 4.0).



1. Introducción

La resistencia no drenada es un parámetro importante en los proyectos de ingeniería geotécnica en los que el suelo se carga rápidamente sin permitir el drenaje del agua intersticial. Esta situación suele ser crítica, por lo que muchos de estos proyectos requieren conocer este valor durante la fase de planificación, dimensionamiento y evaluación de las obras geotécnicas. Este es el caso del diseño de cimentaciones, análisis de estabilidad a corto plazo, etc. La resistencia no drenada puede ser evaluada mediante ensayos tanto de campo como de laboratorio.

En el laboratorio, esta propiedad se evalúa comúnmente mediante ensayos triaxiales que requieren preparación cuidadosa de las muestras para preservar las condiciones de campo. Sin embargo, en suelos arcillosos blandos, esta preparación es muy difícil.

En el Perú, existen varias ciudades ubicadas sobre suelos arcillosos, donde las obras pueden presentar problemas técnicos no experimentados en otras zonas, debido a las características del suelo y la falta de equipos de laboratorio adecuados para la determinación de sus principales propiedades. Ante esta escasez de equipos apropiados, la presente investigación propone el uso del ensayo Penetrómetro de Cono, que es un equipo común en muchos de los laboratorios del país, para determinar la resistencia no drenada de suelos arcillosos blandos. Para el desarrollo de la investigación se seleccionaron suelos de la región San Martín, ubicada en la selva peruana.

El ensayo Penetrómetro de Cono fue desarrollado por la comisión Geotécnica de Vías de Suecia entre 1914 y 1922. Originalmente, el objetivo era estimar la resistencia de suelos arcillosos remoldeados y se convirtió en un método alternativo para determinar el límite líquido de arcillas. Es un método sencillo comparado con otros, por lo que forma parte de las normas británicas, canadienses, japonesa y suecas.

La determinación de la resistencia al corte no drenado de suelos de grano fino, utilizando el ensayo del Penetrómetro de Cono, ha sido evaluada de forma experimental a lo largo del tiempo. En varias de estas evaluaciones, particularmente en [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11] y [12], se emplearon muestras de suelos inalteradas y mezclas de suelos, que confirmaron la validez del modelo propuesto por Hansbo [13]. Un resumen de ellas es mostrado en [14].

Hansbo [13] determinó la relación entre la resistencia al corte no drenado del suelo (S_u) y la profundidad de penetración del cono.

$$S_u = K \cdot \frac{Q}{h^2} \quad (\text{Ec.1})$$

Donde: S_u = resistencia al corte no drenada, K = factor de cono, Q = peso total del cono, y h = profundidad de penetración del cono.

K es la pendiente de la relación lineal entre Q/h^2 y S_u . Es una constante empírica que depende del ángulo (α) y de la rugosidad (ξ) del cono.

Para cumplir con el objetivo principal de la investigación, fue necesario calibrar el Penetrómetro de Cono con el fin de obtener la resistencia no drenada mediante una prueba alternativa. Para ello, se utilizó el equipo de Veleta de Laboratorio, que proporciona directamente el valor de S_u , y que ha sido usado ampliamente en otros estudios, como [13], [2], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21] y [22].

2. Materiales y métodos

Para la ejecución del estudio se seleccionaron lugares de la región San Martín (Rioja y Moyobamba), conocidos por la presencia de suelos arcillosos blandos. Para la recolección de muestras, se realizaron excavaciones a cielo abierto o calicatas de 1.0 m, en promedio, de profundidad. De estas, mediante el uso de tubos de acero de pared delgada, se extrajeron muestras en estado inalterado (figura 1). La investigación se limitó a 13 muestras porque varias de las muestras recolectadas presentaban una consistencia mayor a la capacidad de trabajo de la veleta de laboratorio.

Figura 1.

(a) Vista de una de las calicatas donde se extrajo la muestra de suelo, (b) Tubo de pared delgada, utilizado para la obtención de muestras inalteradas



(a)

(b)

Cada uno de los tubos con muestras de suelo, se cortó transversalmente para la obtención de especímenes con una altura de 7 cm de altura y un diámetro de 8.5 cm, como se muestra en la figura 2. Se realizaron un total de dos cortes por tubo, tomando especial cuidado para que la sierra no penetrara en el suelo. El tubo se giró en cada paso hasta cortar toda la circunferencia. El personal de Maestranza de la Universidad Ricardo Palma brindó apoyo para esta actividad. Luego, se utilizó un hilo de nylon para cortar el suelo, separar los segmentos y alisar la superficie de la muestra.

Figura 2.

(a) Corte de tubos de pared delgada (b) Vista de cuerpo de prueba, preparado para el ensayo



Para determinar la resistencia no drenada utilizando el ensayo del Penetrómetro de Cono, fue necesario realizar una calibración previa, y se obtuvo simultáneamente la resistencia no drenada mediante el ensayo de Veleta de Laboratorio.

El ensayo de Veleta de Laboratorio se llevó a cabo de acuerdo con la norma ASTM D4648-16 “Standard Test Methods for Laboratory Miniature Vane Shear Test for Saturated Fine-Grained Clayey Soil”, y las recomendaciones de [23]. Asimismo, el ensayo Penetrómetro de Cono se realizó conforme con la norma BS 1377-2,1990 “Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes. Part 2: Classification Test”.

En el ensayo Penetrómetro de Cono, el procedimiento comenzó colocando el cuerpo de prueba debajo del cono y asegurándose de que este hiciera un contacto muy ligero con la superficie del suelo, mientras que el vástago tocaba el dial. Luego, se dejó caer el cono y se registró la profundidad de penetración (h) después de 5 segundos. Se realizaron cuatro lecturas equidistantes desde el centro y se repitió el mismo procedimiento en la cara opuesta del cuerpo de prueba. En la figura 3, se observa el equipo Penetrómetro de Cono y los pasos principales realizados durante el ensayo.

Figura 3.

(a) Equipo Penetrómetro de Cono, (b) Se muestra la posición del cono antes del ensayo (c) El ensayo se llevó a cabo en cuatro puntos equidistantes



(a)



(b)



(c)

Para el ensayo con la Veleta de Laboratorio, se seleccionó uno de los cuatro resortes que vienen con el equipo, cuyas rigideces son diferentes. Después de instalar el resorte, se ajustó la lectura a 0° para la medición interior y exterior. La veleta se introdujo gradualmente en el centro del cuerpo de prueba, y se aseguró su estabilidad para evitar cualquier giro durante la inserción. La profundidad de inserción fue de 2 veces la altura de la veleta.

El ensayo se comenzó registrando el tiempo y girando la manivela en sentido horario a una velocidad constante de $60^\circ/\text{min}$ hasta alcanzar los $90^\circ/\text{min}$ y se observó el momento en el que el puntero dejó de girar. El procedimiento se repitió en la otra cara del cuerpo de prueba. En la figura 4, se presenta el equipo de Veleta de Laboratorio y los pasos principales durante el ensayo.

Para calcular la resistencia no drenada (S_u), se usaron tablas de calibración donde las lecturas registradas se multiplican por la rigidez del resorte empleado y la constante K específica de acuerdo con las dimensiones de la veleta.

Figura 4.

(a) Equipo Veleta de Laboratorio, (b) Posición de la veleta antes de ensayo (c) El ensayo se realizó en el centro del cuerpo de prueba



(a)



(b)



(c)

Con el fin de evitar posibles influencias, todos los ensayos fueron ejecutados con los mismos equipos y un único operador. Con los datos recopilados, se realizaron análisis estadísticos para determinar el factor K promedio, que correlaciona los resultados de profundidad de penetración (h) obtenidos con el penetrómetro de cono y la resistencia no drenada (S_u) del equipo de Veleta de Laboratorio. Durante este análisis, se consideraron las medidas de variabilidad de los datos, lo que permitió una evaluación exhaustiva de la consistencia y confiabilidad de los resultados.

3. Resultados

La tabla 1 resume los resultados de los ensayos de granulometría, límite líquido, límite plástico, límite de contracción, y gravedad específica. Las muestras seleccionadas fueron clasificadas según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). La determinación del límite líquido se llevó a cabo siguiendo la norma ASTM, que utiliza la copa de Casagrande.

Tabla I:

Resumen de resultados de los ensayos de caracterización

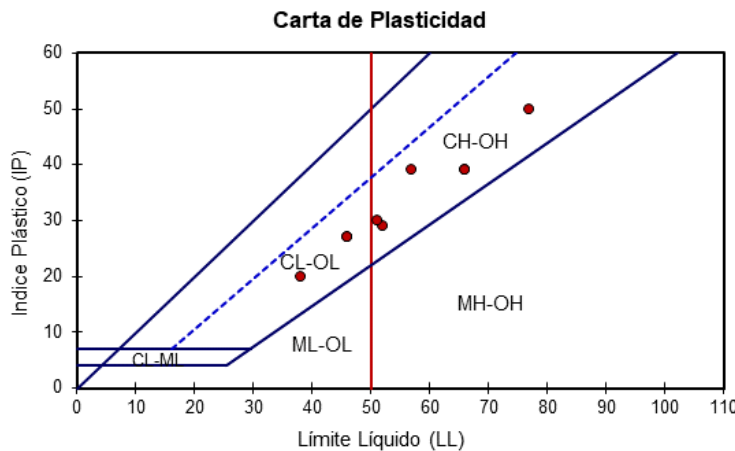
Ubicación	Muestra	LL	LP	LC	IP	SUCS	G _s
Posic (Rioja)	M-1	139 (61)	29	35	110	OH	2.57
Posic (Rioja)	M-2	139(61)	29	35	110	OH	2.57
Posic (Rioja)	M-3	-	-	-	-	Pt	-
Posic (Rioja)	M-4	-	-	-	-	Pt	-
Jepelacio (Moyobamba)	M-5	46	19	16	27	CL	2.73
Jepelacio (Moyobamba)	M-6	46	19	16	27	CL	2.73
Jepelacio (Moyobamba)	M-7	66 (46)	27	17	39	OH	2.74
Jepelacio (Moyobamba)	M-8	66(46)	27	17	39	OH	2.74
Moyobamba-Yantaló	M-9	38	18	19	20	CL	2.74
Moyobamba-Yantaló	M-10	57	18	20	39	CH	2.64
Moyobamba-Yantaló	M-11	52	23	19	29	CH	2.71
Moyobamba-Yantaló	M-12	51	21	23	30	CH	2.66
Rioja-La Perla de Cascayunga	M-13	77 (43)	27	49	50	OH	2.63

* LL=límite líquido, LP=límite plástico, LC=límite de contracción, IP=Índice de plasticidad, G_s=gravedad específica. El valor indicado entre paréntesis fue obtenido con muestra secada al horno previamente

Los resultados obtenidos con los límites líquido y plástico son mostrados en la carta de plasticidad en la figura 5, en la que se observa que todas las muestras se encuentran por encima de la línea A, por lo que la mayoría fue de alta plasticidad.

Figura 5.

Carta de Plasticidad



Los ensayos de Veleta y de Penetrómetro de Cono se llevaron a cabo en las caras superior e inferior de las trece muestras inalteradas, excepto en el caso de la muestra M-4, en la que solo se registró los resultados de la cara inferior del cuerpo de prueba. Esto se debió a que el ensayo en la cara superior no cumplió con el tiempo de ruptura especificado en la norma ASTM D4648-16 (entre 2 a 3 minutos).

Después de la realización de los ensayos, se determinó la humedad de la sección ensayada. Un resumen de los resultados es mostrado en la tabla 2.

Tabla 2.

Resultados obtenidos en los ensayos de Penetrómetro de Cono y Veleta de Laboratorio

Ubicación	Muestra		Penetrómetro de cono		Veleta de laboratorio			w%
			h mm	Q/h ² kPa	S _u kPa	S _{ur} kPa	S _u /S _{ur}	
Posic (Rioja)	M-1	sup	5.3	27.6	6.9	1.0	7	221.93
		fon	7.1	15.7	7.1	1.1	6	229.55
Posic (Rioja)	M-2	sup	7.7	13.2	7.0	0.9	8	203.38
		fon	6.5	18.6	6.7	1	8	116.75
Posic (Rioja)	M-3	sup	3.2	75.1	31.7	4.9	6	89.86
		fon	3.5	65.3	41.6	8.4	5	72.13
Posic (Rioja)	M-4	fon	3.5	62.9	32.0	7.1	4	90.72
Jepelacio (Moyobamba)	M-5	sup	7.8	12.8	5.4	2.3	2	71.10
		fon	7.1	15.6	5.0	3.1	2	65.72
Jepelacio (Moyobamba)	M-6	sup	7.0	16.0	5.0	3.4	1	65.40
		fon	7.0	16.0	4.3	3.1	1	40.62
Jepelacio (Moyobamba)	M-7	sup	1.6	306.6	51.5	25.3	2	23.19
		fon	2.3	151.6	76.3	25.3	3	23.72
Jepelacio (Moyobamba)	M-8	sup	2.5	125.6	53.1	19.8	3	27.81
		fon	1.3	447.0	54.1	19.8	3	23.39
Moyobamba- Yantaló	M-9	sup	2.8	100.1	60.9	16.6	4	19.38
		fon	2.7	110.4	56.4	16.1	4	20.07
Moyobamba- Yantaló	M-10	sup	5.0	31.0	14.4	3.9	4	86.68
		fon	3.4	67.9	21.6	4.0	5	41.82
Moyobamba- Yantaló	M-11	sup	2.0	206.4	104.9	34.8	3	26.89
		fon	1.6	297.2	152.6	50.1	3	26.42
Moyobamba- Yantaló	M-12	sup	2.8	102.5	67.6	20.5	3	29.83
		fon	2.2	158.5	83.2	32.8	3	27.72
Rioja - La Perla de Cascayunga	M-13	sup	2.0	206.4	101.6	13.8	7	33.17
		fon	2.0	196.2	95.8	13.8	7	37.46

* h=profundidad de penetración del cono, Q=peso total del cono, S_u=resistencia no drenada, S_{ur}= resistencia no drenada residual, w=humedad

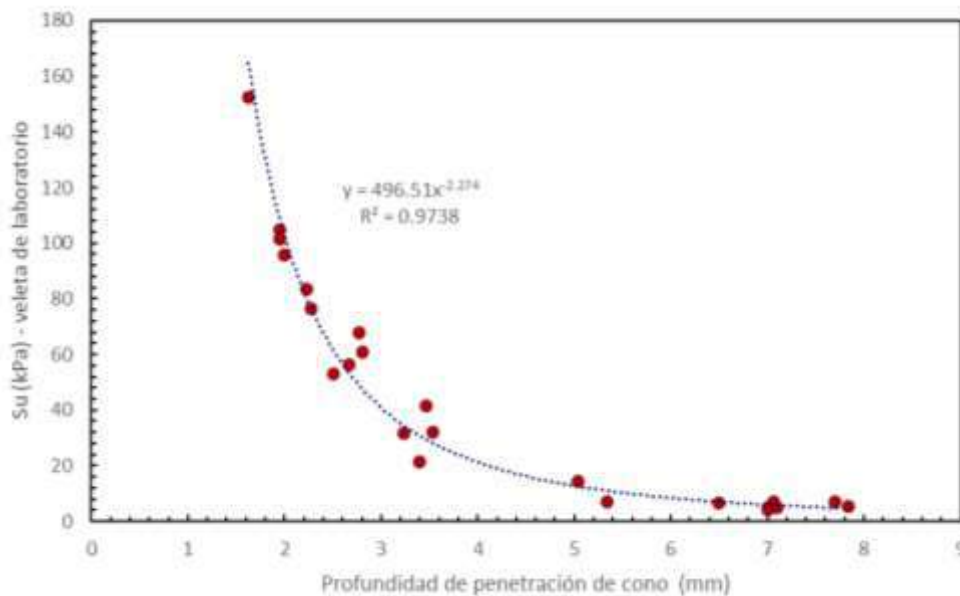
La resistencia no drenada obtenida de la veleta de laboratorio fue calculada mediante la Ec (1).

4. Discusión de resultados

Los resultados de los ensayos fueron comparados y se muestran en la figura 6. En este gráfico, se presenta la relación entre la profundidad de penetración del Penetrómetro de Cono y la resistencia no drenada medida con la Veleta de Laboratorio. La línea de tendencia que mejor se ajustó a los datos fue una función potencial, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.97, lo que indica una alta correlación entre los resultados obtenidos. En el gráfico, se observa que, a mayor profundidad de penetración, los valores de resistencia no drenada disminuyen.

Figura 6.

Relación entre la resistencia no drenada medida con la Veleta del Laboratorio y la profundidad de penetración del Cono



Según la ecuación lineal de Hansbo (Ec.1), se determina una relación lineal entre la inversa de la penetración del cono ($1/h^2$) y la resistencia al corte no drenada (S_u) medida en la veleta en miniatura de laboratorio. La figura 7 presenta la calibración del Penetrómetro de Cono, la pendiente representa el factor de cono, K , cuyo valor es 0.518. Se debe considerar que el peso del cono es igual a $Q=mg$, donde m es igual a 0.08 kg (80g), e incluye la masa del cono y el vástago, y g es 9.81 m/s^2 . Se observa una concordancia significativa entre los resultados experimentales y la expresión de Hansbo [13], respaldada por un coeficiente de correlación $R^2=0.978$. En la figura 8, se puede observar que existe una buena compatibilidad con los resultados obtenidos.

Figura 7.

Correlación entre la resistencia no drenada y la penetración del cono obtenida en la presente investigación, donde el fator de cono es $K=0.518$

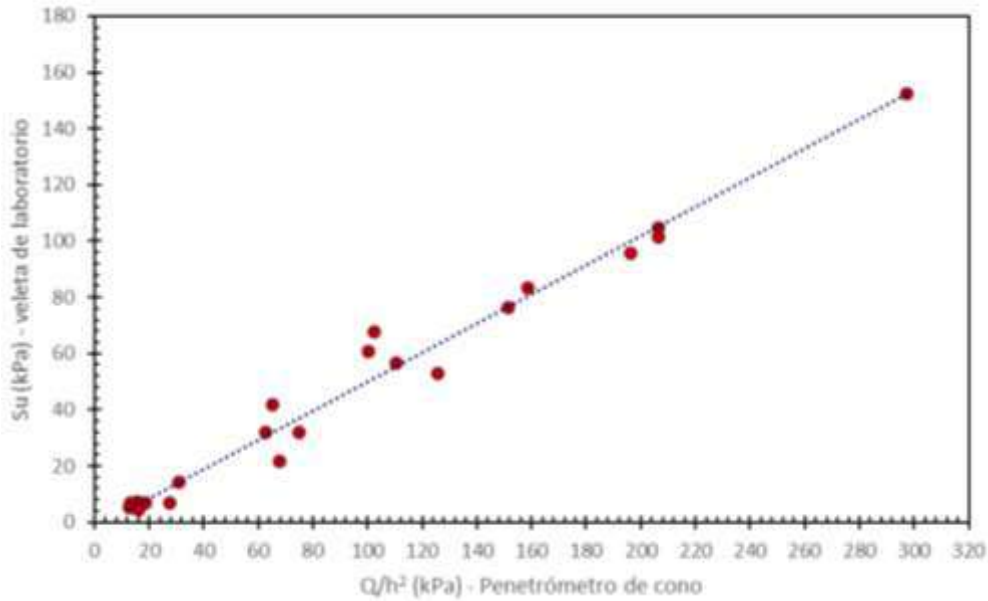
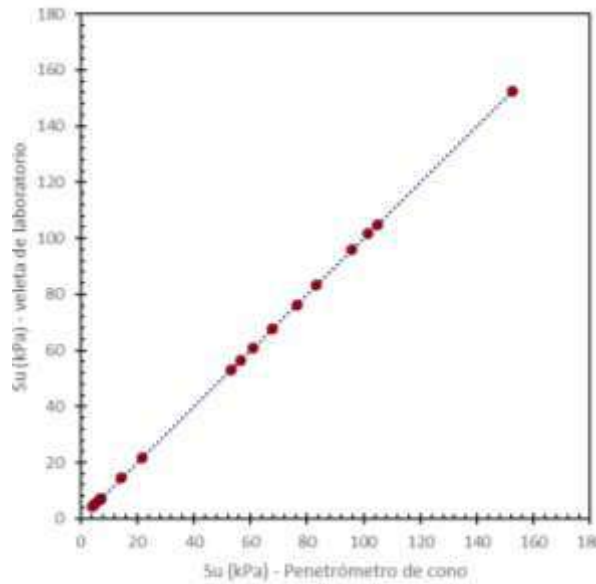


Figura 8.

Comparación de resistencia no drenada obtenida con Veleta de Laboratorio y Penetrómetro de Cono obtenida por la ecuación 1



El valor de K obtenido fue comparado con los valores encontrados por otros autores. Según la tabla 3, se observa que el valor obtenido es muy cercano al de O'Kelly [17] y Farias y Llano-Serba [19].

Tabla 3.

Factores de cono K obtenidos en diferentes estudios, comparados con el obtenido en la presente investigación

Investigador	K	R ²
Farias y Llano-Serna [19]	0.498	0.974
O'Kelly, B [17]	0.565	0.848
Zentar, R.; Abriak, N.; Dubois, V. [16]	0.380	0.945
Wood D. [2]	0.696	0.960
Gardiner, [24]	1.058	0.948
Karlsson, [1]	0.800	0.986
Presente Investigación (2023)	0.518	0.978

Nota: Adaptado de [25]

5. Conclusiones

- La investigación presenta una metodología sencilla para estimar la resistencia al corte no drenada utilizando el Ensayo Penetrómetro de Cono, un equipo accesible en los laboratorios del Perú. La metodología se basa en la relación entre la resistencia al corte no drenada (S_u) y la profundidad de penetración del cono, como propuso Hansbo en 1957.
- Es necesario destacar la importancia de una calibración previa y adecuada para determinar el factor de cono (K), ya que este parámetro depende mucho de la rugosidad superficial del cono. Asumir un valor de K, sin tomar en cuenta esta característica fundamental, puede conducir a resultados inexactos. En este estudio, la calibración del penetrómetro de cono se realizó utilizando los resultados de la profundidad de penetración (h) y la correspondiente resistencia al corte no drenada, resultante del ensayo de veleta en miniatura de laboratorio, y se obtuvo un valor de factor de cono de $K=0.518$ con un coeficiente de correlación $R^2=0.978$.
- El estudio demuestra que, con una calibración adecuada, el Penetrómetro de Cono es una herramienta confiable para estimar la resistencia al corte no drenada en arcillas. Aunque la validación respecto a los resultados de los ensayos de Veleta de Laboratorio es limitada, la simplicidad y el bajo costo del Penetrómetro hacen de esta metodología

una herramienta útil para obtener parámetros para un análisis de ingeniería preliminar. Además, la simplicidad del ensayo puede ser atractiva en aplicaciones de ingeniería que requieren análisis rápidos de arcillas saturadas.

6. Referencias

- [1] R. Karlsson, «Suggested improvements in the liquid limit test, with reference to flow properties of remolded clays,» de *Proceeding of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Paris, 1961.
- [2] D. M. Wood, «Some fall cone tests,» *Geotechnics*, vol. 35, n° 1, pp. 64-68, 1985.
- [3] P. Brown y M. Huxley, «The cone factor for a 30° cone,» *Ground Engineering*, vol. 29, n° 10, pp. 34-36, 1996.
- [4] G. Rajasekaran y N. Rao, «Falling cone method to measure the strength of marine clays,» *Ocean Engineering*, vol. 31, n° 14-15, pp. 1915-1927, 2004.
- [5] H. Tanaka, H. Hirabayashi, T. Matsuoka y H. Kaneko, «Use of fall cone test as measurement of shear strength for soft clay materials,» *Soils and foundations*, vol. 52, n° 4, pp. 590-599, 2012.
- [6] S. Lemos y P. Pires, «The undrained strength of soft clays determined from unconventional and conventional tests,» *Soils and Rocks*, vol. 40, n° 3, pp. 291-301, September-December 2017.
- [7] D. Wang, R. Zentar, N. Abriak y W. Xu, «Shear Strength Behavior of Cement/Lime-Solidified Dunkirk Sediments by Fall Cone Tests and Vane Shear Tests,» *Geotechnical Testing Journal*, vol. 36, n° 1, pp. 1-8, 2013.
- [8] C. Bastos, A. Alves, M. Pereira, K. Rosa, M. Viegas y E. De Jesus, «Estudo sobre a resistência não drenada de solos finos pelo ensaio de cone de queda livre empregando amostras de solos artificiais,» de *XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Goiana, 2014.
- [9] A. Gruchot y T. Zydron, «Impact of a test method on the undrained shear strength of a chosen fly ash,» *Journal of Ecological Engineering*, vol. 17, n° 4, pp. 41-49, Sept 2016.
- [10] C. Oliveira, L. Eichelberger, A. Alves y C. Bastos, «Resistencia não drenada de solos artificiais remoldados através do ensaio de cono e queda,» de *XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, COBRAMSENG 2018*, Salvador, Bahia, Brasil, 2018.
- [11] P. Pinto, A. Lima y B. Berkert, «Fall cone test applied to studies of plasticity and shear strength of artificial soils,» *Geotecnia*, n° 143, pp. 85-110, July 2018.

- [12] A. F. Cabalar, M. M. Khalaf y H. Isik, «A comparative study on the undrained shear strength results of fall cone and vane shear tests in sand–clay mixtures,» *Arab J Geosci*, p. 13:395, 2020.
- [13] S. Hansbo, A new approach to the determination of the shear strength of clay by the Fall-Cone test, Stockholm: Stockholm, 1957.
- [14] M. A. H. A. C. G. R. L. y. R. S. V. L. R. S. V. L. M. R. Escalaya Advíncula, «El ensayo penetrómetro de cono aplicado a la determinación de la resistencia a la corte no drenada de suelos de grano fino,» *Perfiles_Ingenieria*, vol. 19, nº 20, pp. 15-34, 2023.
- [15] T. Lu y W. Bryant, «Comparison of vane shear and fall cone strengths of soft marine clay,» *Marine Georesources & Geotechnology*, vol. 15, nº 1, pp. 67-82, 1997.
- [16] R. Zentar, N. Abriak y V. Dubois, «Fall cone test to characterize shear strength of organic sediments,» *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, vol. 135, nº 1, pp. 153-157, 2009.
- [17] B. O'Kelly, «Characterisation and undrained strength of amorphous clay,» *Proc. Inst. Civ. Eng. Geotech. Eng.*, vol. 167, nº 3, pp. 311-320, 2014.
- [18] S. Lemos, Estudo da resistência não drenada de solo de baixa consistência por meio de ensaios de campo e laboratório, Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, 2014.
- [19] M. Farias y L. S. M. A., «Simple methodology to obtain critical state parameters of remolded clays under normally consolidated conditions using the fall-cone test,» *Geotech. Test. J.*, vol. 39, nº 5, 2016.
- [20] M. A. Llano-Serna, M. Farias, D. Pedroso, D. Williams y D. Sheng, «Considerations on the experimental calibration of the fall cone test,» *Geotechnical Testing Journal*, 2018.
- [21] D. Canela y I. Fernandes, «Use of fall cone test for the determination of undrained shear strength of cohesive soil,» de *MATECWeb Conferences IPICSE*, 2018.
- [22] C. Clemente, V. Faro y M. Moncada, «Determination of the undrained shear strength by the fall cone method in marine soils,» de *International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS*, 2020.
- [23] Head, K and Epps, R, *Manual of Soil Laboratory Testing*, Scotland, UK: Whittles, 2011.
- [24] E. Gardiner, «Part II Project Report,» Cambridge University Engineering Department, United Kingdom, 1982.

[25] M. A. Llano-Serna y L. F. Contreras, «The effect of surface roughness and shear rate during fall-cone calibration,» Géotechnique, vol. Géotechnique, n° 4, pp. 1-11, 2020.

Trayectoria académica

Miriam Rosanna Escalaya Advíncula

Universidad Ricardo Palma, Perú.

Doctora en Ingeniería Civil en el Área de Especialización de Geotecnia de la Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro-Brasil, Maestra en Ciencias con Mención en Ingeniería Geotécnica de la Universidad Nacional de Ingeniería, Ingeniera Civil de la Universidad Nacional San Luis Gonzaga de Ica. Actualmente se desempeña como Especialista Geotécnica en la Empresa Jorge E. Alva Hurtado Ingenieros SAC, con gran experiencia en el área. Ejerce la actividad docente en el pregrado de la Facultad de Ingeniería Civil de las Universidad Ricardo Palma.

Autor corresponsal: miriam.escalaya@urp.edu.pe / m_escalaya@hotmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0620-8633>

Marco Antonio Hernández Aguilar

Universidad Ricardo Palma, Perú.

Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería Geotécnica por la Universidad Católica de Río de Janeiro - Brasil. 1993-1995. Ingeniero Civil CIP 064415, graduado en la Universidad Ricardo Palma 1985-199. Gerente General de Geo Master Ingenieros Consultores S.AC. Consultor Geotécnico de obras de Diseños de Presas de Relave, Estabilización de Taludes, Colocación y Monitoreo de Instrumentación Geotécnica de Campo, estudio y Evaluación de Capacidad Portante, Evaluación Geotécnica del subsuelo mediante perforaciones diamantinas, Estudios Geotécnicos para plantas de tratamientos de aguas residuales, agua de mina y depósitos de relaves, evaluación y diseños de pavimentos, trabajos geotécnicos para estudios hidrogeológicos, para tanques de combustibles. Ejerció la actividad docente en la Universidad San Ignacio de Loyola y Universidad Peruana de Ciencia Aplicadas. Actualmente es Docente Universitario de los cursos de Mecánica de Suelos I y II en el Pregrado de la Universidad Ricardo Palma.

marco.hernandez@urp.edu.pe

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1534-428X>

CIVIL

Uso del ensayo penetrómetro de cono en la determinación de la resistencia al corte no drenado de suelos arcillosos blandos de la región San Martín, Perú

César Giancarlo Rojas Llactas

Universidad Ricardo Palma, Perú.

Estudiante de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, de la Universidad Ricardo Palma, Perú. Colaborador en el desarrollo de Proyectos de Investigación Científica con enfoque en las especialidades de Mecánica de Suelos, Geotecnia y Cimentaciones.

201811351@urp.edu.pe

Orcid: <https://orcid.org/0009-0002-0180-1160>

Contribución de autoría

Miriam Escalaya Advíncula: Coordinación trabajos de campo y ensayos de laboratorio, discusión de resultados, redacción de artículo.

Marco Hernández Aguilar: Coordinación trabajos de campo, análisis y discusión de resultados.

César Rojas Llactas: Coordinación trabajos de campo, análisis y discusión de resultados.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflicto de intereses en el desarrollo de la presente investigación.

Responsabilidad ética y legal

El desarrollo de la investigación se realizó bajo la conformidad de los principios éticos del conocimiento, respetando la originalidad de la información y su autenticidad.

Declaración sobre el uso de LLM (Large Language Model)

Este artículo no ha utilizado para el desarrollo de la investigación textos provenientes de LLM (ChatGPT u otros).

CIVIL

Miriam Rosanna Escalaya Advíncula, Marco Antonio Hernández Aguilar, César Giancarlo Rojas Llactas

Financiamiento

La presente investigación ha sido financiada por el Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Ricardo Palma.

Agradecimiento

Al Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Ricardo Palma por financiamiento del Proyecto.

Correspondencia: miriam.escalaya@urp.edu.pe / m_escalaya@hotmail.com



Evaluation of exposure to Wi-Fi radiofrequency fields in indoor and outdoor environments in the Ricardo Palma University campus, Lima, Peru, using a personal exposimeter

Evaluación de la exposición a campos de radiofrecuencia Wi-Fi en ambientes interiores y exteriores en el campus de la Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú, utilizando un exposímetro personal

Víctor Cruz Ornetta, Jorge Ubillús Gonzales, Julio González Prado, Milton Marcelo Peña Calero, Manuel Enrique Isaías Pardo Rendon

RECIBIDO: 26 de abril de 2024.

ACEPTADO: 03 de junio de 2024.

Abstract

The objective of this study was to make an evaluation of Wi-Fi radiofrequency fields in campus of Ricardo Palma University in the Surco district, Lima, Perú using personal exposure meters. To carry it out a literature review was first made, then the location of the environments was defined. In total 96 outdoor and 10 indoor environments were selected. Subsequently, the exposure meter including the proprietary software for data processing was tested. The maximum contribution of Wi-Fi 2G and Wi-Fi 5G for outdoor environments by main frequency bands to average exposure were 1.83×10^{-6} and 3.39×10^{-5} W/m² respectively and the maximum contribution of Wi-Fi 2G and Wi-Fi 5G for indoor environments by main frequency bands to average exposure were 1.33×10^{-6} and 2.96×10^{-6} W/m² respectively. Based on the ICNIRP 1998 limits, the exposure quotients were also obtained the maximum contribution of Wi-Fi 2G and Wi-Fi 5G for outdoor environments by main frequency bands to average exposure were 1.83×10^{-5} and 3.39×10^{-4} % respectively and the maximum contribution of Wi-Fi 2G and Wi-Fi 5G for indoor environments by main frequency bands to average exposure were 1.33×10^{-5} and 2.96×10^{-5} W/m² respectively. In conclusion, all measurements made were well below international limits, for outdoor and indoor environments the largest contributor to total exposure was broadcasting services, the second largest were mobile phone base stations, for outdoor environments the third largest was Wi-Fi 5G and mobile phone handsets exposure was well below that of mobile phone base stations and for indoor environments the third largest was mobile handsets and the last one was Wi-Fi.

Keywords: electromagnetic field, non-ionizing radiation, radiofrequency field, exposimeter, microenvironment.

Cómo citar

V. Cruz Ornetta, J. Ubillús Gonzales, J. González Prado, M. M. Peña Calero, y M. E. I. Pardo Rendon, «Evaluation of exposure to Wi-Fi radiofrequency fields in indoor and outdoor environments in the Ricardo Palma University campus, Lima, Peru, using a personal exposimeter», *Perfiles_Ingenieria*, vol. 20, n.º 21, n.º 21, pp. 111-135, jun. 2024.

Resumen

El objetivo de este estudio fue realizar una evaluación de los campos de radiofrecuencia Wi-Fi en el campus de la Universidad Ricardo Palma en el distrito de Surco, Lima, Perú, utilizando exposímetros personales. Para esto, primero se realizó una revisión de la literatura, luego se definió la ubicación de los ambientes. En total, se seleccionaron 96 ambientes exteriores y 10 interiores. Posteriormente, se probó el exposímetro incluyendo el software propietario para el procesamiento de datos. La contribución máxima de Wi-Fi 2G y Wi-Fi 5G para ambientes exteriores por bandas de frecuencia principales a la exposición promedio fueron 1.83×10^{-6} y 3.39×10^{-5} W/m² respectivamente y la contribución máxima de Wi-Fi 2G y Wi-Fi 5G para ambientes interiores por bandas de frecuencia principales a la exposición promedio fueron 1.33×10^{-6} y 2.96×10^{-6} W/m² respectivamente. Con base en los límites ICNIRP 1998, también se obtuvieron los cocientes de exposición, la contribución máxima de Wi-Fi 2G y Wi-Fi 5G para entornos exteriores por bandas de frecuencia principales a la exposición promedio fueron 1.83×10^{-5} y 3.39×10^{-4} % respectivamente y la contribución máxima de Wi-Fi 2G y Wi-Fi 5G para entornos interiores por bandas de frecuencia principales a la exposición promedio fueron 1.33×10^{-5} y 2.96×10^{-5} W/m² respectivamente. En conclusión, todas las mediciones realizadas estuvieron muy por debajo de los límites internacionales, para entornos exteriores e interiores el mayor contribuyente a la exposición total fueron los servicios de radiodifusión, el segundo más grande fueron las estaciones base de telefonía móvil, para entornos exteriores el tercero más grande fue Wi-Fi 5G y la exposición de los teléfonos móviles fue muy inferior a la de las estaciones base de telefonía móvil y para entornos interiores el tercero más grande fueron los teléfonos móviles y el último fue Wi-Fi.

Palabras clave: campo electromagnético, radiación no ionizante, campo de radiofrecuencia, exposímetro, microambiente.

© Los autores. Este artículo Open Access está publicado bajo la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC-BY 4.0)



1. Introduction

Both in Peru and in the world, the growth of Internet access continues at an unstoppable pace, especially driven by mobile communications systems and wireless access via Wi-Fi systems. According to the Supervisory Body for Private Investment in Telecommunications (OSIPTEL) in Peru, in 2014-I there were 10.99 million mobile telephone lines with Internet access (mobile Internet) and in 2023-II there were 30.45 million mobile Internet lines. While the percentage of Internet access in homes due to fixed Internet is 39.4%, access due to mobile Internet is 48.7% [1] totaling almost 89% of homes with Internet access. In homes and corporate environments, as well as in free and paid public networks, Wi-Fi systems are used to connect to the Internet, whether fixed or mobile. According to the International Telecommunication Union (ITU) [2] (2024) global internet access via mobile networks in 2022 represented an average of 11 gigabytes per month but the broadband fixed network accounted for 257 gigabytes and these networks need to be complemented by Wi-Fi networks. Despite of these facts and the very important role of Wi-Fi networks for internet access there is an increasing concern about these networks, Therefore, in recent years, numerous studies and reviews have been performed on the effects of electromagnetic waves from Wi-Fi on people's health, giving controversial results so the concern is still a problem to be solved. Some of these studies are summarized below. Ait-Aissa et al. (2010) [3] carried out research on gliosis and apoptosis in young rat brains exposed in utero to Wi-Fi radiation which concluded that there was no significant difference between the levels of persistent astroglia activation or induction of apoptosis in the brain of young rats. Ait-Aissa et al. (2012) [4] conducted a research to evaluate immunological biomarkers in the serum of rats exposed to Wi-Fi signal in utero and postnatally exposed in utero to a Wi-Fi signal, concluding that no significant differences were observed for any of the antigens or isotypes at any of the exposure levels, there were also no significant differences in birth and growth of young rats. Ait-Aissa et al. (2013) [5] evaluated the bioeffects on the developing nervous system of young rodents from exposure to Wi-Fi signals and there was no induction of 3-NT formation or increased of HSP expression in the cerebral cortex and hippocampus of young rats. Bektas et al. (2020) [6] performed a study on the effects of radiofrequency radiation emitted by mobile phones and Wi-Fi systems and on umbilical cord blood and placenta concluding that the results indicated that exposure to mobile phones during pregnancy could have significant potential to cause oxidative stress and DNA damage in umbilical cord blood and placenta, while no negative effects were evident for exposure to Wi-Fi. In the case of combined exposure to mobile phones, the results of this study also indicated that combined effects of exposure to mobile phones + Wi-Fi show a contribution from Wi-Fi. Dasdag et al. (2015) [7] conducted a study to investigate the effects of long-term exposure to radiation from Wi-Fi systems on the testicles, concluding that 2.4 GHz Wi-Fi radiation affects testicular function and histology. Shokri et al. (2014) [8] carried out a research on the potential effects of short and long-term exposure to 2.45 GHz Wi-Fi radiation on the reproductive system of male rats, concluding that there was a decrease in sperm parameters in a time-dependent manner and the number of apoptosis-positive cells and caspase-3 activity increased in the seminiferous tubules of exposed rats.

The results of the research on health effects from Wi-Fi are controversial and the only established effects are the ones related to the increase in temperature caused by RF. The bulk of studies have been taken into account for the formulation of international recommendations on the

maximum permissible limits of exposure to non-ionizing radiation, published by the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) 2020 limits [9] which replaced the ICNIRP 1998 limits [10] and the International Institute of Electrical and Electronics Engineers [11].

To know the level of exposure to electromagnetic fields generated by telecommunications services in general and by Wi-Fi systems in particular, measurement campaigns are constantly carried out. These campaigns are carried out using expensive equipment, applying protocols recommended by international organizations such as the International Telecommunications Union [12], the International Institute of Electrical and Electronic Engineers [12] or national organizations such as the Ministry of Transport and Communications of Peru [13]. Basically, there are two types of methods to measure RF electromagnetic fields. First there were developed the fixed-location measurements and after that they were conducted dynamic methods using equipment for fixed-location RF field evaluations but mounted on a car in order to perform measurements along a route. This latter one evolved to measurements with portable exposure meters (PEM) performed along a route. Based on these two concepts currently there are different methods used for exposure evaluation: spot measurements, monitoring measurements, dynamic measurements, and personal measurements. One of the methods broadly used are the spot measurement [14], [15], [16], [17], [18] which is carried out by conducting measurements at selected places and specific time periods with devices located in fixed places. On the one hand, this method allows strict compliance with the protocols and the use of very good meters (broadband meters or selective band analyzers, but also personal exposure meters), which facilitates an accurate measurement of the specific contribution of different sources to the total environmental exposure. of RF-EMF, but on the other hand it has limited spatial resolution and does not consider the specific characteristics of personal exposure [18], [19]. Understanding these restrictions, and to more quickly and accurately characterize the level of radiation that people are exposed to in certain areas of interest, it is best to use a personal RF-EMF exposure assessment that is performed using personal meters. The RF exposure meters are small enough that participants can wear them on the waist and thus capture exposure to RF fields from various sources and situations in their daily lives, but they can also be used for performing spot measurements. Although the use of personal exposure meters (PEMs) is limited by the uncertainty of the measurement readings due to the participant's body, it is a cheaper choice to conduct spot measurements so the objective of this study was to made an spot evaluation of Wi-Fi radiofrequency fields in the campus of the Ricardo Palma University, Lima, Peru located at the Surco district in Lima city which in the central western part of Peru. using PEMs.

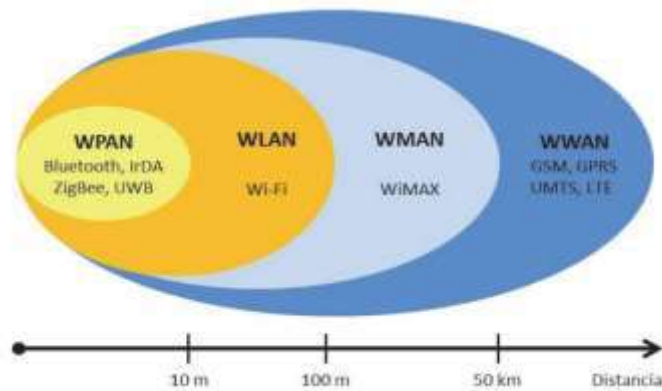
1.1. Characteristics of Wi-Fi networks

Wi-Fi is a wireless technology used to connect computers, tablets, smartphones, televisions, and other devices to the Internet. Consequently, a Wi-Fi network is a broadband radio local area network (RLAN) that allows the aforementioned devices to access the Internet through a router that acts as a hub to transmit the Internet signal to all its enabled devices. for Wi-Fi, connected directly to an Internet modem. This gives you the flexibility to stay connected to the Internet as long as you are within your network's coverage area. Personal Area Networks (PAN) cover a few meters, are for personal use and when developed with wireless networks, it is called Wireless Personal Area Network (WPAN). Wireless Local Area Networks (WLAN) are computer networks that allow communication

and data exchange between different devices over short distances (typically in the order of 100 m), which is why they are used for home and corporate networks, and They are basically implemented using Wi-Fi technology. A metropolitan area network (WMAN) is a computer network that connects computers in a metropolitan area, which can be a large city, several cities and towns, or any large area with several buildings and can cover distances of the order of 50 km. Wireless Wide Area Networks (WWAN) are computer networks that can interconnect several WLAN or WMAN networks that could all be in different physical locations and can be corporate networks for private use or belong to Internet Service Providers (ISP) to provide connection. to its clients (public service). Figure 1 shows the location of the Wi-Fi network within wireless technologies. Figure 2 shows the basic diagram of a Wi-Fi network, showing the router, access points and terminals that connect to the network.

Figure 1.

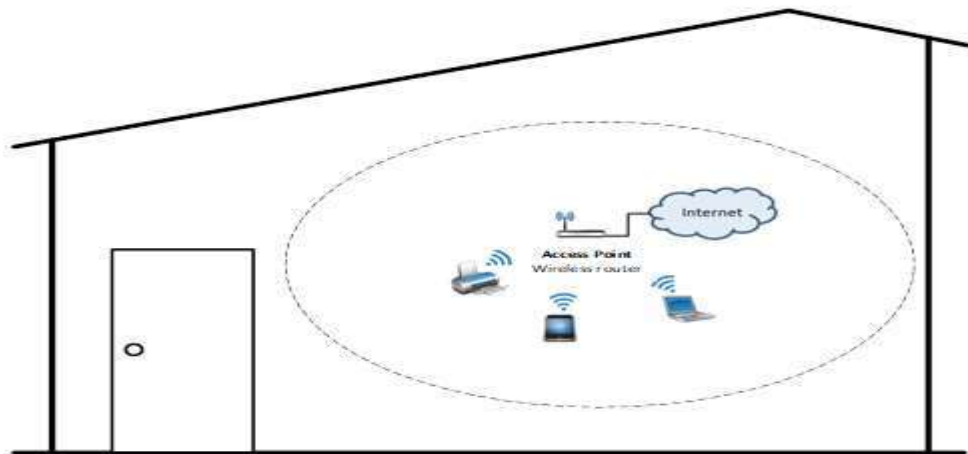
Classification of wireless networks by their range



Source: Techpedia [20]

Figure 2.

Scheme of Wi-Fi network at home



Source: Internetizado [21]

Recommendation ITU-R M.1450-5 [22] of the International Telecommunication Union (ITU) includes recommendations from the International Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), the European Telecommunications Standards Institute (ETSI) and the Association of Radio Industries and Businesses (ARIB) to standardize Wi-Fi systems with the aim of allowing cross-compatibility between various manufacturers and their compatibility with wired local area networks (LAN). Thus, current Wi-Fi systems work mainly in the unlicensed 2.4 and 5 GHz bands.

Due to this, Wi-Fi systems and their signals are present in almost all environments where the life of human beings takes place, at home, work, study centers, hospitals, buses, trains, ships, airplanes and many more; However, along with this great development and the tremendous utility associated with these systems, an important concern has arisen about the possible effects produced by electromagnetic waves from wireless communications systems, including Wi-Fi systems. In 2013, the International Agency for Research on Cancer (IARC) published volume 102 of the Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Human Beings in Chapter 6, Section 6.3 Global Evaluation classifies Radiofrequency Fields as belonging to Group 2B "Possible Carcinogenic to Human" [23] which increases the concern of the public and institutions about the possible health effects of wireless technologies in general and Wi-Fi systems in particular.

This recurring concern about the possible effects of Wi-Fi networks has given rise to numerous specific studies on the possible effects on people's health and the levels of exposure to radio frequency produced by Wi-Fi networks [3], [4], [5], [6], [7], [8]. Furthermore, according to the standard health risk assessment model adopted by the World Health Organization [24] it includes four main components: hazard identification, hazard characterization, exposure assessment and risk characterization. In other words, assessing the health risks of Wi-Fi networks involves an important component of exposure assessment. Worldwide, there are several studies to assess the Wi-Fi; however, there are few studies for Peruvian and Latin American Wi-Fi systems. That is why the objective of this study was to carry out an evaluation of radiofrequency including Wi-Fi radiation on the campus of the Ricardo Palma University. The present study aims to answer questions such as: Does the radiation from the Wi-Fi systems on the URP campus comply with the exposure limits to non-ionizing radiation recommended by the WHO? What is the contribution of Wi-Fi radiation to the total radio frequency radiation? What are the comparative levels of total radiofrequency radiation between faculties?

2. Literature review

Ramirez-Vazquez et al. (2020) [17] has carried out measurements of Wi-Fi radiation on a university in Aman, Jordania and found a 34.38 and 28.82 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ for spot and personal measurements (ICNIRP quotients for the general public of 3.45×10^{-4} and 2.88×10^{-4} % respectively). Ramirez-Vazquez et al. (2023) [25] has carried out measurements of Wi-Fi radiation on a university in Albacete, Spain and found a 6.36 and 30.5 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ for 2G and 5G respectively (ICNIRP quotients for the general public of 6.36×10^{-5} and 3.05×10^{-4} % respectively). Aminzadeh et al. (2016) [26] conducted measurements in Belgium on 5G Wi-Fi indoor exposure and found an average power density of 165.8 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ (an ICNIRP quotient for general public of 8.9×10^{-2} %). Bhatt et al., (2017)

[27] conducted Wi-Fi measurements in Melbourne, Australia and Ghent, Belgium finding an average electric field of 0.02 V/m (an ICNIRP quotient for the general public of $8 \times 10^{-2} \%$) for 2G Wi-Fi and the same value for 5G Wi-Fi. Bhatt et al., (2022) [28] performed Wi-Fi measurements in Melbourne, Australia and found a median electric field of 0.01 V/m (an ICNIRP quotient for the general public of $2 \times 10^{-5} \%$) for 2G Wi-Fi personal exposure and a median electric field of 0.016 V/m (an ICNIRP quotient for the general public of $5.12 \times 10^{-5} \%$) for 2G Wi-Fi environmental exposure. Birks L.E. et al. (2018) [29] conducted a study on personal exposure to Wi-Fi in Denmark, Slovenia, Spain, The Netherlands and Switzerland and found a median electric field of $1.8 \mu\text{W}/\text{m}^2$ (an ICNIRP quotient for the general public of $1.8 \times 10^{-5} \%$). Ramirez-Vasquez et al., 2020 [16] conducted a study of personal exposure to radiofrequency electromagnetic fields in outdoor and indoor school buildings, in Albacete, Spain and found the average exposure levels of 33.1 and $121 \mu\text{W}/\text{m}^2$ (ICNIRP quotients for the general public of 3.31×10^{-4} and $1.21 \times 10^{-4} \%$ respectively).

3. Materials and Methods

In order to perform this study, they were conducted the following steps:

3.1. Definition of environments and data collection

Measurements were made in indoor environments such as classrooms and the main library and outdoor environments inside faculties for not less than 6 minutes per area.

4. Study instruments

For practical reasons, a calibrated personal exposimeter EME Spy Evolution, MVG was used for the measurements. This small-sized equipment with an isotropic probe allows the evaluation of the individual contribution to the total level of non-ionizing radiation of the 20 services shown in table 1.

Table 1.*Telecommunication Services of Eme Spy Evolution [30]*

	Telecommunication Service	Minimum Frequency (MHz)	Maximum Frequency (MHz)
1	FM	88	108
2	TV-VHF	174	216
3	TV-UHF	470	644
4	LTE Band 12 UL	698	716
5	LTE Band 12 DL	728	746
6	LTE Band 13 DL	746	756
7	LTE Band 13 UL	777	787
8	LTE Band 26 UL	814	849
9	LTE Band 26 DL	859	894
10	ISM/Intelligent Meters	902	928
11	LTE Band 4 UL	1710	1755
12	LTE Band 25 UL	1850	1915
13	DECT 6.0	1920	1930
14	LTE Band 25 DL	1930	1995
15	LTE Band 4 DL	2110	2155
16	LTE Band 40	2300	2400
17	Wi-Fi 2G	2400	2483
18	LTE Banda 7 UL	2500	2570
19	LTE Banda 7 DL	2620	2690
20	Wi-Fi__33 5G	5150	5850

5. Limits Used to Evaluate evaluate the Exposure to NIR

On July 6, 2003, the Ministry of Transports and Communications of Peru issued “The Maximum Permissible Limits of Non-Ionizing Radiation in Telecommunications” [13] by means of Supreme Decree No. 038-2003-MTC, which are based on the ICNIRP reference levels 1998[9] and considers not only general public exposure but also occupational exposure in the frequency range 9 kHz to 300 GHz. In the frequency range used to carry out this study, the new ICNIRP reference levels 2020 are the same as those of ICNIRP 1998 (see table 2), so the ICNIRP 2020 compliance criteria [10] are the same used for the ICNIRP 1998 guidelines.

Table 2.

Peruvian Maximum Permissible Limits FOR Non-Ionizing Radiation (rms values)

	Frequency Range	E (V/m)	H (A/m)	Seq (W/m ²)
Occupational Exposure	9 – 65 kHz	610	24.4	-
	0.065 – 1MHz	610	1.6/f	-
	1 – 10 MHz	610/f	1.6/f	-
	10 – 400 MHz	61	0.16	10
	400 – 2000 MHz	3f ^{0.5}	0.008 × f ^{0.5}	f/40
	2 – 300 GHz	137	0.36	50
Population Exposure	9– 150 kHz	87	5	-
	0.15 – 1MHz	87	0.73/f	-
	1 – 10 MHz	87/f ^{0.5}	0.73/f	-
	10 – 400 MHz	28	0.073	2
	400 – 2000 MHz	1.375f ^{0.5}	0.0037 × f ^{0.5}	f/200
	2 – 300 GHz	61	0.16	10

Table 3 shows the values of the Maximum Permissible Limits of Non-Ionizing Radiations of Telecommunications Services that can be evaluated by EME SPY Evolution.

6. Exposure to Multiple Frequencies

The level of exposure to NIR emitted on a single frequency could be expressed through a parameter called “exposure quotient”. As it can be seen in equation (1) its value is given by the quotient of the measured power density (S_{measured}) and the power density limit (S_{limit}) (ICNIRP, 1998).

$$\text{Exp quotient} = \frac{S_{\text{measured}}}{S_{\text{limit}}} \quad (1)$$

As it can be seen in the equations (2) and (3) the exposure quotient can be expressed in terms of the measured.

7. Exposure Quotient

The level of exposure to NIR emitted on a single frequency could be expressed through a parameter called “exposure quotient”. As it can be seen in equation (1) its value is given by the quotient of the measured power density (S_{measured}) and the power density limit (S_{limit}) (ICNIRP, 1998).

$$\text{Exp quotient} = \frac{S_{\text{measured}}}{S_{\text{limit}}} \quad (1)$$

Table 3.

General public limits for services measured by Eme Spy Evolution

	Service	Frequency band (MHz)	Mid Band Frequency (MHz)	Seq (W/m ²)
1	FM	88-108	98	2.000
2	TV-VHF	174-216	195	2.000
3	TV-UHF	470-644	557	2.785
4	LTE Band 12 UL	698-716	707	3.535
5	LTE Band 12 DL	728-746	737	3.685
6	LTE Band 13 DL	746-756	751	3.755
7	LTE Band 13 UL	777-787	782	3.910
8	LTE Band 26 UL	814	849	4.158
9	LTE Band 26 DL	859	894	4.383
10	ISM/Intelligent Meters	902-928	915	4.575
11	LTE Band 4 UL	1710-1755	1732.5	8.663
12	LTE Band 25 UL	1850	1915	9.413
13	DECT 6.0	1920	1930	9.625
14	LTE Band 25 DL	1930	1995	9.813
15	LTE Band 4 DL	2110-2155	2132.5	10.000
16	LTE Band 40	2300-2400	2350	10.000
17	Wi-Fi 2G	2400-2483	2441.5	10.000
18	LTE Band 7 UL	2500-2570	2535	10.000
19	LTE Band 7 DL	2620-2690	2655	10.000
20	Wi-Fi 5G	5150-5850	5500	10.000

As it can be seen in the equations (2) and (3) the exposure quotient can be expressed in terms of the measured electric field strength (E_{measured}) and the field strength limit (E_{limit}). If the magnetic field were measured, the same expression would be used,

$$\text{Exp quotient} = \left(\frac{E_{\text{measured}}}{E_{\text{limit}}} \right)^2 \quad (2)$$

$$\text{Exp quotient} = \left(\frac{H_{\text{measured}}}{H_{\text{limit}}} \right)^2 \quad (3)$$

8. Exposure Quotient to Multiple Frequencies

The multi-frequency exposure ratio can be expressed in terms of the measured electric field strength for each frequency ($E_{i\text{-measured}}$) and the electric field strength limit ($E_{i\text{-limit}}$) or in terms of the measured magnetic field strength for each frequency ($H_{i\text{-measured}}$) and the magnetic field strength limit ($H_{i\text{-limit}}$) (Equations (4) and (5)).

$$\text{Exp quotient} = \sum_{i>1\text{MHz}}^{300\text{GHz}} \left(\frac{E_{i\text{-measured}}}{E_{i\text{-limit}}} \right)^2 \quad (4)$$

$$\text{Exp quotient} = \sum_{i>1\text{MHz}}^{300\text{GHz}} \left(\frac{H_{i\text{-measured}}}{H_{i\text{-limit}}} \right)^2 \quad (5)$$

9. Preparation of the equipment

Before starting the evaluation, the equipment was configured to record the measurements values: electric field strength (V/m), power density (mW/cm^2 , W/m^2), exposure quotient (general public and occupational) values every 5 seconds. This allows simultaneous evaluation of the services shown in Table 1. The equipment was placed on the tripod, and it was then activated. Simultaneously, the whole measurements values were recorded, as well as the position using a GPS. Each measurement lasted 6 minutes.

10. Selection of locations

The places where the measurements would be carried out in the different faculties were identified and selected. The criteria considered for this purpose was to choose the points below the access points.

Table 4 shows the number of points evaluated in each faculty, classified according to the type of environment. In total were evaluated 106 points: 96 outdoor and 10 indoor.

Table 4.

Number of locations Evaluated

Faculty/Type of measurement	Indoor	Outdoor
Architecture and Urban Planning	2	15
Biological Sciences	-	15
Economics and Business	1	13
Engineering	4	14
Human Medicine	3	9
Humanities and Modern Languages /Psychology	-	17
Pavilion G	-	13
TOTAL	10	96

11. Results and Discussion

11.1. Results

These measurements included different telecommunications services and systems such as broadcasting, mobile telephony and Wi-Fi.

Figure 3 shows the mean of the power density (W/m²) for outdoor environments by main frequency bands. The contribution of Wi-Fi 2G and Wi-Fi 5G were 1.83×10^{-6} and 3.39×10^{-5} W/m² respectively.

Figure 3.

Average exposure by main frequency bands for outdoor environments (W/m2)

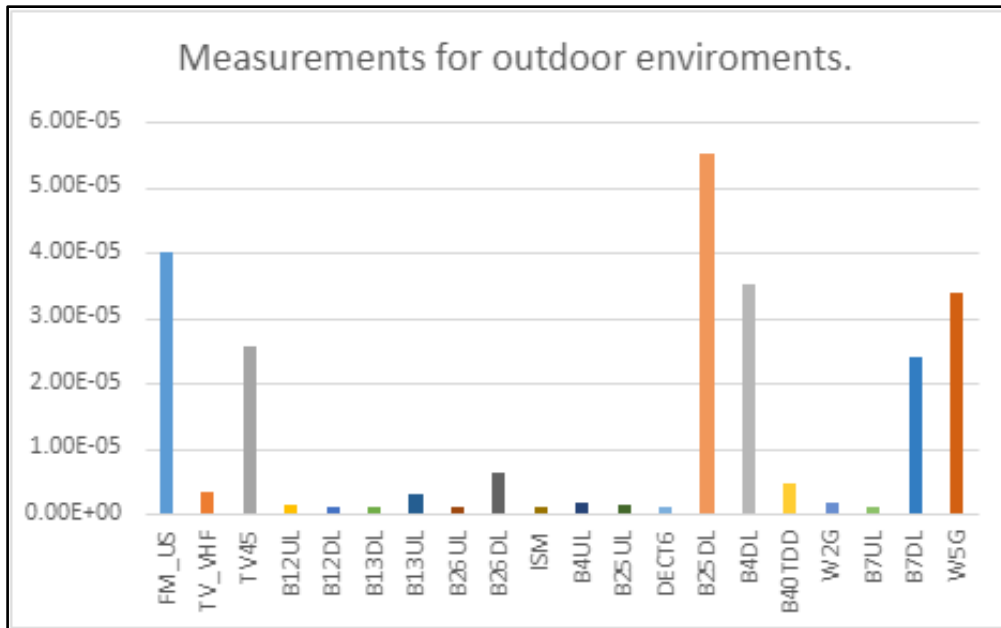


Figure 4 shows the mean of the power density (W/m2) for indoor environments by main frequency bands. The contribution of Wi-Fi 2G and Wi-Fi 5G were 1.33×10^{-6} and 2.96×10^{-6} W/m2 respectively.

Figure 4.

Average exposure by main frequency bands for indoor environments (W/m2)

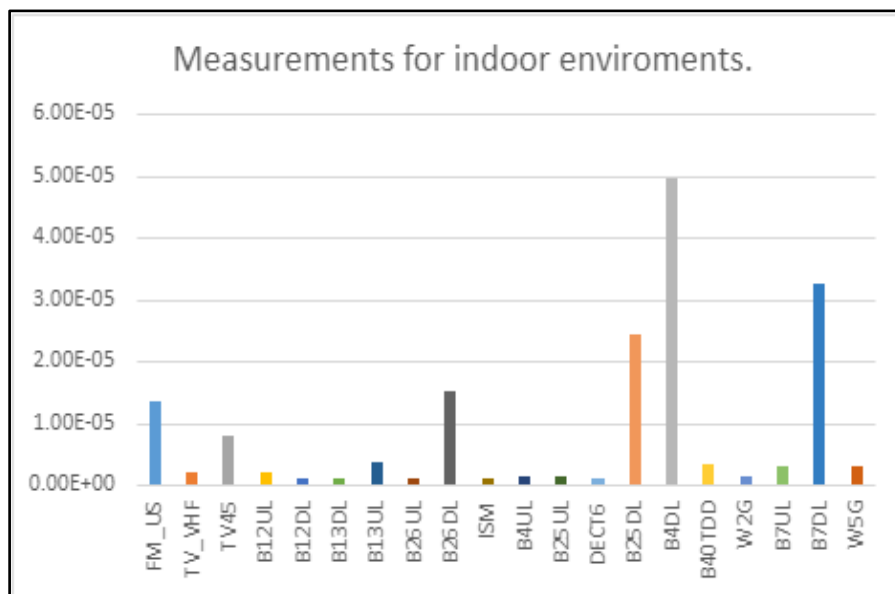
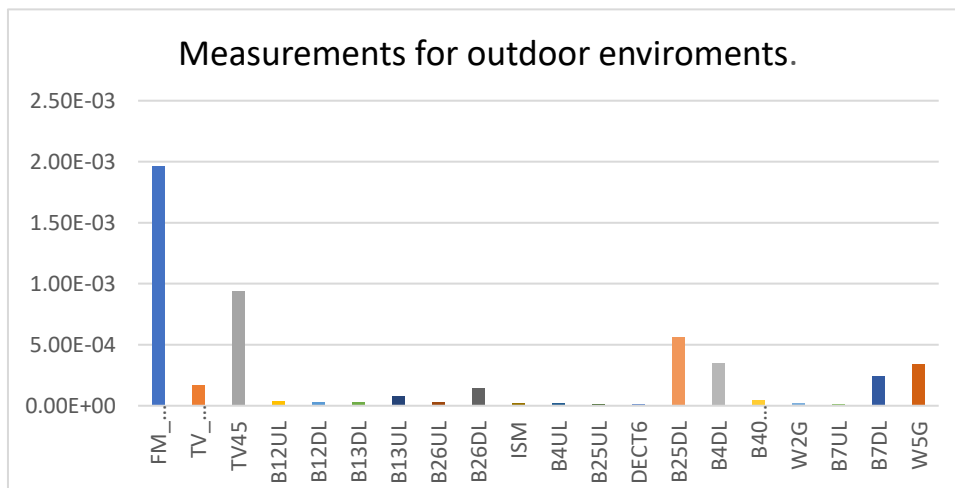


Figure 5 shows the mean General Public Exposure (%) for outdoor environments by main frequency bands. The contribution of Wi-Fi 2G and Wi-Fi 5G were $1.83 \times 10^{-5} \%$ and $3.39 \times 10^{-4} \%$ respectively.

Figure 5.

Average exposure by main frequency bands for outdoor environments (%)*

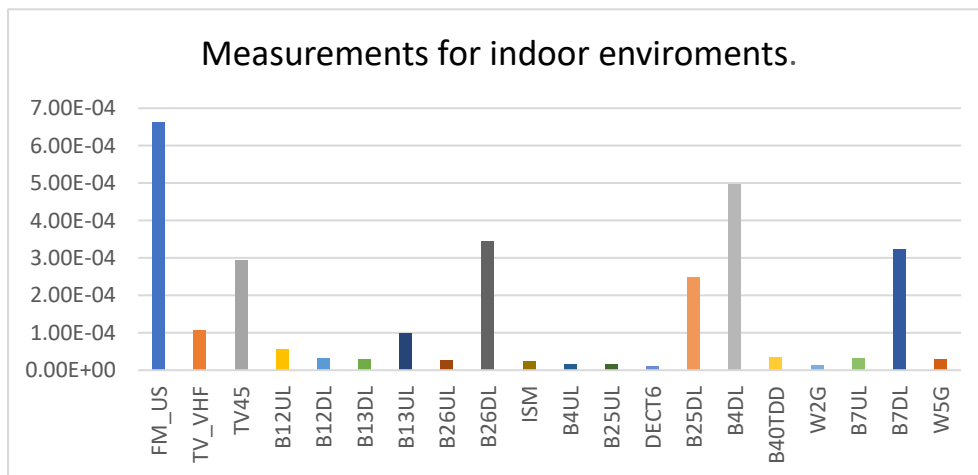


*The percentage is about the ICNIRP population reference levels

Figure 6 shows the mean General Public Exposure (%*) for indoor environments by main frequency bands. The contribution of Wi-Fi 2G and Wi-Fi 5G were $1.33 \times 10^{-5} \%$ and $2.96 \times 10^{-5} \%$ respectively.

Figure 6.

Average exposure by main frequency bands for indoor environments (%)*

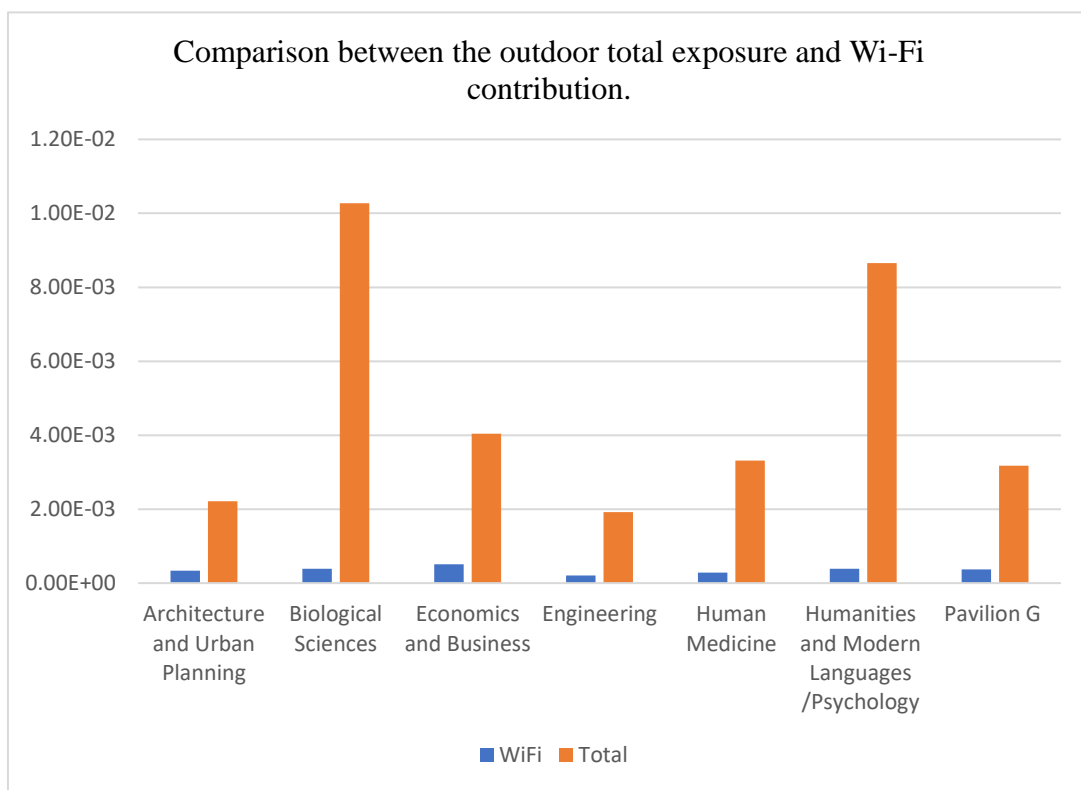


*The percentage is about the ICNIRP population reference levels

Figure 7 shows a comparative graph of total exposure and Wi-Fi contribution to General Public Exposure (%) in outdoor environments by faculties. The maximum value of the total exposure was 1.03×10^{-2} % for the Faculty of Biological Sciences and of the Wi-Fi contribution was 5.08×10^{-4} % for the Faculty of Economics and Business.

Figure 7.

Comparative of the total and Wi-Fi contribution average exposure by faculties for outdoor environments (%)*

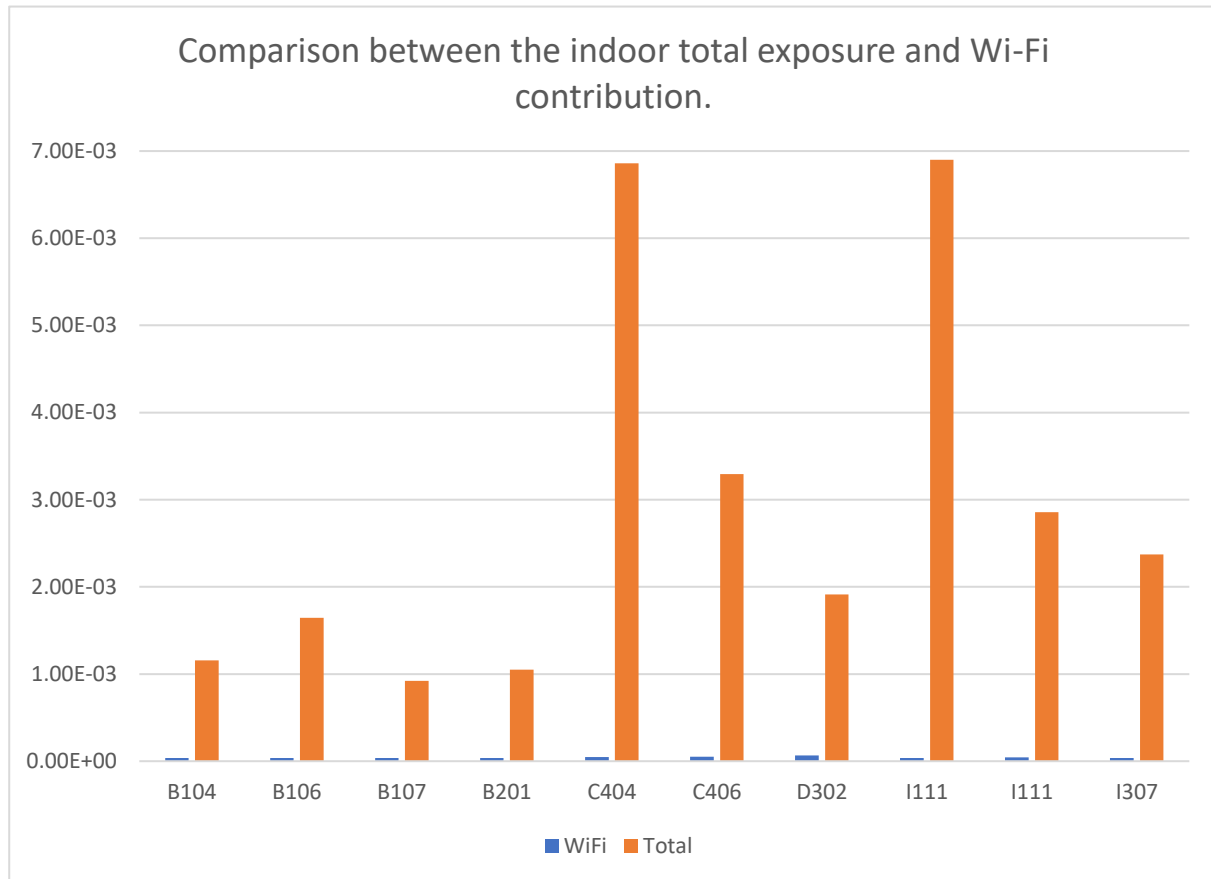


*The percentage is about the ICNIRP population reference levels

Figure 8 shows a comparative graph of the total exposure and the Wi-Fi contribution to General Public Exposure (%) in outdoor environments by faculties. The maximum value of the total exposure was 1.03×10^{-2} % for the Faculty of Biological Sciences and of the Wi-Fi contribution was 5.08×10^{-4} % for the Faculty of Economics and Business.

Figure 8.

Comparative of the total and Wi-Fi contribution average exposure by classrooms for indoor environments (%)*

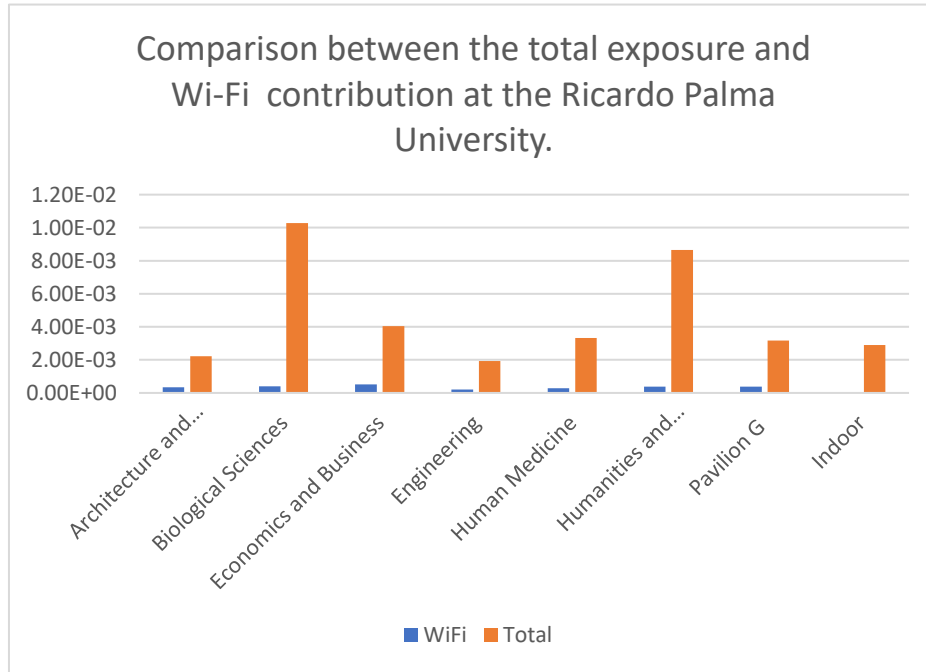


*The percentage is about the ICNIRP population reference levels

Figure 9 presents a comparative of the total and Wi-Fi contribution to average exposure by faculties and indoor measurements (%*).

Figure 9.

Comparative of the total and Wi-Fi contribution average exposure by faculties and indoor measurements (%)*



*The percentage is with reg to the ICNIRP population reference levels

11.2. Discussion

In this study, a personal exposure meter (PEM) was used to perform the measurements and a 5-s interval was used to simultaneously measure more frequency bands (20). It was the same interval used by Ramirez-Vasquez at the University of Castilla-La Mancha in Albacete, Spain [25], different from the studies by Ramirez-Vasquez at the German Jordanian University, Amman, Jordan, Sagar et al. [19] in Switzerland, and Aminzadeh et al. (2016) [26] in Belgium that used a 4-second interval between two measurements. It was also different from Bhatt et al., (2017) [27] in Melbourne, Australia and Ghent, Belgium, which used a 3-second interval.

In the Ricardo Palma University research, the maximum of the average exposure by faculties of Wi-Fi 2G and Wi-Fi 5G contributions were 1.83×10^{-5} and 3.39×10^{-4} % respectively, which are of the same order of the values found by the study of Ramirez-Vazquez et al., (2020) [17] at a university in Aman, Jordania (Wi-Fi contribution to average exposure of 3.45×10^{-4} % for spot measurements). Ramirez-Vazquez et al., (2023) [25] found at a university in Albacete, Spain a 2G and 5G contribution of 6.36×10^{-5} and 3.05×10^{-4} % respectively which are nearly the same values found in the URP study.

12. Conclusion

Spot measurements made with personal exposure meters have proven to be very useful for making measurements in larger areas than spot measurements with an interesting trade-off between technical and economic factors.

All the measurements made were well below the international limits, as in other studies worldwide.

As in most studies in Peru the largest contributor to total exposure was broadcasting services. The second largest were mobile phone base stations.

Exposure from mobile phone handsets was well below the exposure of mobile phone base stations as it was in several studies performed worldwide.

The contribution of Wi-Fi radiation to total RF exposure is typically one of the smallest. For outdoor environments, the third highest was 5G Wi-Fi, and for indoor environments, the lowest was Wi-Fi.

13. References

- [1] PUNKU, “Reportes. Reportes por servicios. Servicio de Internet,” 2023.
- [2] ITU/UN tech agency, “Measuring Digital Development - Facts and Figures 2023 - ITU Hub.”
- [3] S. Aït-Aïssa *et al.*, “In situ detection of gliosis and apoptosis in the brains of young rats exposed in utero to a Wi-Fi signal,” *C R Phys*, vol. 11, no. 9–10, pp. 592–601, Nov. 2010, doi: 10.1016/j.crhy.2010.10.005.
- [4] S. Aït-Aïssa *et al.*, “In utero and early-life exposure of rats to a Wi-Fi signal: Screening of immune markers in sera and gestational outcome,” *Bioelectromagnetics*, vol. 33, no. 5, pp. 410–420, Jul. 2012, doi: 10.1002/bem.21699.
- [5] S. Aït-Aïssa *et al.*, “*In Situ* Expression of Heat-Shock Proteins and 3-Nitrotyrosine in Brains of Young Rats Exposed to a WiFi Signal *In Utero* and In Early Life,” *Radiat Res*, vol. 179, no. 6, pp. 707–716, Jun. 2013, doi: 10.1667/RR2995.1.

- [6] H. Bektas, S. Dasdag, and M. S. Bektas, "Comparison of effects of 2.4 GHz Wi-Fi and mobile phone exposure on human placenta and cord blood," *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, vol. 34, no. 1, pp. 154–162, Jan. 2020, doi: 10.1080/13102818.2020.1725639.
- [7] S. Dasdag, M. Taş, M. Z. Akdag, and K. Yegin, "Effect of long-term exposure of 2.4 GHz radiofrequency radiation emitted from Wi-Fi equipment on testes functions," *Electromagn Biol Med*, vol. 34, no. 1, pp. 37–42, Jan. 2015, doi: 10.3109/15368378.2013.869752.
- [8] S. Shokri, A. Soltani, M. Kazemi, D. Sardari, and F. B. Mofrad, "Effects of Wi-Fi (2.45 GHz) Exposure on Apoptosis, Sperm Parameters and Testicular Histomorphometry in Rats: A Time Course Study," *Cell J*, vol. 17, no. 2, pp. 322–331, 2015.
- [9] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, "Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz)," *Health Phys*, vol. 118, no. 5, pp. 483–524, May 2020, doi: 10.1097/HP.0000000000001210.
- [10] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection.," *Health Phys*, vol. 74, no. 4, pp. 494–522, Apr. 1998.
- [11] IEEE, "IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz," *IEEE Std C95.1-1991*, pp. 1–76, 1992, doi: 10.1109/IEEESTD.1992.101091.
- [12] International Telecommunication Union, "Guidance on complying with limits for human exposure to electromagnetic fields," no. K.52 (06/2021). pp. 1–44, 2021. [Online]. Available: <https://handle.itu.int/11.1002/1000/14724-en?locatt=format:pdf&auth>
- [13] Ministerio de Transportes y Comunicaciones, "Decreto Supremo n.º 038-2003-MTC." [Online]. Available: <https://www.gob.pe/institucion/mtc/normas-legales/308749-038-2003-mtc>
- [14] J. Tomitsch, E. Dechant, and W. Frank, "Survey of electromagnetic field exposure in bedrooms of residences in lower Austria," *Bioelectromagnetics*, vol. 31, no. 3, pp. 200–208, Apr. 2010, doi: 10.1002/bem.20548.
- [15] L. Verloock, W. Joseph, F. Goeminne, L. Martens, M. Verlaek, and K. Constandt, "Temporal 24-hour assessment of radio frequency exposure in schools and homes," *Measurement*, vol. 56, pp. 50–57, Oct. 2014, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2014.06.012.

- [16] R. Ramirez-Vazquez, I. Escobar, A. Thielens, and E. Arribas, “Measurements and Analysis of Personal Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields at Outdoor and Indoor School Buildings: A Case Study at a Spanish School,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 195692–195702, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3033800.
- [17] R. Ramirez-Vazquez *et al.*, “Georeferencing of Personal Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields from Wi-Fi in a University Area,” *Int J Environ Res Public Health*, vol. 17, no. 6, p. 1898, Mar. 2020, doi: 10.3390/ijerph17061898.
- [18] V. Cruz Ornetta *et al.*, “Evaluación de radiaciones no ionizantes de la red Wi-Fi en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos,” *Theorēma (Lima, Segunda época, En línea)*, no. 3, pp. 119–132, Jun. 2016, [Online]. <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/Theo/article/view/11982>
- [19] S. Sagar, B. Struchen, V. Finta, M. Eeftens, and M. Röösl, “Use of portable exposimeters to monitor radiofrequency electromagnetic field exposure in the everyday environment,” *Environ Res*, vol. 150, pp. 289–298, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.envres.2016.06.020.
- [20] Techpedia, “Redes inalámbricas.” [Online]. Available: <https://techpedia.fel.cvut.cz/html/frame.php?oid=9&pid=1003&finf=>
- [21] E. G. Del Olmo, “Red ad hoc inalámbrica: qué es, cómo crearla, usos y características.” Apr. 2023. [Online]. Available: <https://www.internetizado.com/red-ad-hoc>
- [22] International Telecommunication Union, “Recommendation ITU-R M.1450-5 Characteristics of broadband radio local area networks,” Apr. 2014. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/recommendation.asp?lang=en&parent=R-REC-M.1450-5-201404-I>
- [23] IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, “Non-ionizing radiation, Part 2: Radiofrequency electromagnetic fields.,” *IARC Monogr Eval Carcinog Risks Hum*, vol. 102, no. Pt 2, pp. 1–460, 2013.
- [24] World Health Organization, *Establishing a Dialogue on Risks from Electromagnetic Fields*. World Health Organization, 2002.
- [25] R. Ramirez-Vazquez, I. Escobar, A. Martinez-Plaza, and E. Arribas, “Comparison of personal exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields from Wi-Fi in a Spanish university over three years,” *Science of The Total Environment*, vol. 858, p. 160008, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2022.160008.

- [26] R. Aminzadeh *et al.*, “On-body calibration and measurements using personal radiofrequency exposimeters in indoor diffuse and specular environments,” *Bioelectromagnetics*, vol. 37, no. 5, pp. 298–309, Apr. 2016.
- [27] C. R. Bhatt, M. Redmayne, B. Billah, M. J. Abramson, and G. Benke, “Radiofrequency-electromagnetic field exposures in kindergarten children,” *J Expo Sci Environ Epidemiol*, vol. 27, no. 5, pp. 497–504, Sep. 2017, doi: 10.1038/jes.2016.55.
- [28] C. R. Bhatt, S. Henderson, C. Brzozek, and G. Benke, “Instruments to measure environmental and personal radiofrequency-electromagnetic field exposures: an update,” *Phys Eng Sci Med*, vol. 45, no. 3, pp. 687–704, Sep. 2022, doi: 10.1007/s13246-022-01146-y.
- [29] L. E. Birks *et al.*, “Spatial and temporal variability of personal environmental exposure to radio frequency electromagnetic fields in children in Europe,” *Environ Int*, vol. 117, pp. 204–214, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.envint.2018.04.026.
- [30] MVG, “EME Spy Evolution: Public RF Safety.” [Online]. Available: <https://www.mvg-world.com/en/products/rf-safety/public-rf-safety/eme-spy-evolution>

Trayectoria académica

Víctor Manuel Cruz Ornetta

Universidad Ricardo Palma, Perú.

Profesor Principal de la Universidad Ricardo Palma y de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú, Doctor en Ciencias Ambientales. Profesor Principal, Facultad de Ingeniería, Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú y Profesor Principal, Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

Autor corresponsal: victor.cruz@urp.edu.pe

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4353-7751>

Jorge Paúl Ubillús Gonzales

Universidad Ricardo Palma, Perú.

Académico Profesional de Electrónica de la Universidad Ricardo Palma. Ha sido miembro de la Escuela Profesional de Electrónica, jefe del Laboratorio de Sistemas Digitales, jefe de la Oficina de Bienes y Servicios de la Facultad de Ingeniería, director de la Escuela Académico Profesional de Electrónica y director de la Oficina Central de Informática y Cómputo de la Universidad Ricardo Palma.

jorge.ubillus@urp.edu.pe

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6156-6663>

Julio César González Prado

Universidad Ricardo Palma, Perú.

Ingeniero electrónico por la Universidad Nacional de Ingeniería maestro en Ciencias de la Electrónica con mención en Control y Automatización por la universidad nacional del callao. Maestro en docencia superior por la Universidad Ricardo Palma. Estudios concluidos de doctorado en Ingeniería Eléctrica por la universidad nacional del callao. Docente de la Universidad Ricardo palma de la carrera de

Electrónica

Evaluation of exposure to Wi-Fi radiofrequency fields in indoor and outdoor environments in the Ricardo Palma University campus, Lima, Peru, using a personal exposimeter

Ingeniería Electrónica e Ingeniería Mecatrónica. Áreas de interés: sistemas digitales y microelectrónica.

julio.gonzalez@urp.edu.pe

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0384-7015>

Milton Marcelo Peña Calero

Universidad Ricardo Palma, Perú.

Estudiante del 7mo ciclo de la carrera de Ingeniería Electrónica de la Universidad Ricardo Palma.

202120442@urp.edu.pe

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0384-7015>

Manuel Enrique Isaías Pardo Rendon

Universidad Ricardo Palma, Perú.

Estudiante del 6to ciclo de la carrera de Ingeniería Electrónica de la Universidad Ricardo Palma.

202111266@urp.edu.pe

Orcid: <https://orcid.org/202111266@urp.edu.pe>

Contribución de autoría

Víctor Cruz Ornetta: Diseñó, participó en las mediciones, análisis de datos, redacción y aprobación de este artículo.

Jorge Paúl Ubillús Gonzales: participó en las mediciones, análisis de datos, redacción y aprobación de este artículo.

Julio César González Prado: participó en las mediciones, análisis de datos y en la redacción de este artículo.

Milton Marcelo Peña Calero: Participó en las mediciones, análisis de datos y redacción de este artículo.

Manuel Enrique Isafas Pardo Rendon: participó en las mediciones, análisis de datos y redacción de este artículo.

Conflicto de intereses

Los autores expresan que no existen conflicto de intereses en el desarrollo de la presente investigación.

Responsabilidad ética y legal

El desarrollo de la investigación se realizó bajo la conformidad de los principios éticos del conocimiento, respetando la originalidad de la información y su autenticidad.

Declaración sobre el uso de LLM (Large Language Model)

Este artículo no ha utilizado para el desarrollo de la investigación textos provenientes de LLM (ChatGPT u otros).

Financiamiento

La presente investigación ha sido financiada por el Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Ricardo Palma.

Agradecimiento

Al Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Ricardo Palma por financiamiento del Proyecto.

Correspondencia: victor.cruz@urp.edu.pe



First steps using FPGA technology

Primeros pasos usando la tecnología FPGA

Pedro Selencio, Landaeta Herrera

RECIBIDO: 15 de febrero de 2024.

ACEPTADO: 20 de mayo de 2024.

Abstract

This research has as main objective to show in a general way the FPGA technology, Field Programmable Gate Array – Arrangement of programmable Gates on the Chip. We will talk here about its architecture, manufacturing companies, description of a simple circuit using VHDL, Very High Speed Hardware Description Language, Quartus II Software and the INTEL Cyclone II card. A simple combinational logic circuit was used to carry out the simulation with the Quartus II software. Leaving everything clearly indicated to carry out larger projects. The results of the study show that the graphs obtained as a response of the circuit studied were as expected, and also that the properties of the software under study could be verified. The general characteristics of the FPGA technology were studied. The basic functions of the Quartus II software were known to execute a project in all its phases. This is a basic project. In the future there are projects that work with sequential logic and with other tools such as the ISP Lever software from the LATTICE Semiconductor company, which allows, using only software, to develop FPGA projects. In other words, this research serves as the basis for larger-scale projects.

Keywords: FPGA, VHDL, software, logic, technology.

Cómo citar

P. S. Landaeta, «First steps using FPGA technology », *Perfiles_Ingenieria*, vol. 20, n.º 21, pp. 136-149, jun. 2024.

Resumen

Esta investigación tiene como objetivo principal mostrar de manera general la tecnología FPGA, Field Programmable Gate Array – Arreglo de Compuertas programables en el Chip. Se hablará aquí de su arquitectura, empresas fabricantes, descripción de un circuito sencillo usando VHDL, Very High Speed Hardware Description Language, Software Quartus II y la tarjeta Cyclone II de INTEL. Se uso un circuito sencillo de lógica combinacional para efectuar la simulación con el software Quartus II. Dejando todo claramente indicado para realizar proyectos de mayor envergadura. Los resultados del estudio muestran que las gráficas obtenidas como respuesta del circuito estudiado fueron las esperadas, y además que se pudieron comprobar propiedades del software en estudio. Se estudiaron las características generales de la tecnología FPGA. Se conocieron las funciones básicas del software Quartus II para ejecutar un proyecto en todas sus fases. Este es un proyecto básico, a futuro vienen proyectos donde se trabaje con lógica secuencial y con otras herramientas como el software ISP Lever de la empresa de Semiconductores LATTICE, que permite, usando solamente software, desarrollar proyectos de FPGA. Es decir, esta investigación sirve como base para proyectos de mayor envergadura.

Palabras clave: FPGA, VHDL, software, lógica, tecnología.

© Los autores. Este artículo Open Access está publicado bajo la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC-BY 4.0).



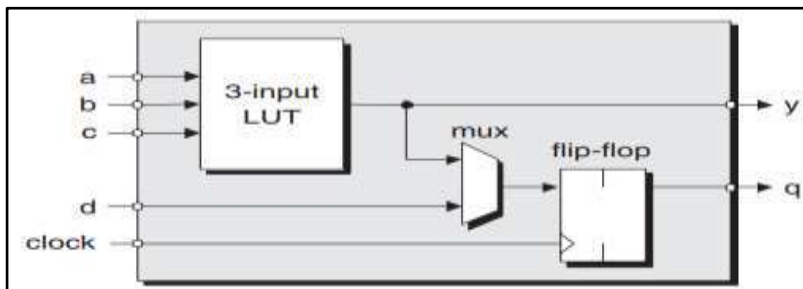
1. Introduction

FPGA technology has existed since the mid 80's and came to solve a gap that existed between PLDs [1] (PLD: Programmable Logic Device) and the ASICs [2] (ASIC: Application Specific Integrated Circuit). The main objective of this research is to talk about all these basic issues and describe a very simple project using VHDL language, and thus know the initial steps that must be taken to undertake projects using this technology. There are several aspects that must be taken into account to understand this interesting world of FPGAs, one of them is the issue of device manufacturers. In this group are XILINX, INTEL FPGA (Former ALTERA) and LATTICE. There are others, but only these three are mentioned because they are the relevant ones in this investigation. XILINX for being the first FPGA manufacturer worldwide, INTEL FPGA because it is the one used in research and is also the second most important worldwide for its sales, and LATTICE because it provides the FPGAs used to work with Free Software and Hardware. Another factor to take into account is related to the language used to describe FPGAs, such as HDL (Hardware Description Language). There is VERILOG and VHDL, in this investigation VHDL will be used [3] [4].

Another point of interest is the choice of the FPGA Chip to use in the project. For this investigation, the FPGA CYCLONE II from the company INTEL FPGA will be used. This is a chip already discontinued by the company, but it is still available for sale over the Internet. And the last thing to deal with is related to the software provided by the manufacturing company to describe the hardware. In the case of INTEL FPGA, from now on simply INTEL, it works with the QUARTUS II web edition 13.0 sp1 (sp: Service Pack) software, which is a version offered free by the company, and is more than enough to carry out the projects initials of any beginner, it is also the only version of the software that supports the CYCLONE II chip [5].

The work methodology focuses on making known the architecture of FPGAs and also showing the steps to undertake a project with FPGA from the INTEL company, with the CYCLONE II chip, using the VHDL language with the support of the QUARTUS II web edition 13.0 software sp1 explaining it from the most elementary. The internal architecture of the CYCLONE II chip shows that it has everything necessary to undertake the basic projects that are aspired to be carried out, since the chip has 4608 LEs (Logic Elements) and the company offers the card with a plug for +5V power, port to download the description made in the QUARTUS II software, LEDs and Pushbuttons. All arranged and ready to start with the initial projects. LEs are the smallest part of the FPGA architecture [6], it is called that in INTEL and in XILINX it is called Logic Cell. The LEs they are made up of the LUTs (Look Up Tables), these can have 2, 3, 4, 5, 6 or another number of inputs depending on the FPGA model. In the LUTs is where everything that is the gate logic of the design in question is built or assembled. Multiplexers (mux) are used when it is necessary to design systems with multiple inputs and a single output. And the Flip-Flops that all FPGAs have are type D, whatever the manufacturer. Figure 1 shows the basic internal architecture of an FPGA where its D input (D for Data: 1 or 0), the synchronization clock called CLOCK and the Q output can be observed. For each high clock level, the Q output will take the value of input D. Figure 1 shows the LUT, MUX, and Flip Flop and how they come together in the internal building architecture of the FPGA.

Figure 1.
Basic components of an FPGA.



It can be read in the data sheet of the manufacturer of the IC (IC: Integrated Circuit) CYCLONE II on the Internet that the Logical Array Consists of LABs (Logic Array Block), with 16 LEs in each LAB [7].

2. Materials and methods

The work consists of talking about the architecture of the FPGA, describing using VHDL a basic combinatorial logic circuit using Quartus II and the cyclone II chip. This Chip is mounted on a card as shown in Figure 2 where you can see the integrated FPGA ep2c5T144C8 with the peripherals that the manufacturing company places to take advantage of the circuit in basic initial projects and other larger projects that you want to do.

The hardware shown in figure 2 is complemented by using the QUARTUS II simulation tool [8] allows working with the VHDL language and with other languages that QUARTUS II incorporates, as well as having the option of making the assemblies in schematic mode.

Figure 2.
FPGA mounted on the card with peripherals

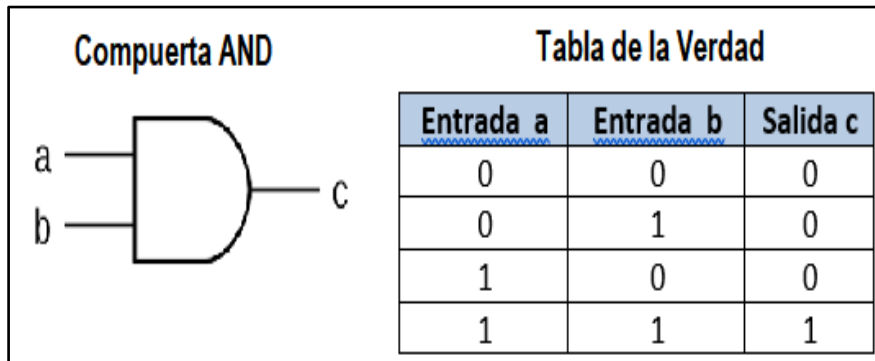


To start with the work, suppose that you have the circuit of figure 3 [9] and you want to run it with the FPGA. This involves using VHDL to describe the circuit and verify that the truth table is true. Using FPGA, it is possible to implement in a practical way all combinatorial

and sequential logic assemblies. In addition to state machines, memories and digital signal processing, all with VHDL. This is necessary to comment so that the new readers of the subject can understand or assimilate that something that was done with 10 integrated circuits or more, is now done with a single chip or IC FPGA.

Figure 3.

Basic logic circuit to describe using VHDL



It is mostly to put into context what it means to use FPGAs and the advantages they bring. The first thing to have is a software to make the description. In this case, the tool is searched for on the page of the manufacturer of the card with which it is working [9]. Since you are using an INTEL company card, you must go to the page provided by the manufacturer. figure 4 shows the availability of the QUARTUS II software to be downloaded with the INTEL logo on the website.

Figure 4.

Web page where you can see the version of the software to download



After this, the indicated software is downloaded and work will begin on the descriptions of the selected hardware. The software you download is a free version from the company. It has some limitations, but the important thing is that it is more than enough for the objectives set out in this research. It is already known that the FPGA chip is the CYCLONE II from the INTEL company. And also that the software that is being indicated to download is QUARTUS II 13.0 sp1. For other FPGA series, for example CYCLONE III, CYCLONE IV or CYCLONE V, and

for other FPGA versions from the same INTEL company, the QUARTUS II software changes its version. On the INTEL company page is the QUARTUS II recommendation for your selected FPGA chip.

By having the hardware to be described and the software installed on the PC (Personal Computer), the VHDL description of the hardware indicated in Figure 3 is carried out. To do this, you must study the basics of VHDL and on the Internet there is a lot of material related to tutorials that serve as support to start with this language. Professor Carlos Fajardo from the Industrial University of Santander in Colombia has some videos that very well illustrate all this about VHDL and he teaches in each one of them the degrees of difficulty in the description. [10].

After all this study, a description can be made as shown in Figure 5. The description in figure 5 highlights the points of interest in VHDL. First, the libraries with which you are working are observed. All descriptions have the Library IEEE semicolon header, then comes the batch of libraries that will be used in the description, one that should always go is use `ieee.std_logic_1164.all` semicolon. The semicolon signifies the closure of that line of code. Then in the description comes the entity. The entity has to do with the declarations of inputs and outputs of the digital system that is being developed. Finally, the architecture, in this space the codification that indicates what you want to do in the project is placed.

Figure 5.

VHDL description of the hardware in Figure 4

```

library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;
use ieee.std_logic_arith.all;
use ieee.std_logic_unsigned.all;

entity Nuevo is
port(
    a: in std_logic ;
    b: in std_logic ;
    s: out std_logic );
end;

architecture Comportamiento of Nuevo is
begin
    s <= a and b;
end Comportamiento;

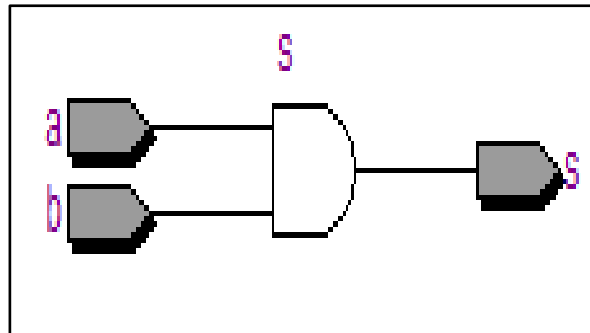
```

After having the code ready comes the compilation part. In the Processing menu or the toolbar, select the Start compilation option. The software will send a message saying if everything is fine or not, in the case of the example everything was satisfactory, that is, there are no errors. Already at this level you have the possibility to see the described hardware using the QUARTUS II software and you can also see the simulation. The compilation process returns the circuitual synthesis. Following the path TOOLS in the →Netlist Viewers→ RTL Viewer

menu bar you get to the RTL view (Register Transfer Level) [11] of the description made in VHDL

Figura. 6

Hardware result of compilation and synthesis



The definitive proof that the circuit will be exactly the one that was originally intended to be assembled consists in making the compilation that automatically brings with it the circuitual synthesis. Then, reaching the RTL viewer in the menu bar, you will see the circuit produced by the software used, be it QUARTUS II or ISE WEBPACK from XILINX, as seen in the circuit in Figure 6, and which shows the interpretation given by the VHDL description software corresponding to the circuit that was intended to be modeled (see Figure 3).

After the above, the simulation stage is carried out. It should be clarified that the MODELSIM software from the INTEL company will not be used because this is an initiation investigation on the subject of FPGAs. Therefore, the University Program VWF (Vector Wave File) tool is used. You are in File New, double click on University Program VWF. When doing the above a window will appear, double click on the blank part to the left of that figure and in this way a window called Insert Node or Bus will appear, which prepares the way to go to the input and output signals of the project you are working on, click on the Node Finder button.

After clicking on Node Finder, check that the Pins All option is in the next window and click on the List button and all the inputs and outputs placed in the description made in VHDL will appear.

Figure 7.
Window for simulation



After clicking on the List button, you must select the inputs and outputs that you want to appear in the simulation, see figure 7. After that, click on the OK button. When doing so, the window shown below in Figure 8 appears.

After the above, click on the clock window option in the toolbar. This option allows assigning the value to the time of each of the input signals. In [12] and [13] an explanation is made in more detail of what is discussed here.

The entries are then selected and a time is assigned to each one. In this case under study, 100 ms high and low was assigned to input A. And 200 ms high and low to input B, see figure 9.

After simulating the description made, it is passed to the recording stage in the IC FPGA. For this, some hardware devices are used, made up of what the company INTEL calls the USB Blaster, made up of the electronics card named USB Blaster, a communications cable to be used between the USB Blaster and the CYCLONE II FPGA board, and a USB cable to be used between the CYCLONE II board and the computer.

Figure 8.
Input and output variables ready for simulation

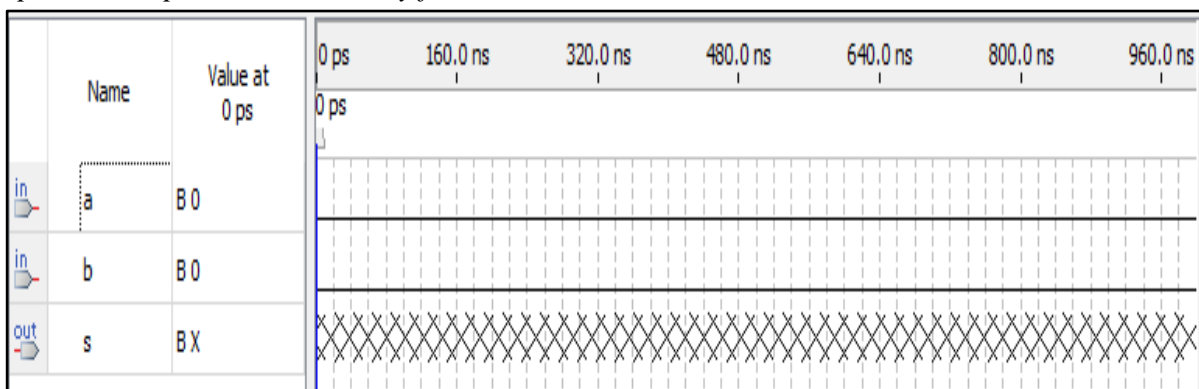


Figure 9.
Input and output signals after running the simulation

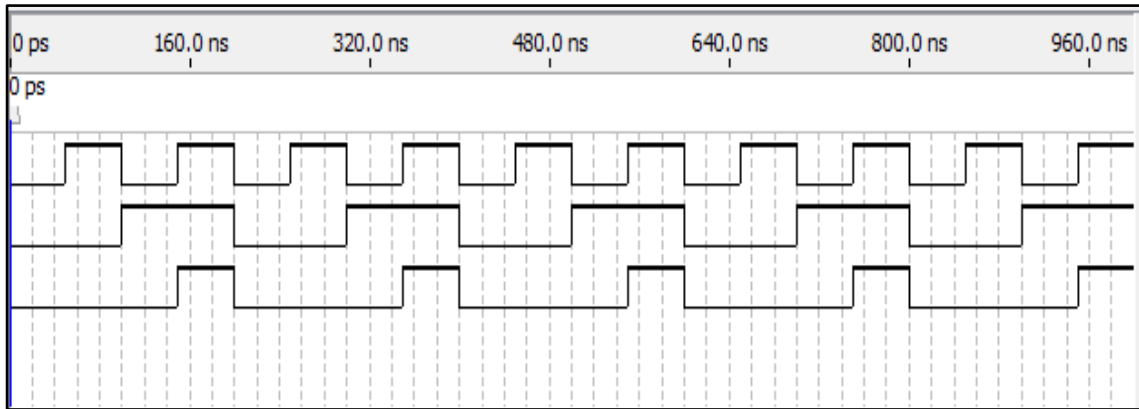
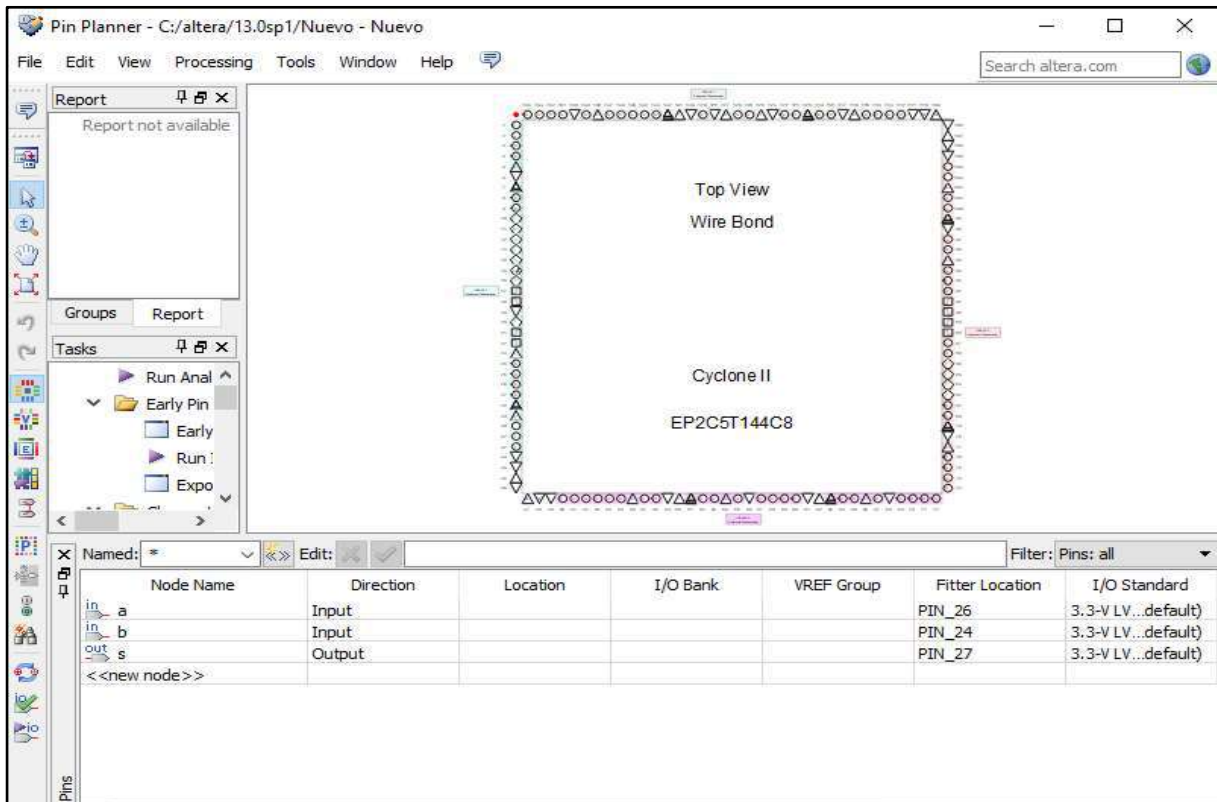


Figure 10.
Option to assign the input and output pins of the FPGA



So, to record the FPGA chip what is done first is the pin assignment. In the Quartus II software you can see the pin assignment using Pin Planner, choosing from the Assignments menu bar you get to the Pin Planner option. This window in figure 10 shows the pin assignment for the circuit proposed in Figure 3. After the assignment, the FPGA is recorded using the USB

Blaster. In figure 11 all the parts of the USB Blaster assembly are shown. These three parts are the basic ones to record what is done in the Quartus II after the description is compiled satisfactorily. Additional information in this regard is shown in [14].

Figure 11.

USB Blaster to burn the description in the FPGA



3. Results

- The main objective of the research was achieved, as it was to show the FPGA technology in a general way. Using an elementary combinatorial circuit, all the necessary steps were taken to implement a project with FPGA. Software to use, references and important comments to understand each step of the process and know all the necessary equipment for its implementation in hardware.

- As part of the main objective of the investigation that was also fulfilled, there is the description made in VHDL shown in Figure 5. It shows all the parts in which any description is composed.

- Another of the objectives was to know the architecture of the FPGAs, in Figure 1 the most basic of what these integrated circuits are composed of Multiplexers, flip flops and Lookup tables (LUT) are mentioned. There are many more components, such as the gate array, Microprocessor, DSP, ROM memories, input and output devices for communication with the real world in applications that warrant it. Since the research refers to the beginnings of this technology, these issues were not touched on because it would provide material for another article. On the other hand, this architecture differs from the one used in the CPLDs in processing capacity and price of the device.

- The practical assembly in Figure 6 is the result obtained after compiling the description made with the Quartus II software. This shows that any circuit that is described with VHDL will appear inside the FPGA chip.

- As a last result, we have the output of the combinatorial logic circuit studied. In Figure 9 you can see the signals supplied by the Quartus II software.

4. Discussion

A relevant point to bring to the discussion is the lack of basic material to understand the elementary principles of FPGAs. It is very difficult for a beginner to find recent material from indexed journals or research papers endorsed by universities, be it theses, essays or technical reports where research on basic aspects of this technology is shown. Hence the importance of this material to contribute to that void found in it. Taking the above into account, a book that does not pass and transcends time to help every beginner in this FPGAs is the book by Clive Maxfield edited by Newnes and Elsevier in 2004 [15]. You can also find publications of FPGA scientific articles for beginners in magazines that are not indexed in recognized databases such as SCOPUS, Scielo or Latindex for example, but it is what is available to be downloaded freely and without any restriction, such this is the case of the International Journal of Trend in Scientific Research and Development (IJTSRD). There you can find the article by San Naing et al, published in 2019 on Operation of FPGA-based Digital Logic Circuits for Beginners [16]. If the research has some type of funding, more recent research can be found. The rest that is found on the Internet is research that goes beyond the basics, such as those carried out by applications of the NIOS II processor [17] of the FPGA of the INTEL company, works related to signal processing for aerospace applications [18] or math applications using VERILOG [19].

Although this research works with proprietary software and hardware, free software and hardware are not intentionally left aside. The reason for working with proprietary hardware and software basically has its essence because it was what was found at the beginning of the investigation. The free versions have VERILOG and myhdl from the Python ecosystem. These free versions need a Free Software (FS) and Free Hardware (FH) structure to close the project cycle. Because it's not just programming in VERILOG. In FPGA projects, making the description, which for other software is programming, is not everything. The description can also be done from a proprietary software such as QUARTUS II and it comes from a company that of course does not work with FS and FH. In FPGA projects, you should always invest in an electronic card, and it is at that point that it is not so free because you still have to make an initial investment of a few Dollars (USD) in the electronic card that adapts to this methodology. This can go from 30 USD to 150 USD. After that initial expense is where the freedoms of use, study, distribution and modification come. But, it is not the central topic of this investigation because just knowing the structure of the new card with a different chip than the one that has been used is a separate investigation, since the majority of FH uses FPGA ICs from the LATTICE company and later knowing the software associated with it to close the project cycle would correspond to another investigation.

Another aspect that was left out of the research was FPGA simulation using PROTEUS. Actually, what is available in PROTEUS is a SPLD, Simple Programmable Logic Device, GAL 22v10. To simulate this device, the VHDL language simulation software must generate a .jed extension, which QUARTUS II does not provide. There you need other software. In this case, the ispLEVER software from LATTICE meets the desired characteristics. The company allows you to download a free version with a 1-year license to use. There is other software that can generate the .jed file but the description is no longer in VHDL, as in the case of WinCUPL that's why it's important to use ispLEVER.

5. Conclusions

Although in the investigation we only worked with an AND gate for reasons of seeking maximum simplicity for the rapid understanding of the learning process of project development with FPGA. Larger combinational circuits and also sequential circuits could be worked on. The advantage of this is that a large number of Integrated Circuits would not be used, thus reducing the number of errors that can be made in a practical assembly by a high percentage. Since an FPGA IC is enough to make a project that can contain 200 Flip Flops and 100 Gates or more.

To complement what has been said above, it should be said that the entire work process with the Quartus II software for this simple AND gate is the same as it would be used for a complex system of gates, flip flops and larger digital integrated circuits. The steps are identical, and that is what makes this investigation relevant.

The versatility of the INTEL Quartus II software to describe circuits and to achieve the simulation and tuning of the described circuit was demonstrated.

6. References

- [1] P. Kumar, «Development of Programmable Logic Devices, » International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering, vol. 8, n° 4, 2020.
- [2] P. Kumar, «Analysis of ASIC Design Methodology in Advanced Digital System, » International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering, vol. 8, n° 4, 2020.
- [3] E. Saeed, Basics VHDL Labs. Basics Lab for Learning VHDL. Learning with Experiments, Al Nahrain. Irak: Lap Lambert, 2020.
- [4] A. Ivanova, «A Concept of Visual Programming Tool for Learning VHDL, » IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020.
- [5] INTEL-ALTERA, «Quartus II Handbook Version 13.1. Volume 1: Design and Synthesis, » November 2013. <https://www.intel.com/content/www/us/en/software-kit/666221/intel-quartus-ii-web-edition-design-software-version-13-1-for-windows.html>.
- [6] S. Rai, P. Nath, A. Rupani, S. Vishvakarma y A. Kumar, «A Survey of FPGA Logic Cell Designs in the Light of Emerging Technologies, » IEEE Access, vol. 9, pp. 91564 - 91574, 2021.
- [7] INTEL, «Cyclone II Device Handbook, Volume 1, » 2008. [En línea]. Available: https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/hb/cyc2/cyc2_cii5v1.pdf.
- [8] C. Figueroa y S. Giraldo, Diseño y construcción de un instrumento prototipo para el análisis de la ley de Hooke, caída libre y péndulo simple usando dispositivos FPGAs, Pereira. Colombia, Universidad Tecnológica de Pereira. (Tesis de Maestría), 2019.

- [9] INTEL, «Descargar software QUARTUS II,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.intel.com/content/www/us/en/software-kit/666221/intel-quartus-ii-web-edition-design-software-version-13-1-for-windows.html>.
- [10] C. Fajardo, «Introducción a VHDL. Circuitos Secuenciales: Registros y Contadores. Universidad Industrial de Santander,» 2013. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=vTmBuR-JgvM>.
- [11] B. ROBLES, Principios del FPGA y aplicaciones en el control de procesos industriales., Universidad de El Salvador. San Salvador. El Salvador: (Tesis de Pregrado), 2016.
- [12] F. Urbano, «Simulación usando Altera Quartus II 13 sp1 Web Edition,» 2013. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=C7f5mO6Tjk0>.
- [13] C. Benalcazar y I. Andrade, Diseño e implementación de prácticas con FPGA para la materia de Digitales II mediante la herramienta de trabajo Cyclone II de Altera, Guayaquil. Ecuador, (Tesis de Pregrado), 2012.
- [14] INTEL, «Intel FPGA USB Download Cable User Guide,» 2016. [En línea]. Available: https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/ug/ug_usb_blstr.pdf.
- [15] C. Maxfield, The design warrior's guide to FPGA, Road Burlington, Massachusetts, USA: ELSEVIER, 2004.
- [16] S. Naing, N. San y T. Chao, «FPGA Based Digital Logic Circuits Operation for Beginners,» International Journal of Trend in Scientific Research and Development (IJTSRD), vol. 3, n° 5, pp. 495-501, 2019.
- [17] H. Cao y U. Meyer, «XML-Based Automatic NIOS II Multi-Processor System Generation for Intel FPGAs,» Electronics, 2022.
- [18] F. Santos, Emulación basada en FPGA de los efectos de los single event upsets ocasionados por la radiación en circuitos digitales tolerantes a fallos, Madrid. España, Universidad Complutense de Madrid. (Tesis Doctoral), 2018.
- [19] M. Mustaph y N. Zulkarnain, «Full cycle trigonometric function on Intel Quartus II Verilog, » International Conference on Engineering and Technology (IntCET 2017), 2018.
- [20] U. Cem y T. Bora, Digital System Design with FPGA: Implementation Using Verilog and VHDL, Estambul. Turquía: McGraw Hill, 2017.

Trayectoria académica

Pedro Selencio, Landaeta Herrera

Universidad Politécnica Territorial del Estado Aragua “Federico Brito Figueroa”, Venezuela

Profesor jubilado de la Universidad Politécnica Territorial del Estado Aragua (UPTA) “FBF”.
Venezuela. Profesor perteneciente al departamento de Electrónica y Telecomunicaciones.

Jefe del departamento de Investigación en la sede de Maracay.

Especialista Ingeniero en Electrónica UPTA-FBF

Actualmente soy investigador independiente ya que estoy en condición de Jubilado con 25 años de servicio.

Asistí a congresos científicos nacionales e internacionales, fui seleccionado para optar al premio Nacional de Ciencia con mi investigación de sistemas inalámbricos.

landaetabiz@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8843-4991>

Contribución de autoría

Pedro Landaeta: Un único autor.

Conflicto de intereses

El autor sostiene que no existen conflicto de intereses en el desarrollo de la investigación.

Responsabilidad ética y legal

El desarrollo de la investigación se realizó bajo la conformidad de los principios éticos del conocimiento, respetando la originalidad de la información y su autenticidad. Se han citado las fuentes con sus respectivos datos, y no me ha atribuido algún concepto o filosofía planteada. Todos han sido asignados a sus respectivos autores.

Declaración sobre el uso de LLM (Large Language Model)

Este artículo no ha utilizado para el desarrollo de la investigación textos provenientes de LLM (ChatGPT u otros).

Financiamiento

La presente investigación ha sido financiada con los recursos propios del autor.

Correspondencia: landaetabiz@gmail.com



Low transconductance OTAs design with extended linear range and its application in EEG signals

Diseño de OTAs de baja transconductancia con rango lineal extendido y sus aplicaciones en señales EEG

Franco Renato Campana Valderrama

RECIBIDO: 10 de enero de 2024.

ACEPTADO: 27 de marzo de 2024.

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño de OTAs simétricos con bajo valor de Transconductancia (orden de los nA/V) y sus aplicaciones en baja frecuencia y baja potencia. Para este objetivo, se usó espejos de corriente serie-paralelo (S-P), los cuales dividen la transconductancia del par diferencial. Con esta técnica se obtuvo transconductores de hasta 1 nA/V. También se presenta una técnica para extender el rango lineal de los pares diferenciales. Los OTAs simétricos diseñados serán usados en filtros activos de baja frecuencia central para aplicaciones biomédicas (señales EEG). Los capacitores de estos filtros están en el orden de los picofaradios y están fuera del circuito integrado. Estos OTAs y Filtros fueron diseñados con tecnología estándar de fabricación de 0.8 μm . La factibilidad de las técnicas que presentaremos, serán validadas mediante resultados de simulación.

Palabras clave: amplificador, baja transconductancia, microconsumo, baja frecuencia, espejos de corriente.

Cómo citar

F. R. Campana Valderrama, «Low Transconductance OTAs Design with Extended Linear Range and its Application in EEG Signals», *Perfiles_Ingenieria*, vol. 20, n.º 21, pp. 151-164, jun. 2024.

Abstract

In this work, the design of symmetric OTAs with low transconductance value (nA/V order) and their application in low frequency and low power is presented. For this aim, the series-parallel (S-P) mirrors was used, which divided the differential pair transconductance. With this technique, a 1 nA/V transconductor is reached. Techniques for extend the linear range (hundreds milivolts) of the differential pair will presented too. The Advanced Compact MOSFET Model ACM was used in the design process. These symmetric OTAs designed will be used in active filters with low central frequency, for biomedical applications (EEG signals). The capacitors of this filters are in the picofaradads order, and are off chip. These OTAs and filters were designed in 0.8 μm standard technology. These techniques that we will present will be validated through simulation

Keywords: amplifier, low transconductance, low power, low frequency, current mirrors.

© Los autores. Este artículo Open Access está publicado bajo la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC-BY 4.0).



1. Introduction

In the field of medical electronics, active filters with very low cutoff frequencies (of the order of a few hertz) are needed due to the relatively slow electrical activity of the human body. Specific applications ECG, EEG systems and pacemakers [1].

For an operational transconductance amplifier-capacitor (OTA-C) filter implementation, such low frequencies imply large capacitors and very low transconductances. Thus, there are two entirely independent angles to the problem that need to be addressed. One is the design of OTAs with very low transconductances (typically of the order of a few nanoamperes per volt) and high linearity, while the other is the realization of very large capacitors (typically of the order of a few nanofarads) on chip [1].

In this work shows by post layout simulations the feasibility of the OTAs design with low value of transconductance G_m and its application in active filters with low central frequency. For the OTAs designed, the main characteristics to be considered are: extended linear range at input (above 100 mV), low power consumption and low G_m value.

The ACM equations that will be used in the differential pair design will be presented in section 2. In section 3 will described the methodology design for OTAs with low G_m values, using the series-parallel S-P current division technique, which will allow us to divide the differential pair input transconductance. This paper presents the improvements in terms of current consumption, input linear range and area, from that achieved in reference [2].

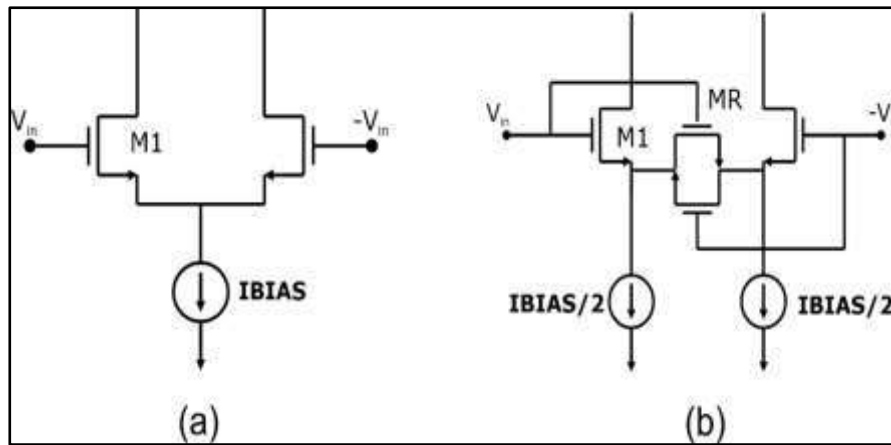
In section 4, it details the use of these OTAs in active Bandpass Filters with low central frequency, and will be used in the brain waves filtering (EEG signals). Finally, in section 5 will give some conclusions.

2. Differential Pair Design

The ACM Mosfet model will be used to calculate the differential pair linear range in terms of level inversion i_f . From figure 1(a):

Figure 1(a).

(a) *Differential MOS pair, and (b) Differential MOS pair with active linearization*



The relevant equations that will be useful to design from the input pair linearity in terms of level inversion are [3]:

$$V_{lin} \approx 3n\phi_t \sqrt{\alpha(1 + i_f)} \quad (1)$$

The equation (1) is very useful in the theoretical design stage of any differential pair circuit. This expression will be valid in all levels inversion. The α value can be 0.05 or 0.1, and represent the expected percentage error [Arnaud]. The i_f values can be $1 < i_f$ for weak inversion, $i_f > 100$ for strong inversion and $1 < i_f < 100$ for moderate inversion. For more details about the ACM model and their relationships in levels inversion terms, could be found in the [4] reference.

To enhance the linearity, a modified differential input pair can substitute M1 and M2 in Fig. 1(a), as shown in Fig.1(b) [5]. The effective transconductance g_{meff} of the pair in Fig. 1(b) is calculated by small signal analysis, assuming that transistors MR operate in the linear region, each behaving as a resistor of value $2R$. Therefore:

$$g_{meff} = \frac{g_{m1}}{1 + n g_{m1} R} \quad (2)$$

where g_{m1} is the transconductance pair, R is the degeneration resistor that can be made with MOS transistor (M_R in Fig. 1(b)) and n is the slope factor, slightly greater than unity and weakly dependent on the gate voltage [6].

3. Ota Design Methodology

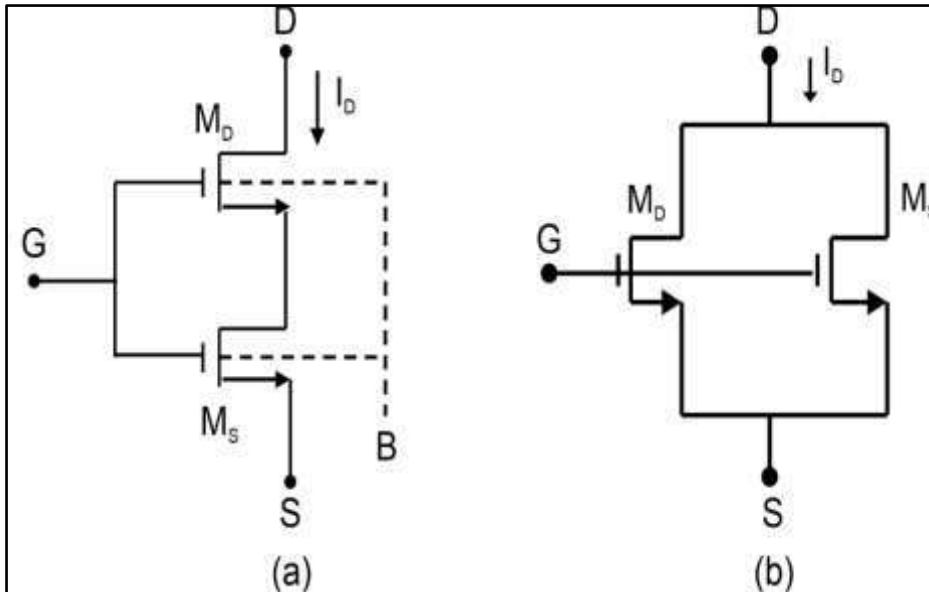
Here we examine the use of the series-parallel S-P technique, in order to apply in the symmetric OTAs circuit; with this technique could be divide the input pair transconductance for hundreds and allows the implementation of an area efficient current divider [6].

In Fig. 2(a) two transistors $M_S(D)$, are series connected; the equivalent ratio $(W/L)_{eq}$ of the composite transistor is [7]:

$$(W/L)_{eq} = \frac{(W/L)_S(W/L)_D}{(W/L)_D+(W/L)_S} \quad (3)$$

Figure 2.

(a) Two series transistors associated and (b) Two parallel transistors associated



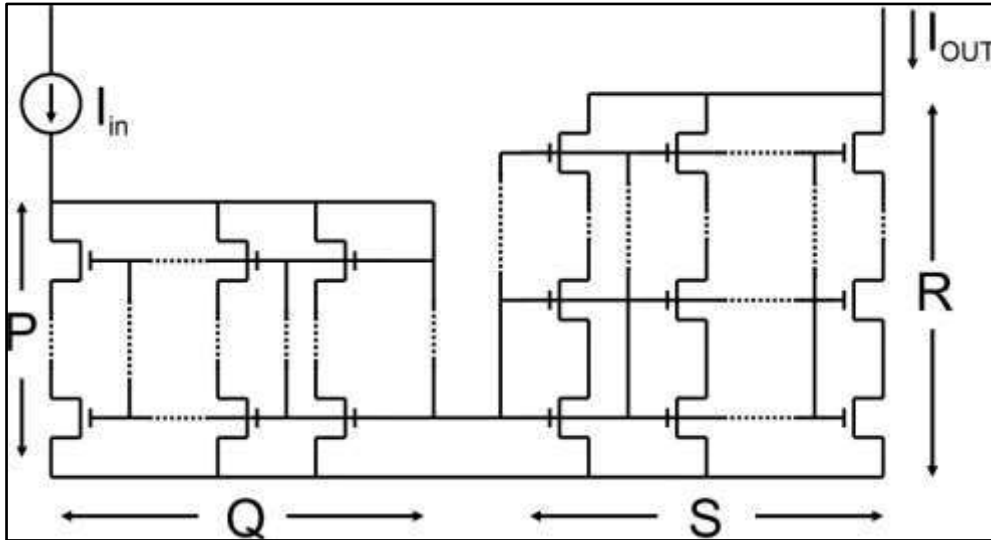
From this equation, if the M_S and M_D transistors have the same (W/L) , result will be $(W/2L)$, it means that with the same aspect ratio (W/L) for transistors connected as in Fig. (2), the equivalent transistor aspect ratio it will be divided by 2. If it is generalized to "N" transistors in series with the same aspect ratio, the result will be (W/NL) , namely, the equivalent transistor aspect ratio it will be divided by N.

In the same way, if it has two transistors associated in parallel as in Fig. 2(b), the equivalent relationship $(W/L)_{eq}$ will be:

$$(W/L)_{eq} = (W/L)_D + (W/L)_S \quad (4)$$

For the last equation, if the transistors have the same aspect ratio (W/L) , the result aspect ratio will be $(2W/L)$. If it is generalized to "N" transistors in parallel with the same aspect ratio, the result will be (MW/L) . This analysis can be extended up to achieve the topology shows in Fig. (3), that represents the S-P technique, applied to a simple current mirror [6]

Figure 3.
Generic SP current mirror



where:

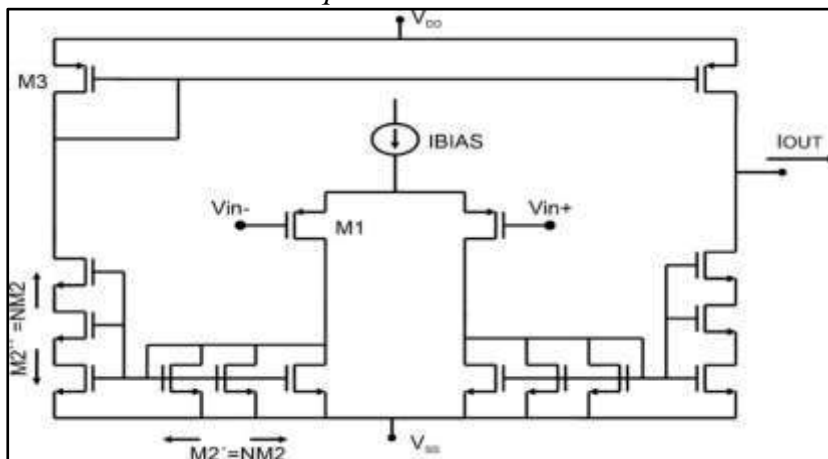
$$\frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{SP}{RQ} \quad (5)$$

If in the last relationship we do $S=P=1$ with $R=Q=N$, we obtain:

$$\frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{1}{N^2} \quad (6)$$

Applying the last equation to a symmetric OTA, we get the following circuit:

Figure 4.
Symmetric OTA with S-P technique



For the mirrors of Fig. (4), N transistors are associated in series an parallel to achieve the output transconductance [2], [3], [6]:

$$G_{mx} = g_{m1} \frac{SP}{RQ} = \frac{g_{m1}}{N^2} \quad (7)$$

where, g_{m1} is the differential pair transconductance, given by:

$$g_m = \frac{2I_D}{n\phi_t(\sqrt{1+i_f}+1)} \quad (8)$$

where ϕ_t is the thermodynamic voltage, and its 26 mV at room temperature.

Now, we show the strategy to follow to get OTAs with low transconductance and extended input linear range. The relationship between linear range input pair and level inversion i_f is given by the eq. (1).

Suppose that the circuit of the Fig. (4) requires a transconductor of a low value G_{mx} , and an input linear range V_{linx} with an α give by 5%. The inversion level i_{fl} of the input pair is determined by eq. (1). For a given bias current, that can be determined from the power consumption and area budgets, we have $I_{BIAS}=2I_{D1}$, and according to the ACM model, we have $I_{D1}=I_{SQ}(W/L)_1 i_{fl}$, where I_{SQ} depends of the technology, therefore the $(W/L)_1=I_{BIAS}/(2I_{SQ}i_{fl})$. So, with the with the I_{BIAS} , α and i_{fl} give by eq. 1 according to linear range requirements, we can get the $(W/L)_1$ and g_{m1} by eq. 8. With this g_{m1} , could be obtain the number of unit transistors "N" or any arrangement unit transistor given by Eq. 7 [3].

With this technique it designed four OTAs with different transconductance input values. For example, with $i_f=40$, according to Eq. 1, we obtain $V_{lin}=150mV$, and with $I_{BIAS}=80$ nA, the $G_{m1}=297nA/V$. In the table 1 we detail these circuits.

Table 1.
Summary of Transistors Arrangement

OTA	G_{mx}	M_1	Arr	$(W/L)_u$	M_2'	M_2''	M_3	$(W/L)_u$
1	4.4 nS	(3/50)	5s	(3/10)	17p	8s x 2p	2s x 4p	(4/4)
2	8.8 nS	(3/50)	5s	(3/10)	17p	6s x 3p	2s x 4p	(4/4)
3	1.2 nS	(3/50)	5s	(3/10)	31p	16s x 2p	2s x 4p	(4/4)
4	15.6 nS	(3/50)	5s	(3/10)	8p	5s x 2p	2s x 4p	(4/4)

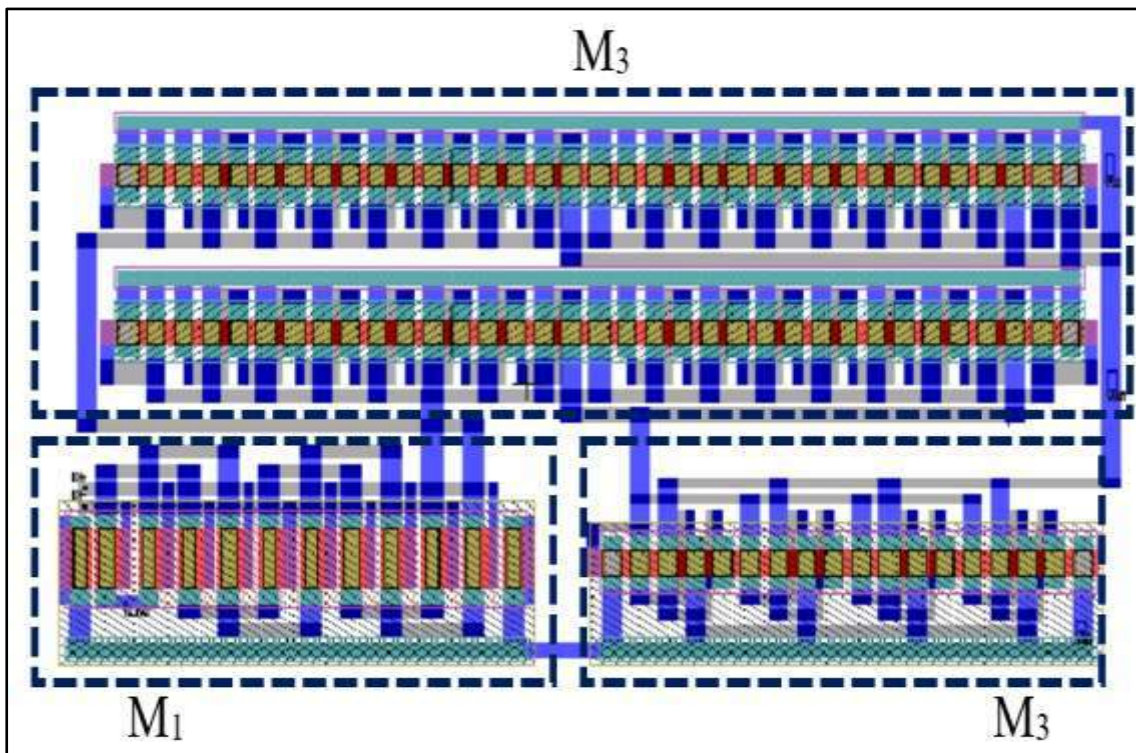
As an example, we can extend the input linear range based in the circuit of Fig.1(b), for all these OTAs and using the Eq.2. The G_{mx} target, M_1 and M_3 aspect ratio and its unitary arrangement are the same as table 1, so we do not repeat here. The table 2 present the aspect ratios resume.

Table 2.
Transistors Arrangement for Extended Linear Range

OTA	(W/L) _R	M_2'	M_2''	(W/L) _u
1	(3/250)	10p	6s x 2p	(4/4)
2	(3/250)	15p	4s x 4p	(4/4)
3	(3/250)	12p	9s	(4/4)
4	(3/250)	6p	3s x 2p	(4/4)

As an example of layout, we show the layout of OTA 1 in Fig. (5). The layout technique used for all these circuits was the common centroid.

Figure 5.
Layout of OTA 1 of Table 1



Here, we show in the table 2, a comparative survey using these technique and the requirements achieve, with the other topologies and techniques used for the requirements listed above.

Table 3.
Comparative Table off this Work with other Circuits

Parameters	OTA	SD+CD	FG+CD	BD+CD	This Work	
G_m (nS)	11.6	11.55	11.5	11.24	4.4	8.8
					1.2	15.6
Linearity (mVp)	80	120	165	450	150-500	150-500
					150-500	150-500
I_{BIAS} (nA)	2	100	200	500	80	80
					80	80
Power	16.2 nW	1.35 uW	1.62 uW	4.05 uW	406-417 nW	413-429 nW
					402-404 nW	422-450 nW
Area (mm ²)	1.44	0.21	4.65	0.22	0.023	0.026
					0.042	0.028

Where, according to [1]: OTA: Symmetric OTA, SD: Source degeneration, FG: Floating gate, BD: Bulk driven, CD: Current division. As an example, in the figure 6 and 7, we show the input linear range I_{out} vs. V_{lin} and extended linear range achieved in this work for OTA 1.

Figure 6.
Transfer curve I_{OUT} vs. V_{lin} of OTA 1

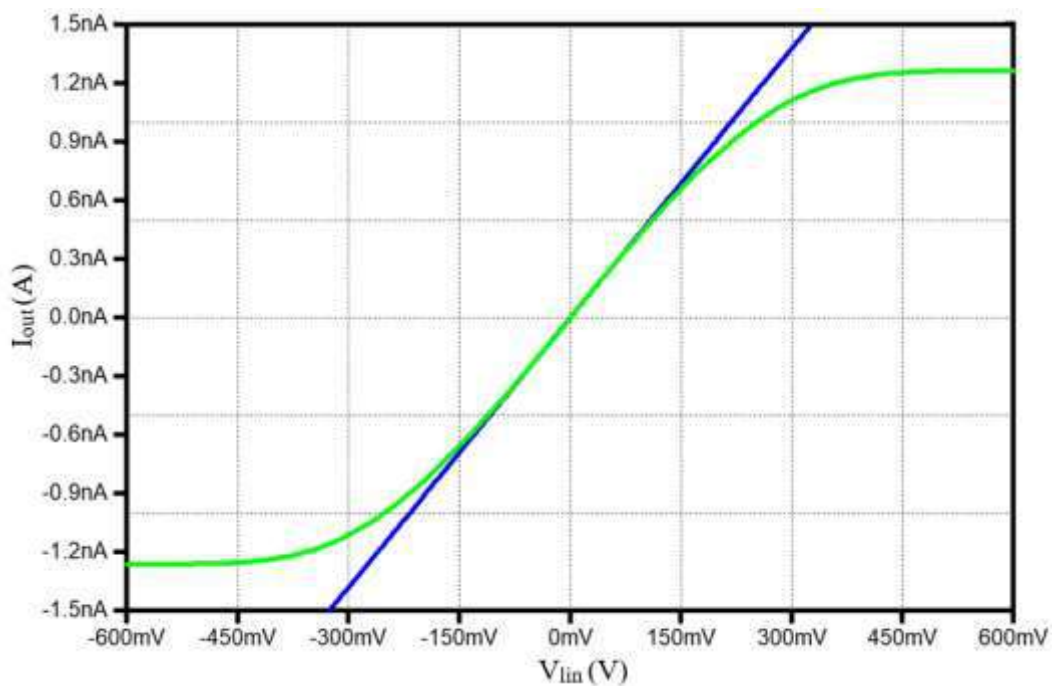
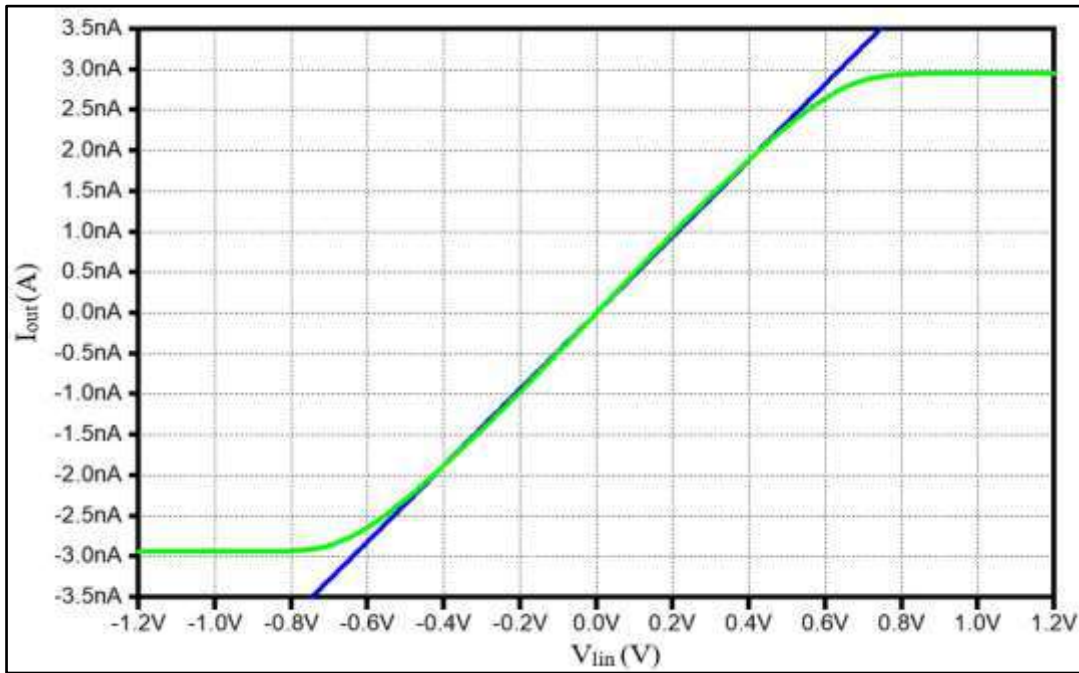


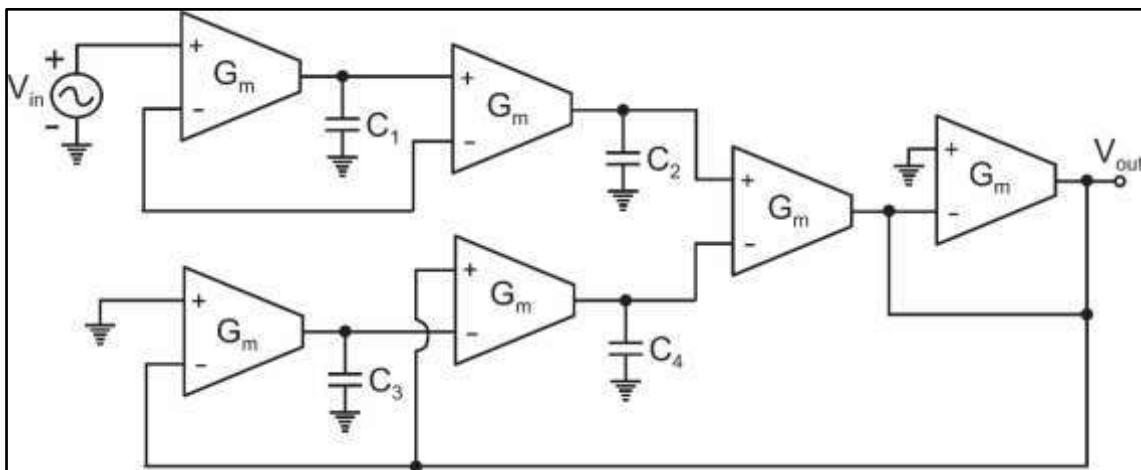
Figure 7.
Transfer curve I_{OUT} vs. V_{lin} for extended linear range OTA 1



4. Filter Design

In the Fig. (8) we show the biquad filter structure [8] that we use to achieve a low centra frequencies.

Figure 8.
Bandpass filter topology



and the function transfer function is:

$$H(S) = \left[\frac{W_{P1}^2}{S^2 + S(W_{P1}/Q_{P1}) + W_{P1}^2} \right] \left[\frac{S^2}{S^2 + S(W_{P2}/Q_{P2}) + W_{P2}^2} \right] \quad (9)$$

and the equations project design will be:

$$C_1 = \frac{G_{m1}}{Q_{P1}W_{p1}}, C_2 = \frac{G_{m2}Q_{P1}}{W_{p1}}, C_3 = \frac{G_{m3}}{Q_{P2}W_{p2}}, C_4 = \frac{G_{m4}Q_{P2}}{W_{p2}} \quad (10)$$

$$W_{p1} = \sqrt{\frac{G_{m1}G_{m2}}{C_1C_2}}, W_{p2} = \sqrt{\frac{G_{m3}G_{m4}}{C_3C_4}}, Q_{p1} = \sqrt{\frac{C_2G_{m1}}{C_1G_{m2}}}, Q_{p2} = \sqrt{\frac{C_4G_{m3}}{C_3G_{m4}}} \quad (11)$$

With the equations (10) and (11), we proceed to design four bandpass filters to filtering the following brain waves: $\delta(1 - 4Hz)$, $\theta(4 - 8Hz)$, $\alpha(8 - 12Hz)$, and $\beta(13 - 40Hz)$, with central frequency of 2.5, 6, 10 and 26.5 Hz, respectively, and using for these filters the OTAs 3, 1, 2 and 4 for each, respectively.

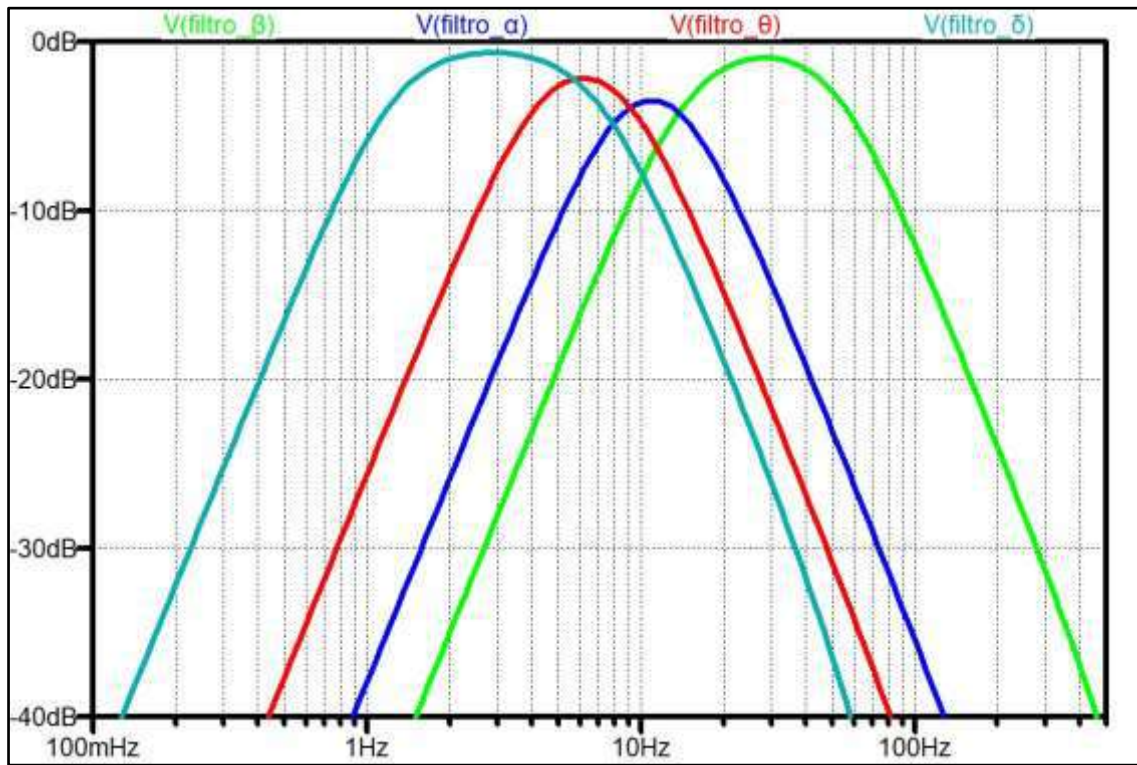
Then, according to Eq. 9 and 10, we can find capacitors values found for the filters, using the OTAs designed in table 1. We show the filters detail in the table 4.

Table 4.
Summary of the Filters Designed with the OTAs

Filter	F _C (Hz)	C ₁ (pF)	C ₂ (pF)	C ₃ (pF)	C ₄ (pF)	I _{BIAS} (nA)	Power (uW)	Area (mm ²)
1	2.5	43	19	230	110	480	4.8 uW	0.3
2	6	125	61	250	122	480	4.8 uW	0.18
3	10	164	79	248	120	480	4.8 uW	0.2
4	26.5	73	36	259	120	480	4.8 uW	0.14

In Fig. (9) we show the Bode Diagram of the designed filter above. We can see a good agreement among the theoretical estimate and the simulation results.

Figure 9.
Filters Bode Diagram



5. Conclusions

In this work we can demonstrate that the application of the ACM model with the S-P technique that divided the current and the input transconductance, allow us obtain low output transconductance values and extended input linear range. Further, this work presented the improvement in relation to \cite{campana} in terms of linear range, power consumption and area.

All the OTAs in the table 1, were applied to the low central frequency filter design successfully. The power consumption were in microwatts and they not use a lot area.

For future survey, we attempt place the capacitors on chip. For this target, we can scaling the transconductance/capacitors by 10.

6. References

- [1] Veeravalli, Sanchez-Sinencio y S. Martinez, «Different operational transconductance Amplifier topologies for obtaining Very Small Transconductances, » de ISCAS 2000-IEEE International Symposium on Circuits and Systems, May 28-31, 2000, Geneva, Switzerland, 2000.
- [2] R. Campana y M. Marquez, «Diseño de OTAs de Bajo GM y su aplicación en Baja Frecuencia y Microconsumo,» de IBERCHIP, March 14-16, Lima, Peru, 2007.
- [3] A. Arnaud y C. Galup-Montoro, «Pico A/V Range CMOS Transconductors Using Series-Parallel Current Division, » Electronics Letters, vol. 39, n° 18, pp. 1295-1296, 2003.
- [4] A. Cunha, M. Schneider y C. Galup-Montoro, «An MOS Transistor Model for Analog Circuit Design, » IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 33, n° 10, pp. 1510-1519, October 1998.
- [5] F. Krummenacher y N. Joehl, «A 4-Mhz CMOS continuous time filter with on-chip automatic tuning, » IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 23, n° 3, p. 750–758, 1988.
- [6] A. Arnaud, R. Fiorelli y C. Galup-Montoro, «On the Design of Very Small Transconductance OTAs with Reduced Input Offset,» de SBCCI'05, Florianópolis-Brasil, 2005.
- [7] C. Galup-Montoro, M. Schneider y R. Loss, «Series-Parallel Association of FETs for High Gain and High Frequency Applications, » IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 29, n° 9, pp. 1094-1101, 1994.
- [8] G. Düzenli, Y. Kiliç, H. Kuntman y A. Ataman, «On the Design of Low Frequency Filters Using CMOS OTAs Operating in the Subthreshold Region,» Microelectronics Journal, vol. 30, n° 1, pp. 45-54, 1999.

Trayectoria académica

Franco Renato Campana Valderrama

Universidad Ricardo Palma, Perú.

Ingeniero Electrónico graduado en la Universidad Ricardo Palma (2006). Pasante en la Universidad Católica del Uruguay (2007). Master en el área de Circuitos y Sistemas Integrados por la Universidad Federal de Santa Catarina- Brasil (2010). Graduado del Programa de Entrenamiento en Herramientas CADENCE para Diseño de Circuitos Integrados en Modo Mixto, CT-1, CI-Brasil, Porto Alegre (2011).

Estudiante de Doctorado en la Universidad Federal de Minas Gerais. Ganador del concurso de Subvenciones y Publicaciones de Ciencia e Innovación Tecnológica-CONCYTEC (2011), para la publicación del libro de su autoría “Los Dispositivos Semiconductores”. Áreas de interés: Investigación y desarrollo en el Modelamiento del Transistor MOS, técnicas de Diseño de Amplificadores con Ultra Bajo Consumo de Potencia y Baja Tensión de Alimentación, Diseño de Referencias de Tensión Independientes de la temperatura, y docencia en estas áreas.

Hasta el 2024, docente de la Universidad Ricardo Palma y de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.

Autor corresponsal: franco.campana@urp.edu.pe

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1395-8280>

Contribución de autoría

Único autor, quien hizo la investigación total del tema del artículo.

Conflicto de intereses

El autor sostiene que no existen conflicto de intereses en el desarrollo de la investigación.

Responsabilidad ética y legal

El desarrollo de la investigación se realizó bajo la conformidad de los principios éticos del conocimiento, respetando la originalidad de la información y su autenticidad. Se han citado las fuentes con sus respectivos datos, y no me ha atribuido algún concepto o filosofía planteada. Todos han sido asignados a sus respectivos autores.

Declaración sobre el uso de LLM (Large Language Model)

Este artículo no ha utilizado para el desarrollo de la investigación textos provenientes de LLM (ChatGPT u otros).

Financiamiento

La presente investigación ha sido financiada con los recursos propios del autor.

Agradecimiento

A los Doctores Alfredo Arnaud Maceira, Joel Gak Szollozy y Matías Miguez de Mori, miembros del Departamento de Ingeniería Eléctrica DIE, de la Universidad Católica del Uruguay.

Correspondencia: franco.campana@urp.edu.pe



Seguridad basada en el comportamiento para reducir el índice de accidentabilidad en la empresa minera Raura

Behavioural based safety to reduce accident rates in Raura mining company

Wilder Beto Chamorro Celis

RECIBIDO: 05 de mayo de 2024.

ACEPTADO: 10 de junio de 2024.

RESUMEN

El objetivo del estudio fue mejorar el sistema de gestión de seguridad mediante la implementación de seguridad basada en el comportamiento con el fin de reducir el índice de accidentabilidad en la empresa minera Raura. Metodológicamente, se utilizó un diseño cuasi-experimental con un enfoque cuantitativo de nivel descriptivo. Se utilizaron las técnicas de encuestas y observación, la información se recopiló mediante el uso de cartillas de observación y cuestionarios. La población y muestra del estudio estuvo compuesta por 80 trabajadores. Los resultados, al comparar los datos estadísticos de 2022 y 2023, arrojaron que se logró reducir en un 73 % el número de accidentes e incidentes con la implementación de la metodología SBC. Además, se han obtenido resultados muy positivos al formar, capacitar y entrenar a los trabajadores, aumentando su nivel de conocimientos y concienciación en materia de seguridad. Asimismo, las tendencias muestran un aumento del 89,4 % en los comportamientos seguros y una disminución del 10,7% en las actitudes riesgosas. Se concluye que la metodología SBC cambia un comportamiento riesgoso por uno seguro, y ayuda a prevenir y reducir los accidentes.

Palabras claves: Accidentes, comportamientos, conocimientos, cultura, seguridad.

Cómo citar

W. B. Chamorro Celis, «Seguridad Basado en el Comportamiento para Reducir Índice de Accidentabilidad en la Empresa Minera Raura», *Perfiles_Ingenieria*, vol. 20, n.º 21, pp. 165-179, jun. 2024.

ABSTRACT:

The objective of the study was to improve the safety management system through the implementation of behavioural safety in order to reduce the accident rate in the Raura mining company. In terms of methodology, an applied quasi-experimental design was used with a quantitative approach at a descriptive level, using survey and observation techniques, the information was collected through the use of observation booklets and questionnaires. The study population and sample consisted of 80 workers. The results, when comparing the statistical data of 2022 and 2023, a reduction in the number of accidents and incidents was achieved, indicating a significant decrease in the number of accidents by 73%, with the implementation of the SBC methodology, very positive results have been obtained by educating, training and training workers, increasing their level of knowledge and awareness of safety. Also, the trends show an increase of 89.4% in safe behaviours and a decrease of 10.7% in risky attitudes. It is concluded, the SBC methodology has a significant impact, changing risky behaviour to safe behaviour helps to prevent and reduce accidents.

Key words: accidents, behavior, knowledge, culture, safety.

© Los autores. Este artículo Open Access está publicado bajo la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC-BY 4.0).



1. Introducción

Los accidentes laborales son graves problemas a los que se enfrentan todas las empresas mineras y constructoras a nivel mundial, aunque existe normas y leyes de seguridad que regula todo lo relacionado con la salud ocupacional. Sin embargo, esto por sí solo no es suficiente para prevenir accidentes. De acuerdo a Organización Internacional de Trabajo (OIT) (2020), 6 300 trabajadores fallecen cada día y más de 2,34 millones fallecen anualmente. Debido a esto, el Estado peruano promulgó la Ley de Seguridad Laboral N° 29783 y el Reglamento de Seguridad en Minería “DS 024-2016-EM modificado por D.S. N° 023-2017-EM” con el fin de prevenir y controlar los accidentes de trabajo. Elescano (2023) menciona que existen otros estándares y normas que pueden ayudar a mejorar su sistema de gestión de seguridad, como la implementación de la norma ISO 45001: 2018.

Por otra parte, Álvarez et al. (2022) encontraron que muchas empresas mineras tienen sistemas de seguridad y salud en el lugar de trabajo ineficientes, y amplio desconocimiento de las normas. Por lo tanto, señalan que el cumplimiento de las leyes de seguridad y los beneficios de un lugar de trabajo saludable y protegido contribuyen a un mejor desempeño en las actividades de los trabajadores. Por ello, es importante aunar esfuerzos para brindar ayuda de otras metodologías. Por otro lado, Castaño et al. (2022) señala que los problemas asociados con la seguridad en las empresas mineras no se deben solo a la mala gestión de seguridad y el incumplimiento de normas y leyes, sino que también está relacionada con el comportamiento de los trabajadores. Este principio se ha desarrollado mediante metodologías de seguridad basadas en el comportamiento, que permiten a los trabajadores aprender y ser conscientes de sus responsabilidades, así como del cuidado de su propia integridad. Es un proceso de trabajo en equipo que requiere la participación de todos los miembros de la alta dirección, supervisores y trabajadores con el fin de lograr el bienestar y la salud y aumentar el conocimiento de los empleados sobre temas relacionados con la gestión de la seguridad. Además, Cabanillas (2022) indica que la causa principal de los accidentes ocurre por malas prácticas del trabajador en ese sentido. Su investigación se centra en el impacto de las metodologías de seguridad basadas en el comportamiento, que evidenciaron un incremento en el nivel de conducta seguro de 94,9%. Este éxito se debe a la educación y capacitación continua, la sensibilización y las evaluaciones y la formación hacia una cultura de prevención, lo que ha llevado a una reducción del 90% de los accidentes. Asimismo, Pariona y Matos (2021) afirman que la metodología ha demostrado ser eficaz en la modificación y mejora efectiva de las conductas de riesgo a seguras, y ayudó a fortalecer las actividades planificadas por la organización, pues alcanzó un comportamiento seguro en el 77% de los trabajadores. Sobre esta base, el programa se mantiene eficiente y es muy útil para la reducción de accidentes.

López y Romero (2020) afirman que mejorar la gestión de la seguridad requiere una visión integral de todas las actividades, que identifique las desviaciones que deban ser estandarizadas según las normas de seguridad y realicen mejoras durante todo el proceso. Para lograr esto, es necesario explorar y conocer las características del entorno laboral, como la rotación del personal, la estandarización en el lugar de trabajo y las conductas inseguras de los trabajadores. Esto ayudó enormemente a reducir los accidentes

y creó una cultura de prevención que permitió que el 87% de los participantes mejorase su comportamiento. Del mismo modo, Montero (2021) enlistó una serie de actividades críticas y luego desarrolló un plan de acción para cada una. El resultado fue una reducción de los accidentes, ya que el método SBC tiende a controlar los comportamientos de los trabajadores. La población estudiada corresponde al personal operativo de la empresa minera Raura, la cual se dedica a la explotación de minerales polimetálicos en labores subterráneas, donde están expuesto a trabajos de alto riesgos, propensos a sufrir accidentes. Por lo tanto, proponemos un enfoque basado en el comportamiento humano, con el propósito de mejorar el sistema de gestión de seguridad para reducir el índice de accidentabilidad mediante la implementación de la metodología seguridad basada en el comportamiento. Para lograr este objetivo, la investigación se lleva a cabo mediante el diagnóstico e identificación de actividades críticas.

La importancia de resolver el problema de la ocurrencia de accidentes es uno de los desafíos más difíciles para toda empresa. Por lo tanto, las técnicas de la metodología SBC es eficaz para detectar conductas peligrosas y salvaguardar y garantizar la seguridad de los trabajadores, ya que se enfoca en mejorar la conducta negativa de los colaboradores. Según Meliá (2007), para que un colaborador trabaje de manera segura deben cumplirse 3 condiciones de poder, saber y querer realizar un trabajo seguro (p. 61).

2. Métodos

2.1. Tipo y diseño de investigación

La presente investigación es de tipo aplicada, ya que su finalidad es solucionar problema de los accidentes y conductas riesgosa. En ese sentido, Hernández et al. (2014) enfatiza que este “tipo de investigaciones se basan en ciencia pura”. Con respecto al diseño es cuasi experimental, se trata de una investigación de causa efecto porque se manipula una variable deliberadamente para detectar los comportamientos de los trabajadores, así como no se pretende controlar las variables, sino describir sus efectos. En cuanto al enfoque del estudio, es cuantitativo porque se realizó la estadística de la frecuencia de los actos inseguros y el porcentaje de accidentes e incidentes. Teniendo en cuenta a Hernández et al. (2014), este consiste en “recopilar información y cuantificar resultados numéricos a través de la estadística”. El estudio se realizó de abril a diciembre de 2023 y los accidentes registrados desde el año 2019 al 2023 en la empresa minera Raura, ubicada en el distrito de San Miguel de Cauri, provincia de Lauricocha y departamento de Huánuco.

2.2. Población y muestra

La población de este estudio estuvo conformada por los 100 trabajadores que laboran en la empresa minera Raura, que incluye a todos los trabajadores operativos y excluye a los trabajadores administrativos y trabajadores eventuales o de visita. Se les explicó previamente el propósito del estudio y participaron voluntariamente. En este sentido, Hernández et al. (2014) plantea la formula finita, que calcula el tamaño de la muestra:

$$n = \frac{N \times Z_a^2 \times p \times q}{d^2 \times (N - 1) + Z_a^2 \times p \times q}$$

Donde:

Z = Coeficiente de confianza = 1,96

e = Error de estimación 5 %

p = Variable estudiada en la población = 0,5

q = Probabilidad de No ocurrencia del evento = 0,5

N = Tamaño de la población = 100

n = Tamaño de la muestra

Como resultado del ejercicio se obtuvieron: n = 80 trabajadores (muestra)

2.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para el presente estudio, se utilizaron encuestas, observaciones y registros documentales como instrumentos de medición. La investigación consta de tres etapas fase inicial, intermedia y final. Durante el pretest se realizaron encuestas de 24 preguntas basadas en las siguientes dimensiones: conocimiento de seguridad, comportamientos, actitud laboral y accidentabilidad. Durante la fase final del postest, se volvió a encuestar con los mismos cuestionarios. Estas encuestas se realizaron de manera anónima y el criterio de evaluación consistió en una escala de valores deficiente y regular para diagnosticar el nivel conocimientos de los trabajadores. Por otro lado, se utilizaron las cartillas de observación para identificar las conductas seguras y riesgosas y la revisión documental.

2.4. Análisis e interpretación de la información

Para analizar la información de los resultados de las encuestas, se digitalizó en una base de datos Excel, las cuales se exportaron a Software de SPSS V.20. La información se procesó mediante estadística descriptiva, en tablas y figuras, se evaluaron frecuencias, porcentajes y pruebas de normalidad entre variables. El análisis de los comportamientos se procesó en Excel y se presentaron los resultados mediante las tabulaciones y macros.

3. Resultados

3.1. Descripción de los riesgos

Se muestran las estadísticas de accidentes de la empresa minera Raura de los años 2021, 2022 y 2023, como se observa en la tabla 1. Los últimos años fueron los que más accidentes reportaron, en particular en los meses de julio, agosto y diciembre. Debido a las condiciones laborales de la explotación de minerales en las minas subterráneas, los

INDUSTRIAL

Seguridad basada en el comportamiento para reducir el índice de accidentabilidad en la empresa minera Raura

trabajadores realizan tareas de alto riesgo y están expuestos a sufrir accidentes. Por ello, se realizó un diagnóstico para identificar los principales riesgos que causan accidentes, que son los comportamientos inseguros y las actividades críticas. Dentro de ello, se han encontrado las 12 actividades más riesgosas que provocan comportamientos inseguros entre los trabajadores, que son el incumplimiento de procedimientos, el uso inadecuado de los EPPS, el uso inadecuado de dispositivos celulares, el exceso de confianza, la prisa, el manejo de equipos pesados, el manejo de vehículos automotores y la perforación con diamantina. Por eso, se implementa una metodología de seguridad basada en el comportamiento que se enfoca en el comportamiento humano para ayudar a concientizar y la formación a través de la capacitación con el propósito de corregir los actos inseguros identificados en diversas actividades del proceso y, así, mejorar la gestión seguridad.

Tabla 1.

Índices de accidentabilidad en la empresa minera Raura

Año	Mes	H-H	Accidentes	Accidentes	Accidentes	Índice de	Índice de	Índice de
		Trabajadas	Incapacitantes	leves	fatales	Frecuencia	Severidad	Accidentabilidad
		Mes	Mes	Mes	Mes	Mes	Mes	Mes
2021	Ene	396,219	1	1	0	2.52	45.43	0.11
2021	Feb	376,256	2	1	0	5.32	63.79	0.34
2021	Mar	406,011	0	0	0	0.00	157.63	0.00
2021	Abr	406,105	0	0	0	0.00	142.82	0.00
2021	May	423,501	0	0	0	0.00	155.84	0.00
2021	Jun	412,772	0	0	0	0.00	135.67	0.00
2021	Jul	452,458	1	1	0	4.42	137.03	0.61
2021	Ago.	460,884	0	0	0	2.17	173.58	0.38
2021	Set	458,505	0	0	0	0.00	187.57	0.00
2021	Oct	496,555	0	0	0	0.00	180.82	0.00
2021	Nov	478,325	0	0	0	0.00	182.88	0.00
2021	Dic	498,728	3	2	0	9.49	190.256	0.68
2022	Ene	142,802	1	0	0	7.00	63.02	0.44
2022	Feb	190013	0	2	0	0.00	84.2	0.00
2022	Mar	292,036	1	2	0	3.42	68.48	0.23
2022	Abr	330,844	0	1	0	0.00	48.36	0.00
2022	May	380,669	1	2	0	2.63	55.17	0.14
2022	Jun	393,916	1	3	0	2.54	83.77	0.21
2022	Jul	459,682	1	2	0	2.18	17.4	0.04

2022	Ago.	499,354	2	3	0	4.01	24.03	0.10
2022	Set	531,431	0	4	0	0.00	1.88	0.00
2022	Oct	533,386	2	4	0	3.75	18.75	0.07
2022	Nov	512,436	1	3	0	1.95	33.17	0.06
2022	Dic	451,199	1	2	0	2.22	55.41	0.12
2023	Ene	459,069	2	2	0	4.36	58.81	0.26
2023	Feb	393,576	0	2	1	2.54	15,323.60	38.93
2023	Mar	443,046	3	3	0	6.77	58.68	0.40
2023	Abr	451,405	0	2	0	0.00	31.01	0.00
2023	May	468,989	1	3	0	2.13	21.32	0.05
2023	Jun	471,925	3	3	0	6.36	44.5	0.28
2023	Jul	495,664	1	7	0	2.02	44.38	0.09
2023	Ago.	475,555	0	11	0	0.00	48.36	0.00
2023	Set	496,744	2	3	0	4.03	66.43	0.27
2023	Oct	522,170	3	2	0	5.75	566.87	3.26
2023	Nov	511,510	2	1	0	3.91	78.2	0.31
2023	Dic	506,210	2	2	0	5.93	59.26	0.35

Nota: Esta tabla muestra la cantidad de accidentes ocurridos entre años 2021 al 2023.

3.2. Resultados del Programa SBC después de su implementación, los efectos y las mejoras en la conducta de los trabajadores

Los resultados del estudio indican que, después de la aplicación del SBC, se puede evidenciar que el programa tiene un impacto significativo en la mejora del comportamiento de seguridad en los trabajadores de la empresa minera Raura, lo cual se presenta en los siguientes puntos.

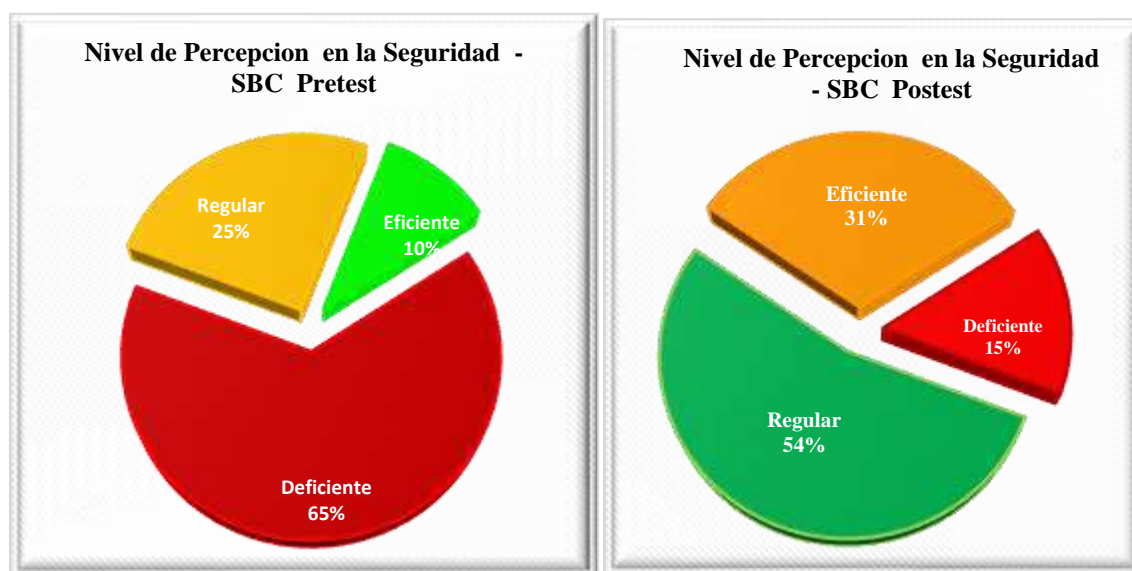
3.2.1. Diagnóstico del nivel de conocimiento y la percepción de seguridad de los trabajadores

En este estudio, el conocimiento de los trabajadores se diagnosticó en dos etapas, un pretest y un postest. De acuerdo a la figura 1, en la etapa inicial de la prueba, los resultados mostraron que el 65% de trabajadores se encontraban en nivel deficiente. Es claro que los trabajadores no eran conscientes de la importancia del uso de EPP, no estuvieron familiarizados con sus procedimientos y la conducción de los equipos de manera defensiva. Asimismo, carecían de una cultura de seguridad organizacional. En cuanto al diagnóstico, en la etapa post test, después de 32 semanas de implementación del SBC, el porcentaje del nivel conocimiento y la percepción de la seguridad aumentó del siguiente modo: 54 % en el nivel regular, 31 % en nivel eficiente y 15 % en nivel

deficiente. Contribuyeron a esta mejora la educación, sensibilización continua y seguimientos realizados a los trabajadores.

Figura 1.

Nivel de conocimiento y la percepción de seguridad

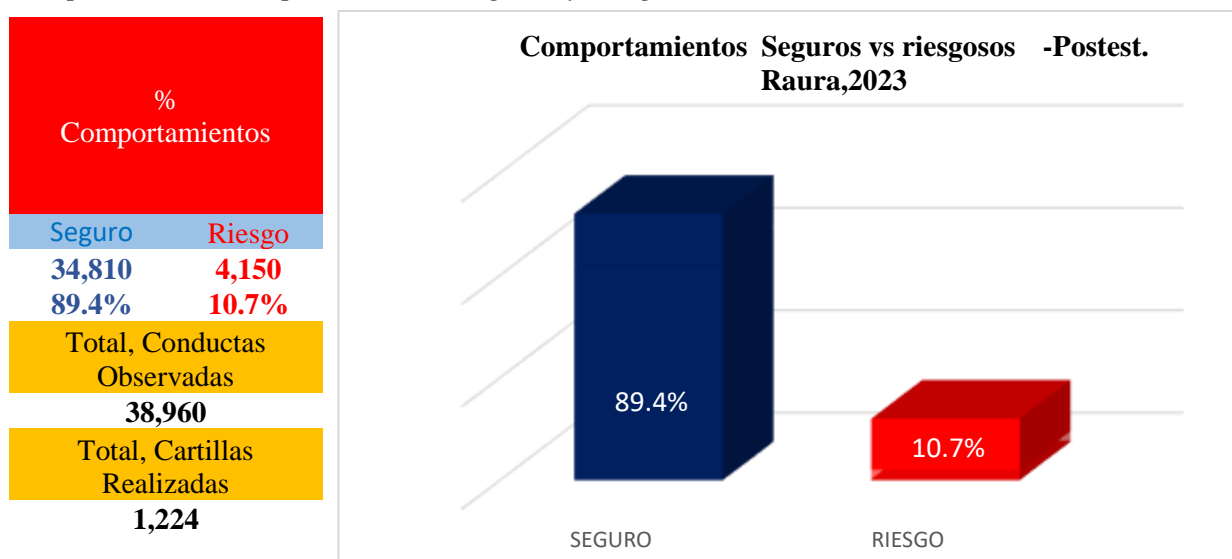


3.2.2. Variación de comportamientos seguros e inseguros

En la figura 2, se muestra los resultados esperados de la implementación del SBC. La intervención de la metodología ha demostrado una mejora relevante en el comportamiento de los trabajadores y ha mejorado el 89,4% de los comportamientos seguros y reducido el 10,7% de los comportamientos riesgosos. Finalmente, la implementación del SBC ha transformado la cultura preventiva de los trabajadores, lo que ha dado lugar a nuevas perspectivas para garantizar a un trabajo seguro.

Figura 2.

Comparación de comportamientos seguros y riesgosos



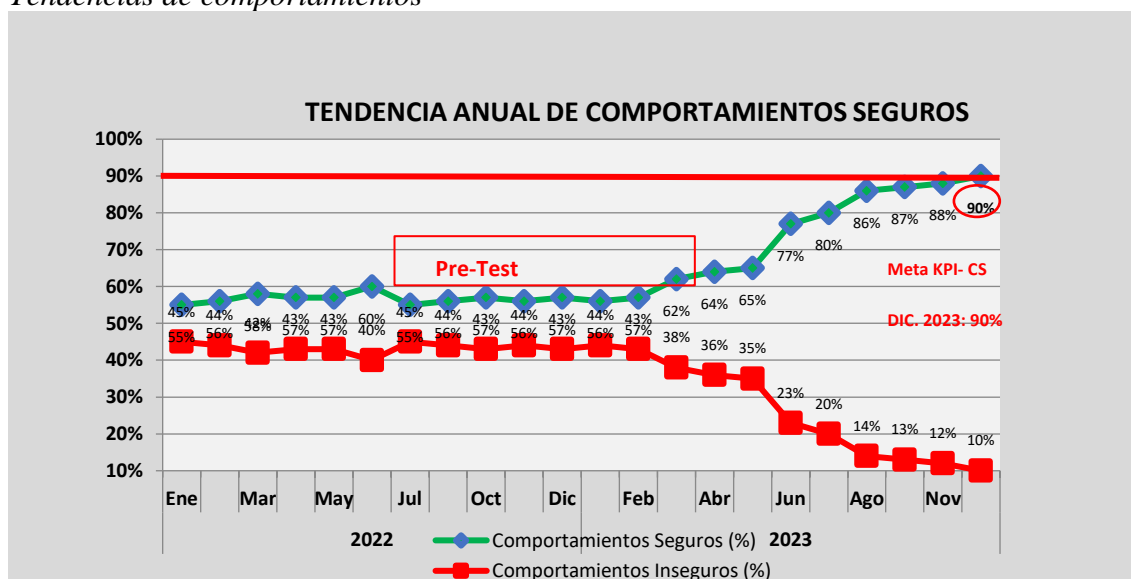
Nota: El gráfico muestra el cambio de comportamientos después de su implementación.

3.2.3. Tendencias de comportamiento seguro/ riesgosos por meses

En la figura 3, se muestra, después de la implementación de la SBC, que existe una clara tendencia hacia el comportamiento seguro o, lo que es lo mismo, una disminución significativa del comportamiento inseguro a 10%. El aumento de los comportamientos seguros fue de 90%, por lo que se alcanzó la meta deseada.

Figura 3.

Tendencias de comportamientos



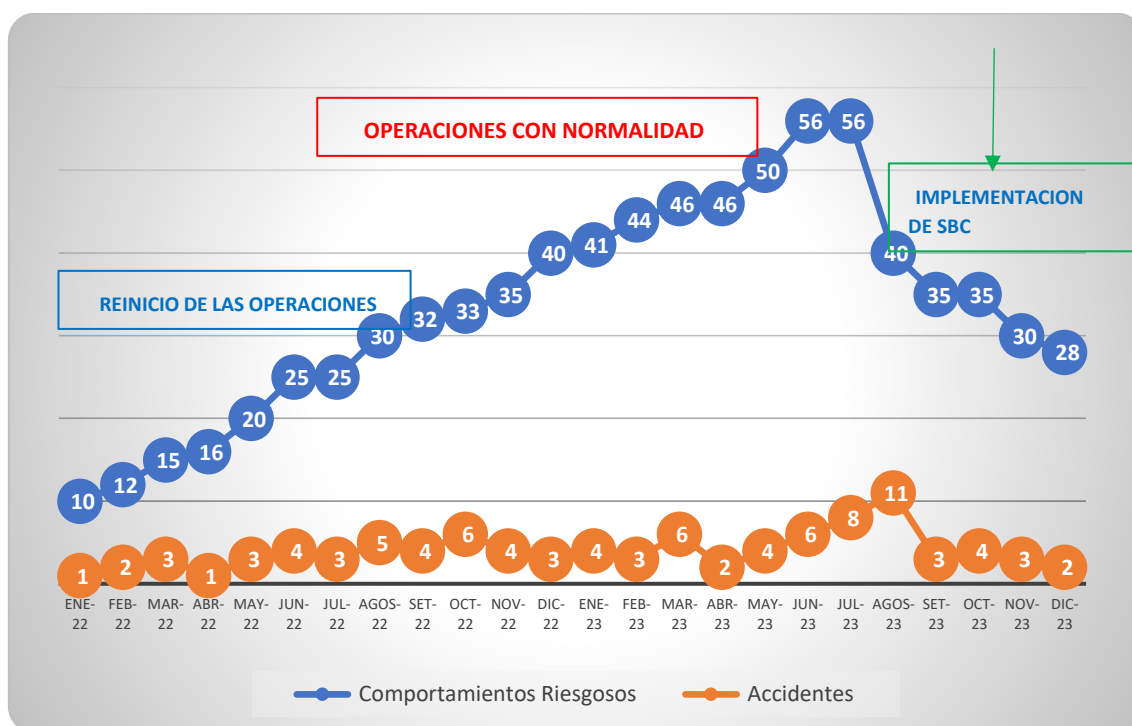
Nota.: En el gráfico se evidencia la tendencia de aumento de comportamientos seguros y la reducción de comportamientos inseguros.

3.3. Evaluación de los resultados de reducción de accidentes

La figura 4 muestra los detalles de los resultados de la frecuencia accidentes mensuales y registro de comportamientos riesgosos desde enero de 2022 a diciembre de 2023. Se observa que, de agosto de 2022 a agosto de 2023, la frecuencia de accidentes fue la más crítica con 66 casos. Sin embargo, luego de la implementación de SBC, hubo una disminución significativa de los accidentes y los comportamientos riesgosos. El promedio de accidentes después de la implementación se reduce en un 73 %, es decir, de 11 a 3 casos al mes. Esto significa que el índice de accidentabilidad ha disminuido claramente. De tal forma, el enfoque SBC es eficaz y tienen un impacto en la reducción de accidentes y lesiones en el lugar de trabajo. Al centrarse en identificar y cambiar comportamientos inseguros, la empresa establece una cultura de seguridad en los trabajadores que garantiza que estén entrenados y capacitados para asumir la responsabilidad de su propia seguridad y la de sus compañeros de trabajo.

Figura 4.

Accidentes y comportamientos riesgosos por meses



4. Discusión

El propósito del estudio fue mejorar el sistema de gestión de seguridad mediante la aplicación de la metodología SBC para reducir el índice de accidentes en la empresa minera Raura. Sobre esta base, se analizaron los fundamentos teóricos del D.S 024 -2016 -EM, y su modificatoria D.S.023-2017-EM (2016), que menciona que todas las empresas tienen la obligación de identificar sus peligros y capacitar y entrenar a sus trabajadores, tomar medidas preventivas para minimizar y controlar las conductas riesgosas y evitar accidentes. Según los hallazgos encontrados del estudio, la implementación de SBC

redujo significativamente los accidentes y comportamientos riesgosos en la compañía minera Raura, como se puede observar en la figura 4. El índice de accidentabilidad ha disminuido de manera relevante en los últimos meses del año 2023 en relación con el año 2022 e incluso los primeros meses de 2023, que fueron anteriores a la implementación del SBC. Asimismo, se ha logrado que las actitudes proactivas de seguridad pasaran al 89.4 %, lo que demuestra que la metodología es efectiva para proteger la seguridad en el trabajo. Por lo tanto, continuar promoviendo la concientización y el cumplimiento de las normas de seguridad es fundamental. Estos resultados coinciden, como lo señalan Tito y Silva (2019), con la disminución significativa del número de accidentes en el año 2014 obteniendo como resultado de 14,84%, mientras para el año 2013 con 36.36% y el 48.8% para el año 2012, Aunado a esto, la implementación de metodología SBC ha demostrado una mejora significativa en el desempeño de seguridad de la compañía. De la misma manera, estos resultados guardan relación con los hallazgos de Pabón y Rubiano (2020), quienes afirman que la aplicación de SBC logró mejorar el conocimiento y crear una cultura de seguridad y confianza en los trabajadores. Además, fue exitosa en la reducción muy significativa de los accidentes con lesiones personales, accidentes con daño a la propiedad e incidentes. Considerando los antecedentes utilizados y la coincidencia con este estudio. Está claro que los accidentes ocurren debido a un mal comportamiento y toma de malas decisiones de los propios trabajadores. Debido a esto, el programa SBC es eficaz porque está enfocado en identificar conductas inseguras y sirve como una herramienta de intervención inmediato y corrigiéndolas. Desde el punto de vista, Barriga y Puma (2021) para la implementación de la metodología SBC es necesario estudiar fundamentos teóricos de la metodología. En este contexto, en esa investigación se analizaron los fundamentos de la teoría tricondicional de SBC. Al respecto, Amelia (2007) define las tres condiciones que deben existir para un trabajo seguro: poder, saber y querer trabajar seguro. Asimismo, se debe identificar los comportamientos riesgosos y diagnosticar las actividades críticas de la organización. Son esenciales estos elementos para la efectividad del plan de implementación de la metodología. En este sentido, los resultados encontrados guardan relación por que se siguió los mismos procesos de recolectar la información con técnicas de observación y encuestas y estos resultados coinciden con la investigación de Barriga y Puma (2021). Para dicho estudio, se redujo el número de accidentes, actitudes riesgosas y significativamente disminuye reporte de incidentes. Además, se aumentó la conciencia sobre la seguridad en los trabajadores. De acuerdo con Rodríguez (2020), el modelo conductual del programa SBC se basa en la capacitación, concientización y entrenamiento continuo y sobre todo la comunicación efectiva, para fortalecer los comportamientos, reforzar el nivel de conocimientos, entender y aceptar la importancia del autocuidado y, a la vez, generar una confianza en los trabajadores. Por lo tanto, todos los investigadores consideran que la observación y la retroalimentación son métodos de SBC, que llevará a resultados favorables para mejorar el nivel de cultura de seguridad deseado en una organización.

Dicho esto, existe una relación con los resultados encontrados del presente estudio, que aumentó significativamente los comportamientos seguros de los trabajadores al 90 % y, simultáneamente, una disminución de comportamientos inseguros en un 10%. Por otro lado, también coinciden con los resultados obtenidos por Sogamoso y Troya (2020), quienes buscaron identificar las causas de un accidente laboral, sobre la base de las técnicas de análisis de resolución de problemas. Con su identificación, fue posible

poner en práctica una metodología de SBC para complementar la gestión de seguridad y ayudó a identificar los actos inseguros y reducir el número de accidentes en la organización. Por otra parte, Loayza (2023), en su estudio, se centró a evaluar la línea de mando que son los supervisores, quienes, al capacitar, impactan significativamente en la reducción de accidentes y en el desempeño de indicadores de seguridad. Por esta razón, los supervisores fueron evaluados mediante los instrumentos de encuesta y observación utilizados en las evidencias anteriores. Los resultados del presente estudio guardan relación porque se logró reducir el índice de accidentabilidad y aumentó la eficiencia del liderazgo con una cultura preventiva. De igual manera, coincide con los resultados obtenidos por Molocho (2023), quien buscó diagnosticar la baja participación de reportes de actos subestándares y condición subestándar. Después de capacitar en el manejo de reportes, la percepción y la motivación de los trabajadores han ido incrementándose de manera favorable. En esa misma línea, Duque Zapata et al. (2023), en su investigación, lograron mejorar significativamente la cultura de sus trabajadores a través de charlas, capacitaciones, sensibilizaciones y acercamiento continuo, lo que aumentó progresivamente su autoestima y autovaloración. Logró, por último, que los colaboradores sean más comunicativos, proactivos y tengan una actitud positiva hacia la seguridad.

5. Conclusión

En esta investigación, se determinó que los accidentes laborales son problemas que acontecen a diario causados por comportamientos riesgosos de los mismos trabajadores. en base a ello, con la implementación de la metodología de SBC, se logró mejorar la gestión de seguridad y ha tenido un impacto positivo. En este estudio se demuestra que la metodología SBC influyó significativamente en la reducción de accidentes, mejoró los comportamientos seguros en un 89.4% y ayudó a reducir dichos actos subestándares en 10.7%. Asimismo, en esta etapa, también se llevó a cabo el diagnóstico de conocimiento de pre test - post test.

Después de que el programa se implementó, los trabajadores mejoraron su conocimiento y conciencia de seguridad. Finalmente, la aplicación de SBC nos ayudó a mejorar la tendencia de comportamientos seguros y crear una cultura de seguridad en los trabajadores y prevenir accidentes de manera efectiva. En futuras investigaciones, se recomienda realizar estudios longitudinales a gran escala para obtener mayor beneficio de SBC. Asimismo, las industrias mineras deben optar por la implementación del programa, ya que ayuda a concientizar a los trabajadores mediante la capacitación, talleres y retroalimentación.

6. Referencias

- [1] Álvarez Contreras, D.E., Araque Geney, E.A. y Jiménez Lyons, K. A. (2022). Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo, Mipymes de Sincelejo, Colombia. *Sistema Institucional de Revistar Udenar*, XX (2),179-201. <https://doi.org/10.22267/rtend.222302.206>
- [2] Barriga Paria, C.J. y Puma Cruz, G.M. (2021). Diseño y aplicación de un programa de seguridad basado en el comportamiento SBC para reducir los incidentes y accidentes en las actividades de perforación e inyección en el dique de arranque, proyecto minero Quellaveco. *Revista Memoria Investigaciones en Ingeniería*, 21(2021),71-93. <https://doi.org/10.36561/ING.21.7>
- [3] Cabanillas Coba, A. (2022). Seguridad basada en el comportamiento y accidentabilidad de los colaboradores de una empresa minera. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*,25(50),161-168. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v25i50.22559>
- [4] Castaño Betancur, N.J., Noguera León, B.A. y Vivas Enríquez, A.V. (2022). *Propuesta de programa de seguridad basado en el comportamiento para la reducción de accidentes y enfermedades laborales en la empresa colombiana integral de transporte Cointran S.A.S., basados en la legislación vigente*. [Tesis en Especialización en gerencia de la seguridad y salud en el trabajo, Universidad ECCI de Colombia]. <https://repositorio.ecci.edu.co/bitstream/handle/001/2487/Trabajo%20de%20grado.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [5] Congreso de la República del Perú. (2014). *Ley 30222 que modifica la Ley 29783 Seguridad y Salud en el Trabajo de 2014*. *Diario Oficial El Peruano*.
- [6] Duque Zapata, M.A., Rodríguez Machado, E.A., y Ramírez Pulgarín, D.A. (2023). *Proyecto de intervención con base en los principios del programa de seguridad basada en el comportamiento (sbc), y la autovaloración para contribuir a la disminución de accidentes de trabajo en la producción de tablillas y estacones en el aserrío Don francisco* [Titulo para optar grado especialista en gerencia de la seguridad y salud en el trabajo, Universidad Ces Facultad de Medicina Madelin]. <https://repository.ces.edu.co/handle/10946/8195>
- [7] Elescano Yupanqui, J. M. (2023). Influencia de la implementación de la Norma ISO 45001:2018 en la percepción de seguridad y salud de los estudiantes de Ingeniería Geológica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*,26(52),1-6. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v26i52.26364>
- [8] Fidias Gerardo, A.O. (2012). Proyecto de la investigación Introducción a la metodología científica. Editorial Episteme, C.A https://tauniversity.org/sites/default/files/libro_el_proyecto_de_investigacion_de_fidias_g_arias.pdf

- [9] Hernández Sampieri, R., Fernández Callado, C. y Baptista Lucio, M. P. (2014). *Metodología de la investigación Sexta edición*. México Interamericana editores. ISBN: 978-1-4562-2396-0
- [10] Loayza Susanibar, G. F. (2023). Estrategias en seguridad y salud ocupacional para la reducción de accidentes en empresas mineras. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*,26(52),1-6. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v26i52.25280>
- [11] López Montalbán, M.E. y Romero Baylón, A.A. (2020). Método Intervención en la Reducción del Índice de Accidentabilidad en la Contratista minera Aesa. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*,23 (46),147-153. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v23i46.19191>
- [12] Meliá, J.L., (2007) Seguridad Basada en el Comportamiento, *Unitat investigación de Psicometría Universidad de Valencia*. 157-180. <https://www.sotarmin.com/wp-content/uploads/2023/11/139504397-03-01-Seguridad-Basada-en-El-Comportamiento.pdf>
- [13] Molocho Herrera, R. A. (2023). Percepción de los trabajadores sobre los reportes de actos y condiciones subestándares. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*,26(52), 1-6. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v26i52.25988>
- [14] Montero Martínez, R. (2021). Análisis De Las Críticas A La Tecnología De La Gestión De La Seguridad Basada En Los Comportamientos. *Revista Brasileira de Ergonomia*,6(1),39-61.<https://revistaacaorgonomica.org/article/627d5827a9539-5060d327af3/pdf/abergo-6-1-39.pdf>
- [15] Organización Internacional del Trabajo, Seguridad y Salud en el Trabajo. (02 de mayo de 2024). *Día Mundial de la Seguridad y la Salud en el Trabajo*. <https://www.ilo.org/es/normas-internacionales-del-trabajo/temas-comprendidos-en-las-normas/seguridad-y-salud-en-el-trabajo>
- [16] Pabón Rojas, D.C. y Rubiano Osorio, M. (2020). *Programa de seguridad basada en el comportamiento para la prevención de accidentes de trabajo y enfermedades laborales en una pyme del sector de la construcción en la ciudad de Bogotá D.C.* [Título en Maestría en Seguridad y Salud en el Trabajo, Pontificia Universidad Javeriana]. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/49975>
- [17] Pariona Palomino. y Matos Ormeño, W. (2020). Seguridad Basada en el Comportamiento: hacia una cultura del trabajo seguro. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 24(47),177-123. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i47.19195>

[18] Rodríguez Portocarrero, P. (2020) *Implementación del modelo de observación conductual aplicado a la seguridad (OCAS) para incrementar comportamientos seguros y reducir comportamientos inseguros en trabajadores de la minería polimetálica*. [Título para optar grado magister en Gestión Integrada con mención en Seguridad, Salud Ocupacional y Medio Ambiente, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/11773/Rodriguez_pp.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[19] Sogamozo Andrade, M.C. y Troya Lizcano, R.D. (2020). *Diseño de un Programa de Seguridad Basado en el Comportamiento para la Reducción de Accidentes Laborales en Varisur S.A.S*. [Título para optar grado magister en Gerencia de la Seguridad y Salud en el Trabajo, Universidad ECCI de Colombia]. <https://repositorio.ecci.edu.co/handle/001/793>

[20] Tito Cajia, L. y Silva, W. (2019). Influencia de la metodología seguridad basada en el comportamiento en la prevención y reducción del número de accidentes en CAME Contratistas y Servicios Generales S.A. - Proyecto Antamina – Periodo 2014. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 22(43), 93-98. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v22i43.16693>

Trayectoria académica

Wilder Beto Chamorro Celis

Universidad Nacional Mayor de San Marco, Perú.

Titulado en Ingeniería de Minas y en ingeniería Industrial CIP 292771 con estudios de Maestría en Gestión Integrada en Seguridad, Salud Ocupacional y Medio Ambiente en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Con solida conocimientos en Sistema Gestión integrado de Seguridad Salud Ocupacional y Gestión Ambiental, Calidad ISO 14001,45001,9001 y OHSAS 18001. Con experiencia en Minería subterránea e Industria, en especial énfasis en el Aseguramiento de Control de Calidad (QA/QC) en códigos Técnicos NI 43-101 y JORC.

wilder.chamorro@unmsm.edu.pe

Orcid: <https://orcid.org/0009-0004-7657-5270>

Contribución de autoría

Único autor, quien hizo la investigación total del tema del artículo.

Conflicto de intereses

Declaro que no existe conflicto de intereses en el desarrollo de la presente investigación.

Responsabilidad ética y legal

La presente investigación se llevó a cabo siguiendo los principios éticos del conocimiento, asegurándose de que la información es original y confiable.

Declaración sobre el uso de LLM (Large Language Model)

Este artículo no ha utilizado para el desarrollo de la investigación textos provenientes de LLM (ChatGPT u otros).

Financiamiento

El presente artículo ha sido realizado con los recursos propios del autor.

Agradecimiento

Mis agradecimientos a la Dra. Dora Isabel Pino Arana como asesora por haber aportado sus conocimientos y experiencias y tiempo para llevarse a cabo esta investigación de artículo. Mis agradecimientos a la empresa Raura, por facilitar la información útil para este estudio.

Correspondencia: wilder.chamorro@unmsm.edu.pe



Horno Batch a GLP con control PID para la automatización del proceso de curado de pintura electrostática

LPG batch Oven with PID control for the automation of the electrostatic paint curing process

Ricardo John Palomares Orihuela, Enzo Pietro Morán Ugarelli, Rafael Marcel Sánchez Soto

RECIBIDO: 05 de mayo de 2024.

ACEPTADO: 10 de junio de 2024.

RESUMEN

El presente artículo presenta la mejora del proceso de recubrimiento superficial con pintura electrostática mediante la fabricación de un horno de curado tipo batch a GLP con un volumen de trabajo de 20 m³. La estructura se fabricó con ángulos estructurales de 3/16" x 2", los paneles tipo sándwich de planchas de acero galvanizado de 0.6 mm y 1.0 mm y con un interior de lana de 2" de espesor como aislante. Se emplearon 6 quemadores infrarrojos catalíticos a GLP con una potencia total de 65.4 kW/h, con lo cual se logró alcanzar la temperatura de 180 °C en 20 minutos con carga máxima. Se diseñó una interfaz gráfica con una pantalla táctil. Se utilizó una Raspberry Pi 3B+ para ejecutar el software de control y monitoreo desarrollado en Python. Se empleó controladores industriales de temperatura PID y sensores PT-100 de tres hilos. Se realizó el modelamiento matemático del horno para obtener la función de transferencia y las constantes de sintonización del controlador PID. Se realizaron nueve pruebas para garantizar el correcto funcionamiento del horno. Se realizó el pintado y curado de láminas de muestra con espesores de 90 μm hasta 106 μm, lo cual garantiza la durabilidad de esta. Finalmente, se realizó pruebas de adhesión, rayado, doblez y lijado que arrojaron resultados óptimos.

Palabras claves: controlador PID, automatización, pintura electrostática, horno industrial, quemador infrarrojo.

Cómo citar

E. P. Morán Ugarelli, R. M. Sánchez Soto, y R. J. Palomares Orihuela, «Horno Batch a GLP con control PID para la automatización del proceso de curado de pintura electrostática», *Perfiles_Ingenieria*, vol. 20, n.º 21, pp. 180-196, jun. 2024.

ABSTRACT

This article presents the improvement of the surface coating process with electrostatic painting by manufacturing an LPG batch-type curing oven with a working volume of 20 m³. The structure was manufactured with 3/16" x 2" structural angles, sandwich panels made of 0.6 mm and 1.0 mm galvanized steel sheets and with a 2" thick wool interior as insulation. 6 LPG catalytic infrared burners were used with a total power of 65.4 kW/h, with which the temperature of 180 °C was reached in 20 minutes with maximum load. A graphical interface was designed with a touch screen. A Raspberry Pi 3B+ was used to run the control and monitoring software developed in Python. Industrial PID temperature controllers and three-wire PT-100 sensors were used. Mathematical modeling of the oven was carried out to obtain the transfer function and tuning constants of the PID controller. Nine tests were carried out to ensure proper operation of the oven. Sample sheets with thicknesses from 90 μm to 106 μm were painted and cured, which guarantees the durability of the applied paint. Finally, adhesion, scratching, bending and sanding tests were carried out, obtaining optimal results in each one.

Keywords: PID controller, automation, electrostatic painting, industrial oven, infrared burner.

© Los autores. Este artículo Open Access está publicado bajo la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC-BY 4.0).



1. Introducción

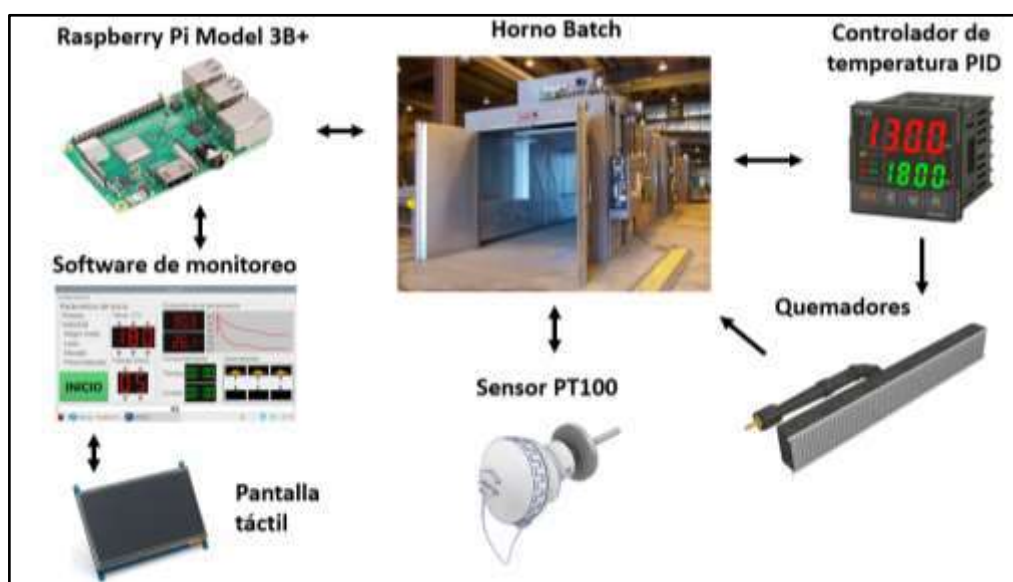
Muchas empresas metalmeccánicas están optando por utilizar pintura electrostática como recubrimiento superficial para sus productos. Esto se refleja, según la Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria (SUNAT), en su reporte de consulta importador-exportador del año 2019, en que los 2 principales importadores de este producto en el Perú hacen una suma total de S/. 6,290,176.00 (equivalente a unas 800 toneladas) y en el reporte del año 2020 asciende a la suma de S/. 6,701,56.00, equivalente a unas 957 toneladas (Aduanas, 2021). Este tipo de pintura permite tener un lote completo en unas cuantas horas a comparación de las pinturas líquidas tradicionales que requieren hasta 3 días. Muchas empresas no cuentan con un proceso de curado para pintura electrostática y tercerizan el proceso a empresas que presentan problemas en cuanto al control de calidad (inadecuado proceso de curado, insuficiente recubrimiento, pintura quemada), el incremento de los costos (servicio de pintado y transporte) y el incremento de los tiempos de producción.

2. Materiales y métodos

En la figura 1, se aprecia el diagrama con los dispositivos y actuadores involucrados en el diseño del horno batch. En la Raspberry Pi se ejecuta el software de monitoreo y muestra los parámetros en una pantalla táctil para el ingreso de parámetros para la operación del horno. Estos son enviadas al controlador de temperatura PID para accionar los quemadores. La Raspberry Pi también opera un módulo de relés para energizar todos los dispositivos.

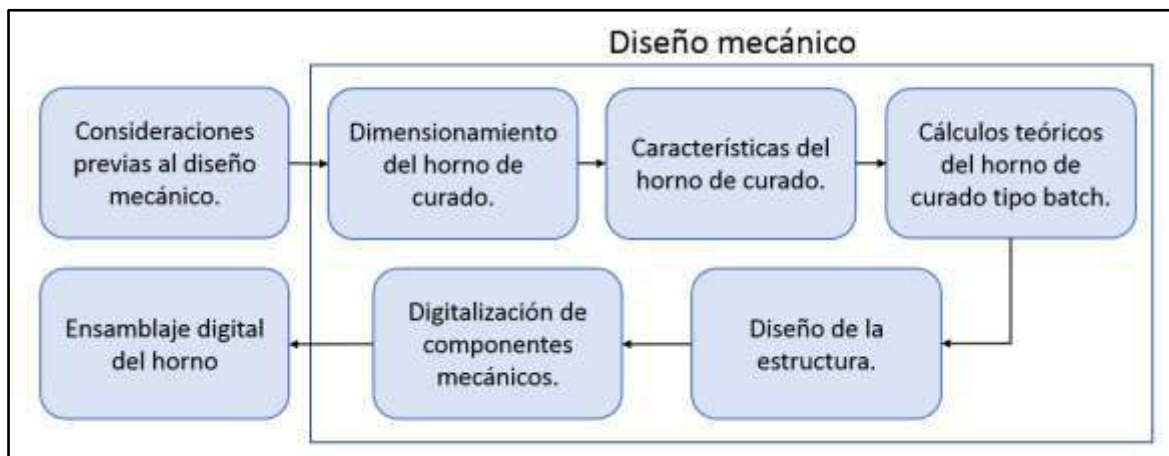
Figura 1.

Diagrama mecatrónico del sistema de control del horno

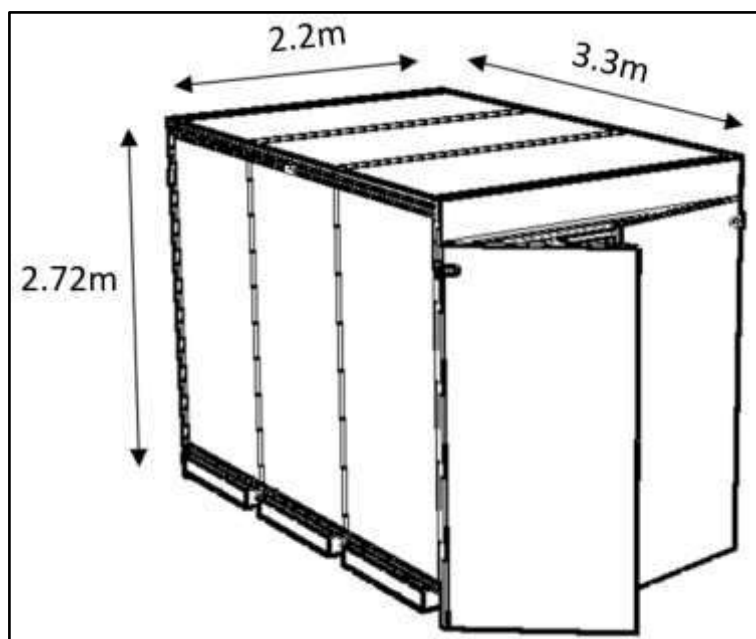


2.1. Diseño mecánico

En esta sección, se desarrolla los análisis y cálculos necesarios para realizar el diseño del horno batch. Se observa el flujograma del diseño mecánico con los pasos a desarrollar.

Figura 2.*Flujograma del diseño mecánico*

En la figura 3, se tiene un bosquejo del diseño del horno tipo batch utilizado para elaborar el proyecto.

Figura 3.*Vista isométrica del horno batch*

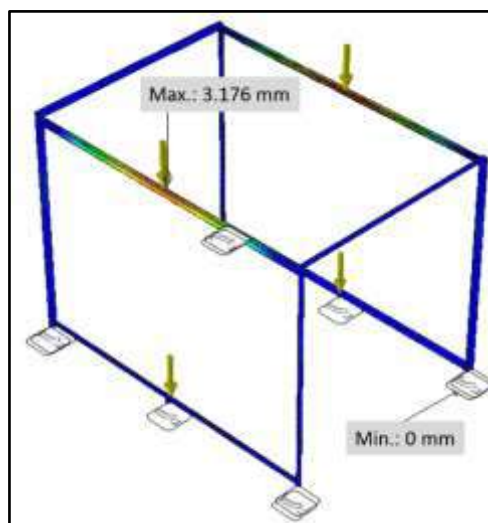
Para el cálculo de la potencia de los quemadores se utilizó la masa total de las paredes internas del horno, incluyendo las laterales, techo y puertas, y se tomó en cuenta el espesor de la plancha metálica de $e = 0.6 \text{ mm}$, $\rho_{\text{acero}} = 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ (densidad del acero) y el $A_{\text{total}} = 38.9 \text{ m}^2$ se obtiene que $Q_{\text{curado}} = 61.14 \text{ kW}$.

Los paneles aislantes están conformados por un núcleo y 2 placas de acero galvanizado de 0.6 mm y 1.0 mm. El aislante seleccionado es la lana de roca con las siguientes características: densidad de 100 kg/m^3 , conductividad térmica de 0.033 a 0.122 W/mK , y rango de temperatura de trabajo de $10 \text{ }^\circ\text{C}$ a $400 \text{ }^\circ\text{C}$.

Se utiliza el ángulo estructural A36 de $3/16''$ (4.8 mm) para determinar el espesor ideal de los ángulos y se realiza la simulación de esfuerzos con una carga de 395 kg (peso total de paneles aislantes). En la figura 4, se aprecia la simulación de desplazamiento con un máximo de 3.176 mm en la parte superior de la estructura.

Figura 4.

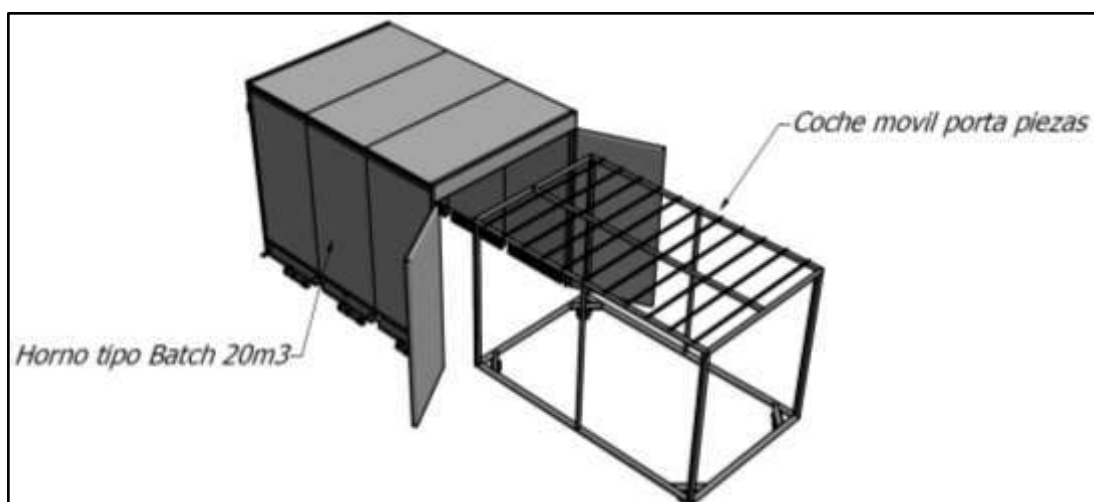
Simulación de desplazamiento máximo para ángulos de $3/16''$ (4.8 mm) espesor



En la figura 5, se muestra el ensamblaje final de las distintas piezas que conforman el horno de curado que está compuesto por ángulos de estructura, paneles aislantes, quemadores catalíticos infrarrojos y coche porta piezas.

Figura 5.

Ensamble digital del horno batch



2.1.1. Modelamiento matemático del horno y el controlador PID

La función de transferencia del horno batch es obtenida utilizando las leyes termodinámicas y la ley de enfriamiento de Newton. Mediante las ecuaciones 1 y 2 se obtuvo una función de transferencia de primer orden.

$$\frac{\theta_0(t)}{Q_i(t)} = \frac{R_{te}}{R_t C_t s + 1} \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{\theta_0(t)}{Q_i(t)} = \frac{86.7}{(85.41 \times 101.5)s + 1} = \frac{86.7}{8669.11s + 1} \dots \dots \dots (2)$$

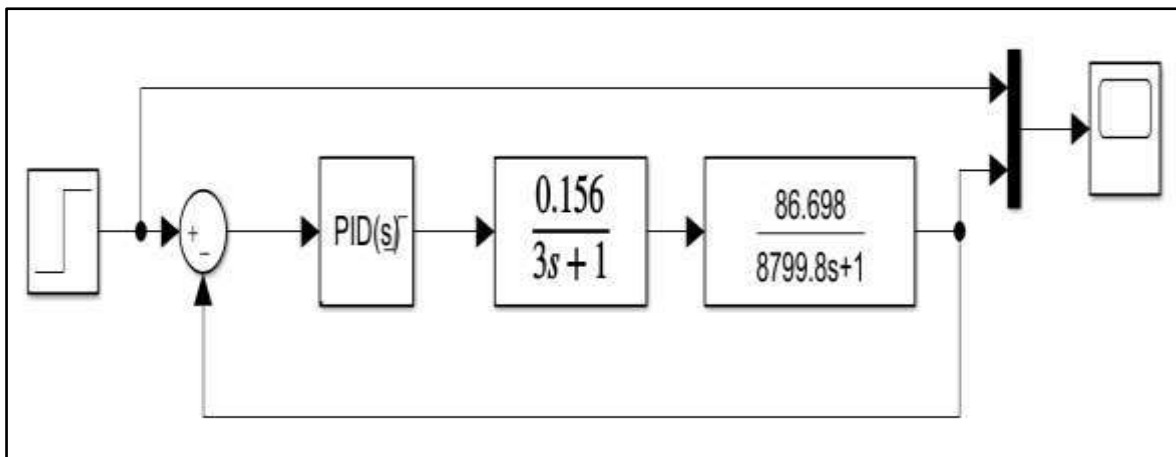
La función de transferencia de la válvula reguladora se expresa en la ecuación 3.

$$\frac{Q_i(s)}{P(s)} = \frac{0.0156}{3s + 1} \dots \dots \dots (3)$$

En la figura 6, se aprecia el diagrama de bloques desarrollado en Simulink en el que se ingresó la función de transferencia tanto del horno y como de la válvula reguladora.

Figura 6.

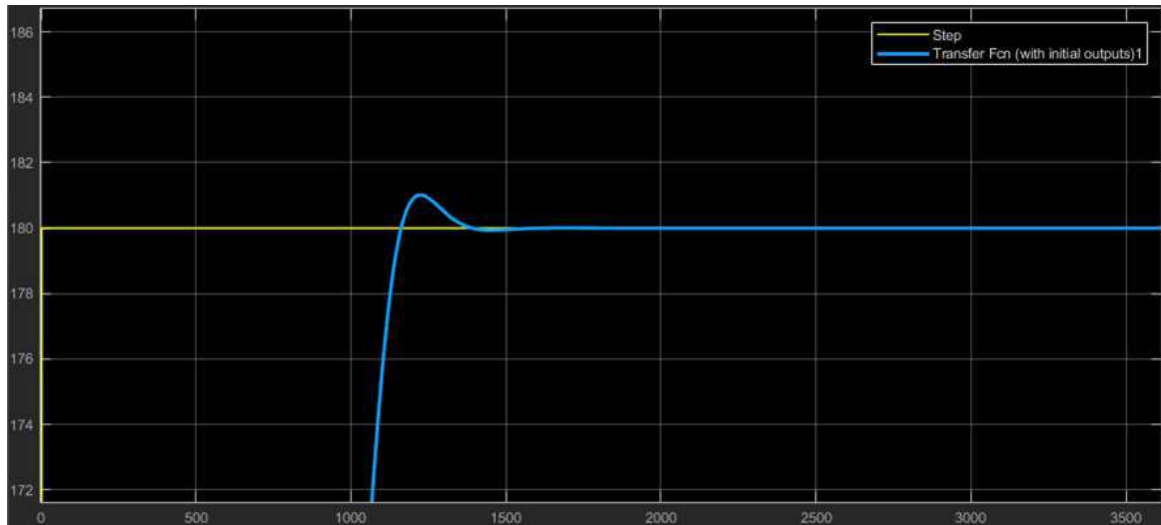
Ensamble digital del horno batch



Dado que la planta en lazo abierto no presenta un comportamiento sigmooidal y no obtiene la ganancia crítica que haga oscilar el sistema en lazo cerrado, no es posible la aplicación de métodos de sintonización del tipo Ziegler - Nichols o Cohen y Coon, por lo que se optó por un proceso heurístico, con valores pequeños para las ganancias Kp y Ki y analizar el comportamiento del sistema, cuyo resultado final se muestra en la figura 7.

Figura 7.

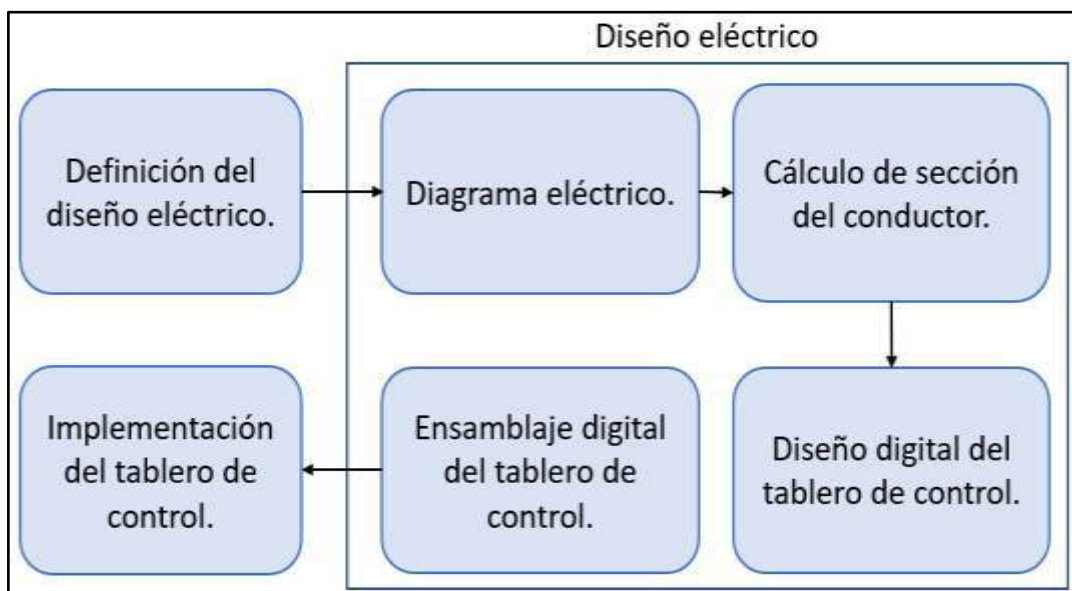
Respuesta del controlador PID con ganancia $K_p=15$, $K_i=0.2$ y $K_d=0$

**2.2. Diseño eléctrico**

Para la elaboración del diseño eléctrico se hizo uso del software AutoCAD para diseñar el diagrama eléctrico de conexionado de controladores de temperatura, quemadores infrarrojos catalíticos (parte de control) y la comunicación del controlador con la Raspberry Pi. En la figura 8, se observa el flujograma del diseño eléctrico.

Figura 8.

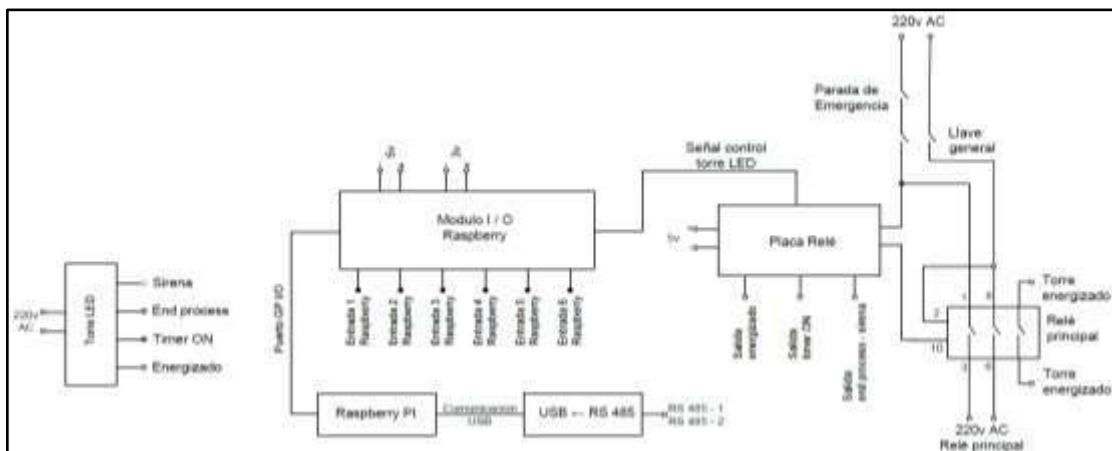
Flujograma del diseño eléctrico



En la figura 9, se observa el diagrama de conexiones de la etapa de control. El módulo de entradas y salidas de la Raspberry Pi, que controla el módulo de relés y activa las luces LED para indicar distintos estados de funcionamiento del horno.

Figura 9.

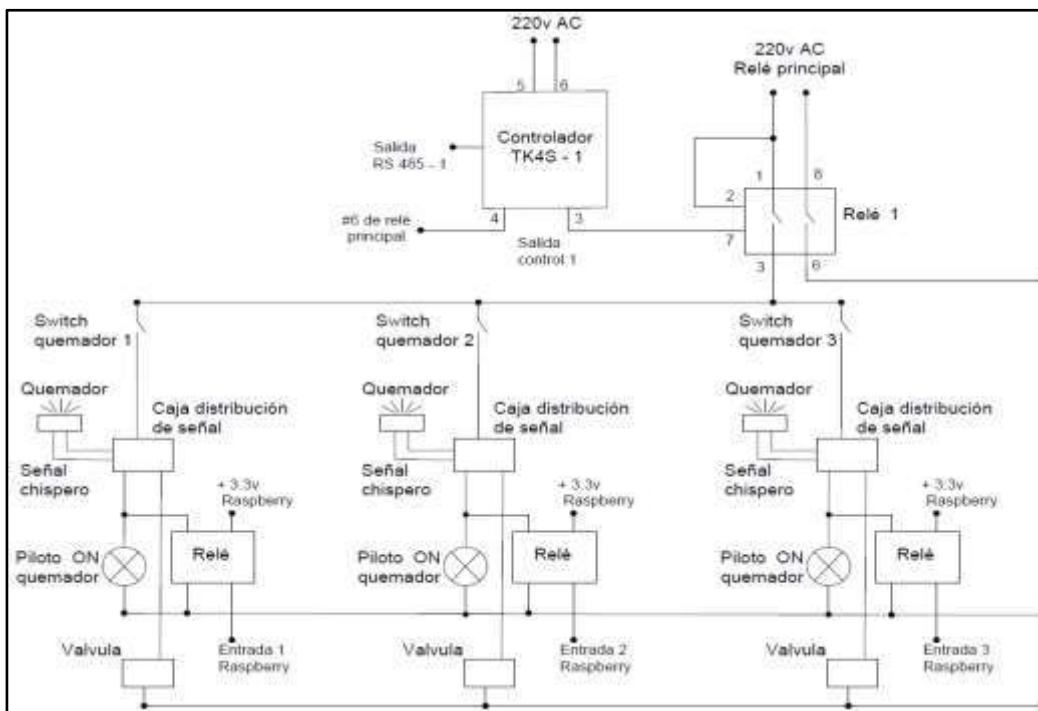
Diagrama de conexiones etapa de control



En la figura 10, se observa el diagrama de conexiones de la etapa de fuerza, que incluye un relé accionado por el controlador de temperatura TK4S-B4RN de la marca Autonics. Al energizar este relé, los módulos de control de los quemadores mandan la señal de abrir la electroválvula y activan el chispero hasta que encienda la llama. Cuando el módulo de control detecta la llama, este envía una señal de 220 V y enciende una luz piloto y activa el relé que envía una señal hacia la Raspberry Pi. Cada controlador comanda un relé, el cual energiza 3 quemadores.

Figura 10.

Diagrama de conexiones etapa de fuerza



Se digitaliza el tablero de control y los componentes que lo integran para determinar la disposición final. En la figura 11, se aprecia tanto la vista exterior como interior.

Figura 11.

Vista exterior e interior del tablero de control

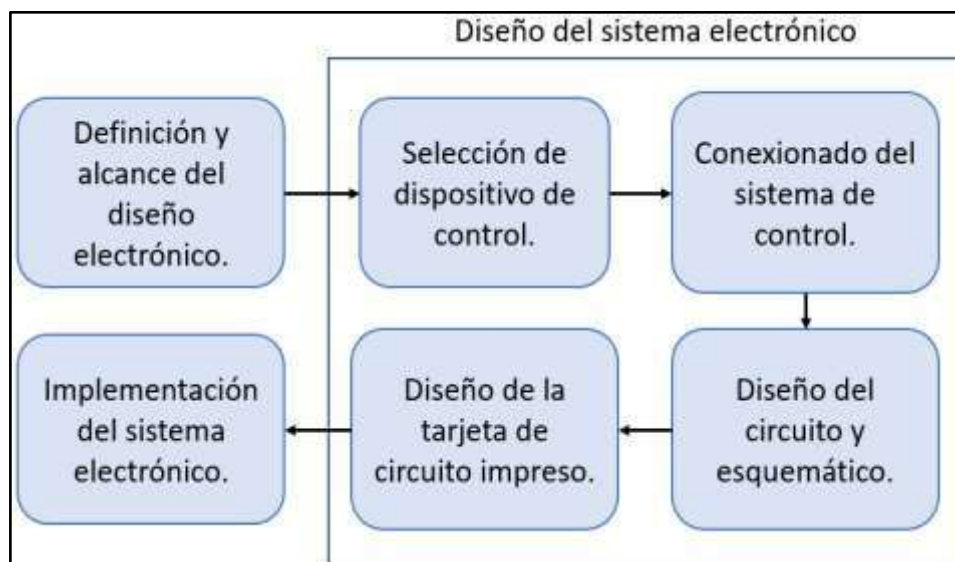


2.3. Diseño electrónico

En la figura 12, se muestra el flujograma con las consideraciones iniciales, diseños y cálculos realizados para la operación y control del horno tipo batch.

Figura 12.

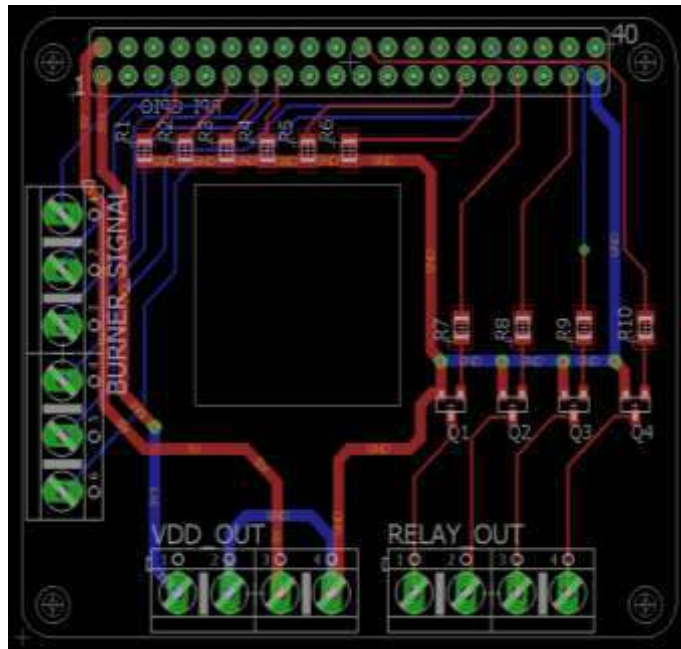
Flujograma del diseño electrónico



Se diseña una PCB de doble capa, con interconexión entre las vías pasantes. En la figura 13, las líneas azules y rojas representan al ruteado en las capas inferiores y superiores respectivamente. Se consideró una sección hueca a la altura del disipador térmico del procesador para evitar recalentamientos de la Raspberry Pi.

Figura 13.

Diseño del PCB para el puerto GPIO de la Raspberry Pi

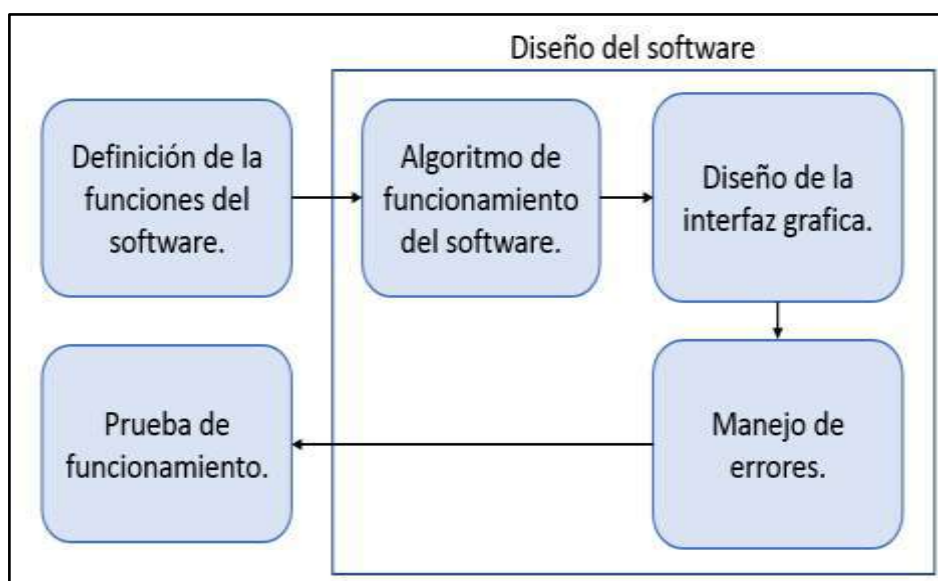


2.4. Diseño de software

En la figura 14, se aprecia el flujograma de desarrollo del software para la Raspberry Pi que permite operar el horno batch.

Figura 14.

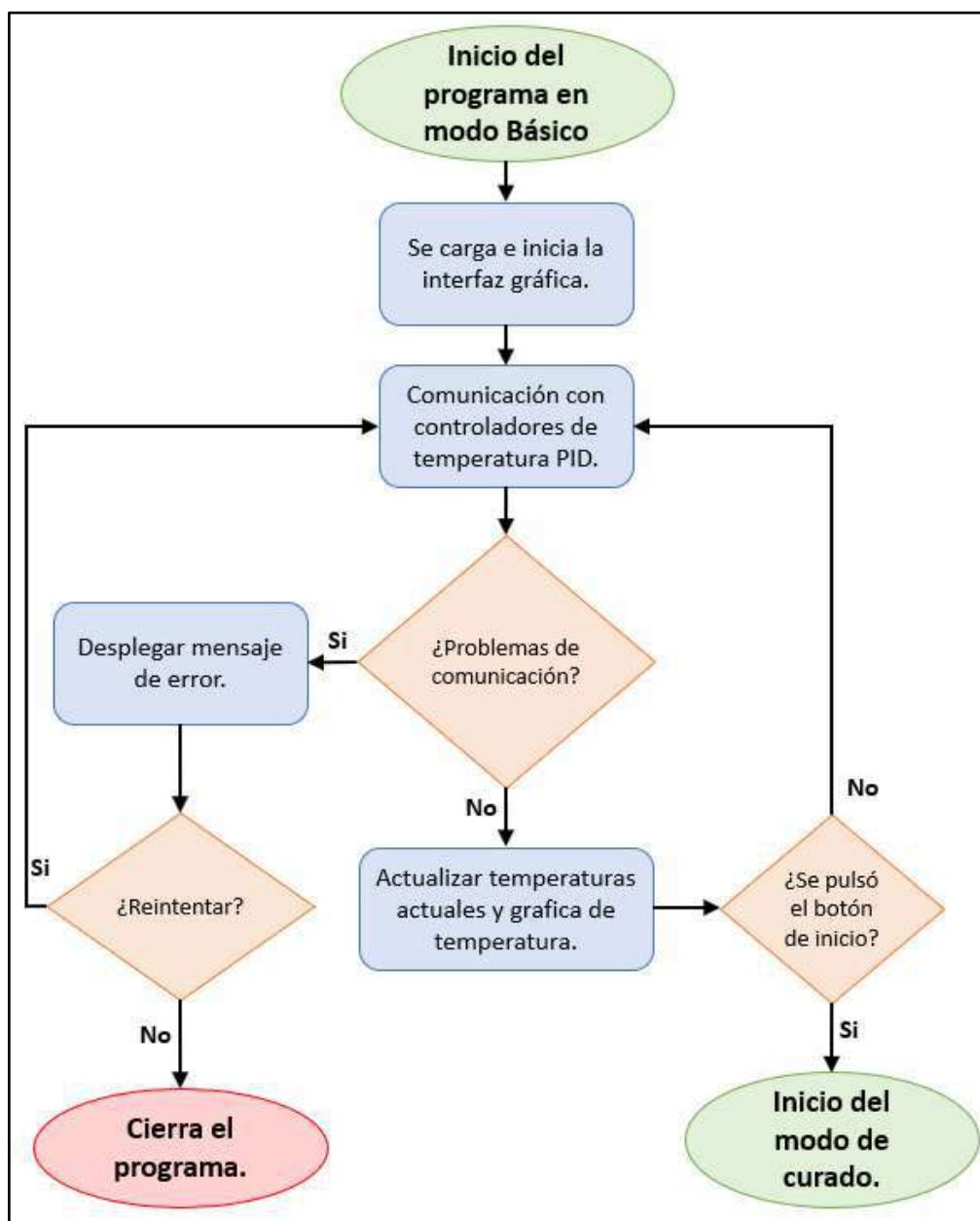
Vista interior y exterior del tablero de control



Para el desarrollo del software se utilizó el lenguaje de programación Python. Este tiene la capacidad de comunicarse vía Modbus con los controladores de temperatura PID. Para ello, se hace uso de un conversor USB a RS485. En la figura 15, se aprecia el diagrama de funcionamiento del programa mientras está en el modo Básico, previo al modo de curado.

Figura 15.

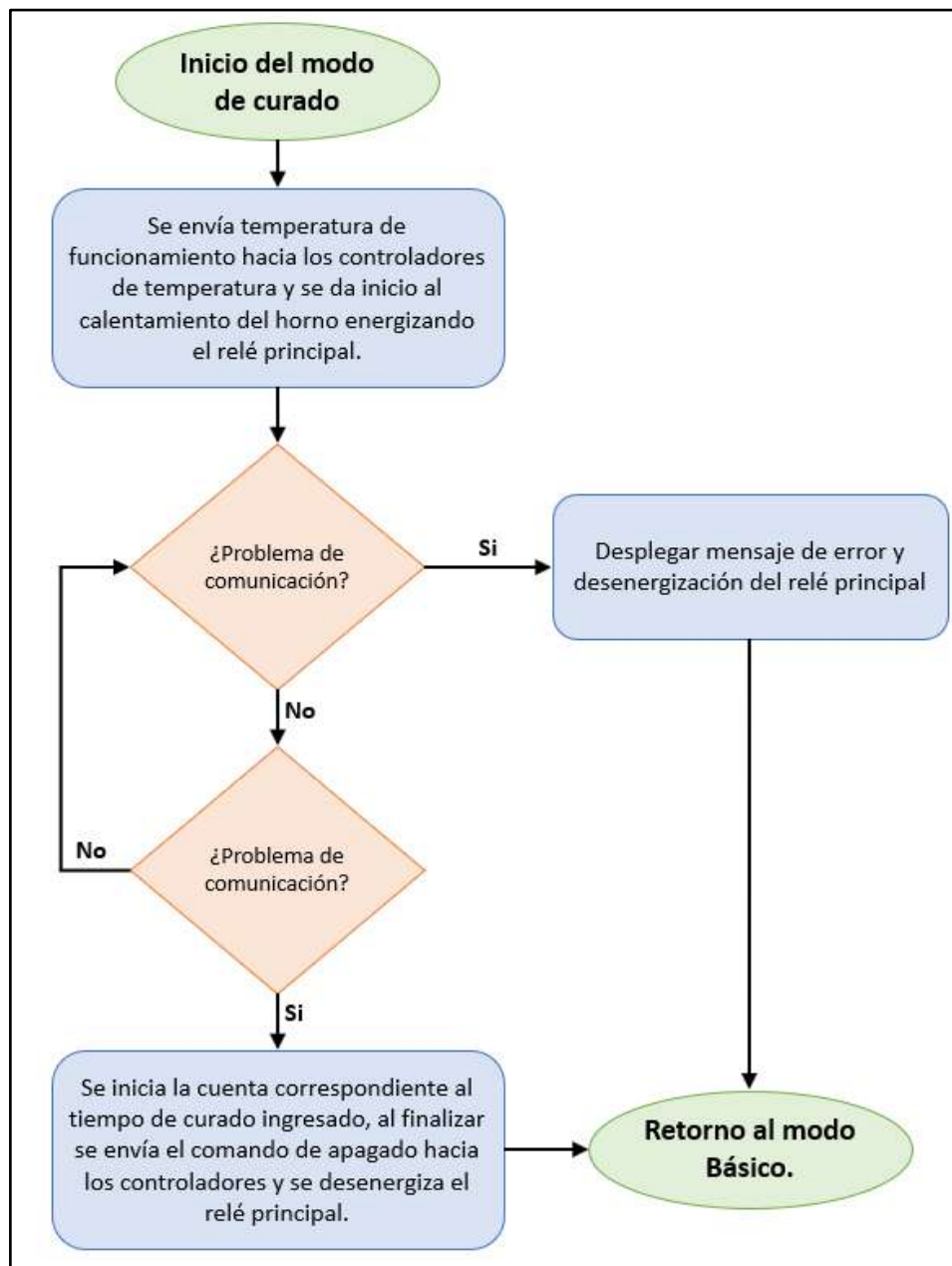
Diagrama de funcionamiento del programa en el modo Básico



En la figura 16, se aprecia el diagrama del funcionamiento del programa mientras está en el modo Curado. En este modo, se energiza el relé principal para accionar los módulos que controlan los quemadores. Al finalizar este proceso, se retoma al modo básico y se desenergiza el relé principal.

Figura 16.

Diagrama de funcionamiento del programa en el modo Curado



2.5 Diseño de la interfaz gráfica

Se hace uso del lenguaje de programación Python para el programa y la interfaz gráfica. La figura 17 corresponde a la interfaz del programa siendo ejecutada en la Raspberry Pi. Esta interfaz fue diseñada acorde a la resolución de la pantalla empleada (1280 x 720 píxeles). Se optimizó el espacio en pantalla con indicadores y botones fáciles de visualizar y operar.

Figura 17.

Ventana principal de la interfaz gráfica



3. Resultados

3.1. Resultado de las pruebas de la interfaz gráfica de usuario (GUI)

Se realizó la capacitación del manejo de la interfaz gráfica a 5 trabajadores, y se solicitó opinión respecto al manejo. Así, se concluyó que la interfaz gráfica resulta sencilla de operar e intuitiva. Los usuarios fueron capaces de ingresar los valores de operación, iniciar o detener el proceso y monitorear los distintos parámetros de funcionamiento. En la figura 18, se aprecia al operario interactuando con la interfaz gráfica.

Figura 18.

Operario probando la interfaz gráfica de usuario para el control del horno



3.2. Resultado de temperatura de pared exterior del horno

Se realizaron mediciones de la temperatura en varios puntos de las paredes exteriores del horno, y se observó que la zona de las juntas de los paneles presentaba temperaturas superiores ($43\text{ }^{\circ}\text{C}$) con respecto a los puntos centrales de los paneles ($35\text{ }^{\circ}\text{C}$), debido a que la unión entre los paneles no presentaba un sello hermético. Por eso, se optó por rellenar estas juntas con silicona de alta temperatura y se obtuvo una temperatura exterior media de $36\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura que no excede los $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ como protección al personal operario. En la figura 19, se observa una medición de temperatura en la pared exterior del horno, donde se obtuvo $35.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ cuando el horno está a $179.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Figura 19.

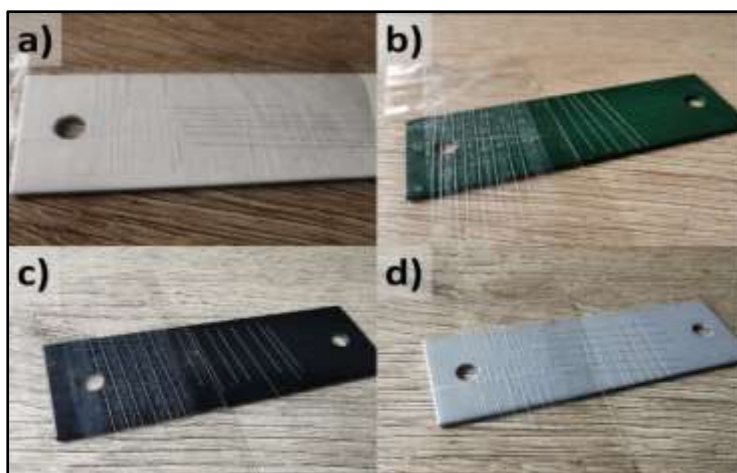
Operario probando la interfaz gráfica de usuario para el control del horno



Se realizó una prueba de adhesión de la pintura en base a la norma ASTM D 3359. Se hicieron marcas en forma de cruz o cuadrícula hasta llegar al metal de la pieza, luego, se procede a pegar una cinta adhesiva sobre la parte marcada y se ejerce una leve presión. Se espera aproximadamente 1 minuto y se retira la cinta de forma súbita. En un resultado satisfactorio, no debe quedar restos de pintura en la cinta, lo cual indica un buen curado de pintura electrostática. En la figura 20, se observan los resultados de esta prueba en los distintos colores de pintura sin desprendimiento de pintura para ninguno de los 4 casos.

Figura 20.

Prueba de adhesión de pintura electrostática



4. CONCLUSIONES

- Se diseñó e implementó el sistema mecánico para el horno tipo Batch de 20 m³ mediante el software Autodesk Inventor. En la prueba de temperatura en la pared exterior, los resultados teóricos y las simulaciones concuerdan con las mediciones realizadas.
- Se diseñó e implementó el sistema eléctrico para el horno tipo batch que garantiza la correcta operación del sistema de acuerdo con las pruebas del tablero de control y de los elementos de seguridad.
- Se diseñó e implementó el sistema electrónico del módulo de control, así como el software de monitoreo embebido para la operación y visualización de parámetros del horno batch.
- Se logró mantener la estabilidad térmica en el horno tipo batch, lo cual fue demostrado con las pruebas de funcionamiento de los quemadores catalíticos y los controladores de temperatura PID industriales.
- Se diseñó e implementó un horno batch con control de temperatura PID para el curado de pintura electrostática en la empresa Maker Asociados S.A.C. Las pruebas realizadas durante el proceso de curado de la pintura electrostática demostraron que el horno cumple con los estándares industriales y los requisitos de la empresa, por lo que se obtuvieron resultados satisfactorios.

5. Referencias

- [1] Aduanas. (s.f.). Consulta por Importador/Exportador. http://www.aduanet.gob.pe/cl-ad-itconsultadwh/ieITS01Alias?accion=consultar&CG_consulta=1
- [2] Åström, K. (2009). Control PID avanzado. Madrid, España: Pearson Educación S. A.
- [3] Brucart, E. B. (1987). GAS NATURAL Características, distribución y aplicaciones industriales. Barcelona: Editores técnicos asociados.
- [4] Callejón Ferre, Á. J. (2009). Instalaciones de gas en el sector industrial, Agrícola, urbano y doméstico. Almería: Universidad de Almería.
- [5] Castaño Giraldo, S., Hernández Gómez, D., & Gallo Blandón, J. (Julio de 2013). Control y monitoreo de temperatura para un horno de curado de prendas índigo utilizando lógica difusa y controles PI. Revista Politécnica ISSN, 69-81.
- [6] Çengel, Y. (2007). Transferencia de calor y masa, un enfoque práctico. Reno: McGraw-Hill Companies, Inc.
- [7] García Higuera, A. (2005). El control automático en la industria. Cuenca: Ediciones de la Universidad de Castilla - La Mancha.
- [8] Lizarraga, G. (2016). Diseño de línea para pintado electrostático. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba.

- [9] Logicbus. (17 de 06 de 2019). Protocolos de comunicación industriales. <https://www.logicbus.com.mx/blog/protocolos-de-comunicacion-industriales/>
- [10] Montenegro, S., & Tixe, T. (2012). Mejora del proceso de pintura electrostática de la planta de producción “SUMAR”. Quito: Universidad Central de Ecuador.
- [11] Montoya, J., Orozco, C., & González, H. (abril de 2011). Optimización energética de un horno de secado de piezas de PRFV implementando PML. *Scientia Et Technica*, 17(47), 307-312.
- [12] Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna (5 ed.)*. Madrid, España: PEARSON EDUCACIÓN, S.A.
- [13] ONSEMI. (s.f.). MMBT3904L DATASHEET. https://www.mouser.pe/datasheet/2/308/1/MMBT3904LT1_D-2316262.pdf
- [14] Pintura Para. (17 de julio de 2016). Pintura electrostática. <https://www.pintura-para.com/pintura-electrostatica/>
- [15] Ponsa, P., & Granollers, A. (2007). *Diseño y automatización industrial*. Madrid: Pirámide.
- [16] Ramos, I. (2020). *Diseño energético de un horno piloto de curado para tratamiento de acabado de pintura electrostática en superficies metálicas y MDF*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- [17] Rougeron, C. (1977). *Aislamiento acústico y térmico en la construcción*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, S.A.
- [18] Senner, A. (1994). *Principios de electrotecnia*. Barcelona: Editorial Reverté S.A.
- [19] Silge Electrónica. (s.f.). Silge. <https://blog.silge.com.ar/>: <https://blog.silge.com.ar/soluciones-para-el-control-de-temperatura-industrial>
- [20] Trinks, W. (2004). *Industrial Furnaces (6 ed.)*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- [21] Yarasca, J., & Espinoza, M. (2015). *Propuesta de implementación de un sistema de pintura electrostática para piezas metálicas utilizadas en tableros y celdas eléctricas*. Lima: Universidad Ricardo Palma.

Trayectoria académica

Ricardo John Palomares Orihuela

Universidad Ricardo Palma, Perú.

Docente de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Ricardo Palma. Ingeniero Mecatrónico de la Universidad Nacional de Ingeniería, doctor en Ciencias de la Educación, magister en Ciencias de la Educación con mención en Docencia Universitaria y maestría en Ciencias de la Electrónica con mención en Ingeniería Biomédica. Senior Member IEEE. Miembro Profesional RAS, EMBS, ComSoc y EduSoc - IEEE. Investigador RENACYT – Nivel V.

Autor corresponsal: ricardo.palomares@urp.edu.pe

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9076-3674>

Enzo Pietro Jesús Morán Ugarelli

Universidad Ricardo Palma, Perú.

Ingeniero Mecatrónico egresado de la Universidad Ricardo Palma. Actualmente desempeñando el rol de analista de mantenimiento preventivo para maquinaria minera.

enzo.2401@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-5191-3589>

Rafael Marcel Sánchez Soto

Universidad Ricardo Palma, Perú.

Ingeniero Mecatrónico de la Universidad Ricardo Palma. Ingeniero de proyectos con asesoría en mejora de procesos automatizados en AGP PERÚ, con especialización avanzada en Autodesk Inventor, gestor de proyectos retail en HMY PERÚ y Gerente General en Maker Asociados SAC.

sanchez.rafael16@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-3020-1902>

Contribución de autoría

Ricardo Palomares: Investigación, metodología, supervisión, escritura – revisión y edición.

Enzo Morán: Conceptualización, análisis formal, adquisición de financiación, investigación, software, recursos, validación, visualización, escritura – borrador original.

Rafael Sánchez: Conceptualización, análisis formal, adquisición de financiación, investigación, software, recursos, validación, visualización, escritura – borrador original.

Conflicto de intereses

Los autores sostienen que no existe conflictos de intereses en el desarrollo de la presente investigación.

Responsabilidad ética y legal

La presente investigación se llevó a cabo siguiendo los principios éticos del conocimiento, asegurándose de que la información es original y confiable.

Declaración sobre el uso de LLM (Large Language Model)

Este artículo no ha utilizado para el desarrollo de la investigación textos provenientes de LLM (ChatGPT u otros).

Financiamiento

La empresa MAKER ASOCIADOS S.A.C. y los investigadores.

Correspondencia: ricardo.palomares@urp.edu.pe