



TECNOLOGÍA
en marcha

Revista trimestral
Enero - Marzo 2025
Volumen 38-1
ISSN-E 2215-3241



TEC | Tecnológico
de Costa Rica

Publicación y directorio en catálogos

latindex

redalyc.org UAEM

Dialnet

melICA

SciELO

REDIB
Red Iberoamericana
de Investigación y Docencia Científica

DOAJ

Comisión Editorial

Felipe Abarca Fedullo. Director.
Editorial Tecnológica de Costa Rica

Juan Antonio Aguilar Garib
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Universidad Autónoma de Nuevo León,
México

Carlos Andrés Arredondo Orozco
Facultad de Ingenierías
Universidad de Medellín. Colombia

Lars Köhler
Experimenteller Botanischer Garten
Georg-August-Universität Göttingen.
Alemania

Jorge Solano Jiménez
Instituto Costarricense del Cemento
y del Concreto

Edición técnica

Alexa Ramírez Vega

Revisión filológica

Esperanza Buitrago Poveda

Diseño gráfico

Felipe Abarca Fedullo

Diagramación

Alexa Ramírez Vega

Diseño de cubierta

Ariana Sanabria García

Imagen de cubierta

<https://www.pexels.com>

Datos de catalogación en publicación

Tecnología en Marcha / Editorial Tecnológica
de Costa Rica. - Vol. 38-1. Enero-Marzo,
2025 – Trimestral
ISSN-E 2215-3241

1. Ciencia y Tecnología –
Publicaciones periódicas CDD:600

**TEC** | Tecnológico
de Costa Rica

Apdo 159-7050 Cartago, Costa Rica

Tel.:(506) 2550-2297, 2550-2618

Correo electrónico: editorial@itcr.ac.cr

Web: <https://www.tec.ac.cr/editorial>

http://revistas.tec.ac.cr/tec_marcha

**TEC** | Tecnológico
de Costa Rica

La Editorial Tecnológica de Costa Rica es una dependencia especializada del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Desde su creación, en 1978, se ha dedicado a la edición y publicación de obras en ciencia y tecnología. Las obras que se han editado abarcan distintos ámbitos respondiendo a la orientación general de la Institución.

Hasta el momento se han editado obras que abarcan distintos campos del conocimiento científico-tecnológico y han constituido aportes para los diferentes sectores de la comunidad nacional e internacional.

La principal motivación de la Editorial es recoger y difundir los conocimientos relevantes en ciencia y tecnología, llevándolos a los sectores de la comunidad que los requieren.

La revista *Tecnología en Marcha* es publicada por la Editorial Tecnológica de Costa Rica, con periodicidad trimestral. Su principal temática es la difusión de resultados de investigación en áreas de Ingeniería. El contenido de la revista está dirigido a investigadores, especialistas, docentes y estudiantes universitarios de todo el mundo.

Publicación y directorio en catálogos

TECNOLOGÍA *en marcha*

Contenidos

Caracterización del fruto de 46 cultivares de mango (<i>Mangifera indica</i>) en Alajuela, Costa Rica Fruit characterization of 46 mango cultivars (<i>Mangifera indica</i>) in Alajuela, Costa Rica <i>José Eladio Monge-Pérez, Michelle Loría-Coto</i>	3
Reutilización de baterías de litio: un estudio integral sobre oportunidades, regulaciones y perspectivas en Alemania y Costa Rica Reuse of Lithium Batteries: A Comprehensive Study on Opportunities, Regulations, and Perspectives in Germany and Costa Rica <i>Emily Denz, Sergio Morales-Hernández</i>	19
Desarrollo de un sistema embebido de clase bulk aplicado en un equipo de crecimiento de cristales Development of a bulk class embedded system applied in a crystal growth equipment <i>Francisco Sánchez-Niño, Francisco J. De Anda-Salazar, Oscar F. Núñez-Olvera</i>	33
Simulación numérica con MATLAB y modelos Probit para calcular las consecuencias por daño pulmonar de explosiones en calderas Numerical simulation with MATLAB and Probit models to calculate the consequences due to lung damage from boiler explosions <i>Ricardo A. Morales-Vargas</i>	44
Aplicación del Índice Simplificado de Calidad de Agua (ISQA) en la evaluación de calidad del agua en el río Ocloro, San José, Costa Rica Application of the Simplified Water Quality Index (ISQA) in water quality assessment in the Ocloro River, San José, Costa Rica <i>Elena Chaves-Chaves</i>	59
New procedure for the maintenance in the electric substations of interiors to achieve their operational efficiency Nuevo procedimiento para el mantenimiento de las subestaciones de interiores para lograr su eficiencia operacional <i>Carlos Manuel Ruano-González</i>	68

Comprobación de la eficiencia de aplicación con pulverizadora utilizando equipamiento de agricultura digital y de precisión y por medio de guía manual

Verifying the efficiency of application with a spray boom using digital and precision agriculture equipment and manual guidance

Hazel Priscilla Garro-Ureña, Isaac Javier Mora-González, Natalia Gómez-Calderón, Oscar Quesada-Chacón..... 78

Impacto de los marcos de gobierno de TI en la seguridad de la información de las organizaciones

Impact of IT governance frameworks on information security in organizations

Luis Rolando Lecca-Rengifo, Harrison Jordi Paz-Medrano, Alberto Carlos Mendoza de los Santos..... 93

Infraestructura verde para el control pluvial como medida de adaptación al cambio climático

Green infrastructure for stormwater control as a measure of adaptation to climate change

David Borge-Leandro 104

Evaluación del comportamiento de la demanda en el modelado de las redes de distribución

Demand behavior evaluation in modeling distribution networks

Rebeca Solís-Ortega, Gustavo A. Gómez-Ramírez, Kervyn Josué Sáenz-González, Alfredo Josué Ellis-Rodríguez, William Johan Navarro-Alpizar 115

Diseño y construcción de un túnel de viento subsónico de circuito abierto

Design and construction of a subsonic open-circuit wind tunnel

Fiorella Garro-Fernández, Carlos Alberto Echandi-Jara, Emanuel Fallas-Hernández, Marco Zúñiga-Pepper, Gustavo Richmond-Navarro 128

Fundamentos y perspectivas del pensamiento computacional: un análisis integral para la investigación futura

Foundations and perspectives of computational thinking: a comprehensive analysis for future research

Jorge Monge-Fallas, Liliana Sancho-Chavarría, César Garita-Rodríguez, Antonio González-Torres, Ignacio Trejos-Zelaya 145

Effect of instance selection algorithms on prediction error of numerical variables

Efecto de los algoritmos de selección de instancias sobre el error de predicción de variables numéricas

Martín Solís, Erick Muñoz-Alvarado..... 157

Evaluación de parámetros microbiológicos en el arroyo Santa María, Jalpa de Méndez, Tabasco, México

Evaluation of microbiological parameters in arroyo Santa María, Jalpa de Méndez, Tabasco, México

María Elena Cárdenas-Córdova, Rudy Solís-Silván, Azucena del Rosario Fraire-Vázquez, Gaspar López-Ocaña, Ricardo Díaz-Palacios..... 172

Caracterización del fruto de 46 cultivares de mango (*Mangifera indica*) en Alajuela, Costa Rica

Fruit characterization of 46 mango cultivars (*Mangifera indica*) in Alajuela, Costa Rica


José Eladio Monge-Pérez¹, Michelle Loría-Coto²


Fecha de recepción: 12 de diciembre, 2023
Fecha de aprobación: 7 de abril, 2024

Monge-Pérez, J.E; Loría-Coto, M. Caracterización del fruto de 46 cultivares de mango (*Mangifera indica*) en Alajuela, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 1. Enero-Marzo, 2025. Pág. 3-18.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i1.6949>

1 Finca Experimental Interdisciplinaria de Modelos Agroecológicos, Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

 jose.mongeperez@ucr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-5384-507X>

2 Escuela de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica.

 michelle_loria@yahoo.com

 <https://orcid.org/0000-0003-0456-2230>

Palabras clave

Mangifera indica; Anacardiaceae; fruto; variedad; color; sabor.

Resumen

Se evaluaron algunas características del fruto de 46 cultivares de mango (*Mangifera indica*), en Alajuela, Costa Rica, tanto a nivel cualitativo (dos variables) como cuantitativo (ocho variables). Se hallaron diferencias estadísticamente significativas entre cultivares, para siete variables cuantitativas. Se obtuvo una amplia variabilidad en cuanto a las características del fruto: longitud (74,50-146,20 mm), ancho (59,98-116,28 mm), grosor (58,08-104,80 mm), relación longitud/ancho (0,81-2,02), relación longitud/grosor (0,90-2,01), relación ancho/grosor (0,97-1,21), volumen relativo (262,33-1287,05 cm³), y porcentaje de sólidos solubles totales (12,0-20,0 °Brix). La información generada es útil para los productores de mango, en el proceso de selección del cultivar apropiado para su nicho de mercado.

Keywords

Mangifera indica; Anacardiaceae; fruit; variety; color; flavor.

Abstract

Some fruit characteristics of 46 mango (*Mangifera indica*) cultivars in Alajuela, Costa Rica were evaluated, considering both qualitatively (two) and quantitatively (eight) variables. There were statistically significant differences between cultivars for seven quantitative variables. Data show a wide variability with respect to fruit characteristics: length (74.50-146.20 mm), width (59.98-116.28 mm), thickness (58.08-104.80 mm), length/width ratio (0.81-2.02), length/thickness ratio (0.90-2.01), width/thickness ratio (0.97-1.21), relative volume (262.33-1287.05 cm³), and percentage of total soluble solids (12.0-20.0 °Brix). This information is useful for mango growers to choose the best cultivar for their particular market purposes.

Introducción

El mango (*Mangifera indica* L.) es una fruta tropical originaria del sudeste de la India y sus islas circunvecinas, y su cultivo inició hace 4000 años [1]. En el mundo se producen alrededor de 14 millones de toneladas de mango por año, distribuidas en 111 países productores de esta fruta. México y Brasil son los principales exportadores de mango a nivel mundial [2]. El mango se caracteriza por la producción de frutos con excelente calidad, constituyéndose como una de las especies de frutas de clima tropical más importantes [3].

En Costa Rica, la producción y exportación de mango se da principalmente en las regiones Chorotega y Pacífico Central. Entre las variedades más cultivadas se encuentran Keitt, Palmer, Tommy Atkins, Cavallini, Kent, Mora, Irwin y Haden (rojo), entre otras [2].

Para la comercialización internacional del mango, es muy importante el peso del fruto; el mercado de EEUU prefiere frutos entre 250 y 600 g [3] [1] [4] [5], mientras que el mercado europeo prefiere frutos de 250 a 750 g [3] [6]. Se considera que los frutos pequeños son aquellos con un peso inferior a 250 g; los medianos tienen un peso entre 250 y 350 g; los grandes pesan entre 350 y 500 g; y los muy grandes superan los 500 g [6].

En mango, el sabor, el rendimiento de pulpa, y la textura de la pulpa, son características muy importantes para la preferencia del consumidor de mango, mientras que para el productor también es importante que la variedad tenga buenas características de cultivo (rendimiento, tolerancia a plagas y enfermedades, entre otras) [6].

En mango, el porcentaje de sólidos solubles totales sirve como un indicador de la dulzura de los frutos [7], y esto está directamente relacionado con su sabor [1].

Entre las características que pueden servir de soporte para la evaluación de la calidad del fruto de mango están: apariencia externa, sabor, aroma, contenido de fibras de la pulpa, textura de la pulpa, valor nutricional, tamaño, peso, y forma [8].

El mango es una de las frutas tropicales que destaca por su particular sabor y aroma, y que tiene amplia aceptación, creciente demanda y razonables precios en los mercados internacionales; sin embargo, el acceso a estos mercados se dificulta porque las características de los frutos no satisfacen las normas de calidad establecidas y porque los rendimientos por unidad de área son bajos [9].

La calidad es un factor clave en la comercialización del mango, ya que los consumidores exigen cada vez estándares más altos, tanto en los parámetros físico-químicos relacionados con la madurez, así como en su apariencia externa [10].

El fruto de mango ideal debe poseer una alta relación pulpa/semilla, consistencia firme y uniforme, ausencia de fibra, adecuada relación azúcar/ácido, aroma agradable, y perdurabilidad del sabor y de la calidad. La popularidad del mango se debe a su excelente sabor, aroma y apariencia [11].

En el mercado de Europa, Canadá y EEUU, la preferencia es hacia los colores vivos o brillantes de la cáscara (amarillo y/o rojo), con una cobertura total de la superficie del fruto; sin embargo, la evolución del mercado y el incremento de los denominados “mercados étnicos”, conformados por personas de origen asiático o latino, ha abierto las perspectivas para otros cultivares, ya que estas personas prefieren los frutos que colorean de verde a amarillo cuando están maduros, pues les recuerdan sus variedades nativas [12]. Dos de los cultivares que más se comercializan en el mercado europeo son Kent y Keitt [13].

Los principales cultivares de mango que se producían anteriormente en países como México y Venezuela con fines de exportación eran Kent, Keitt, Tommy Atkins y Haden, pero en los últimos años se han introducido Ataulfo, Edward y Julie, todos ellos con características sobresalientes de sabor, aroma y tamaño, que los hacen más atractivos para los consumidores [14] [12]. En el caso de la variedad Ataulfo, se ha incrementado sustancialmente su volumen de exportación, debido principalmente a sus características sensoriales, mayor vida de anaquel, y preferencia de consumidores asiáticos y latinos residentes en Estados Unidos, que demandan cada vez más esta variedad [10].

El objetivo de este trabajo fue evaluar las características del fruto de 46 cultivares de mango, producidos en las condiciones de Alajuela, Costa Rica.

Materiales y métodos

La investigación se realizó en el mes de junio de 2018, en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno (EEAFBM) de la Universidad de Costa Rica, situada a 10°1' latitud Norte y 84°16' longitud Oeste, en el distrito Barrio San José del cantón Central de la provincia de Alajuela, a una altitud de 840 msnm, con un promedio de precipitación anual de 1940 mm distribuidos de mayo a noviembre, y un promedio anual de temperatura de 22 °C.

Se evaluaron los frutos de 46 cultivares de mango (*Mangifera indica* L.) (cuadro 1), a partir de árboles ubicados en el banco de germoplasma de dicho frutal de la EEAFBM. Se seleccionaron cuatro frutos en madurez fisiológica por cada cultivar. El punto de cosecha de los frutos se determinó según el color de la cáscara, la forma del fruto, y la elevación del hombro del fruto en relación al pedúnculo [15].

Las variables del fruto evaluadas fueron:

Variables cuantitativas:

1. Longitud (mm): se obtuvo al medir la distancia máxima entre el ápice y la base del pedúnculo o los “hombros” del fruto.
2. Ancho (mm): se obtuvo al medir la distancia máxima entre los lados del fruto.
3. Grosor (mm): se obtuvo al medir la distancia máxima entre ambas caras del fruto.
4. Relación longitud/ancho: se obtuvo al dividir la longitud entre el ancho, para cada fruto.
5. Relación longitud/grosor: se obtuvo al dividir la longitud entre el grosor, para cada fruto.
6. Relación ancho/grosor: se obtuvo al dividir el ancho entre el grosor, para cada fruto.
7. Volumen relativo (cm³): se obtuvo al multiplicar la longitud por el ancho y por el grosor, para cada fruto.
8. Porcentaje de sólidos solubles totales (°Brix): se obtuvo a partir de 2-3 gotas del jugo del fruto, para cada cultivar. Para esta variable, solamente se evaluó un fruto por cultivar.

Variables cualitativas:

1. Color: se obtuvieron los valores de “Hue value” y “Chroma”, a partir de la comparación del color del fruto con las diferentes clasificaciones de color de la Tabla de Munsell.
2. Características organolépticas: se obtuvo a partir de una prueba de degustación de los frutos de cada cultivar, por parte de un panel de 15 personas.

Para la evaluación del porcentaje de sólidos solubles totales se utilizó un refractómetro manual marca Atago, modelo N-1a, con una escala de 0,0-32,0 ± 0,2 °Brix. Para la evaluación de las dimensiones de los frutos se utilizó un calibrador digital milimétrico marca Mitutoyo, modelo CD, con una capacidad de 150,00 ± 0,01 mm.

El diseño experimental fue un irrestricto al azar, donde los tratamientos fueron los 46 cultivares, y las repeticiones fueron cada uno de los cuatro frutos analizados por cultivar (excepto para la variable porcentaje de sólidos solubles totales). Para las variables cuantitativas, se realizó un análisis de varianza, y se utilizó la prueba de LSD Fisher ($p \leq 0,05$) para la comparación entre tratamientos.

Resultados y discusión

En el cuadro 1 se presentan los datos de longitud, ancho y grosor de los frutos, y las relaciones entre esas variables se presentan en el cuadro 2.

Cuadro 1. Longitud, ancho, y grosor del fruto de los cultivares estudiados.

Cultivar	Longitud (mm)	Ancho (mm)	Grosor (mm)
Huevo de Toro	146,20 a	72,40 l-p	72,70 h-n
John Ensey	138,75 ab	98,40 b-d	92,25 bc
Pairi	128,75 a-c	81,63 i-m	80,78 e-i
Early Gold	127,40 a-d	88,20 e-j	81,27 d-i
Smith	126,40 a-d	92,35 c-i	92,10 bc
Glenn	122,45 b-e	104,85 bc	92,70 bc
Irwin	121,10 c-e	90,20 d-i	89,38 b-d
Zilate	120,63 c-e	90,78 d-i	87,35 c-f
Becky	119,98 c-e	89,45 d-i	82,33 c-h
Keitt	117,98 c-e	91,38 d-i	85,88 c-h
M-6906	116,95 c-e	79,50 j-n	76,75 h-k
Brooks	116,65 c-e	77,00 l-o	75,00 h-l
Edward	115,40 c-f	91,83 d-i	90,10 b-d
Marichal	114,77 c-f	97,77 b-e	97,03 ab
Nelson	113,70 d-f	107,15 ab	88,48 b-e
Aeromanis	112,85 d-g	71,65 n-p	60,83 no
Santaello	110,60 e-h	87,23 f-k	74,93 h-l
Lily	110,60 e-h	90,23 d-i	91,38 bc
M-13768	109,83 e-i	74,23 l-o	68,15 l-n
Kent	109,45 e-j	103,28 bc	90,00 b-d
Haden Rojo	109,03 e-k	93,37 c-i	91,57 bc
Manzano	108,55 e-k	94,28 c-h	83,65 c-h
Magashamin	107,13 e-k	85,45 h-l	85,25 c-h
Pope	104,20 e-l	90,45 d-i	86,53 c-g
Carrie	104,05 e-l	81,55 i-n	72,75 h-m
Tommy Atkins	102,58 f-l	95,70 c-f	89,93 b-d
Bombay Yellow	98,95 f-m	92,15 c-i	81,90 c-i
Julie	98,77 g-m	82,00 i-m	74,73 h-l
Sensation	98,35 h-m	83,75 i-l	78,60 g-j
Filipino	98,00 h-m	95,13 c-g	86,45 c-g
Sunset	97,13 h-m	76,68 l-o	75,25 h-l
Turrialba	96,63 i-m	75,70 l-o	69,48 k-n
Zill	96,40 i-m	88,00 e-j	78,20 g-j
Davis Haden	95,98 j-m	84,20 i-l	81,60 d-i
Lippens	95,13 k-n	78,03 k-o	80,78 e-i
Tyler Premier	93,65 k-n	116,28 a	104,80 a
Florigon	93,40 k-n	88,23 e-j	79,13 f-j
Fairchild	91,75 l-n	75,08 l-o	71,85 i-n
Singapur	89,23 l-o	70,15 op	60,73 no
Haden Amarillo	88,85 l-p	71,75 m-p	63,85 m-o
Kensington Pride	86,65 m-p	86,25 g-l	77,23 h-k
Mora	84,15 m-p	83,13 i-l	72,30 i-n
Van Dyke	83,43 m-p	74,80 l-o	71,48 j-n
Mulgoba	81,90 n-p	70,23 op	67,80 l-n
Jamaica	77,95 op	64,73 p	64,55 m-o
Saigon	74,50 p	59,98 p	58,08 o

Nota: medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$) según la prueba LSD Fisher.

Cuadro 2. Relaciones longitud/ancho, longitud/grosor, y ancho/grosor, del fruto de los cultivares estudiados.

Cultivar	Relación longitud/ancho	Relación longitud/grosor	Relación ancho/grosor
Huevo de Toro	2,02 a	2,01 a	1,00 d-g
Aeromanis	1,58 b	1,86 a	1,18 ab
Pairi	1,57 b	1,59 bc	1,01 d-g
Brooks	1,52 bc	1,56 b-d	1,03 d-g
M-13768	1,48 b-d	1,61 b	1,09 cd
M-6906	1,47 cd	1,52 b-e	1,04 d-g
Early Gold	1,44 c-e	1,57 b-d	1,08 cd
John Ensey	1,40 d-f	1,50 c-f	1,07 d-f
Smith	1,37 e-g	1,37 i-k	1,00 e-g
Irwin	1,35 e-h	1,36 i-k	1,01 d-g
Becky	1,34 f-h	1,46 e-i	1,09 cd
Zilate	1,33 f-h	1,38 g-k	1,04 d-g
Keitt	1,29 g-i	1,37 h-k	1,07 de
Santaello	1,29 g-j	1,48 d-g	1,16 a-c
Turrialba	1,28 g-j	1,39 g-k	1,09 cd
Carrie	1,28 g-k	1,43 e-j	1,13 a-d
Singapur	1,27 g-k	1,47 d-h	1,16 a-c
Sunset	1,27 h-k	1,29 k-m	1,02 d-g
Edward	1,26 h-k	1,28 k-n	1,02 d-g
Magashamin	1,26 h-k	1,26 l-o	1,00 d-g
Saigon	1,24 h-l	1,28 k-n	1,04 d-g
Haden Amarillo	1,24 h-l	1,39 f-k	1,13 a-d
Lippens	1,23 i-l	1,18 o-q	0,97 g
Lily	1,23 i-l	1,22 l-q	0,99 fg
Fairchild	1,23 i-l	1,28 k-n	1,05 d-f
Julie	1,21 i-m	1,32 j-l	1,10 cd
Jamaica	1,21 i-m	1,21 l-q	1,00 d-g
Marichal	1,18 j-n	1,18 n-q	1,01 d-g
Haden Rojo	1,17 j-o	1,19 m-q	1,02 d-g
Sensation	1,17 j-o	1,25 l-o	1,07 d-f
Glenn	1,17 j-p	1,32 j-l	1,13 a-d
Mulgoba	1,17 k-o	1,21 l-q	1,04 d-g
Pope	1,15 l-p	1,21 l-q	1,05 d-f
Manzano	1,15 l-p	1,30 k-m	1,13 a-d
Davis Haden	1,15 l-p	1,18 o-q	1,03 d-g
Van Dyke	1,12 m-q	1,17 o-q	1,05 d-f
Zill	1,09 n-r	1,23 l-p	1,13 a-d
Bombay Yellow	1,08 n-r	1,21 l-q	1,13 a-d
Tommy Atkins	1,07 o-r	1,14 pq	1,07 d-f
Nelson	1,07 p-r	1,28 k-n	1,21 a
Kent	1,06 p-r	1,21 l-q	1,15 a-c
Florigon	1,06 p-r	1,18 n-q	1,12 b-d
Filipino	1,03 qr	1,14 pq	1,12 b-d
Mora	1,02 r	1,17 o-q	1,15 a-c
Kensington Pride	1,01 r	1,12 q	1,12 b-d
Tyler Premier	0,81 s	0,90 r	1,11 b-d

Nota: medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$) según la prueba LSD Fisher.

Con respecto a la longitud del fruto de mango, diversos investigadores han encontrado valores entre 52,34 y 160,50 mm [3] [16] [5] [1] [17] [18] [7] [19] [12] [9] [20] [21]; los resultados obtenidos en la presente investigación se ubicaron dentro de dicho rango. Para esta variable en cada cultivar, en el cuadro 3 se contrastan los valores informados en la literatura con los hallados en el presente estudio, que fueron similares en el caso de Glenn, Haden Rojo (conocido a nivel mundial únicamente como Haden), Irwin, Tommy Atkins y Zill; fueron inferiores en el caso de Edward, Keitt, Kensington Pride (conocido también solo como Kensington), Kent, Smith y Van Dyke; y fueron superiores para Manzano (también llamado Manzana), Sensation y Tyler Premier.

Cuadro 3. Longitud del fruto de mango, informada en la literatura, por cultivar.

Cultivar	Longitud del fruto (mm)		Referencias
	Obtenida en el presente ensayo	Informada en la literatura	
Edward	115,40	123,6	[12]
Glenn	122,45	110,3 – 122,4	[12] [9]
Haden (rojo)	109,03	96,6 – 112,2	[9] [20]
Irwin	121,10	117,9 – 123,1	[12] [9]
Keitt	117,98	121,0 – 153,0	[16] [19] [20] [21]
Kensington	86,65	98	[16]
Kent	109,45	110,1 – 123,5	[16] [9] [20]
Manzana	108,55	102,7	[9]
Sensation	98,35	93,11	[19]
Smith	126,40	130	[16]
Tommy Atkins	102,58	94,79 – 116,0	[3] [16] [18] [19] [9] [20] [21]
Tyler Premier	93,65	71,90 – 76,64	[5]
Van Dyke	83,43	98	[18]
Zill	96,40	96 – 98,5	[16] [9]

En relación al ancho del fruto de mango, en diversas investigaciones se han hallado valores entre 42,64 y 109,80 mm [3] [16] [5] [1] [17] [18] [7] [19] [12] [9] [20] [21]; en el presente ensayo se encontraron valores similares, excepto para el cultivar Tyler Premier, con un valor superior a dicho rango (116,28 mm). Para esta variable en cada cultivar, en el cuadro 4 se contrastan los valores informados en la literatura con los encontrados en el presente estudio, que fueron similares en el caso de Kent; fueron inferiores en el caso de Keitt, Manzano y Van Dyke; y fueron superiores para Edward, Glenn, Haden Rojo, Irwin, Kensington Pride, Sensation, Smith, Tommy Atkins, Tyler Premier y Zill.

Cuadro 4. Ancho del fruto de mango, informado en la literatura, por cultivar.

Cultivar	Ancho del fruto (mm)		Referencias
	Obtenido en el presente ensayo	Informado en la literatura	
Edward	91,83	86,3	[12]
Glenn	104,85	78,0 – 85,4	[12] [9]
Haden (rojo)	93,37	81,2 – 81,4	[9] [20]
Irwin	90,20	75,3 – 78,2	[12] [9]
Keitt	91,38	93,6 – 104,0	[16] [19] [20] [21]
Kensington	86,25	84	[16]
Kent	103,28	102 – 105,8	[16] [9] [20]
Manzana	94,28	95,3	[9]
Sensation	83,75	75,49	[19]
Smith	92,35	85	[16]
Tommy Atkins	95,70	70,67 – 95,2	[3] [16] [18] [19] [9] [20] [21]
Tyler Premier	116,28	77,91 – 93,99	[5]
Van Dyke	74,80	78	[18]
Zill	88,00	68 – 74,5	[16] [9]

En cuanto al grosor del fruto de mango, diversos autores han informado de valores entre 57,0 y 94,68 mm [18] [19] [12]; en este caso, los valores obtenidos en el presente estudio también fueron similares, excepto para los cultivares Tyler Premier y Marichal, que mostraron valores superiores a dicho rango (104,80 y 97,03 mm, respectivamente). Para esta variable en cada cultivar, en el cuadro 5 se contrastan los valores informados en la literatura con los hallados en el presente estudio, los cuales fueron inferiores en el caso de Keitt, y fueron superiores para Edward, Glenn, Irwin, Sensation, Tommy Atkins y Van Dyke.

Cuadro 5. Grosor del fruto mango, informado en la literatura, por cultivar.

Cultivar	Grosor del fruto (mm)		Referencias
	Obtenido en el presente ensayo	Informado en la literatura	
Edward	90,10	81,7	[12]
Glenn	92,70	77,0	[12]
Irwin	89,38	70,9	[12]
Keitt	85,88	94,68	[19]
Sensation	78,60	73,60	[19]
Tommy Atkins	89,93	71 – 71,03	[18] [19]
Van Dyke	71,48	66	[18]

Otros investigadores informaron que el cultivar Tyler Premier obtuvo una longitud de fruto y un ancho de fruto muy similares, lo que le dio un formato redondeado a los frutos [5], pero en el presente ensayo la relación longitud/ancho fue de 0,81, es decir, que el ancho fue mayor que la longitud.

En el cuadro 6 se presenta el volumen relativo de los frutos para cada cultivar, así como su clasificación en categoría de tamaño de frutos en: muy grande (volumen relativo superior o igual a 1000 cm³), grande (volumen relativo entre 750 y 999 cm³), mediano (volumen relativo entre 500 y 749 cm³), y pequeño (volumen relativo inferior a 500 cm³). Los cultivares que más se utilizan para exportación corresponden a tamaños muy grandes (Kent) y grandes (Tommy Atkins, Keitt, Haden Rojo e Irwin), lo cual coincide con lo encontrado para Kent y Keitt por otros investigadores [16].

Cuadro 6. Volumen relativo y clasificación de tamaño, del fruto de los cultivares estudiados.

Cultivar	Volumen relativo (cm ³)	Clasificación de tamaño
John Ensey	1287,05 a	Muy grande
Glenn	1190,49 ab	Muy grande
Tyler Premier	1175,49 ab	Muy grande
Smith	1156,26 ab	Muy grande
Marichal	1090,79 a-c	Muy grande
Nelson	1077,38 a-c	Muy grande
Kent	1021,91 a-c	Muy grande
Irwin	979,95 b-d	Grande
Zilate	956,39 b-e	Grande
Edward	954,98 b-e	Grande
Keitt	952,47 b-e	Grande
Haden Rojo	931,67 b-e	Grande
Early Gold	922,38 b-f	Grande
Lily	912,47 b-f	Grande
Becky	893,51 b-f	Grande
Manzano	890,97 b-f	Grande
Tommy Atkins	886,41 b-f	Grande
Pairi	855,43 b-g	Grande
Filipino	824,06 b-h	Grande
Pope	815,03 b-h	Grande
Magashamin	782,73 b-i	Grande
Huevo de Toro	769,52 b-j	Grande
Santaello	748,77 c-j	Mediano
Bombay Yellow	748,24 c-j	Mediano
M-6906	714,10 d-j	Mediano
Brooks	676,39 e-j	Mediano
Zill	669,84 e-j	Mediano
Davis Haden	661,72 e-j	Mediano
Florigon	652,77 e-j	Mediano
Sensation	649,85 e-j	Mediano
Carrie	635,42 e-k	Mediano
Julie	606,42 f-k	Mediano
Lippens	602,05 g-k	Mediano
Kensington Pride	580,43 g-k	Mediano
Sunset	567,80 h-k	Mediano
M-13768	560,18 h-k	Mediano
Turrialba	523,20 i-l	Mediano
Mora	506,17 j-l	Mediano
Fairchild	496,02 j-l	Pequeño
Aeromanis	493,45 j-l	Pequeño
Van Dyke	447,71 j-l	Pequeño
Haden Amarillo	406,79 j-l	Pequeño
Mulgoba	392,43 j-l	Pequeño
Singapur	380,16 j-l	Pequeño
Jamaica	326,65 kl	Pequeño
Saigon	262,33 l	Pequeño

Nota: medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$) según la prueba LSD Fisher.

Otros autores encontraron que la variedad Sensation se considera mediana; las variedades Carrie, Edward, Pope y Zill se consideran grandes; y las variedades Haden (rojo) y Smith se consideran muy grandes [6]. Estos resultados coinciden con los hallados en el presente ensayo para los cultivares Sensation, Edward, Pope y Smith, pero los cultivares Carrie y Zill se consideraron medianos, y Haden Rojo se consideró grande.

Entre los factores que pueden influenciar el tamaño del fruto de mango están: variedad genética, número de frutos por planta, competencia entre órganos de la planta en desarrollo, disponibilidad de agua en el suelo, y temperatura, entre otros [17].

En el cuadro 7 se presentan los datos de porcentaje de sólidos solubles totales y color del fruto. Entre los cultivares más utilizados para exportación, el Tommy Atkins fue el que obtuvo el mayor valor de porcentaje de sólidos solubles totales en esta prueba (17,0 °Brix), seguido de Haden Rojo (16,0 °Brix), y Kent e Irwin (15,0 °Brix). Es importante destacar a la variedad Julie, que obtuvo 20,0 °Brix, al igual que el cultivar Saigon; sin embargo, Julie presenta frutos medianos, y Saigon tiene frutos pequeños, lo que limita su potencial comercial.

Con respecto al porcentaje de sólidos solubles totales en mango, diversos investigadores han encontrado valores entre 6,33 y 27,50 °Brix. Sin embargo, estos valores incluyen evaluaciones en frutos con poca madurez para que soporten el transporte para exportación, en cuyo caso los valores oscilan entre 6,33 y 11,80 °Brix [22] [23] [20]. Por otra parte, en los frutos con un mayor grado de madurez, los valores informados están entre 9,3 y 27,5 °Brix [16] [1] [4] [8] [6] [15] [17] [24] [18] [7] [25] [19] [12] [9] [14] [10] [26] [11] [27]; los valores obtenidos en la presente investigación se ubicaron dentro de este último rango.

El mango es cosechado en estado de inmadurez para poder soportar los efectos del embalaje y transporte, y esto afecta la calidad del fruto; por otra parte, cuando es cosechado en su óptima calidad para consumo fresco, pierde las características adecuadas para tolerar los daños causados durante el transporte. En un ensayo sobre el proceso de maduración de frutos de mango, se encontró que el porcentaje de sólidos solubles totales se incrementó significativamente con el tiempo de almacenamiento, desde 8,23 hasta 16,43 °Brix en promedio para los cultivares estudiados; este incremento pudo ser causado por la alteración de la estructura de la pared celular y el rompimiento de carbohidratos complejos en azúcar simple, o a expensas del almidón presente en el fruto [26].

En relación al porcentaje de sólidos solubles totales en frutos maduros, por variedad, en el cuadro 8 se contrastan los valores informados en la literatura con los hallados en el presente estudio, los cuales fueron similares en el caso de Haden Rojo, Irwin, Kent, Tommy Atkins y Van Dyke; fueron inferiores en el caso de Florigon, Glenn, Kensington Pride, Smith y Zill; y fueron superiores para Carrie, Edward, Manzano, Pope y Sensation.

Cuadro 7. Porcentaje de sólidos solubles totales y color, del fruto de los cultivares estudiados.

Cultivar	Porcentaje de sólidos solubles totales (°Brix)	Color (Hue value/Chroma)
Julie	20,0	10R5/4
Saigon	20,0	7,5YR7/10
Singapur	19,5	2,5Y8/10
Carrie	19,5	2,5Y8/10
Turrialba	19,0	5Y7/8
Davis Haden	19,0	5YR7/8
Fairchild	18,5	2,5Y8/8
Kensington Pride	18,0	2,5YR6/8
Lippens	18,0	5R5/10
Sensation	18,0	2,5Y7/8
M-6906	18,0	2,5Y8/10
Edward	17,5	5Y7/8
M-13768	17,5	7,5YR8/6
Pope	17,5	10R4/10
Smith	17,5	5R5/8
Haden Amarillo	17,0	2,5Y8/10
Filipino	17,0	5R4/10
Tommy Atkins	17,0	2,5R5/10
Glenn	17,0	2,5Y8/10
Aeromanis	17,0	7,5YR8/10
Van Dyke	17,0	2,5R4/10
Zilate	16,0	5R4/10
Zill	16,0	5R4/10
Tyler Premier	16,0	2,5Y8/10
Bombay Yellow	16,0	2,5Y8/8
Mulgoba	16,0	5R6/8
Haden Rojo	16,0	10R6/10
Jamaica	16,0	2,5Y8/10
Magashamin	15,5	2,5R4/8
Mora	15,5	5R5/10
Florigon	15,5	2,5Y8/10
Manzano	15,0	5R4/10
Kent	15,0	2,5Y7/10
Irwin	15,0	5R4/10
John Ensej	15,0	5YR6/10
Pairi	15,0	2,5YR6/8
Sunset	15,0	10R5/6
Early Gold	14,0	5YR7/10
Santaello	14,0	2,5Y8/8
Lily	12,5	2,4R4/4
Becky	12,0	5R7/6
Huevo de Toro	nd	2,5GY8/6
Nelson	nd	nd
Marichal	nd	nd
Keitt	nd	nd
Brooks	nd	nd

Cuadro 8. Porcentaje de sólidos solubles totales del fruto maduro de mango, informado en la literatura, por cultivar.

Cultivar	Porcentaje de sólidos solubles totales (°Brix)		Referencias
	Obtenido en el presente ensayo	Informado en la literatura	
Carrie	19,5	18,9	[6]
Edward	17,5	15,50 – 17,1	[8] [6] [12] [14]
Florigon	15,5	25,0	[24]
Glenn	17,0	17,10 – 17,50	[12] [9]
Haden (rojo)	16,0	12,1 – 21,3	[8] [6] [24] [12] [9] [14] [26]
Irwin	15,0	14,1 – 18,5	[8] [24] [12] [9]
Kensington	18,0	19,0 – 19,8	[16] [24]
Kent	15,0	13,7 – 20,0	[16] [8] [24] [9] [14] [26] [27]
Manzana	15,0	14,9	[9]
Pope	17,5	16,0	[6]
Sensation	18,0	14,4 – 15,87	[6] [19]
Smith	17,5	18,6 – 24,9	[16] [6]
Tommy Atkins	17,0	13,9 – 25,2	[16] [4] [8] [24] [18] [19] [9] [14] [26] [27]
Van Dyke	17,0	16,3 – 20,2	[24] [18] [14]
Zill	16,0	16,1 – 21,7	[16] [8] [6] [24] [9]

Los valores de porcentaje de sólidos solubles totales del mango dependen del sitio de cultivo, y del estado de maduración del fruto en el momento del análisis [16].

En el cuadro 9 se presentan las características organolépticas de los cultivares de mango. Se observa una amplia variedad de sabores y texturas entre los diferentes cultivares, lo cual es muy importante para definir las preferencias de los consumidores por uno u otro cultivar.

Entre los cultivares que presentaron un sabor dulce o muy dulce, y una textura poco fibrosa y agradable, se encuentran Haden Amarillo (conocido así únicamente en Costa Rica), Irwin, Julie, Smith, Kent, Lily, M-6906, Lippens, Carrie, Zilate, Davis Haden, y Florigon.

El hecho de que un cultivar obtuviera un alto valor de porcentaje de sólidos solubles totales no le confirió necesariamente un buen sabor, como ocurrió en el panel de degustación con los cultivares Saigon, Singapur, Turrialba, Van Dyke, Kensington Pride, y M-13768, que mostraron presencia importante de fibras en la pulpa, o sabores catalogados como “extraños”.

Otro dato curioso fue que los cultivares Aeromanis y Glenn, a pesar de tener 17 °Brix, en la prueba de degustación se les calificó con muy poco sabor en el primer caso, o con un sabor no muy bueno en el segundo caso. Otros cultivares mostraron sabores catalogados como muy ácido, “picante”, “salado”, o aromático.

Las discrepancias en relación a los datos encontrados en la literatura con respecto a la caracterización física y química de frutos de mango, pueden ser explicadas por las diferencias entre las metodologías de análisis utilizadas, el estado de maduración del fruto al ser cosechado, y las diferencias entre las zonas productoras [15].

Cuadro 9. Características organolépticas del fruto de los cultivares estudiados.

Cultivar	Sabor	Textura y otras características organolépticas
Aeromanis	Muy poco sabor	nd
Becky	Poco dulce	Firme. Tamaño grande
Bombay Yellow	nd	Suave y poco fibroso
Brooks	nd	nd
Carrie	Muy dulce	"Gelatinoso"
Davis Haden	Dulce	"Gelatinoso"
Early Gold	Un poco ácido	Muy jugoso
Edward	nd	Muy suave y con poca fibra
Fairchild	nd	Suave y con poca fibra
Filipino	Dulce	Muy fibroso
Florigon	Dulce	Suave y "gelatinoso"
Glenn	No muy buen sabor	Suave y jugoso
Haden Amarillo	Muy dulce	Suave y poco fibroso
Haden Rojo	Muy ácido	nd
Huevo de Toro	Muy ácido	nd
Irwin	Dulce	Poco fibroso
Jamaica	Dulce	Fibroso
John Ensey	nd	"Gelatinoso", muy fibroso por fuera y suave por dentro
Julie	Dulce y ácido	"Gelatinoso", no es fibroso
Keitt	nd	nd
Kensington Pride	Muy dulce	Fibroso
Kent	Muy dulce	Poco fibroso
Lily	Dulce, ácido	No es fibroso. Tamaño pequeño
Lippens	Dulce y aromático	"Gelatinoso", no es fibroso
Magashamin	nd	Muy suave, poco fibroso, "gelatinoso"
Manzano	Fuerte aroma	Suave, arenosa, poco fibroso
Marichal	nd	nd
Mora	nd	Arenosa y poco fibrosa
Mulgoba	Muy dulce	Fibroso
M-6906	Dulce y ácido	Firme, no fibroso
M-13768	Dulce	Fibroso
Nelson	nd	nd
Pairi	Sabor un poco "salado"	Un poco "gelatinoso" y fibroso a la vez
Pope	Sabor a "picante"	No es fibroso
Saigon	Sabor "extraño", aromático	Muy fibroso
Santaello	Sabor a "guayaba"	Firme y fibroso
Sensation	Sabor a "sandía"	Crujiente, quebradizo. La cáscara se desprende fácilmente de la pulpa
Singapur	Sabor a "guayaba"	Fibroso
Smith	Dulce, sabor a "coco"	Suave, compacto, poca fibra, "gelatinoso"
Sunset	Sabor a "toronja", ácido	nd
Tommy Atkins	nd	Fibroso
Turrialba	Muy dulce	Fibroso
Tyler Premier	Un poco ácido	Poco fibroso
Van Dyke	Algo dulce, sabor "extraño"	Poco fibroso, unas partes compactas y otras no
Zilate	Dulce	Suave, poco fibroso
Zill	nd	Poca fibra, muy jugoso

En una prueba de degustación de variedades de mango realizada en España, los consumidores rechazaron la variedad Sensation, debido a su sabor; además, la variedad Tommy Atkins no fue muy apreciada, mientras que los consumidores prefirieron variedades como Irwin, Carmen, Osteen, Lippens y Keitt, y en menor grado Kent y Zill [28].

Con el fin de adaptarse al cambio climático, los agricultores necesitarán variedades de mango con mayor tolerancia al estrés por sequía o calor, a un patrón de lluvias errático y exceso de humedad, y resistencia a nuevas razas de plagas y enfermedades. Por esta razón, es importante contar con bancos genéticos que puedan brindar las variedades mejor adaptadas al cambio climático en cada sitio. La evaluación sistemática de la diversidad genética mantenida en los bancos genéticos, y el acceso a información climática, permitirá la identificación de los cultivares mejor adaptados a las condiciones del cambio climático. El cambio climático proyectado puede tener un impacto profundo en cultivos altamente sensibles al clima como el mango [29]. El presente ensayo es un aporte en esta dirección, al caracterizar los frutos de los cultivares de mango presentes en el banco de germoplasma de la EEAFBM.

Conclusiones y recomendaciones

Se encontró una amplia variabilidad en las diferentes características físicas y químicas evaluadas a nivel de fruto, entre los 46 cultivares de mango.

Se presentaron algunas discrepancias entre los valores informados en la literatura y los obtenidos en el presente ensayo, para las diferentes variables evaluadas, lo que puede responder a la interacción genotipo-ambiente.

Los datos obtenidos se pueden considerar como representativos del comportamiento de los cultivares de mango, producidos en la zona de Alajuela, Costa Rica.

Se recomienda realizar la caracterización de los frutos de los diversos cultivares de mango en las diferentes zonas de producción de este frutal en el país.

Se recomienda aumentar el número de frutos evaluados por cultivar, en futuras investigaciones sobre caracterización de frutos de mango.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración de Tatiana Arias, Gislen Valverde, Josebeth Castro, Mariela Chinchilla, Daniela Ávila, Marcela Castro, Cindy Gamboa, Katherine Bolaños, Karol Zamora, Yuliana Quesada, Robert Ramírez, Francisco Ramírez, Juan Diego Román y Esteban Umaña, en el trabajo de campo. Asimismo, agradecen la asesoría de Patricia Quesada, y el financiamiento recibido por parte de la Universidad de Costa Rica, para la realización de este trabajo.

Referencias

- [1] R. P. d. Silva, M. A. C. d. Lima, T. P. Ribeiro, D. C. G. d. Trindade, A. Amariz and F. P. L. Neto, "Caracterização dos frutos de variedades do banco ativo de germoplasma de mangueira da Embrapa Semi-Árido," 2009. [Online]. Available: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CPATSA-2010/41650/1/OPB2522.pdf>.
- [2] Ministerio de Agricultura y Ganadería, Caracterización agrocadena de mango, San José, Costa Rica: Comité Técnico Regional, Región Pacífico Central, 2007, p. 54.
- [3] N. C. Ristow, S. R. Rosatti, F. C. Santos and M. A. C. De Lima, "Caracterização física de frutos de acessos de mangueira de diferentes origens do banco ativo de germoplasma da Embrapa Semiárido," in *22º Congresso Brasileiro de Fruticultura, 22-26 outubro, Memórias*, Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, Brasil, 2012.

- [4] A. C. d. Q. Pinto, V. H. V. Ramos and J. N. Dias, Avaliação de cultivares e seleções híbridas de manga em áreas de Cerrado, Planaltina, D. F., Brasil: Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, Embrapa Cerrados, 2004, p. 20.
- [5] S. R. Rosatti, R. P. d. Silva, N. C. Ristow and M. A. C. De Lima, "Caracterização física de frutos de acessos de mangueiras de diferentes origens," in *3º Simpósio Brasileiro de Pós-colheita de Frutas, Hortaliças e Flores, Memórias*, Nova Friburgo, Rio de Janeiro, Brasil, 2011.
- [6] J. A. Galli, M. D. Michelotto, L. C. P. Silveira and A. L. M. Martins, "Qualidade de mangas cultivadas no Estado de São Paulo," *Bragantia*, vol. 67, no. 3, pp. 791-797, 2008.
- [7] A. S. Faraoni, A. M. Ramos and P. C. Stringheta, "Caracterização da manga orgânica cultivar Ubá," *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, vol. 11, no. 1, pp. 9-14, 2009.
- [8] D. F. P. d. Silva, D. L. d. Siqueira, A. Rocha, L. C. C. Salomão, R. G. P. Matias and T. B. Struiving, "Diversidade genética entre cultivares de mangueiras, baseada em caracteres de qualidade dos frutos," *Revista Ceres*, vol. 59, no. 2, pp. 225-232, 2012.
- [9] R. Ramírez, O. Quijada, G. Castellano, M. E. Burgos, R. Camacho and C. Marín, "Características físicas y químicas de frutos de trece cultivares de mango (*Mangifera indica* L.) en el municipio Mara en la planicie de Maracaibo," *Revista Iberoamericana de Tecnología Poscosecha*, vol. 10, no. 2, pp. 65-72, 2010.
- [10] J. A. Osuna, M. L. Guzmán, B. Tovar, M. Mata and V. A. Vidal, "Calidad del mango Ataulfo producido en Nayarit, México," *Revista Fitotecnia Mexicana*, vol. 25, no. 4, pp. 367-374, 2002.
- [11] J. Aular and Y. Rodríguez, "Características físicas y químicas, y prueba de preferencia de tres tipos de mangos criollos venezolanos," *Bioagro*, vol. 17, no. 3, pp. 171-176, 2005.
- [12] E. Soto, L. Avilán, E. Unai, M. Rodríguez and J. Ruiz, "Comportamiento y características de algunos cultivares promisorios de mango," *Agronomía Tropical*, vol. 54, no. 2, pp. 179-201, 2004.
- [13] M. Capote-del Sol, G. González, D. Sourd, J. Valdés, B. Velázquez-Palenzuela and N. N. Rodríguez-Medina, "Evaluación de la diversidad de cultivares de mango (*Mangifera indica* L.) en Cuba mediante caracteres morfológicos cualitativos," *Revista CitriFrut*, vol. 28, no. 1, pp. 57-62, 2011.
- [14] J. Siller-Cepeda, D. Muiy-Rangel, M. Báez-Sañudo, E. Araiza-Lizarde and A. Ireta-Ojeda, "Calidad poscosecha de cultivares de mango de maduración temprana, intermedia y tardía," *Revista Fitotecnia Mexicana*, vol. 32, no. 1, pp. 45-52, 2009.
- [15] D. F. P. d. Silva, D. L. d. Siqueira, C. S. Pereira, L. C. C. Salomão and T. B. Struiving, "Caracterização de frutos de 15 cultivares de mangueira na Zona da Mata mineira," *Revista Ceres*, vol. 56, no. 6, pp. 783-789, 2009.
- [16] J. G. d. Costa, L. E. Paiva, A. S. Almeida and S. O. De Souza, "Comparação entre variedades de mangueira em relação a características do fruto nas condições do submedio do São Francisco," in *17º Congresso Brasileiro de Fruticultura, Memórias*, Belem, Pará, Brasil, 2002.
- [17] J. C. M. Rufini, E. R. Galvão, L. Prezotti, M. B. d. Silva and R. A. d. C. Parrella, "Caracterização biométrica e físico-química dos frutos de acessos de manga 'Ubá'," *Revista Brasileira de Fruticultura*, vol. 33, no. 2, pp. 456-464, 2011.
- [18] C. R. L. Carvalho, C. J. Rossetto, D. M. B. Mantovani, M. A. Morgano, J. V. d. Castro and N. Bortoletto, "Avaliação de cultivares de mangueira selecionadas pelo Instituto Agrônomo de Campinas comparadas a outras de importância comercial," *Revista Brasileira de Fruticultura*, vol. 26, no. 2, pp. 264-271, 2004.
- [19] E. Bastías, H. Escobar, A. Leiva, T. Torres and P. Córdova, "Estudio fenológico, calidad del fruto y productividad inicial de tres cultivares de mango (*Mangifera indica* L.), en el valle de Azapa, I Región (Chile)," *Idesia*, vol. 13, pp. 49-62, 1994.
- [20] A. Carrera, D. Mark and R. Gil, "Algunas características físicas y químicas de frutos de cinco variedades de mango en condiciones de sabana del estado Monagas," *Agronomía Tropical*, vol. 58, no. 1, pp. 27-30, 2008.
- [21] R. Fallas, F. Bertsch, E. Mirando and C. Henríquez, "Análisis de crecimiento y absorción de nutrimentos de frutos de mango, cultivares Tommy Atkins y Keith," *Agronomía Costarricense*, vol. 34, no. 1, pp. 1-15, 2010.
- [22] J. Zambrano, W. Materano and S. Briceño, "Influencia del período de almacenamiento en las características poscosecha de cinco variedades de mango *Mangifera indica* L.," *Revista Facultad de Agronomía (LUZ)*, vol. 17, pp. 164-172, 2000.
- [23] G. Laborem, C. Marín, L. Rangel and M. Espinoza, "Influencia del pre-enfriamiento sobre la maduración de 27 cultivares de mango (*Mangifera indica* L.)," *Bioagro*, vol. 14, no. 2, pp. 113-118, 2002.
- [24] R. F. d. M. Nunes, J. M. M. Sampaio and J. A. Rodrigues, Comportamento da mangueira (*Mangifera indica* L.) sob irrigação na região do Vale do São Francisco, Petrolina, Brasil: Circular técnica 66, Embrapa Semi-Árido, 2001, p. 8.

- [25] A. L. Vásquez-Caicedo, S. Neidhart and R. Carle, "Postharvest ripening behavior of nine thai mango cultivars and their suitability for industrial applications," *Acta Horticulturae*, vol. 645, pp. 617-625, 2004.
- [26] A. Carrera, R. Gil and D. Mark, "Comportamiento poscosecha de cinco cultivares de mango tratados con CO₂ y almacenados bajo condiciones naturales, en la Estación Experimental de INIA Caripe, estado Monagas," *Revista UDO Agrícola*, vol. 9, no. 1, pp. 51-59, 2009.
- [27] E. Araiza, T. Osuna, J. Siller, L. Contreras and E. Sánchez, "Postharvest quality and shelf-life of mango cultivars grown at Sinaloa, Mexico," *Acta Horticulturae*, vol. 682, pp. 1275-1279, 2005.
- [28] J. Calatrava, M. C. González and E. Guirado, "Spanish consumer preferences for mango cultivars: a taste testing analysis," *Acta Horticulturae*, vol. 455, pp. 840-844, 1997.
- [29] S. Rajan, "Phenological responses to temperature and rainfall: a case study of mango," in *Tropical fruit tree species and climatic change*, Roma, Italia, Bioversity International, 2012, pp. 71-96.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Reutilización de baterías de litio: un estudio integral sobre oportunidades, regulaciones y perspectivas en Alemania y Costa Rica

Reuse of Lithium Batteries: A Comprehensive Study on Opportunities, Regulations, and Perspectives in Germany and Costa Rica


Emily Denz¹, Sergio Morales-Hernández²


Fecha de recepción: 18 de enero, 2024
Fecha de aprobación: 7 de mayo, 2024

Denz, E; Morales-Hernández, S. Reutilización de baterías de litio: un estudio integral sobre oportunidades, regulaciones y perspectivas en Alemania y Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 1. Enero-Marzo, 2025. Pág. 19-32.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i1.7003>


1 Estudiante de Maestría en Energías Renovables. HTW Berlin – University of Applied Sciences. Alemania.

 emilydenz@aol.com

 <https://orcid.org/0009-0004-0780-0024>

2 Escuela de Ingeniería en Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 smorales@itcr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0003-2136-0382>

Palabras clave

Baterías de litio; vehículos eléctricos; dispositivos más pequeños; segunda vida; reutilización.

Resumen

Este proyecto de investigación pone un fuerte énfasis en la reutilización de baterías de iones de litio como elemento central en la transición hacia una energía neutral en carbono. Se describen en detalle los aspectos técnicos, legales y financieros de estos procesos en Alemania para proporcionar una comprensión integral de las prácticas de reutilización y reciclaje de las baterías de litio. Se presta una atención especial a la reutilización de grandes baterías, con ejemplos concretos de la situación en Alemania. También se abordan los potenciales y desafíos relacionados con las baterías más pequeñas, señalando que en Alemania la reutilización de baterías de iones de litio de dispositivos pequeños no parece ser económicamente rentable. Una contribución significativa de este trabajo es la presentación del enfoque alemán como un modelo inspirador para países en desarrollo como Costa Rica. Se destaca la posibilidad de aplicar estos procesos en una escala menor, especialmente para dispositivos más pequeños. La idea es que el enfoque alemán puede servir como guía para el uso sostenible de baterías de iones de litio en países que aún se encuentran en fase de desarrollo. En resumen, este proyecto contribuye a crear conciencia sobre la importancia de la reutilización de baterías de iones de litio en el contexto de la transición energética y presenta ejemplos concretos, así como posibles aplicaciones para países en desarrollo, contribuyendo así a la sostenibilidad global.

Keywords

Lithium batteries; electric vehicles; smaller devices; second life; reuse.

Abstract

This research project places a strong emphasis on the reuse of lithium-ion batteries as a central element in the transition to carbon neutral energy. The technical, legal and financial aspects of these processes in Germany are described in detail to provide a comprehensive understanding of the reuse and recycling practices of lithium batteries. Special attention is given to the reuse of large batteries, with concrete examples of the situation in Germany. Potentials and challenges related to smaller batteries are also addressed, pointing out that in Germany the reuse of lithium-ion batteries from small devices does not seem to be economically profitable. A significant contribution of this paper is the presentation of the German approach as an inspiring model for developing countries such as Costa Rica. It highlights the possibility of applying these processes on a smaller scale, especially for smaller devices. The idea is that the German approach can serve as a guideline for the sustainable use of lithium-ion batteries in countries that are still in the development phase. In summary, this project contributes to raising awareness of the importance of reusing lithium-ion batteries in the context of the energy transition and presents concrete examples as well as possible applications for developing countries, thus contributing to global sustainability.

Introducción

Contexto y justificación

El uso exponencial de vehículos eléctricos en la movilidad moderna en un gran número de países de todo el mundo, ha impulsado la importancia de explorar diferentes soluciones sostenibles para el manejo de sus componentes centrales, tales como las baterías de litio. Estas baterías, que forman la parte clave de la movilidad eléctrica, representan tanto un logro tecnológico como un desafío ambiental. Con el incremento de la cantidad de baterías de litio que llegan al final de su vida útil en los vehículos eléctricos, surge una oportunidad crucial para abordar la reutilización de estas baterías.

En este contexto, el presente trabajo de investigación se centra en un tema de relevancia global: la reutilización de baterías de litio de coches eléctricos en Alemania, que al día de hoy se ha convertido en un país líder en la adopción de tecnologías sostenibles y energías renovables, se encuentra en una posición estratégica en el futuro, de la reutilización de estas baterías y sus implicaciones tanto tecnológicas como medioambientales.

Objetivos de la investigación

Este estudio tiene como objetivo contribuir a una comprensión en profundidad de los procesos, desafíos y oportunidades asociados con la reutilización de baterías de litio provenientes de vehículos eléctricos en el contexto alemán. La reutilización no solo puede contribuir a prolongar la vida útil de las baterías y reducir el impacto ambiental, sino que también puede tener implicaciones económicas significativas y apoyar a la transición hacia una economía circular. Este objetivo general estará guiado por una evaluación de las tecnologías y aplicaciones viables para la reutilización de baterías de litio, considerando su rendimiento, capacidad y compatibilidad con diferentes usos. También hará una revisión de las normativas existentes relacionadas con la reutilización de baterías de litio, así como las políticas y programas gubernamentales destinados a promover prácticas sostenibles en este ámbito. Además, el análisis de cómo Alemania aborda las baterías de litio provenientes de fuentes no automotrices, ofrecerá una perspectiva valiosa para la formulación de políticas similares en otros lugares, como Costa Rica.

Reutilización de baterías de litio

En primer lugar, es necesario contextualizar el tema general de la reutilización de baterías de litio en un entorno científico. A continuación, se examinará con mayor detalle el concepto de reutilización y se le dará un marco adecuado. Posteriormente, se ilustrará el ciclo de vida de las baterías de litio y, por último, se describirán las diversas técnicas y aplicaciones del reciclaje de baterías de litio.

Definición y concepto de reutilización

La demanda de baterías está aumentando constantemente y se espera que siga aumentando exponencialmente en el futuro, ya que los sistemas de almacenamiento de energía son componentes esenciales de la transición energética. El concepto de „Segunda Vida“ (SV) define la forma en la que es posible prolongar la vida útil de las baterías de iones de litio, permitiendo que las baterías usadas tengan una „segunda vida“ en aplicaciones alternativas, después de su „primera vida“ (PV). [1]

La fabricación de baterías requiere materias primas críticas como el litio, el cobalto y el níquel, que se extraen en condiciones críticas. Por lo tanto, es crucial el reciclaje o la reutilización de las baterías para no perder estos materiales valiosos. Las baterías de iones de litio son altamente reciclables y eficientes en términos de recuperación de materiales. Al combinar varios métodos, es posible reciclar más del 90% de una celda de batería. [2]

Sin embargo, el reciclaje de baterías conlleva costos significativos, y hasta ahora, el reciclaje de baterías pequeñas a menudo no es rentable desde el punto de vista económico. En el capítulo 5.1 también se aborda este tema. La situación es diferente en el caso de las baterías grandes, como las utilizadas en vehículos eléctricos, que son rentables debido a la cantidad de materias primas críticas que contienen. Sin embargo, para satisfacer la creciente demanda de vehículos eléctricos, se requieren más capacidades de reciclaje que aún deben desarrollarse en la Unión Europea. [2]

Con el aumento de los vehículos eléctricos, también aumenta la cantidad de baterías de iones de litio en desuso. Al mismo tiempo, la proporción de energía renovable en la mezcla energética total de Alemania está en aumento. Según la Ley de Energías Renovables de 2023 (EEG 2023) de la República Federal de Alemania, se ha fijado como objetivo generar al menos el 80% de la electricidad a partir de fuentes renovables para 2030. [3] Esto presenta la oportunidad de utilizar baterías de iones de litio retiradas de vehículos eléctricos, ya que son necesarias tecnologías de almacenamiento para integrar energías renovables en la red eléctrica. Debido a las variaciones en la generación de energía renovable, se necesitan sistemas de almacenamiento para garantizar la estabilidad de la red eléctrica alemana a 50 Hz. Esto se puede lograr mediante sistemas de almacenamiento electroquímico como las baterías de iones de litio. Sin embargo, debido a su alto costo, las baterías nuevas pueden resultar costosas, por lo que las baterías de „Segunda Vida“ ofrecen una alternativa económica. Estas baterías de iones de litio tienen suficiente capacidad después de su „primera vida“ para ser utilizadas en perfiles de consumo de energía más bajos. [1]

Ciclo de vida de las baterías de litio

La duración de vida de una batería de vehículo eléctrico se define de manera variable. Basándonos en información del fabricante y en diversos estudios, la duración de vida de una batería de iones de litio, considerando tanto su „Primera Vida“ como su „Segunda Vida“, se ilustra en la Figura 1. Por lo general, la „Primera Vida“ tiene una duración de 10 años hasta alcanzar el „Estado de Salud“ (SoH) con una capacidad residual del 75%. Hasta este punto, se estiman aproximadamente 4000 ciclos de carga. Más tarde, la batería se utiliza para su „Segunda Vida“, que por lo general finaliza después de 20 años, con una capacidad residual del 50%. Hasta este punto, se calculan alrededor de 8000 ciclos de carga. Finalmente, la batería se destina al reciclaje. La estimación de la duración de vida a partir de este punto es de otros 10 años [1].

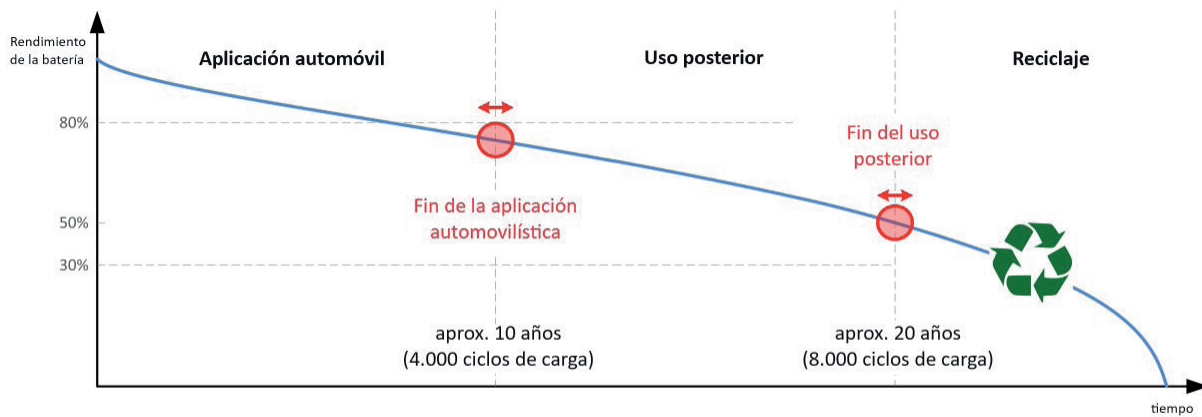


Figura 1. Ciclo de vida de las baterías de litio.

Technologías y aplicaciones de reutilización

A continuación, se ilustrará la reutilización y el proceso de la „Segunda Vida“ mediante el ejemplo de un vehículo eléctrico. La Figura 2 representará la reutilización después de la „Primera Vida“. De acuerdo con otro estudio realizado por Fischhaber, Regett y Schuster en 2016, el ciclo de vida de una batería de iones de litio consta de cuatro etapas clave. Estas etapas son en primer lugar, la operación en vehículos „Primera Vida“, seguida de la etapa de reacondicionamiento, posteriormente la aplicación de la „Segunda Vida“ y, finalmente, el reciclaje. Después de que la batería del vehículo alcance su denominado „Fin de Vida“ (EoL), es decir, el punto en el cual la batería ya no cumple con los requisitos de funcionamiento en el vehículo, se retira y se somete al proceso de reacondicionamiento. [4]

Después de que concluye la Primera Vida del vehículo eléctrico, se recopilan las baterías de iones de litio y se examinan en busca de posibles daños graves. Si se encuentra algún tipo de daño, la batería se somete directamente a un proceso de reciclaje. Si no se detectan daños, la batería de iones de litio es adecuada para una aplicación de „Segunda Vida“, y se procederá a evaluar su „Estado de Salud“ (SOH). Si la capacidad de esta batería supera el 88%, se devuelve para su reutilización en una aplicación de Primera Vida como repuesto o componente de reemplazo. Si la capacidad se encuentra entre el 75% y el 88%, se recomienda utilizar la batería sin desmontar en módulos individuales, como en sistemas de almacenamiento de energía estacionarios, así como en camiones híbridos o en la navegación de transbordadores. Sin embargo, si la capacidad es inferior al 75%, las baterías de iones de litio deben desmontarse en módulos o celdas más pequeñas y utilizarse en aplicaciones estacionarias o dispositivos más pequeños, como laptops, bicicletas eléctricas y pequeños robots domésticos [1].

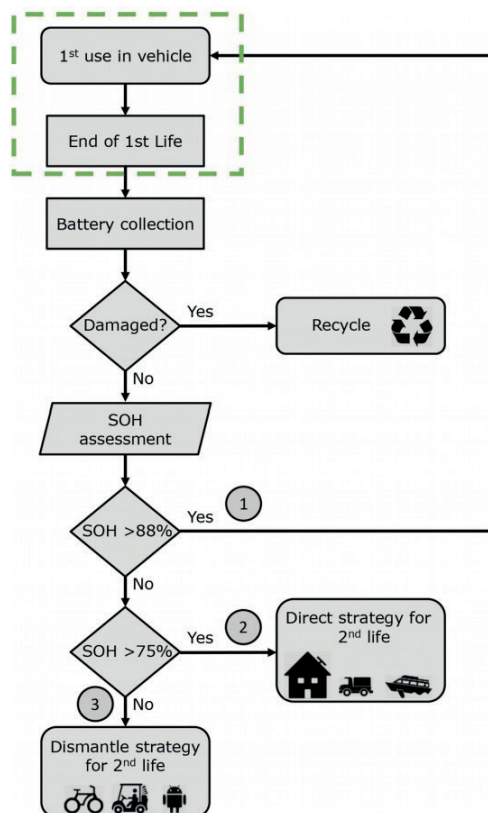


Figura 2. Segunda vida de las baterías de litio.

Como alternativa al reciclaje una vez que se alcance el final de la Segunda Vida, teóricamente se podría considerar la posibilidad de utilizar baterías envejecidas de Segunda Vida en una „Tercera Vida“ en aplicaciones con perfiles de carga aún más suaves. Sin embargo, en la práctica, este enfoque no sería económicamente viable. [4]

Debido al creciente número de vehículos eléctricos, un número cada vez mayor de empresas está optando por donar baterías a terceros países. La idea detrás de esto es que las baterías puedan ser utilizadas para otros propósitos o incluso recicladas. Sin embargo, hasta el momento, no existen directrices para la exportación de baterías de iones de litio. Por lo tanto, no hay garantía de que las baterías que aún estén en funcionamiento, sean necesarias en el lugar de destino o que haya capacidades de reciclaje disponibles allí. Es por ello que cada vez más organizaciones no gubernamentales están exigiendo estándares mínimos para la exportación de baterías usadas a terceros países. Esto tiene como objetivo garantizar que las baterías donadas y previamente utilizadas cumplan con los estándares del país de destino, conservando al menos el 80% de su capacidad, y ofreciendo una ventaja económica para los organismos receptores. Además, se busca que los actores que comercian con baterías en países de bajos ingresos estén obligados a recolectar cantidades correspondientes en el mismo país y reciclarlas de manera adecuada. [2]

En lo que respecta a los campos de aplicación de las baterías de Segunda Vida (SV), se puede afirmar que las aplicaciones de almacenamiento estacionario, la utilización en infraestructuras eléctricas y la movilidad eléctrica representan las áreas de aplicación más amplias. Según un estudio de Canals Casals, se estima que el 9% de las baterías son reintegradas en el pool de utilización de movilidad eléctrica, el 70% se utiliza en aplicaciones estacionarias o de alto rendimiento, y el 20% se emplea en aplicaciones pequeñas de bajo rendimiento. En el ámbito

de los sistemas de almacenamiento de energía, se consideran aplicaciones para energías renovables en la industria y en hogares particulares, sistemas de almacenamiento a gran escala para proporcionar servicios de regulación primaria y sistemas de suministro de energía de emergencia. [5]

En el ámbito de la movilidad, las baterías de SV se utilizan en camiones híbridos y en la navegación de transbordadores. Para reducir las emisiones de ruido y gases contaminantes, especialmente en áreas urbanas, las baterías de SV pueden utilizarse en las etapas iniciales de desplazamiento de vehículos. Según Canals Casals, la capacidad reducida no supone un problema en este contexto, ya que los vehículos son impulsados eléctricamente solo durante breves períodos de tiempo. Debido a la alta densidad de energía de las baterías de iones de litio y al tamaño de los camiones, ni el peso adicional ni el espacio necesario deberían plantear problemas significativos. Lo mismo se aplica al uso en transbordadores, donde la utilización del motor eléctrico en lugar del motor de combustión puede reducir las emisiones de ruido en los puertos [5].

En lo que respecta a aplicaciones más pequeñas, como laptops, bicicletas eléctricas o robots domésticos, también son posibles. Para ello, las baterías de iones de litio deben desmontarse en su estructura celular. Dado que las baterías de vehículos eléctricos están más avanzadas que las baterías pequeñas convencionales, pueden proporcionar el rendimiento económico y eléctrico necesario en combinación con nuevas celdas, sin necesidad de ocupar más espacio [5].

Marco legal y regulaciones en Alemania

En esta sección, se abordarán las regulaciones en Alemania relacionadas con la reutilización de baterías y las políticas y programas gubernamentales destinados a promover la reutilización. Esta información es fundamental para comprender el contexto político y normativo en torno al tema.

Normativas en Alemania relacionadas con la reutilización de baterías

La base legal para las baterías de iones de litio en Alemania es la Ley de Baterías (BattG). Esta ley se considera la implementación alemana de la Directiva Europea de Baterías (BATT) que regula la puesta en el mercado, la recogida y la eliminación ambientalmente adecuada de las baterías y acumuladores. En 2009, reemplazó al antiguo Reglamento de Baterías (BattV) y fue objeto de una revisión exhaustiva en 2021 (BattG2). Cada país de la Unión Europea tiene su propia legislación sobre baterías. El BattG se aplica únicamente en Alemania. Se considera fabricante a las empresas que, de manera comercial, introducen por primera vez baterías o acumuladores en el mercado alemán mediante venta, arrendamiento, alquiler o donación. Esto incluye tanto la producción como la importación, así como el uso de una propia marca y la distribución intencionada o negligente de baterías no registradas. [6]

Los párrafos 5 a 8 del BattG establecen la obligación del fabricante de retirar las baterías y describen las especificaciones que deben cumplirse en el sistema de devolución. El fabricante tiene la opción de desarrollar y operar su propio sistema de devolución que cubra todo el territorio, contratar a un tercero para llevar a cabo esta tarea o unirse a un sistema de devolución existente. Si no elige ninguna de estas opciones, se le pueden facturar los costos de retirada, clasificación, reciclaje o eliminación. El sistema de devolución no debe tener fines lucrativos y debe cumplir con los objetivos de recogida establecidos en el párrafo 16 de la Ley de Baterías. Las obligaciones de información descritas en el párrafo 18 requieren que el fabricante participe adecuadamente en el sistema de devolución de las baterías y proporcione al cliente información sobre los componentes de la batería. [7]

En resumen, la Ley de Baterías regula fundamentalmente el ciclo de vida completo de las baterías de iones de litio tal como ocurre en el mercado actual. Sin embargo, en este marco aún no se tienen en cuenta las aplicaciones de „Segunda Vida“. En el futuro, será necesario evaluar y definir especialmente las obligaciones y derechos de las partes involucradas para garantizar una reutilización sin problemas. [8]

Políticas y programas gubernamentales de fomento a la reutilización

En abril de 2019, la Comisión Europea publicó una evaluación de la directiva de baterías presentada en la sección anterior. En esta evaluación se determinó que la armonización en Europa se lograría de manera más efectiva a través de un reglamento en lugar de una directiva. Esto se debe a que las diferentes medidas de recopilación y reciclaje de residuos en los diferentes estados miembros habían llevado a un marco legal desigual y confuso. Un reglamento de este tipo es directamente aplicable en cada estado miembro y no necesita ser implementado primero en la legislación nacional. [6]

Ahora, la Unión Europea está preparando un nuevo reglamento de baterías más estricto, que se espera que entre en vigor en 2023. Estas nuevas regulaciones implican la creación de nuevas asociaciones circulares entre fabricantes de baterías y empresas de reciclaje. La nueva propuesta de ley consta de 79 artículos que tienen como objetivo evitar que los países de la UE implementen las regulaciones de manera diferente, como ha sido el caso hasta ahora. Este nuevo reglamento se aplica a todos los tipos de baterías portátiles, de vehículos, de tracción e industriales. Estos nuevos requisitos afectarán a la fabricación, el diseño, la etiquetación, la trazabilidad, la recopilación, la reutilización y el reciclaje de las baterías a lo largo de su ciclo de vida. [8]

En cuanto al reciclaje o la reutilización, este nuevo reglamento introduce algunos cambios. Actualmente, al menos el 50% del peso de las baterías debe reciclarse. A partir de 2025, este requisito aumentará al 65% para las baterías de iones de litio y a partir de 2030 al 70%. Además, se establecen requisitos de reciclaje específicos para el contenido de litio, cobalto, cobre, níquel y plomo de las baterías. Así la cuota de reciclaje requerida para el litio aumentará del 35% al 70% entre 2026 y 2030. Los fabricantes también están obligados a aumentar la cantidad de baterías portátiles devueltas en un 45% para 2026 y un 70% para 2030. En cuanto a la exportación de baterías usadas fuera de la UE, solo será permitida si el procedimiento de gestión de baterías del receptor cumple con los requisitos de la UE. [8]

El objetivo de este nuevo reglamento es revisar la gestión de los residuos de baterías y tomar medidas para proteger el medio ambiente y la salud humana. Esto se logrará mediante la prevención o reducción de los efectos adversos de la generación de residuos, la reducción de los efectos negativos del uso de recursos y la mejora de la eficiencia de los recursos. Este enfoque tiene como objetivo crear una economía más circular y neutral desde el punto de vista climático. [6]

Análisis de la situación actual en Alemania

Después de haber proporcionado un marco tanto definitorio como técnico, así como político y legal, al tema de la reutilización de baterías de litio, es necesario ahora examinar y analizar la situación específica en Alemania. A continuación, se profundizará en proyectos e iniciativas que contribuyen a la reutilización de baterías de iones de litio. Posteriormente, se presentarán colaboraciones entre la industria automotriz y otros sectores de energías renovables.

Proyectos e iniciativas de reutilización de baterías de litio

Alemania se encuentra a la vanguardia en Europa en el ámbito del reciclaje de baterías de iones de litio. Actualmente, la capacidad de las instalaciones se sitúa en el rango de las cifras de toneladas de cuatro dígitos como máximo. Sin embargo, se planea una expansión significativa a corto y largo plazo. Tanto las grandes corporaciones como Volkswagen o Mercedes-Benz como las pequeñas empresas con menos de 100 empleados, como Accurec o Duesenfeld, participan en el campo del reciclaje de baterías. Estas últimas ya reciclan aproximadamente 3000 toneladas de baterías al año. En particular, Accurec ha establecido metas ambiciosas para el futuro, habiéndose invertido ya 5 millones de euros en la construcción de la instalación y la infraestructura correspondiente. La instalación de reciclaje de baterías más grande hasta la fecha en Alemania se encuentra en las montañas del Erzgebirge y es operada por Nickelhütte Aue. En 2021, la cantidad de baterías de iones de litio procesadas fue de aproximadamente 4000 toneladas, aunque la capacidad de la planta permite mucho más, con un límite anual de 7000 toneladas. La siguiente tabla presenta las diferentes instalaciones de reciclaje de baterías de iones de litio en Alemania, teniendo en cuenta que los datos corresponden a abril de 2022 [9].

Empresa	Ubicación de la planta	Puesta en marcha	Capacidad actual	Capacidad planeada	Costos de inversión
Primobius	Hilchenbach (Nordrhein-Westfalen)	2022	20000 t/a	-	datos desconocidos
Accurec	Krefeld (Nordrhein-Westfalen)	2015	3250 t/a	60000 t/a	hasta ahora 5Mio€ (con actualización 13,5Mio€)
Mercedes	Kuppenheim (Baden-Württemberg)	2023	-	2500 t/a	monto de dos cifras de Mio€
Duesenfeld	Wendeburg (Niedersachsen)	2019	2900 t/a	15000 t/a	aprox. 25Mio€
Redux	Bremenhaven (Bremen)	2018	10000 t/a	-	aprox. 3Mio€
BASF	Schwarzheide (Brandenburg)	2023	datos desconocidos	datos desconocidos	datos desconocidos
Nickelhütte Aue	Aue (Sachsen)	2011	4000 t/a	7000 t/a	datos desconocidos
Roth International	Wernberg-Köblitz (Bayern)	2022	-	9000 t/a	datos desconocidos
Volkswagen	Salzgitter (Niedersachsen)	2021	1500 t/a	-	datos desconocidos
Li-Cycle	Ubicación desconocida	2023	-	10000 t/a	datos desconocidos

Figura 3. Plantas de reciclaje de baterías de litio en Alemania.

Un proyecto consorcial que involucra a 9 diferentes socios, Audi, BASF, BMW, Circular GmbH, FIWARE Foundation, Fraunhofer-Institut, System Q, TWAICE y Umicore, tiene como objetivo trabajar en la implementación de una nueva generación de gestión de productos digitales. En este contexto, se espera que el „Battery Pass“ contribuya para fines de 2024 a la creación de un pasaporte de batería aplicable de manera armonizada en la UE y a nivel mundial. El trasfondo de este proyecto radica en la crítica generalizada hacia las baterías de iones de litio debido a su alto consumo de energía en la producción y su alto contenido de materias primas metálicas. Por lo tanto, se busca mantener el foco de atención en el ciclo de vida de estas baterías y diseñar el valor agregado de acuerdo a principios circulares. Esto implica extender el ciclo de vida del sistema de baterías en su totalidad, reutilizar los recursos, materiales y componentes utilizados después de su primer uso, y establecer una cadena de suministro transparente para los materiales de las baterías. A través de este Battery Pass, se pretende desarrollar estándares para un pasaporte digital de baterías que permita una gestión sostenible y circular de las baterías de tracción. Este pasaporte facilita una documentación fluida de la vida útil de la batería, desde la producción hasta el uso, la reutilización y el reciclaje. Los datos de este pasaporte incluyen, por ejemplo, la huella de carbono, las condiciones laborales en la extracción de materias primas, la determinación del estado de la batería, así como el envejecimiento, la calidad, la capacidad de reciclaje y la reparación [10].

Colaboraciones entre la industria automotriz y otras áreas de energías renovables

El desmontaje y separación de materias primas, como níquel, cobalto y litio, de las baterías de iones de litio de vehículos eléctricos es un proceso muy complejo y costoso que también requiere una gran cantidad de energía. Desde una perspectiva económica, a menudo este esfuerzo no resulta rentable para el fabricante. En la mayoría de los casos, es más sencillo para el fabricante simplemente adquirir estos recursos nuevamente.

Sin embargo, actualmente el mercado está creciendo para proveedores que reciclan baterías o les dan una segunda vida. Por ejemplo, la startup aacheniana Voltfang tiene un enfoque interesante en este sentido. Las baterías eléctricas de Tesla Model S y BMW i3 obtienen una segunda vida al utilizarse como sistemas de almacenamiento en el hogar y bancos de energía portátiles. La comercialización del producto tiene éxito debido a que los costos de inversión son significativamente menores en comparación con los sistemas de almacenamiento convencionales, con un período de amortización financiera de menos de 5 años [11].

Además, los fabricantes de automóviles están aprovechando cada vez más el potencial remanente de las baterías que ya no pueden cumplir con la capacidad de carga necesaria para los vehículos eléctricos. Volkswagen, por ejemplo, ha inaugurado una primera planta de reciclaje de baterías de alto voltaje en Salzgitter, que provienen de vehículos eléctricos. El objetivo aquí es recuperar materias primas valiosas como litio, níquel, manganeso y cobalto en un ciclo cerrado con una tasa de reutilización de aproximadamente el 90%. Sin embargo, solo se reutilizan las baterías que ya no pueden ser utilizadas de otra manera. Antes de esto, se analiza si la batería todavía tiene suficiente capacidad para ser utilizada, por ejemplo, en sistemas de almacenamiento de energía móviles, como estaciones de carga rápida flexibles o robots de carga móviles. La planta tiene como objetivo reciclar hasta 3600 sistemas de baterías al año, equivalentes a aproximadamente 1500 toneladas de material. Mercedes, por su parte, ya ha integrado tres sistemas de almacenamiento que incluyen baterías automotrices, con una capacidad total de 40 MWh, en la red eléctrica alemanas [12].

Además, existen colaboraciones entre proveedores de energía y la industria automotriz. Por ejemplo, la empresa alemana de energía EnBW está trabajando en conjunto con Audi en el desarrollo de sistemas de almacenamiento estacionarios que almacenan la electricidad de sus parques eólicos y fotovoltaicos durante períodos de exceso de energía, fortaleciendo así la red en momentos de baja producción. El centro de estos sistemas de almacenamiento está compuesto por baterías desechadas de vehículos eléctricos de Audi. Para ganar más experiencia en este campo, EnBW y Audi están planeando un sistema de referencia en las instalaciones de la planta de energía térmica en Heilbronn, que servirá como modelo técnico y de procesos para futuras instalaciones comerciales. [12]

Exploración de escenarios alternativos al escenario automotriz utilizando Costa Rica como ejemplo

En los capítulos anteriores, se ha abordado extensamente el tema de la reutilización de baterías de iones de litio procedentes de vehículos eléctricos, sin embargo, ¿qué sucede con los dispositivos de menor tamaño, como las baterías de iones de litio de bicicletas eléctricas o de ordenadores portátiles? ¿Se emplean también estas baterías para su reuso en Alemania? ¿Y cuáles son las lecciones que pueden extraer los países en vías de desarrollo, como Costa Rica?

Los próximos capítulos proporcionarán una visión integral de las oportunidades y desafíos relacionados con la diversificación en el uso de baterías de iones de litio, con un enfoque especial en la experiencia alemana y el potencial de Costa Rica como un caso de estudio relevante en el contexto de la sostenibilidad energética y medioambiental. A partir de las lecciones aprendidas en los capítulos anteriores, se presentarán valiosas ideas para la formulación de un posible modelo a menor escala en Costa Rica. Se prestará especial atención a la viabilidad de establecer un proyecto piloto que, de implementarse con éxito, allanaría el camino hacia una adopción más rápida y eficiente de baterías reutilizadas en vehículos eléctricos y en la infraestructura energética del país.

Consideración de una posible aplicación y uso de baterías de litio de fuentes no automotrices en Alemania

En el contexto de la búsqueda de literatura y fuentes de información sobre el segundo ciclo de vida de baterías pequeñas, como las utilizadas en ordenadores portátiles, teléfonos móviles o bicicletas eléctricas en Alemania, se destaca la notoria ausencia de ejemplos e información. Esto sugiere que, en Alemania no se ha considerado económicamente atractivo invertir recursos en la reutilización de baterías pequeñas. Parece existir una falta de rentabilidad en la reutilización de baterías de iones de litio procedentes de dispositivos pequeños en Alemania.

Esta situación se puede explicar en parte por la sensibilidad de las baterías de ion litio a la descarga profunda y su respuesta negativa a un almacenamiento o carga inadecuados, lo que resulta en una marcada disminución de la capacidad de funcionamiento óptimo de estas. Además, las baterías de iones de litio utilizadas en diversos dispositivos suelen tener diseños diferentes y, en muchos casos, están soldadas o integradas de forma permanente, lo que dificulta su desmontaje y reutilización, especialmente en dispositivos pequeños. La descomposición y el reciclaje de baterías pequeñas requieren conocimientos especializados y equipos, lo que aumenta los costos. Por el contrario, las baterías grandes son generalmente más accesibles y fáciles de desmontar y reparar, lo que facilita su reutilización. Además, la vida útil de las baterías pequeñas es significativamente menor que la de las baterías más grandes, lo que reduce la atractividad de la reutilización en términos de costo por unidad de energía producida [13].

Sin embargo, en el ámbito de dispositivos eléctricos más pequeños, como ordenadores portátiles, teléfonos móviles o bicicletas eléctricas, se están intensificando los esfuerzos para reciclar y desechar adecuadamente las baterías de iones de litio, con el fin de minimizar el impacto ambiental y recuperar materias primas valiosas. Para proteger tanto a las personas como al medio ambiente, es de vital importancia la correcta separación y reciclaje de los materiales valiosos, así como la recogida y el reciclaje de los residuos sólidos no clasificados.

Alemania tiene regulaciones ambientales y leyes estrictas para el reciclaje de estas baterías, con el fin de garantizar su disposición y separación adecuada. En 2022, entró en vigor el Reglamento de Eficiencia del Reciclaje de la Unión Europea. [14] El objetivo de esta regulación es proporcionar una base de cálculo uniforme para comparar la eficiencia de reciclaje entre los estados miembros de la Unión Europea. Según un estudio en 2022, la tasa de recogida de baterías de dispositivos aumentó un 9.5% con respecto al año anterior. [15]

Lecciones aprendidas para un modelo potencial en Costa Rica

En Alemania la reutilización de baterías de iones de litio procedentes de dispositivos pequeños no resulta rentable debido al esfuerzo requerido en comparación con el tamaño de la batería. Alemania desempeña un papel fundamental, tanto como consumidor como productor de baterías y vehículos eléctricos. Por lo tanto, tiene más sentido reutilizar baterías grandes de vehículos eléctricos en lugar de invertir recursos en baterías más pequeñas.

La pregunta que surge es cómo aplicar globalmente este enfoque, dado que, por ejemplo, en países de América Central o el Caribe, son principalmente consumidores y no productores. Sin embargo, es probable que con el tiempo, estos países también comiencen a fabricar y utilizar vehículos eléctricos, lo que permitiría la reutilización de baterías. No obstante, este punto aún no se ha alcanzado. Por lo tanto, una opción podría ser implementar un enfoque similar, pero centrado en dispositivos más pequeños.

El trabajo de investigación anterior puede servir como un estímulo, especialmente para países en desarrollo como Costa Rica, para encontrar formas de incorporar la reutilización de baterías de litio en el mercado. Utilizando un procedimiento similar al aplicado en Alemania, pero

adaptado a dispositivos más pequeños y en una escala reducida, se podría abrir un nicho de mercado. Un proyecto piloto como este, podría facilitar la transición hacia la utilización de baterías reutilizadas en vehículos eléctricos de mayor tamaño en el futuro.

Teniendo en cuenta los datos aportados anteriormente, Costa Rica podría comenzar a reutilizar las baterías de iones de litio de vehículos eléctricos como un modelo para mejorar el suministro de energía, reducir la contaminación ambiental y facilitar el acceso a la electricidad en áreas remotas. Además, también podría contribuir a reducir la necesidad de costosas baterías nuevas y ahorrar recursos.

Consideraciones sobre la aplicación del sistema a menor escala utilizando el ejemplo de Costa Rica

La idea de reutilizar las baterías de litio de pequeños dispositivos electrónicos, inspirada en la práctica alemana de reutilizar las baterías más grandes de vehículos eléctricos, conlleva una serie de pasos y consideraciones que deben ser tenidos en cuenta.

En primer lugar, al igual que ocurre en Alemania, se deben establecer sistemas de recolección en los que se recopilen baterías usadas de ordenadores portátiles, teléfonos móviles, bicicletas eléctricas y otros dispositivos. Esto podría llevarse a cabo en colaboración con fabricantes de electrónica, empresas de reciclaje y autoridades gubernamentales. Es de vital importancia garantizar que las baterías se recojan de manera segura y respetuosa con el medio ambiente.

Además, se requiere un control de calidad y una evaluación del estado de las baterías una vez que han sido recolectadas. Solo las baterías en buen estado deben considerarse para su reutilización. Esto puede lograrse, como se indicó anteriormente, mediante una evaluación exhaustiva y pruebas.

A continuación, las baterías de los dispositivos más pequeños que pueden ser reparadas o reacondicionadas deben ser preparadas para el reciclaje o la reutilización. Esto requiere habilidades y equipos especiales. En este sentido, la experiencia de Alemania puede ser exportada. En colaboración con socios locales en Costa Rica, pueden desarrollarse aplicaciones apropiadas a una escala más pequeña para estas baterías reutilizadas. Por ejemplo, podrían utilizarse en sistemas de almacenamiento de energía solar, suministro de energía de respaldo para áreas remotas o proyectos de electrificación.

El ámbito educativo y las regulaciones legales son igualmente importantes en este contexto. La población local debe recibir formación sobre el manejo seguro y la correcta disposición de las baterías. Es necesario prestar especial atención al manejo de las baterías de iones de litio, ya que requieren precauciones adicionales. En cuanto a las regulaciones legales, el gobierno de Costa Rica debe establecer marcos legales y regulaciones adecuados para fomentar la reutilización de baterías y garantizar estándares medioambientales. Además es fundamental supervisar el progreso y llevar a cabo investigaciones para asegurar que la reutilización de las baterías se realice de manera eficiente y respetuosa con el medio ambiente.

Conclusiones

En resumen, se puede afirmar que la reutilización de baterías de iones de litio en Alemania representa un paso crucial en la transición energética sostenible y neutral en carbono. Este hito resulta importante, ya que debido al continuo aumento en la utilización y producción de vehículos eléctricos, el potencial de reutilización de las baterías crecerá de forma significativa en el futuro.

En Alemania, numerosas empresas ya han reconocido que la reutilización de baterías de vehículos eléctricos ofrece oportunidades y han lanzado soluciones al mercado para las baterías de segunda vida antiguas. Además, fuera del ámbito empresarial, se reconoce el potencial del reuso de baterías para nuevos propósitos, especialmente por parte de los comerciantes de energía que las utilizan como valiosos recursos en sistemas de almacenamiento.

En cuanto al uso de baterías alternativas provenientes de dispositivos no relacionados con vehículos eléctricos, como ordenadores portátiles, teléfonos móviles o bicicletas eléctricas, se puede constatar que en Alemania no resulta económicamente rentable su reutilización. Esto contrasta con los países en desarrollo como Costa Rica, que no han sido productores de vehículos eléctricos hasta el momento. Para tales países, la reutilización de baterías de dispositivos más pequeños podría ser una alternativa importante a la hora de abrirse paso en el mercado de reacondicionamiento de baterías de iones de litio.

Así que el enfoque aplicado en Alemania para la reutilización de baterías de vehículos eléctricos podría servir como modelo para Costa Rica. Esto podría llevarse a cabo en una escala más reducida, particularmente en el ámbito de las baterías más pequeñas. Este enfoque podría facilitar la entrada de Costa Rica en el mercado de producción de vehículos eléctricos en el futuro, ya que podrían aplicarse métodos similares de reacondicionamiento. Un proyecto piloto de este tipo podría servir como precursor de implementaciones futuras a mayor escala y, por lo tanto, contribuir de manera significativa a la utilización sostenible de baterías de iones de litio en Costa Rica.

Referencias

- [1] M. Atzorn, C. Gey, F. Leplow und M. Piayda, „Wiederverwendung und Recycling von Lithium-Ionen-Akkus,“ Hochschule RheinMain, Wisbaden Rüsselsheim, 2018.
- [2] J. Broich, „Das zweite Leben der Lithium-Ionen-Batterien,“ 22 06 2022. [Online]. Available: <https://www.energiezukunft.eu/wirtschaft/das-zweite-leben-der-lithium-ionen-batterien/>. [Zugriff am 17 09 2023].
- [3] B. d. Justiz, „Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG),“ 2023. [Online]. Available: https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/_1.html. [Zugriff am 17 09 2023].
- [4] S. Fischhaber, A. Regett und S. F. Schuster, „Studie: Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen,“ Begleit- und Wirkungsforschung Schaufenster Elektromobilität (BuW), Frankfurt am Main, 2016.
- [5] L. C. Casals, B. Amante García und L. V. Cremades, „Electric vehicle battery reuse: Preparing for a second life,“ in *Journal of Industrial Engineering and Management*, Catalunya, Universidad Politécnica de Catalunya, 2017, pp. 271 - 273.
- [6] Hesselmann, „Das Batteriegesetz,“ 2023. [Online]. Available: https://www.batteriegesetz.de/#gesetz_60. [Zugriff am 18 09 2023].
- [7] B. d. Justiz, „Batteriegesetz (BattG),“ 2021. [Online]. Available: https://www.gesetze-im-internet.de/battg/inhalts_bersicht.html. [Zugriff am 17 09 2023].
- [8] A. Seeger, „EU-Batterieverordnung stellt neue Anforderungen an die Industrie,“ STENA Recycling, 2023. [Online]. Available: <https://www.stenarecycling.com/de/news-einblicke/einblicke--inspirationen/leitfaeden-artikel/eu-batterieverordnung-stellt-neue-anforderungen-an-die-industrie/#:~:text=Derzeit%20m%C3%BCssen%20mindestens%2050%20%25%20des,und%20Bleigehalt%20von%20Batterien%20>. [Zugriff am 18 09 2023].
- [9] S. Hartmann, „Deutschland ist in Europa Vorreiter bei Recyclinganlagen für Lithium-Ionen-Batterien,“ Euwid, 24 05 2022. [Online]. Available: <https://www.euwid-recycling.de/news/wirtschaft/deutschland-in-europa-vorreiter-bei-recyclinganlagen-fuer-lithium-ionen-batterien-240522/>. [Zugriff am 22 09 2023].
- [10] T. Weber, „Battery Pass - Umsetzung einer neuen Generation digitaler Produkthandhabung,“ CircularEconomyInitiative, 2023. [Online]. Available: <https://www.circular-economy-initiative.de/battery-pass-de>. [Zugriff am 22 09 2023].
- [11] „Voltfang,“ 2023. [Online]. Available: <https://voltfang.de/batteriespeicher-industrie/batteriegrossspeicher/>. [Zugriff am 19 09 2023].

- [12] M. Kaiser, W. Gomoll und S. Grundhoff, „Wiederverwendung von alten E-Auto-Akkus: Stadionbeleuchtung, Haus-Stromspeicher,“ *EFahrer*, 15 03 2021. [Online]. Available: https://efahrer.chip.de/news/wiederverwendung-von-alten-e-auto-akkus-stadionbeleuchtung-haus-stromspeicher_104330. [Zugriff am 19 09 2023].
- [13] J. Wegener, „Upcycling: Lithium-Ionen-Akkus testen und wiederverwenden,“ 10 05 2021. [Online]. Available: <https://www.heise.de/ratgeber/Upcycling-Lithium-Ionen-Akkus-testen-und-wiederverwenden-6033384.html>. [Zugriff am 30 10 2023].
- [14] E. Kommission, „REGULATION (EU) 2023/1542 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL,“ 12 07 2023. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1542/oj>. [Zugriff am 30 10 2023].
- [15] Umweltbundesamt, „Altbatterien - Im Jahr 2022 hat Deutschland alle von der EU geforderten Mindestziele erreicht,“ 23 10 2023. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altbatterien#im-jahr-2022-hat-deutschland-alle-von-der-eu-geforderten-mindestziele-erreicht>. [Zugriff am 30 10 2023].

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Utilizamos la herramienta de inteligencia artificial ChatGPT para traducción alemán/español. También, para la revisión gramatical y ortográfica de este artículo, esto nos permitió identificar errores y mejorar la fluidez del texto. No obstante, realizamos una revisión final para garantizar que el artículo cumpliera con los estándares de calidad de la revista.

Desarrollo de un sistema embebido de clase bulk aplicado en un equipo de crecimiento de cristales

Development of a bulk class embedded system applied in a crystal growth equipment

Francisco Sánchez-Niño¹, Francisco J. De Anda-Salazar², Oscar F. Núñez-Olvera³

Fecha de recepción: 19 de enero, 2024
Fecha de aprobación: 23 de mayo, 2024

Sánchez-Niño, F; De Anda-Salazar, F.J; Núñez-Olvera, O.F. Desarrollo de un sistema embebido de clase bulk aplicado en un equipo de crecimiento de cristales. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 1. Enero-Marzo, 2025. Pág. 33-43.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i1.7026>

- 1 Instituto de Investigación en Comunicación Óptica IICO – UASLP, México.
 franciscosanchezn@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0004-8102-6671>
- 2 Instituto de Investigación en Comunicación Óptica IICO – UASLP, México.
 francisco.deanda@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0003-1808-5850>
- 3 Instituto de Investigación en Comunicación Óptica IICO – UASLP, México.
 oscar_f_n_o@hotmail.com
 <https://orcid.org/0000-0001-7414-4398>

Palabras clave

Microcontroladores; USB; VID; PID; Clase Bulk.

Resumen

Se presenta el diseño de una interfaz implementada en el ambiente de desarrollo LabVIEW, que se encarga de controlar el funcionamiento del sistema de gases de un equipo de crecimiento de cristales, en este sistema se obtienen componentes opto-electrónicos a través de la técnica de epitaxia en fase líquida (LPE). Desde LabVIEW se envían una serie de comandos hacia un microcontrolador de la serie 18Fxx, el microcontrolador utilizado es el PIC18F4550 de gama media, este dispositivo recibe los datos provenientes desde LabVIEW y en función del comando que recibe, activa o desactiva una serie de válvulas neumáticas que permiten el flujo de gases a través del sistema de crecimiento epitaxial. Además de activar las válvulas neumáticas el microcontrolador adquiere una serie de señales físicas tal como temperatura, humedad y presión, esto permite monitorear desde la interfaz de LabVIEW el estado en que se encuentra el proceso de crecimiento epitaxial.

Keywords

Microcontroller; USB; Vendor ID; Product ID; Bulk.

Abstract

The design of an interface implemented in the LabVIEW development environment is presented, which is responsible for controlling the operation of the gas system of a crystal growth equipment. In this system, opto-electronic components are obtained through the epitaxy technique in liquid phase (LPE). From LabVIEW a series of commands are sent to an 18Fxx series microcontroller, the microcontroller used is the mid-range PIC18F4550, this device receives the data from LabVIEW and depending on the command it receives, it activates or deactivates a series of pneumatic valves that allow the flow of gases through the epitaxial growth system. In addition to activating the pneumatic valves, the microcontroller acquires a series of physical signals such as temperature, humidity and pressure; this allows monitoring the state of the epitaxial growth process from the LabVIEW interface.

Introducción

El bus universal en serie conocido como puerto de comunicación serial (USB), fue desarrollado por grandes compañías tecnológicas como Intel, Microsoft, IBM, COMPAQ, Intel, entre otras, con la finalidad de introducir un estándar para comunicar diversos periféricos a un sistema de cómputo, trayendo consigo las mejores características de la comunicación en paralelo y la comunicación en serie tanto síncronas como asíncronas [1].

En 1991 surge la primera versión llamada USB 1.1 para posteriormente dar origen a las versiones USB 2.0, USB 3.0 y la versión más actual la USB 4.0 [2]. Siendo la versión USB 2.0 utilizada en gran medida para realizar comunicación entre equipos de cómputo y sistemas embebidos como los microcontroladores [3]. Algunas de las principales características que presenta este bus de comunicación son:

- Auto-detección y configuración (plug & play).
- Alimentación propia del puerto de comunicación, 5V y una corriente máxima de 500 mA por bus.

- Fácil expansión utilizando hubs (concentradores).
- Se pueden conectar hasta 127 dispositivos [4].

Cuatro tipos de velocidades en el envío de la información:

- A. Baja velocidad (Low speed): 1.5Mbps, esta velocidad es soportada por las versiones USB 1.1, 2.0 y 3.0. Algunos dispositivos que utilizan esta velocidad de transferencia de datos son los teclados, y mouse.
- B. Velocidad completa (Full speed): 12Mbps, esta velocidad se presenta en las versiones USB 1.1, 2.0 y 3.0. Muy utilizada en la transmisión de audio por el puerto USB.
- C. Alta velocidad (High speed): 480 Mbps, se presenta en las versiones USB 2.0 y 3.0. Generalmente las transmisiones de video utilizan esta velocidad de transferencia de información.
- D. Súper velocidad (Súper speed): 5Gbps, soportada por las versiones 3.0 y 4.0. Utiliza en la transferencia masiva de información a alta velocidad [5].

Hay que mencionar que estas velocidades son teóricas, ya que la velocidad real de transferencia de información va a depender de la cantidad de componentes conectados al anfitrión, recordemos que se pueden conectar hasta 127 dispositivos utilizando concentradores [6]. Otros elementos que resultan de vital importancia para poder realizar la comunicación USB son el número de vendedor (vendedor ID, VID) y el número de producto (product ID, PID). El VID es una licencia de 16 bits necesaria para que un componente pueda salir al mercado soportando la comunicación USB, para la aplicación que aquí será descrita se utiliza el VID de Microchip, que proporciona de forma gratuita para poder establecer la comunicación USB entre un equipo de cómputo y alguno de sus microcontroladores que soportan el protocolo de comunicación. El PID es un número de 16 bits que se usa generalmente para clasificar e identificar a los diferentes componentes de una compañía que soportan la comunicación por el puerto USB [7].

El protocolo de comunicación USB soporta cuatro tipos de transferencia de datos o tramas de comunicación, es muy común que un mismo componente utilice más de una de las transferencias de datos en una misma conexión, estos tipos de transferencias son [8]:

- **Control:** se utiliza para recibir o enviar comandos, en el proceso de enumeración es muy utilizada este tipo de transferencia de datos. La enumeración consiste en el reconocimiento del sistema de cómputo del periférico que se conecta a él a través del puerto USB, el componente es reconocido por medio de su VID, PID, fabricante y tipo de componente.
- **Bulk:** se utiliza cuando se requiere transferir grandes cantidades de información, este tipo de transferencia de datos solo es soportada por las velocidades Full speed y High speed.
- **Isócronas:** es utilizada cuando es necesario garantizar una velocidad constante en la transmisión de la información, ejemplo de esto es en la transferencia de audio y video.
- **Interrupción:** es utilizado cuando no se requiere un ancho de banda muy grande, pero si la atención inmediata a la solicitud de comunicación del periférico. Ejemplos de componentes que utilizan este tipo de transferencia de datos son los teclados, mouse y pantallas táctiles.

Materiales y métodos

El sistema implementado basa su funcionamiento en el uso de un microcontrolador PIC18F4550, por medio de este dispositivo se envía y reciben datos desde la computadora a través del puerto de comunicación USB. El usuario monitorea y controla el funcionamiento de un equipo

de crecimiento de cristales (LPE) desde una interfaz implementada en LabVIEW, de acuerdo a la tarea que se desea realizar se transfiere un comando desde la computadora hacia el microcontrolador PIC18F4550, una vez que éste recibe el comando decide activar o desactivar alguna de las válvulas neumáticas que contiene el sistema crecimiento de cristales, o tomar la lectura de algunas de las señales físicas que se monitorean durante el crecimiento epitaxial [9].

A continuación se describen las diferentes etapas que conforman el sistema implementado.

Sistema de crecimiento de cristales

En la figura 1 se muestra el diagrama esquemático del sistema de crecimiento de cristales por LPE que es controlado por el sistema embebido implementado con el microcontrolador PIC18F4550 y la interfaz humano máquina (HMI) diseñada en LabVIEW.

Este sistema consiste en una serie de tuberías interconectadas por medio de válvulas neumáticas que permiten fluir gas hidrogeno hacia un reactor de tubo de cuarzo, en este reactor es donde se colocan los materiales semiconductores que serán utilizados para realizar el crecimiento epitaxial y obtener dispositivos opto-electrónicos como fotodiodos y foto-detectores.

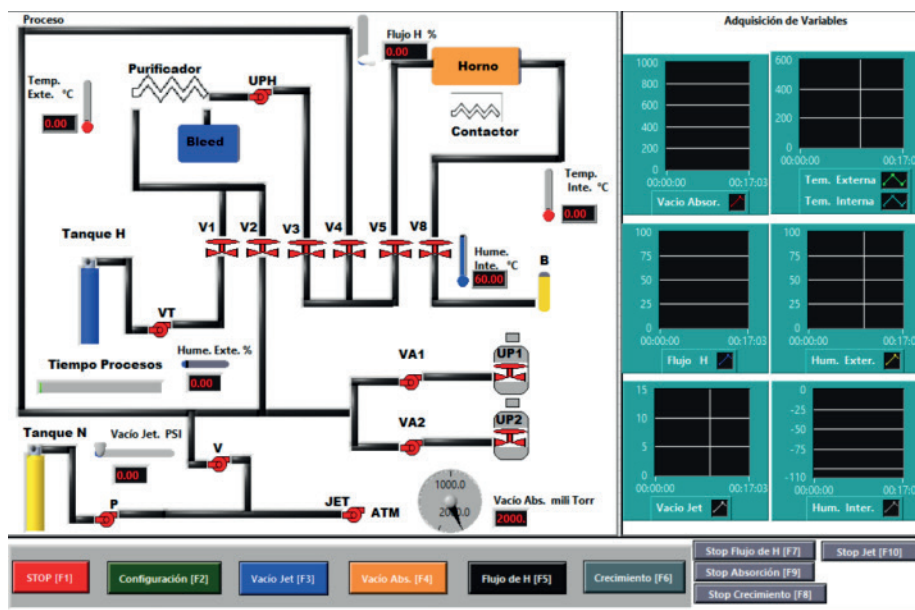


Figura 1. Esquema del sistema de crecimiento de cristales por LEP [6].

El proceso comienza realizando vacío al sistema haciendo fluir gas nitrógeno a alta presión. Para realizar esta tarea se activan las válvulas v5, v4, v3, v y p que se pueden ver en la figura 1, todo el tiempo es monitoreado el vacío del equipo por medio del indicador de vacío jet. Una vez que se alcanza una presión de 0 psi se activan las bombas de adsorción up1, up2 y las válvulas v2, VA1 y VA2 con el fin de obtener una mayor pureza en el interior del sistema de LPE.

Las bombas de adsorción son enfriadas por medio de nitrógeno líquido para aumentar la adherencia de posibles partículas que se encuentren aún en el sistema después de ser realizado el vacío. Es de vital importancia que los crecimientos epitaxiales se realicen en ambientes puros para mejorar las características eléctricas de los componentes opto-electrónicos que se obtienen en el sistema de LPE [7].

Una vez terminado el proceso de vacío se realiza el flujo de hidrogeno en el interior del equipo de LPE con el que se pretende que se arrastren partículas que pudieran todavía estar presentes en el sistema, el gas hidrógeno a presión circula a través de las válvulas vt, v1, uph, v3 y v5 así

como por medio de un equipo purificador, el gas llega hasta la cámara del reactor y cuando la presión en éste alcanza los 103.4 KPa se acciona la válvula v8 para liberar la presión y mantener un flujo constante de hidrógeno. El flujo de gas se mantiene hasta alcanzar una temperatura en el interior del sistema de LPE de por lo menos -20°C .

Cuando se tiene un flujo constante de hidrógeno a lo largo de todo el sistema de crecimiento por LPE, se comienza el proceso de crecimiento de cristales. Se enciende el horno hasta alcanzar la temperatura de disolución de los materiales semiconductores que conformarán las partes líquidas, generalmente se alcanzan temperaturas en el orden los 600°C , posteriormente se comienza a descender gradualmente la temperatura para ir sobresaturando la solución hasta llegar al gradiente de crecimiento, en este momento se hace contacto entre las partes líquidas sobresaturadas y la parte sólida, se inicia la deposición de estructuras cristalinas apiladas sobre el material sólido obteniendo el crecimiento de cristales por epitaxia en fase líquida.

Hay que mencionar que las temperaturas de disolución, crecimiento y los tiempos de flujo dependen del tipo de semiconductor que se desea obtener, así como las características eléctricas que se desea obtener, generalmente suelen utilizarse materiales como galio, indio, boro, arsenuro, arsenuro de galio entre otros.

Interfaz humano – máquina (HMI)

Como siguiente elemento se tiene la interfaz humana – máquina (HMI) implementada en el programa LabVIEW, ésta permite monitorear en todo momento el comportamiento de la temperatura, presión y humedad durante los diferentes procesos que se realizan durante el crecimiento de cristales por epitaxia en fase líquida, tal como se describió en la sección anterior [10]. El usuario hace uso de esta pantalla para activar o desactivar las diferentes válvulas neumáticas según el proceso que se necesite realizar. En la figura 2 se muestra la pantalla de control de la interfaz HMI implementada en LabVIEW.

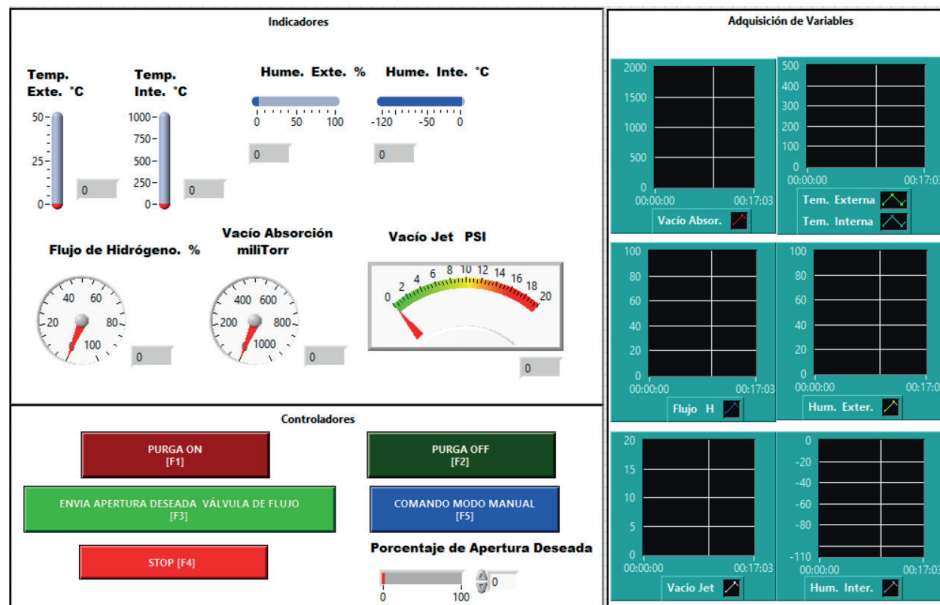


Figura 2. Pantalla de control HMI diseñada en LabVIEW utilizada por los usuarios para controlar y monitorear crecimientos epitaxiales en el sistema de LPE [6].

Este programa tiene la característica de poder almacenar los datos que se están adquiriendo en tiempo real en un archivo de bloc de notas, el usuario puede hacer uso posteriormente de este archivo para realizar un análisis detallado de los datos guardados durante el experimento, transfiriendo los datos a una hoja de cálculo, programa de estadística o de métodos numéricos [11].

El programa envía una serie de comandos en formato hexadecimal hacia el sistema embebido implementado con el microcontrolador PIC18F4550 a través del puerto USB, que está configurado a máxima velocidad de transmisión de datos y trabajando en la clase llamada USB desencadenado o clase bulk. De acuerdo con el comando que se recibe el microcontrolador envía el valor leído por los canales analógicos hacia la interfaz de control y monitoreo de LabVIEW [12], en la figura 3 se muestra un esquema de funcionamiento bidireccional entre la HMI de LabVIEW y el PIC18F4550.

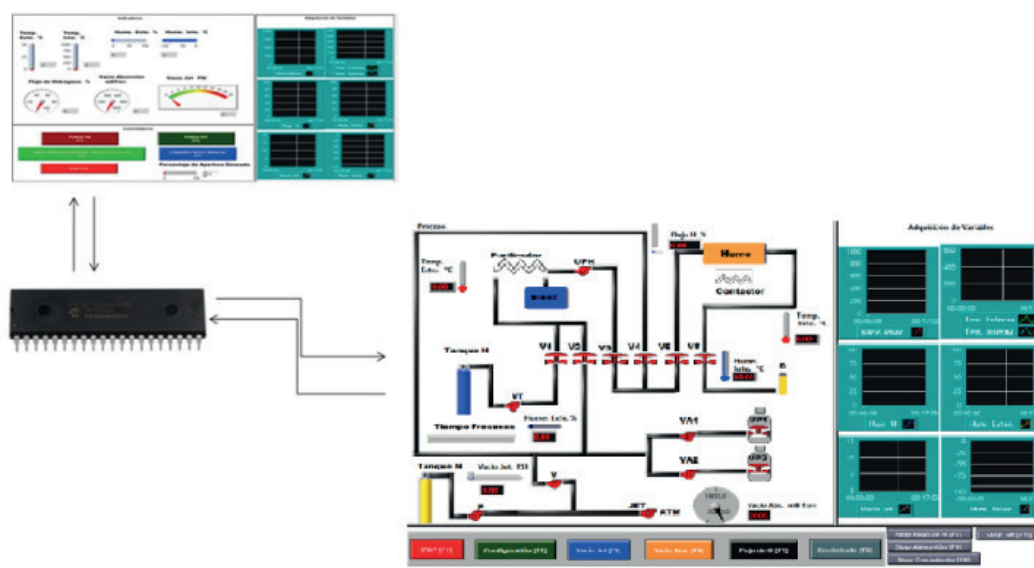


Figura 3. El microcontrolador PIC18F4550 recibe comandos provenientes de la interfaz de LabVIEW que le indican en qué momento debe de activar o desactivar las válvulas del sistema de crecimiento de cristales, así como la lectura de los sensores que monitorean el estado de las variables físicas durante el desarrollo del experimento.

Sistema embebido

Todo el sistema funciona alrededor de un sistema embebido implementado con un microcontrolador PIC18F4550 de 40 terminales de Microchip [13]. El dispositivo está programado para establecer la comunicación con la computadora a través del puerto de comunicación USB a alta velocidad, se utiliza la clase Bulk para el envío y recepción de datos. Algunas de las principales características de este componente son las siguientes:

- Cinco puertos de comunicación digitales bidireccionales denominados como PUERTO A, PUERTO B, PUERTO C, PUERTO D y PUERTO E.
- Un convertidor análogo-digital que se puede configurar con resoluciones de 8, 10 y 12 bits, trece canales multiplexados así como el uso de terminales externas para ser utilizadas como fuentes de referencia.
- Un módulo de comunicación UART que soporta el protocolo de comunicación RS232.

- Módulos CCPx que se pueden configurar para generar señales de modulación en ancho de pulso (PWM), captura de pulsos o comparación de señales.
- Un módulo de comunicación USB que soporta la transferencia de datos a baja, media y alta velocidad así como las clases HID, CDC, almacenamiento masivo y Bulk.
- Puerto de comunicación SPI y paralelo así como múltiples fuentes de interrupción externas e internas.

El microcontrolador recibe un comando en formato hexadecimal enviado desde la interfaz de LabVIEW, cada comando recibido tiene una tarea particular en el funcionamiento del sistema de crecimiento epitaxial. En el cuadro 1 se muestran algunos de los comandos que recibe el PIC18F4550 y la tarea que realiza [14].

Cuadro 1. Se muestran algunos de los comandos en formato hexadecimal que recibe el microcontrolador PIC18F4550 y la función asignada a cada uno de estos comandos [6].

Lista de comandos		
Comando	Función	PIN PIC18F4550
0x00	Temperatura externa	A0
0x01	Humedad externa	A1
0x02	Humedad interna	A2
0x03	Flujo de Hidrógeno	A3
0x04	Vacío bomba Jet	A5
0x05	Vacío bombas adsorción	E0
0x06	Válvula 1	D7
0x07	Válvula 2	D6
0x08	Válvula 3	D5
0x09	Válvula 4	D4
0x10	Válvula 5	D3
0x11	Válvula 8	D2
0x12	Purga	C1
0x13	Horno	A4

El microcontrolador cuenta con un sistema de reloj que corre a los 20MHz, internamente utiliza el módulo USB para elevar la frecuencia de trabajo a los 48MHz que es la velocidad para poder establecer la comunicación USB entre el PIC18F4550 y la computadora por medio del programa desarrollado en LabVIEW [15], en la figura 4 se muestra el sistema mínimo del hardware requerido para el correcto funcionamiento del sistema embebido. El sistema mínimo está conformado por el circuito de reloj de 20MHz, el circuito de reset así como la alimentación del PIC18F4550.

El endpoint 1 se utilizó para transmitir todos los datos provenientes de los sensores colocados en el sistema de crecimiento de cristales, así como para recibir los comandos ejecutados por la HMI de LabVIEW para activar o cerrar las válvulas neumáticas que permiten el flujo de gases en el sistema de LPE. Como se ha mencionado anteriormente resulta de vital importancia para el desarrollo del experimento y su posterior análisis, el monitorear y almacenar la temperatura interna del reactor, temperatura externa, humedad interna, humedad externa, presión, de flujo de gas hidrógeno, presión de vacío con las bombas de adsorción y tipo jet. En la figura 5 se puede observar algunas de las gráficas que se obtienen durante la realización del experimento y una imagen obtenida del recocido de un material crecido por epitaxia en fase liquido.

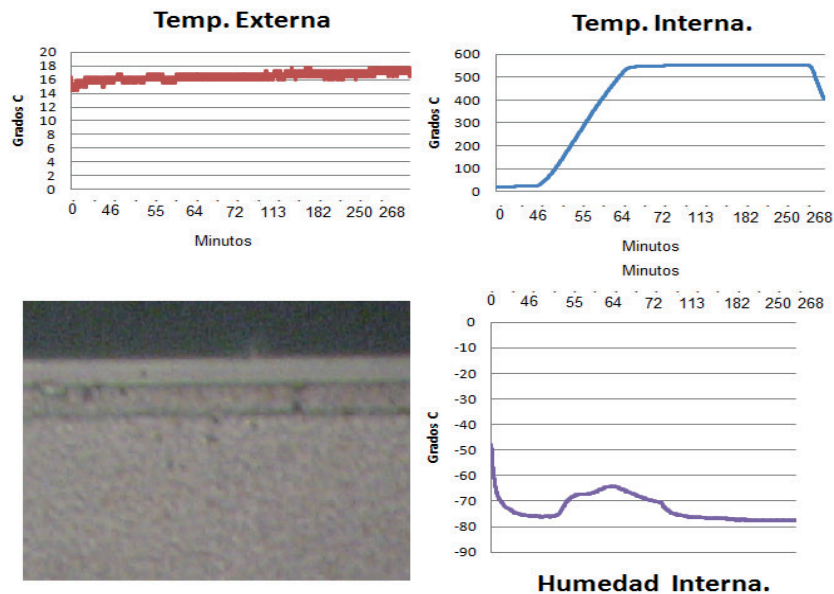


Figura 5. Durante el proceso de crecimiento epitaxial es necesario que se muestre el comportamiento de las variables físicas de relevancia para el experimento, tal como la temperatura externa del reactor, la temperatura interna y la humedad interna [5].

Conclusiones y recomendaciones

Las capas crecidas por epitaxia en fase líquida no son uniformes, para unificarlas es necesario someter el dispositivo a un proceso de recocido, en el cual la temperatura se eleva generalmente a los 800 °C, temperatura que garantiza que las capas cristalinas obtenidas por LPE se unifiquen, esto se puede ver en la figura 5, una pieza que fue sometida al proceso de recocido. El sistema embebido basado en el microcontrolador PIC18F4550 trabajando en modo bulk permite realizar el crecimiento de dispositivos semiconductores por LPE, monitorear las variables físicas presentes durante el experimento enlazándose con la pantalla HMI que corre sobre LabVIEW, almacenar la información para su posterior análisis y realizar procesos de recocido para unificar las diferentes capas de cristales que conforman al componente semiconductor.

Como objetivo se planteó diseñar un sistema de automatización que controlara el accionamiento de las válvulas que generan el flujo de gases que se utilizan durante los crecimientos de cristales por medio de la técnica de epitaxia en fase líquida. Como elemento central de control se utiliza un microcontrolador PIC18F4550, aprovechando el módulo USB embebido que contiene. Este módulo USB se configuró en la clase llamada Bulk o USB desencadenado, que permite hacer uso de la máxima velocidad de transmisión y recepción de datos, las operaciones

ejecutadas por el microcontrolador se realizan a una velocidad de 48MHz, en el orden de los microsegundos. Esta característica resulta de vital importancia en el monitoreo de las señales físicas que intervienen durante el proceso de crecimiento de cristales por LPE así como el accionamiento de los diversos actuadores que están presentes en el sistema de crecimiento de cristales por la técnica de epitaxia en fase líquida [19]. El PIC18F4550 se comunica por medio del puerto USB hacia una interfaz humano-máquina que permite interactuar al usuario con el sistema de crecimiento epitaxial, esta interfaz se diseñó en el ambiente de desarrollo de programación grafica LabVIEW,

Todas las pruebas de funcionamiento que se presentaron en los párrafos anteriores así como muchas otras que se realizaron en el laboratorio de crecimiento de cristales, mostraron que el desarrollo del sistema embebido de clase bulk aplicado en el control y monitoreo del sistema de crecimiento epitaxial, funciona de forma correcta tal como se esperaba permitiendo aumentar la eficiencia de los experimentos realizados en el sistema de LPE así como la obtención de componentes opto-electrónicos con mejores características eléctricas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo del Conahcyt y la UASLP.

Referencias

- [1] Giró Uribazo, F. V., Selva Castañeda, A.R. y Almaguer Lora, Y. (2015). Diseño e implementación de multímetro digital con comunicación USB a PC con microcontrolador PIC18F4550. Conference: XVI Convención internacional de ingeniería eléctrica, 663-667.
- [2] Barry Brey. (2007). Applying Pic18 Microcontrollers: Architecture, Programming and Interfacing Using C and Assembly. 1a.ed. Pearson College Div.
- [3] Estrada Barraza, B. E., Garduño Plata, J.F., Rodríguez Reséndiz, J. y Ramos Arreguin, J.M. (2017). Diseño de Tarjeta Electrónica para Monitoreo de Temperatura y Humedad en Apicultura. La Mecatrónica en México, 6 (3), 66-67.
- [4] Fairs, D.M. y Ahmed, A. (2013). USB Data Acquisition Using Peripheral Interface Control Microcontroller. Tikrit J. Eng. Sci., 20 (3), 10-21.
- [5] Pérez Moret, Y. (2012). Implementación de comunicación USB con Microcontrolador PIC18F4550 y LabVIEW. PCB por La Derecha Pag, pp.1-18.
- [6] Sánchez Niño, F. (2009). Automatización del Sistema de Crecimiento de Cristales por Epitaxia en Fase Líquida. Tesis de maestría. Posgrado en Ciencias Aplicadas, Facultad de Ciencias-Universidad Autónoma de San Luís Potosí.
- [7] Sánchez Niño, F. y De Anda Salazar, F.J. (2012). Automation of a crystal growth system by the liquid phase epitaxy technique. 2012 9th International Conference on Electrical Engineering, Computing, Science and Automatic Control CCE, 1-5. doi: 10.1109/ICEEE.2012.6421203
- [8] Sánchez Niño, F. (2016). Automatización de Experimentos Relacionados con la Epitaxia en Fase Líquida. Instituto de Investigación en Comunicación Óptica-Universidad Autónoma de San Luís Potosí. <https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/handle/i/6009>.
- [9] Sánchez Niño, F., Compeán Jasso, V.H., De Anda Salazar, F.J., Soubervielle Montalvo, C. y Muñoz, J.C. (2017). Vision-aided system for obtaining a required weight by efficient choice of irregular fragments. Journal of Applied Research and Technology, 15 (2), 140-142.
- [10] Chuquimarca, L., Torres, W., Sánchez, J., & Amaya, L. (2024). Implementation of a remote laboratory focused on the development of industrial automation practices. Journal of Applied Research and Technology, 22 (4), 479-487. doi: 10.22201/icat.24486736e.2024.22.4.2389
- [11] Núñez-Alvarez, J. R., Benítez-Pina, I., Acosta-Montoya, G., Pino-Escalona, A., & Villafuela-Loperena, L. (2023). Design of an Integrated Automation & Control System Using Petri Nets: Case Study. Journal of Applied Research and Technology, 21 (2), 169-180. doi: 10.22201/icat.24486736e.2023.21.2.1562.

- [12] Gallego Len, A. J. , Sánchez del Pozo, A. J. , & F. Camacho, E. (2022). Aplicaciones de control predictivo en plantas solares CCP. *Revista Iberoamericana De Automática E Informática Industrial*, 19(3), 309–317. doi: 10.4995/riai.2022.16664
- [13] Guerrero-Castellanos, J. F., & González-Romeo, L. L. (2021). Sistema de control de posición mediante rechazo activo de perturbaciones para sistemas ópticos láser. *Revista Iberoamericana De Automática E Informática Industrial*, 19(1), 61–73. doi: 10.4995/riai.2021.14852
- [14] Chávez-Gudiño, M. A., Concha-Sánchez, A., Maciel-Barboza, F. M., Gadi, S. K., Thenozhi, S., & Jiménez Betancourt, R. (2023). Desarrollo y control de un helicóptero de laboratorio de 2 GDL y de bajo costo. *Revista Iberoamericana De Automática E Informática Industrial*, 20(4), 366–378. doi: 10.4995/riai.2023.18942
- [15] Aldana Franco, F., Aldana Franco, R., Álvarez Sánchez, E. J., Montes González, F., & Leyva Retureta, J. G. (2024). Simulación de comunicación emergente en robótica: apoyo a las cadenas de suministro empleando computación evolutiva. *Acta Universitaria*, 34, 1–15. doi: 10.15174/au.2024.3939
- [16] C. O. Quero, D. Durini, J. de Jesús Rangel-Magdaleno, J. Martínez-Carranza and R.Ramos-Garcia. (2024). Emerging Vision Technology: SPI Camera an Overview. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 27(2), pp. 38-47. doi: 10.1109/MIM.2024.10472984.
- [17] D. J. Jaworski, A. Park and E. J. Park. (2021). Internet of Things for Sleep Monitoring. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 24 (2), 30-36. doi: 10.1109/MIM.2021.9400950.
- [18] Paredes, J., González, E., Castillo-Santamaria, J. G., Muñoz, L., & Villarreal, V. (2023). Sistema para la automatización del registro de asistencia en las aulas de clases. *Revista Tecnología En Marcha*, 36(8), Pág. 83–93. doi: 10.18845/tm.v36i8.6930.
- [19] Tortós-Vinocour, P. E., Valverde-Gutiérrez, S., & Vilchez-Moge, M. E. (2020). Diseño de un prototipo de órtesis para mano con actuadores neumáticos. *Revista Tecnología En Marcha*, 33(5), Pág. 101–105. doi: 10.18845/tm.v33i5.5085

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Simulación numérica con MATLAB y modelos Probit para calcular las consecuencias por daño pulmonar de explosiones en calderas



Numerical simulation with MATLAB and Probit models to calculate the consequences due to lung damage from boiler explosions

Ricardo A. Morales-Vargas¹

Fecha de recepción: 15 de enero, 2024
Fecha de aprobación: 27 de abril, 2024

Morales-Vargas, R Simulación numérica con MATLAB y modelos Probit para calcular las consecuencias por daño pulmonar de explosiones en calderas. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 1. Enero-Marzo, 2025. Pág. 44-58.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i1.7022>

1 Departamento de Salud Ambiental- Escuela de Tecnologías en Salud. Facultad de Medicina. Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
 ricardo.morales@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-8417-992X>

Palabras clave

Calderas; explosión; evaluación de riesgos; análisis de riesgo; riesgos; regulación; efectos domino; herramientas computacionales; simulación.

Resumen

Las explosiones de calderas generan graves daños en instalaciones de trabajo así como lesiones a los operadores, que pueden ir desde quemaduras y laceraciones hasta la muerte, con altos costes económicos para las empresas usuarias. En entornos industriales como institucionales, la principal causa de las explosiones de las calderas es el bajo nivel de agua, generándose sobrecalentamiento de los tubos de las calderas, vaporización repentina, aumento de la presión y fallas catastróficas. A pesar de estos riesgos, existen escasas herramientas computacionales para calcular sus consecuencias. Prevenir este tipo de accidentes es fundamental en la industria, comercio y servicios ya que éstos deben ser intrínsecamente seguros para cumplir su misión económica y humanitaria, respectivamente. Este artículo revisa los requisitos técnicos para el funcionamiento seguro de las calderas centrándose en la ubicación correcta y el distanciamiento de la sala de calderas para minimizar el efecto dominó y lesiones humanas. Se desarrolló un script y código compilado en el entorno MATLAB® para calcular la sobrepresión máxima resultante en función de la distancia, con parámetros ingresados por el usuario para una variedad de calderas y condiciones de explosión. El daño de la onda de choque se estimó mediante cálculos Probit considerando el daño pulmonar, para facilitar el análisis y recomendar la ubicación ideal o mejorada de la sala o compartimento de calderas. Se concluye que la normativa deba incluir un análisis obligatorio de consecuencias, utilizando modelos numéricos para guiar la distribución de las plantas y proteger a los trabajadores y vecinos ante las explosiones.

Keywords

Boilers, explosions; risk assessment; risk analysis; risks; regulation; domino effects; computing tools; simulation.

Abstract

Boiler explosions around the world cause serious damage to work facilities as well as injuries to operators, which can range from burns and lacerations to death, with high economic costs for user companies. In industrial and institutional environments, the main cause of boiler explosions is low water level, which causes boiler tube overheating, sudden vaporization, pressure rise, and catastrophic failure. Despite these risks, there are few computational tools to calculate their consequences. Preventing this type of accident is essential in industry and commerce, as well as the service sectors since these must be intrinsically safe to fulfill their economic and humanitarian mission, respectively. This article reviews the technical requirements for safe operation of boilers focusing on correct location and distancing from the boiler room to minimize the domino effect and human injuries. The author developed a script and compiled code in the MATLAB® environment to calculate the resulting maximum overpressure as a function of distance, with user-entered parameters for a variety of boilers and explosion conditions. Shock wave damage was estimated using Probit calculations considering lung damage, to facilitate analysis and recommend the ideal or improved location of the boiler room or compartment. It is concluded that regulations must include a mandatory analysis of consequences, using similar or more elaborate numerical models, to guide the distribution of plants and protect workers and neighbors from explosion overpressure effects.

Introducción

Las calderas, independientemente del tipo de combustible utilizado, normalmente funcionan a altas presiones y temperaturas, lo que presenta riesgos importantes para los operadores, el resto del personal de la planta y los equipos vulnerables al efecto dominó. Es necesario contar con un estricto marco de seguridad durante todo su ciclo de vida, comenzando por la ubicación del proyecto y distanciamiento de las operaciones críticas de la sala de calderas, construcción del cuarto de calderas, la instalación y puesta en servicio, así como capacitación, procedimientos de operación, mantenimiento, inspección, almacenamiento y desmantelamiento de los equipos. De ahí que resulte de primordial importancia planificar la adecuada ubicación de las calderas y analizar los principales riesgos que pueden generar (explosión de la caldera y propagación de ondas expansivas) mediante técnicas apropiadas de simulación numérica, tal y como han propuesto varios autores [1- 3].

Como lo analizó el autor en un trabajo anterior [4], esto desafortunadamente no ha encontrado resonancia en la comunidad reguladora, y la ubicación de la caldera rara vez se guía por un estricto análisis de riesgo respaldado por cálculos de ingeniería. Ese trabajo analizó las regulaciones de varios países de habla hispana, entre ellos Perú, México, España, Chile, Colombia y Costa Rica, así como las de Estados Unidos y Nueva Zelanda. En los países latinoamericanos los riesgos por explosión o sobrepresión no están específicamente considerados en los requisitos de instalación, para orientar el espaciamiento o la resistencia estructural de las edificaciones que los contienen. La mayoría de estos instrumentos legales se limitan a referencias genéricas sobre la ventilación, la resistencia al fuego de los muros, indicaciones generales para el uso del código sísmico de cada nación y aspectos básicos de higiene y salud ocupacional. Si bien las normas favorecen el funcionamiento seguro, no se centran en los mayores riesgos que presentan dichos equipos, como los daños por sobrepresión o el impulso energético de los materiales proyectados.

Una publicación de la industria del petróleo y gas [5] dirigida al sector de procesos químicos establece una serie de nomogramas y tablas para la separación de diferentes secciones de dichas operaciones e indica que los “utilities” deben estar a 15 metros de los centros de control eléctrico, salas de máquinas, sistemas de protección contra incendios y otros edificios de servicios; a 30 metros de equipos peligrosos (compresores, salas de control, estaciones de bombeo y otras unidades de proceso) y a 100 metros de tanques presurizados o refrigerados. Específicamente para tanques a presión atmosférica, como lo ejemplifican los tanques de almacenamiento de combustible para calderas, recomienda 75 metros entre éstos y las áreas de servicios generales donde se ubican las calderas y sus equipos auxiliares. Sin embargo, se hace hincapié en la protección de los activos de las empresas, con el objetivo de evitar la cadena de acontecimientos (efecto dominó), pero el documento no proporciona detalles sobre cómo se arribó a estas distancias.

Sólo el reglamento español del año 2021 sobre calderas y recipientes a presión [6] indica pautas para la clasificación y ubicación de las calderas en función de parámetros energéticos, pero las distancias requeridas a paredes, linderos y otros equipos son bajas en comparación con los posibles riesgos [4].

Los datos tabulados por varias agencias [7] indican que las fallas en las calderas tienen una frecuencia de 0,9 a 4,0 fallas/año, lo que limita la seguridad y confiabilidad. Las fallas en los controladores de nivel ocurren a una tasa de entre 0,03 y 2,0 fallas/año y las fallas en las válvulas de alivio se estiman en 0,03-0,08 fallas/año. Estos aspectos, que contribuyen a la falla catastrófica de las calderas, adquieren una importancia crítica cuando se trata de equipos para generación de energía térmica/eléctrica, cuyas presiones son aún mayores [1] o en entornos institucionales donde la continuidad y confiabilidad de la operación es crítica.

Existen numerosos ejemplos de explosiones de calderas, debidas principalmente a bajos niveles de agua. La investigación y el análisis de estos accidentes ha sido una práctica común en la ingeniería desde el comienzo de la revolución industrial [8], una práctica que sigue siendo de importancia en la actualidad. Los datos estadísticos publicados por la Junta Nacional de Inspectores de Calderas y Recipientes a Presión para el año 2002 [9], indican que el 85% de los accidentes son atribuibles a dos causas; bajo nivel de agua (49%); y error en la operación o mal mantenimiento (36%). Los accidentes asociados con deficiencias de diseño y fabricación, fallas de control y quemadores, instalación inadecuada, fallas de válvulas de seguridad y reparaciones inadecuadas tienen tasas de falla más bajas; pero aun así es necesario abordarlos. Entre 1992 y 2001, hubo un promedio de 2.334 accidentes/año, que resultaron en 127 muertes. El número medio de heridos es de 1 cada 32 accidentes [10]. En 2002, hubo 1.487 accidentes en calderas de generación de energía, vapor y agua caliente, causando 16 heridos y 3 muertes sólo en los EE.UU [9].

La otra causa común de explosiones se origina en el lado del fuego, debido a la acumulación de combustible en los tubos, y la liberación repentina de la energía de la combustión, pero generalmente causando solo daños internos a la caldera, el hogar, tubos, ladrillos refractarios; pero sin exceder los límites mecánicos y materiales de los equipos que contienen presión del lado del agua, por lo que no son analizados en este estudio.

Publicaciones de la Sociedad Americana de Ingenieros de Energía [11] y del Estado de Tennessee [12] citan la explosión de 2007 en una caldera modelo 2000 CB que operaba a 150 psi, que causó lesiones graves a un operador, destruyendo una pared de la sala de calderas, provocando que el equipo se desplazara unos 30 metros hacia otra zona de la planta, que quedó destruida. La puerta trasera de la caldera también salió despedida a casi 30 metros de la planta dañando varios coches en un aparcamiento cercano. El análisis del accidente indicó que durante la operación con poca agua, se introdujo agua de alimentación fría que repentinamente se vaporizó causando una sobrepresión destructiva [11, 12]. En América Latina, durante el primer semestre de 2020 se reportaron 9 accidentes, con un muerto y 12 heridos [13]. Más recientemente, un accidente de caldera en una planta pesquera en Manta (Ecuador) dejó 3 muertos y 7 heridos [14]. Un estudio de Guimaraes et al [15] deja ver que en Brasil, entre el año 2002 y el 2020 se investigó por el Estado un total de 70 accidentes, con un total de 72 víctimas fatales, siendo el sector de fabricación de alimentos y bebidas el más afectado.

Los modelos de consecuencias habituales para este tipo de accidentes, en cuanto a consecuencias humanas y de equipos, corresponden a los modelos BLEVE; una expansión isentrópica, cercana a la presión atmosférica; que se han utilizado a lo largo de los años [2,3,4,16-20]. En estos, la energía del sistema se expresa como equivalente de TNT. Luego, la sobrepresión se puede calcular utilizando correlaciones de distancia normalizada [19, 21-23] junto con modelos Probit para estimar la probabilidad de sufrir consecuencias debido a diferentes efectos, como, hemorragia pulmonar, rotura de tímpanos, daños oculares y daños por impactos de fragmentos [7, 16, 17, 24-27], siendo el daño pulmonar el predominante [28]. Dicho daño se caracteriza por ruptura de los alveolos, sangrado intra-parenquimal, seguido de edema y compromiso respiratorio que puede llevar a la muerte [29], por la dificultad del tratamiento de la inflamación, hemorragia, tratamiento coagulante y trombosis.[30].

Más recientemente estos estudios se han combinado con modelos computacionales para dinámica de fluidos y modelos numéricos para análisis estructural [2, 26-27, 32], que han permitido modelar el efecto rebote o “dominó” [16, 33, 34], ayudando a optimizar la disposición de la planta [4, 35]. Las explosiones de calderas en hospitales e industrias se han estudiado con software numéricamente complejo como LS-DYNA, un programa basado en análisis estructural de elementos finitos [2]. Otros softwares, como PHAST y CHEMCAD, se pueden utilizar para simular muchos problemas de ingeniería que requieren datos termodinámicos y se

han utilizado para analizar explosiones de calderas y sus consecuencias [3]. MATLAB se ha utilizado en entornos de enseñanza y en muchos entornos industriales para simular problemas de ingeniería, pero pocas referencias apuntan a MATLAB para calcular las consecuencias de una explosión de calderas [35].

Este artículo describe la implementación de una estrategia guiada por el usuario en MATLAB para analizar las consecuencias de las explosiones para una variedad de tamaños de calderas y guiar la ubicación segura durante la planificación del sitio. Se centra en las consecuencias para las poblaciones humanas y los trabajadores, utilizando la probabilidad de hemorragia pulmonar como criterio de valoración, indicador que se encuentra comúnmente en la literatura [19, 24, 25]. Este análisis y la herramienta computacional propuesta esperan llenar un vacío en las regulaciones de calderas de los países latinoamericanos y de habla inglesa, que tienen muy pocas recomendaciones para su ubicación basadas en consideraciones de energía y explosividad.

Metodología

Los cálculos que se describen a continuación fueron implementados en MATLAB R2023a, bajo licencia a la Universidad de Costa Rica. El programa calcula la energía de explosión de una caldera, para facilitar al usuario un correcto diseño de la planta. El software le solicita información al usuario en inglés o español. El software recibe los datos estimados de presión de estallido, presión atmosférica y solicita al usuario el rango de tamaños de caldera a estudiar en m³ de agua líquida.

Aunque el software solicita dicho dato al usuario, el espacio libre de vapor, puede estimarse en un 10% del volumen del líquido, algo común en la mayoría de las calderas pirotubulares, de las más utilizadas en Latinoamérica y en Costa Rica. Lo anterior considerando la información de los modelos CB de empresa Cleaver-Brooks, fabricante y líder en diseño a nivel internacional, emulado por otras empresas. La sobrepresión para la gama de calderas estudiadas se representa en función de la distancia y su equivalente de TNT en kilogramos, TNT (eq). La Tabla 1 muestra tamaños de caldera típicos en el mercado, que pueden utilizarse por el usuario para guiar la ubicación de éstas, aplicando el software MATLAB propuesto. La clase de caldera corresponde a la clasificación de los equipos según el Decreto 26789-S-MTSS, Reglamento de Calderas de Costa Rica.

Cuadro 1. Tipo de caldera y volúmenes de líquido/vapor

Caso (Clase de Caldera)	Potencia de Caldera (HP)	Generación de vapor (kg/hr)	Volumen líquido normal (m ³)	Volumen vapor (m ³)
1 (D)*	4	62	0,06	0,006
2 (C)	50	780	1,42	0,178
3 (C)	125	1950	2,61	0,261
4 (B)	200	3120	3,85	0,385
5 (B)	300	4680	5,80	0,580
6 (B)	400	6240	6,97	0,697
7 (A)	600	9360	10,46	1,046
8 (A)	800	12480	12,41	1,241

* **Nota:** Este caso corresponde a promedios de otros fabricantes, ya que el fabricante líder no trabaja en el rango bajo de la escala.

Luego, el programa solicita al usuario que especifique el número de índice del tamaño de caldera deseado en el que desea centrar su análisis y muestra un gráfico similar y menos poblado de sobrepresión versus distancia y un gráfico de sobrepresión versus el valor Probit para el riesgo. Luego se muestra una tabla Probit para estimar el % de daño a la población expuesta, en este caso, el % de mortalidad por hemorragia de pulmón.

La explosión de la caldera se modeló como una expansión isentrópica de vapor que causa ruptura dúctil [4, 19-24]. La energía liberada durante una expansión isentrópica de un gas ideal se expresa según la ecuación 1 de la termodinámica:

$$E_v = 10^2 \left[\frac{P * V}{\gamma - 1} \right] [1 - (P_a/P)^{(\gamma-1)/\gamma}] \quad (1)$$

donde,

E_v = Energía liberada por la expansion del vapor (kJ)

P = Presión dentro el recipiente al momento de la explosion (bar)

V = Volumen inicial de vapor (m³)

P_a = Presión atmosférica(bar)

γ = C_p/C_v del vapor, y

C_p = calor específico a presión constante

C_v = calor específico a volume constante

Posteriormente se calculó la masa equivalente de TNT para esta energía, lo que permite utilizar las ecuaciones y nomogramas de distancia normalizada (dn) y sobrepresión desarrollados por varios autores [19, 36-38]. Para el presente estudio, y para eliminar sesgos y dificultades en la lectura de nomogramas, se utilizó la ecuación empírica propuesta por Kinney & Graham citada por Birk [36].

La masa, $W(TNT)$, de TNT equivalente (kg), según Casal et al [19, 24] se calculó con la ecuación 2:

$$W(TNT) = 0,021 \left[\frac{P * V}{\gamma - 1} \right] [1 - (P_a/P)^{(\gamma-1)/\gamma}] \quad (2)$$

Como describen Casal et al, si el recipiente también contiene líquido sobrecalentado, como en el caso de una explosión isentrópica, la masa de líquido se vaporizará repentinamente al contactar la atmósfera y el volumen que ocuparía este líquido vaporizado debe calcularse a la presión de vapor en el recipiente justo antes de la explosión, sumando este volumen virtual al volumen de vapor real [19]. Así, la masa equivalente de TNT será:

$$W(TNT) = 0,021 \left[\frac{P * V'}{\gamma - 1} \right] [1 - (P_a/P)^{(\gamma-1)/\gamma}] \quad (3)$$

$$V' = V + V_l f \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right) \quad (4)$$

donde V es el volumen de vapor en la caldera, $\left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)$ es la relación entre la densidad del líquido y el vapor, V_l es el volume del líquido y f , es la fracción vaporizada (flasheo),

$$f = 1 - e \left[-2,63 \frac{Cp}{Hv} (Tc - Tb) \right] \left[1 - \left(\frac{Tc - To}{Tc - Tb} \right)^{0,38} \right] \quad (5)$$

y,

Hv = Entalpía de vaporización (kJ/kg)

Tc = Temperatura crítica (K)

Tb = Temperatura de ebullición a la presión atmosférica (K)

To = Temperatura en el recipiente al momento de la explosion (K)

$e = 2.71828$

La distancia normalizada dn viene dada por la siguiente ecuación, donde d es la distancia desde el centro de la explosión a la que se estima la sobrepresión, y B es la fracción de la energía que se transforma en una onda de presión, que para los efectos de este estudio, se estimó en un 40% para una fractura dúctil [19]. En el caso de fractura frágil, este valor es aproximadamente un 80%, como proponen Casal et al [19]. Sochet [39] por su parte establece que se da un rendimiento de la explosion que puede rondar entre 0,4 y 0,9. El software, no obstante, permite al usuario indicar este valor. Este aspecto debe analizarse claramente, ya que las calderas pueden estar sujetas a altas variaciones de pH que pueden provocar fracturas frágiles [40] (ej. fragilización cáustica).

$$d_n = \frac{d}{\sqrt[3]{B * W(TNT)}} \quad (6)$$

La sobrepresión se calculó para cada distancia d (distancia real) utilizando la ecuación empírica propuesta por otros autores [20, 22, 41], aplicable para explosiones BLEVE en el rango medio y para tanques a presión, respectivamente, en base a su equivalente en TNT:

$$\frac{P}{Pa} = \frac{808 \left[1 + \left(\frac{dn}{4.5} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{dn}{0.048} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{dn}{0.32} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{dn}{1.35} \right)^2}} \quad (7)$$

donde:

P = Sobrepresión generada por la explosión (bar)

Pa = presión atmosférica (bar)

dn = distancia normalizada (m/kg^{1/3})

Las propiedades físicas del vapor se calcularon en MATLAB utilizando las ecuaciones para correlaciones de temperatura y presión reducidas presentadas por Affandi et al [42].

Los daños esperados por sobrepresión se implementaron numéricamente en MATLAB, utilizando las ecuaciones Probit propuestas por Hirsch, como lo discutió Casal para la hemorragia de pulmón [19, 24]. En el caso de daños materiales y equipos a las instalaciones se puede tomar como base el trabajo de diversos autores y resumido por Cozzani et al [43-45]. Se deben utilizar las ecuaciones Probit [17, 19, 24, 35, 44] con la tabla de equivalencia propuesta por Finney [45]. Las ecuaciones son de la forma:

$$Pr = a + b * \ln Op$$

donde:

Pr = valor *Probit* (valor probabilístico del daño a la población expuesta)

a = constante que depende del tipo de lesión y tipo de carga de exposición

b = constante que depende del tipo de exposición

Op = variable que representa la carga de exposición (en este caso la sobrepresión e la explosion)

Según Finney, la variable dependiente Pr se define como una variable aleatoria según una distribución estadística normal con un valor medio de 5 y una desviación estándar de 1, lo que significa que $Pr = 5$ corresponde a un valor *Probit* del 50%. En este estudio se utilizó la ecuación *Probit* de Hirsch con parámetros para hemorragia pulmonar donde $a = -77,1$, $b = 6,91$ y Op es la sobrepresión generada (N/m^2).

Resultados

A modo de ejemplo, se utilizaron los parámetros de entrada al software MATLAB que se muestran en el cuadro 2 para generar las gráficas que se muestran en la figura 1.

Cuadro 2. Parámetros de entrada al software MATLAB.

Parámetro	Valor	Observaciones
Presión de ruptura	10 bar	Corresponde a 150 psi, presión máxima de operación usual en calderas (Costa Rica)
Presión atmosférica	1 bar	
Tamaño mínimo de caldera (volumen líquido)	1 m ³	Volumen aproximado de una caldera de 50 HP
Tamaño máximo de caldera (volumen líquido)	6 m ³	Volumen aproximado de una caldera de 300 HP
Número de calderas a graficar	4	Rango de 50-300 HP (Fig. 1)
Índice de caldera a analizar	2	Fig. 2
% de vapor en la caldera	10%	"Headspace" usual en calderas pirotubulares CB
% de energía liberado como onda de sobrepresión	40%	Ruptura dúctil

La Figura 1 muestra la salida de MATLAB en un gráfico log-log de la distancia versus la sobrepresión generada, para una variedad de calderas a las condiciones definidas por el usuario: presión de ruptura, presión atmosférica y rango de volumen de líquido y de vapor de la caldera, % de vapor en la caldera y el % de energía incorporado a la onda de sobrepresión. A partir de estos datos se calcula la masa equivalente de TNT como muestra el cuadro de leyenda de la gráfica.

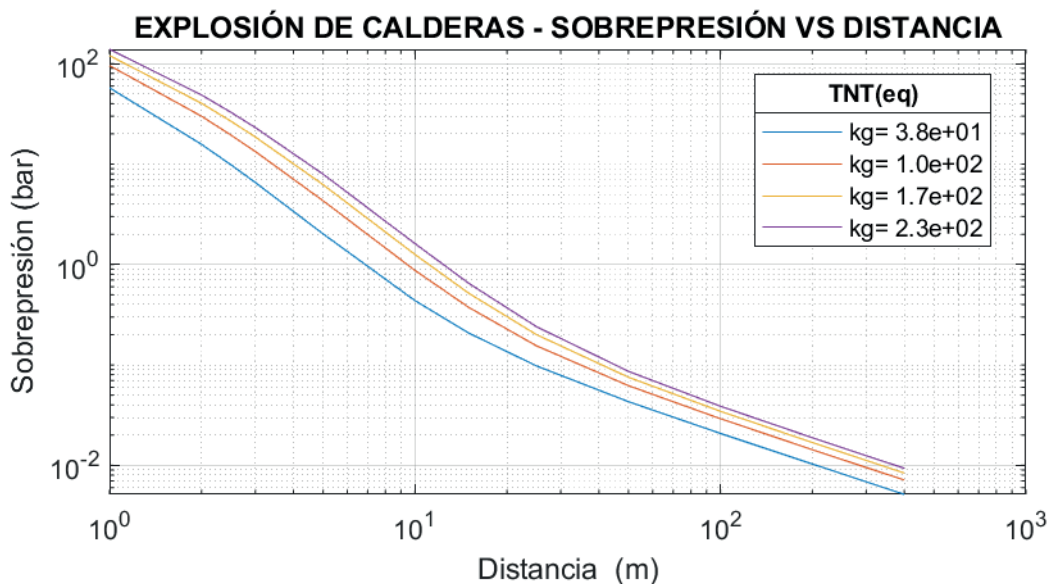


Figura 1. Salida de MATLAB No. 1.

Como se menciona en la sección de metodología, el programa luego solicita un número de índice para el gráfico en el que el usuario desea enfocarse y proporciona una vista menos poblada en formato log-log para facilitar la inspección de la gráfica por el usuario (Figura 2).

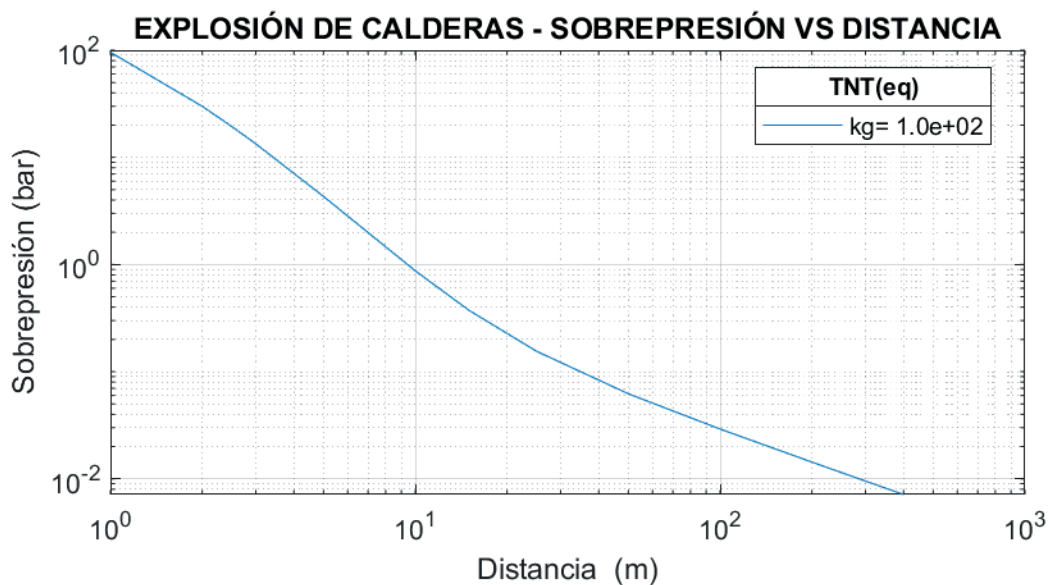


Figura 2. Salida de MATLAB No. 2.

Los parámetros Probit predeterminados para la hemorragia de pulmón se utilizan para generar un gráfico semilogarítmico de sobrepresión versus los valores Probit, como se muestra en la Figura 3.

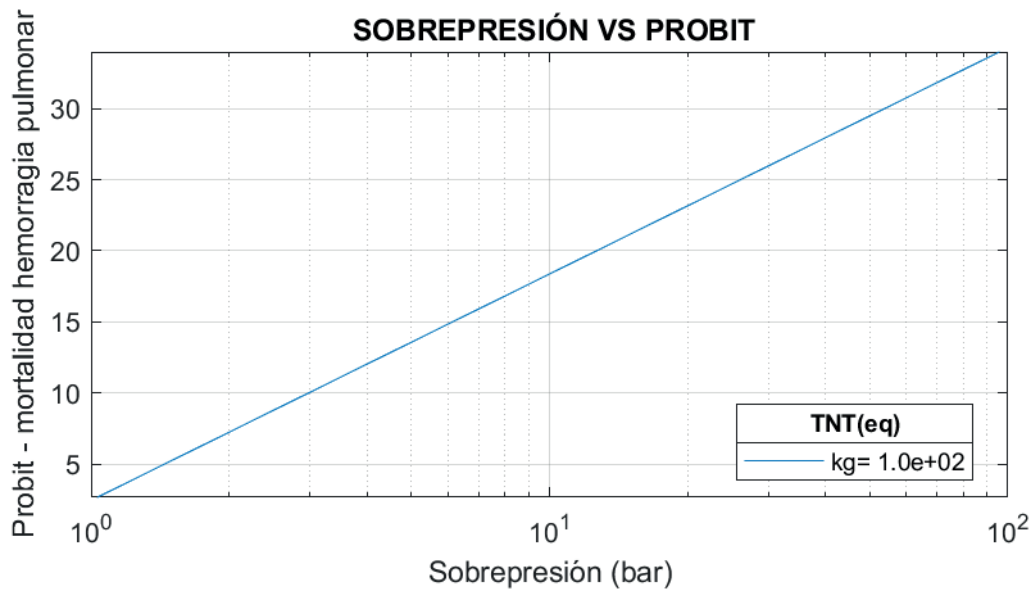


Figura 3. Salida de MATLAB No. 3.

Luego, el programa muestra la tabla de valores probit de Finney (Figura 4), que se utiliza para estimar el % de población afectada en las sobrepresiones de interés, y correspondientes al valor Probit leídos de la Figura 3.

TABLA DE FINNEY PARA CONVERSIÓN DE PROBIT A % DE POBLACIÓN AFECTADA

%	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
0	-	2.67	2.95	3.12	3.25	3.36	3.45	3.52	3.59	3.66
10	3.72	3.77	3.83	3.87	3.92	3.96	4.01	4.05	4.08	4.12
20	4.16	4.19	4.23	4.26	4.29	4.33	4.36	4.39	4.42	4.45
30	4.48	4.50	4.53	4.56	4.59	4.61	4.64	4.67	4.69	4.72
40	4.75	4.77	4.80	4.82	4.85	4.87	4.90	4.92	4.95	4.97
50	5.00	5.03	5.05	5.08	5.10	5.13	5.15	5.18	5.20	5.23
60	5.25	5.28	5.31	5.33	5.36	5.39	5.41	5.44	5.47	5.50
70	5.52	5.55	5.58	5.61	5.64	5.67	5.71	5.74	5.77	5.81
80	5.84	5.88	5.92	5.95	5.99	6.04	6.08	6.13	6.17	6.23
90	6.28	6.34	6.41	6.48	6.55	6.64	6.75	6.88	7.05	7.33

Figura 4. Salida de MATLAB No. 4. Fuente: <https://biocomm.eu/2019/04/03/guide-to-essential-biostatistics-i-the-scientific-method-probit/> (Cited: 27-6-2022).

El resultado completo del programa MATLAB R2023a desarrollado se muestra en la Figura 5, que incorpora en una sola ventana las cuatro salidas gráficas simultáneamente. La versión compilada está disponible previa solicitud al autor.

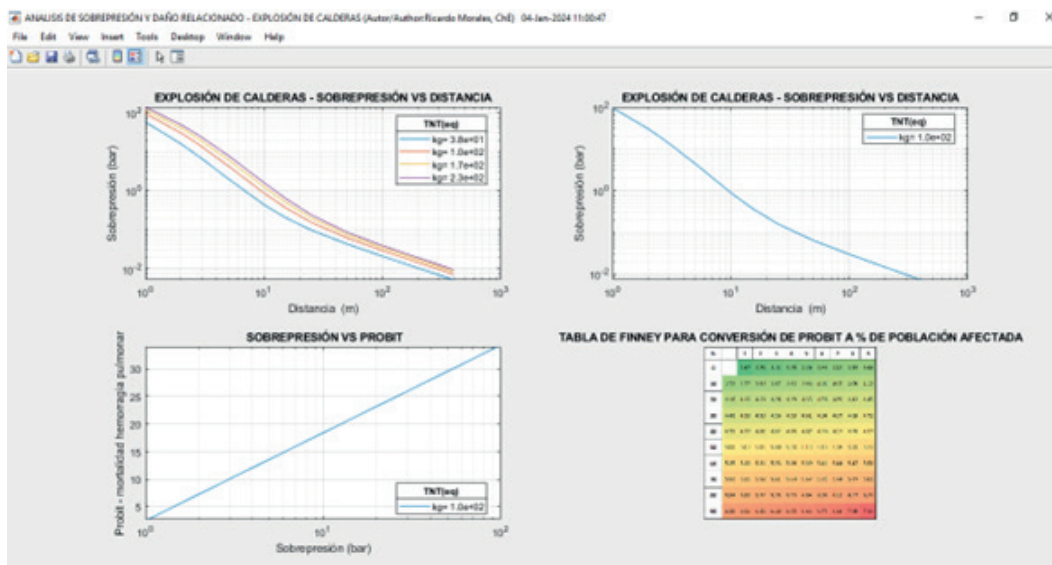


Figura 5. Salida completa del MATLAB No. 5.

Discusión

Las regulaciones nacionales generalmente incorporan especificaciones de fabricación y operación de los equipos, pero omiten requisitos sobre distanciamiento entre salas o compartimentos de calderas y otras exposiciones [4], ignorando los efectos de una sobrepresión en caso de un accidente mayor. El modelo numérico y el procedimiento propuesto permiten a los diseñadores de plantas llegar a “distancias seguras” entre la caldera y otros equipos o exposiciones humanas en caso de falla catastrófica, lo que limita los efectos de la onda expansiva y puede guiar los esfuerzos regulatorios.

Las distancias de seguridad sugeridas determinadas a partir de la salida del software y la ayuda de la tabla Probit de Finney deben considerarse un mínimo de cumplimiento en instalaciones industriales, ya que existen discrepancias entre autores [3, 18, 19] en cuanto a la proporción de la expansión. energía que se transforma efectivamente en una onda de sobrepresión.

El presente estudio se centró en los cálculos de sobrepresión generada por una caldera de vapor BLEVE y no incorpora la energía utilizada en la proyección de fragmentos y sus efectos probabilísticos, que podrían ser de importancia [24]. El resultado del software considera la ruptura dúctil, en la que se supone que el 40% de la energía liberada se transforma en una onda de sobrepresión, lo cual debe verificarse en cada caso, ya que dentro de altas presiones podrían existir otro tipo de condiciones (i.e. fragilización cáustica, en calderas que funcionan a un pH muy alcalino [40]).

El autor coincide con el criterio de Sochet [39] de que los modelos utilizados en el presente estudio representan una opción simple y económica, en comparación con los modelos computacionales de dinámica de fluidos u otros modelos numéricos para el análisis estructural de edificios [2,3], ya que estos últimos requieren mayores capacidades computacionales y experiencia del usuario. Dichas aplicaciones también pueden requerir datos estadísticos sobre las condiciones meteorológicas para la simulación, que no siempre están disponibles en todas las instalaciones industriales. Asimismo, dicho análisis podría ser complicado de implementar al considerar los efectos del suelo, las paredes y las aberturas de ventilación o de entrada/salida, así como otros equipos cercanos, lo que solo es posible con software de elementos o diferencias finitas para mecánica de fluidos, con altos requerimientos computacionales.

El software MATLAB desarrollado es fácil de adaptar a otras condiciones que pueden merecer exploración, como valores distintos para la proporción de energía incorporada en la onda expansiva, diferentes proporciones de líquido a vapor en el recipiente y ofrece la ventaja de explorar diferentes tamaños de calderas simultáneamente. La presión de ruptura se ingresa por el usuario, de modo que se podrían utilizar diferentes criterios, como límites operativos o estructurales, para simular la explosión de diferentes tamaños de calderas, en especial ya que en accidentes reales la presión de ruptura es superior a la presión de operación usual.

El criterio de valoración utilizado, la hemorragia de pulmón (0,7-0,9 bar), tomado de Sajja et al [48], es similar al rango en el que se observan la mayoría de los daños serios en los edificios (cuadro 3). El valor anterior y las distancias correspondientes determinadas a partir de los resultados gráficos podrían ser indicativos de la dimensión más corta que debe tener un cuarto de calderas para minimizar la exposición del resto del personal de la planta. El cuadro 3 muestra el daño esperado a personal e instalaciones, tomado de Lees y otros autores [14, 48], Los valores coloreados son los límites umbral recomendados por Fang [3] para el análisis. Si fuera necesario analizar diferentes criterios de valoración citados en la literatura [17,23,44,47], esto se puede implementar fácilmente cambiando dos parámetros en el código MATLAB (parámetros Probit a y b), y cambios menores en los títulos de salida gráfica programados.

Cuadro 3. Daños esperados según sobrepresión (bar).

Daños esperados	Sobrepresión
	(bar)
Ruido fuerte (143 db), "boom sónico", ruptura de vidrios	0,0028
Presión típica para ruptura de vidrios	0,0103
Daño estructural menor y limitado	0,0300
Ventanas generalmente rotas, algún daño a marcos de ventanas.	0,0345-0,0690
Daño menor a estructuras domésticas	0,0483
Demolición parcial de casas; tornándolas inhabitables	0,0690
Paneles metálicos corrugados fallan y se tuercen. Paneles de madera en casas son derribados	0,0690-0,1379
Rango para heridas por laceración, de leves a serias, por vidrio volante y otros proyectiles.	0,0690-0,5517
Colapso parcial de paredes y techos de casas	0,1379
Concreto no reforzado o paredes de ladrillo se rompen	0,1379-0,2069
Rango para probabilidad del 1 al 90% de ruptura de tímpanos en poblaciones expuestas	0,1655-0,8414
50% destrucción de paredes de ladrillo en casas	0,1724
Marcos de acero en edificios sufren distorsión y son separados de su fundación	0,2069
Postes de madera rotos.	0,3448
Casi completa destrucción de casas	0,3448-0,4828
Vuelco de vagones de tren cargados	0,4828
Demolición de vagones de carga en trenes	0,6207
Probable destrucción total de edificios	0,6897
Daño hemorrágico en pulmones, contusiones, desorientación	0,7-0,9
1-10% de población con daño hemorrágico en pulmones	1.02-1.2
1-99% de fatalidades (muertes) en poblaciones expuestas por efectos directos de la explosión	1,0-2,0

Adaptado de: Lees, Frank P. 1980. *Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 1. London and Boston: Butterworths y Fang et al, 2012; Sajja et al, 2020.

MATLAB, como herramienta computacional, es fácil de aprender, está bien documentado y se utiliza en las ciencias y la ingeniería, contando con comunidades de apoyo en línea. La utilidad y facilidad de implementación del modelo numérico propuesto y las capacidades gráficas del software, permiten a los reguladores incentivar el cumplimiento de un adecuado análisis de riesgos antes de la instalación de la caldera. Los diseñadores, organizaciones profesionales y usuarios de calderas en todos los sectores económicos pueden beneficiarse de este análisis, que sin duda puede contribuir a la reducción de accidentes y pérdidas económicas y humanas de forma significativa. En relación a lo anterior, se compartió el software utilizado y producto de una publicación previa [49] con una empresa consultora de ingeniería [50] que lo utilizaría para informar las decisiones de su cliente sobre ubicación de planta y posicionamiento de la caldera y su cuarto de control dentro de una instalación europea que suministra equipo de defensa.

Es necesario señalar que los accidentes descritos tienen el potencial de volverse más costosos para empresas y gobiernos si los trabajadores o las poblaciones cercanas ponen en marcha procesos legales de responsabilidad civil u otros procedimientos judiciales, lo que hace que la prevención a través del análisis de riesgos, el distanciamiento de las calderas y una mejor construcción sea una inversión provechosa para la economía y la sociedad en general, aspecto que debe retomarse en la elaboración de la normativa internacional.

Referencias

- [1] Shrivastava R, Patel P. Hazards Identification and Risk Assessment in Thermal Power Plant, *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2014; 3(4): 17-37.
- [2] Ibrahim MF, El-Arabaty HA, Moharran I. Effect of steam boiler explosion on boiler room and adjacent building's structure. *International Journal of Engineering Science and Invention*. 2019; Vol. 8, No. 02, Series II: 17-37.
- [3] Fang Q, Zhe Z, Qingmin S. Application of Phast in the Quantitative Consequence Analysis for the Boiler BLEVE. En: *ISDEA '13: Proceedings of the 2013 Third International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications*; 2013. pp. 369-372 <https://doi.org/10.1109/ISDEA.2012.92>
- [4] Morales-Vargas RA. Simulación numérica de explosiones en calderas: Pautas para la distribución de planta como medida de mitigación de daños. *Rev. salud ambient.* 2020; 20(2):137-149.
- [5] Global Asset Protection Services LLC, Oil and Chemical Plant Layout and Spacing, GAPS Guidelines, GAP 2.5.2, 2015.
- [6] Real Decreto 809/2021, de 21 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento de equipos a presión y sus instrucciones técnicas complementarias. <https://www.boe.es/boe/dias/2021/10/11/pdfs/BOE-A-2021-16407.pdf>
- [7] Creus A. Fiabilidad y Seguridad: Su aplicación en procesos industriales. Marcombo. Barcelona, 1992
- [8] Scientific American, "Cause of Boiler Explosions" *Scientific American* 3, 25new, 386 (December 1860) doi:10.1038/scientificamerican12151860-386: <https://www.scientificamerican.com/article/cause-of-boiler-explosions/> [consultado:Julio 6, 2022, 3:00 pm].
- [9] National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors, 2002 Incident Report, Bulletin. 2003; 58(2): 2-3
- [10] National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors, 2002 Boiler accidents report: To err is human, Bulletin, 2002; Vol. 57, No. 2. <https://www.achrnews.com/articles/87615-boiler-accident-reports-to-err-is-human>. [consultado:Julio 6, 2022, 3:00 pm].
- [11] American Society of Power Engineers. Your Boiler Room a Time Bomb?: https://asope.org/sites/default/files/Documents/Your_Boiler_Room-A%20Time_Bomb-2.pdf [Consultado: Julio 6, 2022, 3:10 pm].
- [12] State of Tennessee (USA), 2007. Department of Labor and Workforce Development, Division of Boiler And Elevator Inspection. Boiler Accident Dana Corporation, Paris Extrusion Plant. https://www.ipe.org/docs/default-source/ontario-pdfs/incidents/ftsm-boiler-accident-with-pictures.pdf?sfvrsn=16821ed1_2 [Consultado: Julio 7, 2022, 3:16 pm].
- [13] Editorial. Combustión, Energía y Ambiente. Relación de accidentes en el primer semestre, Calderas. Guía del Usuario en la Industria y el Comercio. CEACA, 2020 1(1), 6-8.

- [14] El Universo, *Sube a 3 la cifra de muertos por explosión en empresa atunera de Manta*, (August 7th, 2020). Ecuador. <https://www.eluniverso.com/noticias/2020/08/07/nota/7933896/explosion-empresa-atunera-manta-muertos/> (Consultado: Julio 5, 2022, 9:41 pm)
- [15] Guimaráes Landi R, Bandineli Montedo U, Netto Lahoz C, Using systems theory for additional risk detection in boiler explosions in Brazil, *Safety Science*, Volume 152, 2022, 105761, ISSN 0925-7535. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105761>.
- [16] Cozzani V, Salzano B. The quantitative assessment of domino effects caused by overpressure Part I. Probit models, *Journal of Hazardous Materials*. 2004; A 107, 67-80.
- [17] González-Ferradás E, Díaz-Alonso F, Sánchez-Pérez JF, Doval Miñarro M, Miñana-Aznar A, Ruiz-Gimeno J, Martínez-Alonso J. Consequence Analysis to Buildings from Bursting Cylindrical Vessels. *Process Safety Progress*, 2009; Vol. 28(2): 179-189.
- [18] Lees FP. *Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 1, London and Boston: Butterworths. 1980.
- [19] Casal J, Arnaldos J, Montiel H, Planas-Cuchi E, Vilchez JA. Modeling and Understanding BLEVEs (Chapter 22). In *Handbook of Hazardous Materials Spills Technology*: 22.1-22.27. <http://aevmont.free.fr/SACH-BOOKS/Petrochemistry/Handbook%20of%20Hazardous%20Materials%20Spills%20Technology/Part%20V.%20Spill%20Modeling/22.%20Modeling%20and%20Understanding%20BLEVEs.pdf> [Consultado: Julio 6, 2022, 3:19 pm].
- [20] Birk AM, Davison C, Cunningham M. Blast overpressures from medium scale BLEVE tests. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2007; 20: 194-206.
- [21] Díaz-Alonso F, González-Ferradás E, Sánchez-Pérez JF, Miñana- Aznar A, Ruiz-Gimeno J, Martínez-Alonso J. Characteristic overpressure-impulse-distance curves for the detonation of explosives, pyrotechnics or unstable substances. *J Loss Prev Process Ind* 2006; 19, 724-728.
- [22] Van de Berg AC, Lannoy A. 1993. Methods for Vapor Cloud Explosion Blast Modelling. *J. Hazard Mater* 1993; 34, 151-171.
- [23] González-Ferradás E, Díaz-Alonso F, Sánchez-Pérez JF, Miñana- Aznar A, Ruiz-Gimeno J, Martínez-Alonso J. Characteristic overpressure-impulse-distance curves for Vessel Burst. *Process. Saf. Prog (AIChE)* 2006; Vol, 25(3): 250-254.
- [24] Casal J, Montiel H, Planas-Cuchi E, Vilchez JA. "BLEVE-bola de fuego" (Chapter 6). In: *Análisis del riesgo en instalaciones industriales*, Bogotá: Editorial Alfaomega; 2001. pp. 173-205.
- [25] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene del Trabajo (Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España, NTP 291: Modelos de vulnerabilidad de las personas por accidentes mayores: método Probit. https://www.cso.go.cr/legislacion/notas_tecnicas_preventivas_insht/NTP%20291%20-%20Modelos%20de%20vulnerabilidad%20de%20las%20personas%20por%20accidentes%20mayores%20metodo%20Probit.pdf. [Consultado: Julio 5, 2022, 3:22 pm].
- [26] Zaghoul A, Ranaweera P, Mohotti D. Assessment of Blast Effects on Passengers in Underground Trains. En: 25th Australian Conference on Mechanics of Structures and Materials (ACMSM25) Brisbane, Australia; 2018.
- [27] Kakogiannis D, Van Hemlrijck D, Wastiels J, Palanivelu S, Van Paeppegem W, Vantomme J, Kozakolios T, Kostopoulos V. Assessment of pressure waves generated by explosive loading. (preprint). *Computer Modeling in Engineering and Sciences*. 2010; 65(1): 1-15. https://www.researchgate.net/publication/228813743_Assessment_of_Pressure_Waves_Generated_by_Explosive>Loading. [Consultado: Julio 5, 2022, 3:24 pm]
- [28] Scott TE, Kirkman E, Haque E, Mahoney P, Hardman JG. Primary blast lung injury - a review. *British Journal of Anaesthesia*, 2017; 118 (3): 311-6.
- [29] Scott TE, Johnston A, Keene D, Rana M, Mahoney P. Primary Blast Lung Injury: The UK Military Experience. *Military Medicine*, 2020; 185, 5/6:e568.
- [30] Li J, Zhang J, Shi M, Yu S, Ji M, Liang Y, Meng X. Crosstalk between Inflammation and Hemorrhage/Coagulation Disorders in Primary Blast Lung Injury, *Biomolecules* 2023, 13, 351. <https://doi.org/10.3390/biom13020351>.
- [31] Jeon D, Kim K, Han S. Modified Equation of Shock Wave Parameters. *Computation*. 2017; 5(3): 1-14. <https://www.mdpi.com/2079-3197/5/3/41> Consultado: Julio 5, 2021, 10:00 am]
- [32] Dadashzadeh H, Khan F, Hawboldt K, Amyotte P. An integrated approach for fire and explosion consequence modelling. *Fire Safety Journal*. 2013; 61: 324-337
- [33] Cozzani V, Tugnoli A, Salzano E. Prevention of domino effect: From active and passive strategies to inherently safer design. *J Hazard Mater* 2007; A139: 209-219.
- [34] Khan F, Abbasi SA, Models for Domino Effect Analysis in Chemical Process Industries, *Process. Saf. Prog* 1998; 17(2): 107-123

- [35] Yin-chua, Lu. "Application of Matlab simulation in boiler explosion quantitative safety assessment." *Manufacturing Automation* (2012): n. pag.
- [36] Birk AM, Davison C, Cunningham M. Blast overpressures from medium scale BLEVE tests. *J Loss Prev Process Ind* 2007; 20: 194-206.
- [37] Van de Berg AC, Lannoy A. 1993. Methods for Vapor Cloud Explosion Blast Modelling. *Journal of Hazardous Materials*. 1993; 34, 151-171.
- [38] Bubbico R, Mazzarotta B. Analysis and comparison of calculation methods for physical explosions of compressed gases. *AIDIC Conference Series*. 2013; 11: 81-90 DOI: 10.3303/ACOS1311009
- [39] Sochet I. Blast effects of external explosions. In: *Eighth International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions*. Yokohama, Japón: Sep. 2010. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00629253/document> [Consultado: Julio 5, 2022, 3:28 pm]
- [40] T. E. Purcell and S. F. Whirl. Protection Against Caustic Embrittlement by Coordinated Phosphate-pH Control 1943 *Trans. Electrochem. Soc.* 83 343.
- [41] Zareei H, Khosravi-Nikou M, Shariati A. (2016). A Consequence Analysis of the Explosion of Spherical Tanks Containing Liquefied Petroleum Gas (LPG). *Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology*. 2016; 5(3): 32-44
- [42] Affandi M, Mamat N, Kanafiah S, Khalid N. (2013). Simplified Equations for Saturated Steam Properties for Simulation Purpose. *Procedia Engineering* 53; 722 – 726.
- [43] Cozzani V, Tugnoli A, Salzano E. Prevention of domino effect: From active and passive strategies to inherently safer design. *Journal of Hazardous Materials*. 2007; A139: 209-219.
- [44] Cozzani V, Salzano B. Threshold values for domino effects caused by blast wave interaction with process equipment. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2004; 17, 437-447.
- [45] Cozzani V, Gubinelli G, Salzano B. (2006). Escalation thresholds in the assessment of domino accidental events. *Journal of Hazardous Materials*. 2006; A129: 1-21.
- [46] Finney, D, L. *Probit Analysis*. Cambridge University Press. Londres, 1971.
- [47] López.Molina A, Vázquez-Román R, Sam Mannan M, Félix-Flores MG. An approach for domino effect reduction based on optimal layouts. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2013; 26: 887-894.
- [48] Sajja, V.S., Statz, J.K., Walker, L.P.B. et al. Pulmonary injury risk curves and behavioral changes from blast overpressure exposures of varying frequency and intensity in rats. *Sci Rep* 10, 16644 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73643-7>
- [49] Morales-Vargas R. Using MATLAB for calculation of boiler explosion consequences: An application to plant layout using Probit models, *J. Res. Technol. Eng.* 3 (3), 2022, 21-31
- [50] A. Davenport, JACOBS Solutions, comunicación personal, Abril 2023.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

El autor aquí firmante declara que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Aplicación del Índice Simplificado de Calidad de Agua (ISQA) en la evaluación de calidad del agua en el río Ocloro, San José, Costa Rica

Application of the Simplified Water Quality Index (ISQA) in water quality assessment in the Ocloro River, San José, Costa Rica

Elena Chaves-Chaves¹

Fecha de recepción: 23 de enero, 2024
Fecha de aprobación: 6 de mayo, 2024

Chaves-Chaves, E. Aplicación del Índice Simplificado de Calidad de Agua (ISQA) en la evaluación de calidad del agua en el río Ocloro, San José, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 1. Enero-Marzo, 2025. Pág. 59-67.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i1.7027>

¹ Escuela de Ingeniería Topográfica, Universidad de Costa Rica, Costa Rica.
 elena.chaveschaves@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-2914-2198>

Palabras clave

Agua; calidad del agua; contaminación; deterioro ambiental; indicador.

Resumen

El agua desempeña un papel crucial en el desarrollo de la vida y está intrínsecamente vinculada al progreso económico y social de una comunidad. Por ello, se requiere contar con agua de calidad. En la evaluación de la calidad del agua es necesario comprender sus condiciones físicas, químicas y biológicas para garantizar su idoneidad según el uso previsto. El propósito de este artículo es presentar los resultados de la evaluación de la calidad de agua del río Ocloro, situado en la provincia de San José mediante la aplicación del Índice Simplificado de Calidad de Agua (ISQA), el cual utiliza los indicadores de temperatura, oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica (CE), demanda química de oxígeno (DQO), y sólidos totales disueltos (SST), mismos que fueron medidos en cinco puntos colocados a lo largo del cauce. Se concluye que el río Ocloro presenta un alto nivel de contaminación y su ecosistema sufre daños severos. Estos hallazgos, sin duda, tienen repercusiones significativas en el desarrollo y la calidad de vida de las comunidades cercanas a su área de influencia.

Keywords

Water; water quality; pollution; environmental degradation; indicator.

Abstract

Water has an essential role in the development of life. Therefore, it is associated to the economic and social progress of communities. Hence, it is necessary to have water quality. Water analysis is required to understand its physical, chemical, and biological conditions according to the final use. This article presents the findings of the water quality assessment using the Simplified Water Quality Index (ISQA) on the Ocloro River located in the San José. The indicators that ISQA apply are temperature, dissolved oxygen (OD), electrical conductivity (CE), chemical oxygen demand (DQO), and total dissolve solids (SST). The indicators were measured in five points along the river. As a result, the Ocloro river manifests a significantly high pollution and environmental degradation level. These observations have significant repercussions on the development and quality of life for communities near its area of influence.

Introducción

El agua es un elemento vital para el desarrollo de la vida de cualquier especie del planeta. Es por esa razón que el establecimiento de los asentamientos humanos a lo largo de la historia gira en torno a alguna fuente de agua bebible[1]. Precisamente, esa estrecha relación ha generado una fuerte presión sobre el recurso hídrico debido al deterioro de los diferentes ecosistemas asociados.

El desarrollo económico y bienestar social están estrictamente asociados a la calidad del agua de la que se dispone, puesto que de ella deriva el equilibrio de los sistemas ecológicos, el control alimentario, actividades agropecuarias y servicios ambientales, por citar algunos elementos concretos. [2]–[4].

Asimismo, contar con agua de alta calidad se vincula directamente a indicadores de salud y crecimiento económico, influyendo así en el bienestar humano y el desarrollo sostenible[5]. En consecuencia, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) ha incorporado el objetivo de

Agua Limpia y Saneamiento dentro de sus metas de desarrollo sostenible. Dada su repercusión en la salud, la economía y ante los desafíos del cambio climático, se ha establecido la meta global de garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para el año 2030 [6].

A partir de lo anterior, se puede inferir que conocer la calidad de un cuerpo de agua es indispensable. No obstante, este proceso es arduo ya que implica la evaluación de las condiciones físicas, químicas y biológicas existentes en el sitio de estudio en concordancia con el uso final que se le vaya dar al recurso [7], [8].

En el caso particular de los ríos, el análisis de la calidad de agua es complejo, dada la dinámica constantemente cambiante del ecosistema, por lo que normalmente se recurre a la implementación indicadores e índices como mecanismo de simplificación en el análisis e interpretación de los datos obtenidos a partir del muestreo [9].

Un indicador de calidad de agua es un parámetro que brinda información respecto al estado del agua que se está valorando, por lo que éste debe ser seleccionado con gran responsabilidad de manera que realmente contribuya con la información necesaria y pertinente al objetivo de la investigación [4], [10].

Para sintetizar la información proveniente de los indicadores se implementan los índices ya que condensan varias variables en un solo valor, lo que facilita la interpretación de los datos y, por ende, proporciona una visión clara de la situación y tendencia de un cuerpo de agua específico. En ese sentido, los indicadores deben de ser transformados una sola escala [5], [7].

Uno de los índices aplicables a ríos o ambientes lóticos es el *Índice Simplificado de Calidad de Agua (ISQA)*, desarrollado en 1982 por Qeral, en España. Este utiliza indicadores como la temperatura, oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica (CE), demanda química de oxígeno (DQO), y sólidos totales disueltos (SST). Permite obtener resultados de manera eficiente, minimizando el tiempo y los recursos necesarios [9], [11], [12].

El objetivo que se expone en este artículo es mostrar los resultados obtenidos en evaluación de la calidad de agua del río Ocloro, situado en la provincia de San José tras aplicar el ISQA.

Con respecto a la calidad de las aguas del río Ocloro, este pertenece a una de las cuatro cuencas más contaminadas del país, por lo que es común encontrar vertidos domésticos e industriales, acumulación de basura y objetos de gran tamaño que contribuyen a una condición deteriorada y generan un impacto negativo en el entorno circundantes [13]–[15].

Materiales y métodos

La zona de estudio se concentra en el río Ocloro ubicado en la provincia de San José, el cual en su recorrido atraviesa los cantones de Montes de Oca, Curridabat y Zapote, donde se han establecido cinco puntos de muestreo tal y como se muestra en la figura 1.

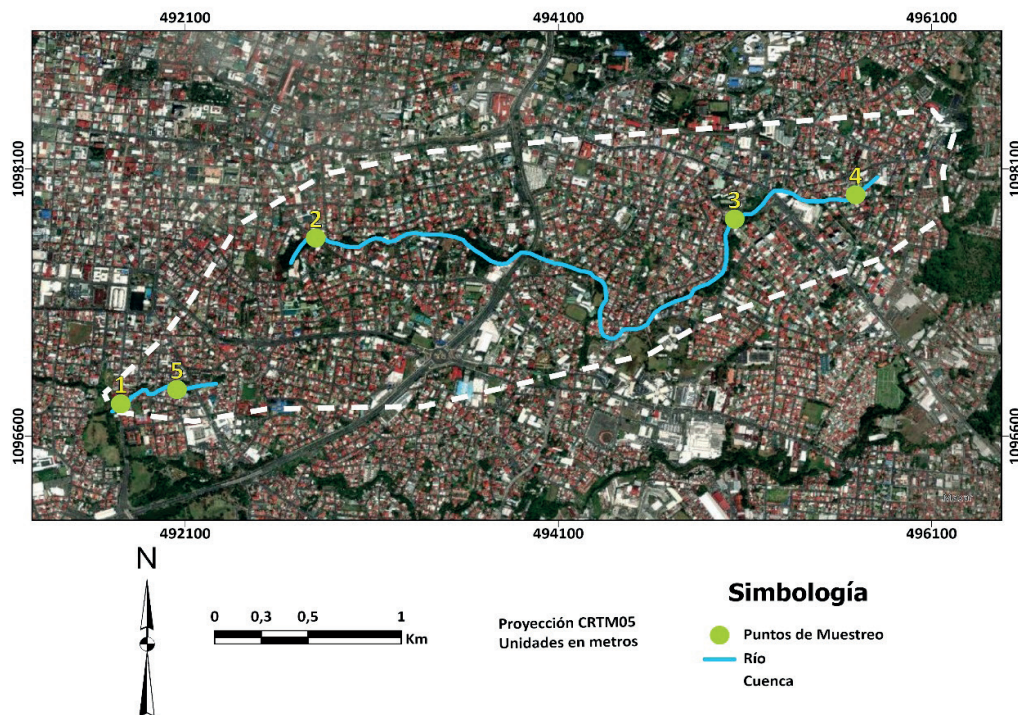


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio y puntos de muestreo.

Las campañas de muestreo que se han llevado a cabo son las siguientes:

Cuadro 1. Campañas de muestreo río Oloro, San José.

Muestreo	Época Seca	Época Lluviosa
Campaña 1	02 de febrero 2021	29 de octubre 2021
Campaña 2	24 de mayo 2022	13 de octubre 2022
Campaña 3	12 de Abril 2023	

Los materiales utilizados para las diferentes campañas de muestreo son: botellas plásticas, guantes, hieleras, etiquetas y medidor multiparámetro HANNA HI9829 para la medición directa de aquellos variables sensibles como la temperatura y oxígeno disuelto.

Para todas las campañas de medición se utilizaron los puntos de muestreo que se observan en la figura 1. Se recolectó una botella de aproximadamente 2 litros de agua y se llevaron a cabo las mediciones en sitio de conformidad con lo establecido en el *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* [16].

El análisis de la calidad de agua del río Ocloro se llevó a cabo mediante la aplicación del *Índice Simplificado de Calidad de Agua (ISQA)*, el cual se define mediante la siguiente ecuación base:

$$ISQA = T(A + B + C + D) \quad (1)$$

Donde,

T: depende de la temperatura del río medida en °C.

A: indica la oxibilidad del agua, es decir depende de la DQO en mg/L.

B: se relaciona con la materia suspendida en el agua (SST) medida en mg/L.

C: concentración de oxígeno disuelto en mg/L.

D: mide la concentración de sales inorgánicas (CE), en mg/L [17].

Para la estandarización de cada uno de los indicadores involucrados en el ISQA de acuerdo con la escala que propone, requiere de las siguientes funciones:

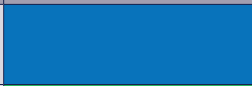



Cuadro 2: Ecuaciones de estandarización ISQA.

Indicador	Función	Ecuación
T	$\begin{aligned} Si T \leq 20 &\rightarrow T = 1 \\ Si T > 20 &\rightarrow T = 1 - (T - 20) * 0,0125 \end{aligned}$	(2)
A	$\begin{aligned} DQO \leq 10 &\rightarrow A = 30 - DQO \\ Si 10 < DQO \leq 60 &\rightarrow A = 21 - (0,35 * DQO) \\ Si 60 < DQO &\rightarrow A = 0 \end{aligned}$	(3)
B	$\begin{aligned} Si SST \leq 100 &\rightarrow B = 25 - (0,15 * SST) \\ Si 250 \geq SST > 100 &\rightarrow B = 16,67 - 0,0667 * SST \\ Si SST > 250 &\rightarrow B = 0 \end{aligned}$	(4)
C	$\begin{aligned} Si O_2 < 10 &\rightarrow C = 2,5 * O_2 \\ Si O_2 \geq 10 &\rightarrow C = 25 \end{aligned}$	(5)
D	$D = 055,42 - 15,38 * \log CE$	(6)

Fuente:[11],[16],[17]

Una vez obtenidos los valores correspondientes a la ecuación 1, su escala de interpretación es la que se muestra a continuación,

Cuadro 3. Interpretación calidad de agua, según escala de ISQA.









Valores del ISQA	Usos	Niveles de calidad	Color de referencia
85-100	Todos los usos	Excelente calidad	
60-85	Agua Potable con tratamientos convencionales	Buena Calidad	
45-60	Riego hortícola, agua industrial y agua potable (tratamiento especial)	Mediana Calidad	
30-45	Riego de plantas sin consumo directo	Mala Calidad	
0-30	Uso muy restringido	Muy mala calidad	

Fuente: [12]

Resultados

Los resultados obtenidos de la aplicación del ISQA en los puntos de muestreo indican niveles agresivos de contaminación en la zona tal y como se puede apreciar en el siguiente cuadro resumen:

Cuadro 4. Clasificación de la calidad de agua, en el río Ocloro, según el ISQA.

Campaña de Muestreo	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
Campaña 1: Época Seca					
Campaña 1: Época Lluviosa					
Campaña 2: Época Seca					
Campaña 2: Época Lluviosa					
Campaña 3: Época Seca					

Tal y como se puede observar, los niveles de contaminación en el río Ocloro varían entre el nivel de contaminación severa a muy severa de conformidad con lo que establece ISQA.

El oxígeno disuelto es un excelente indicativo del estado del agua ya que su presencia es vital para el desarrollo de seres acuáticos aeróbicos, es decir, en altas concentraciones se tendrá un ambiente propicio para la diversidad de organismos acuáticos, mientras que en bajas cantidades pueden proliferar especies de microorganismos y bacterias anaeróbicas que producen normalmente malos olores y sabores desagradables poco aptos para cualquier tipo de uso [19]. En el caso específico del río Ocloro los valores de oxígeno disuelto no superan los 10mg/l (Figura 2), lo que implica una calidad de agua bastante deteriorada y por lo tanto la inexistencia de un ambiente óptimo para el desarrollo de especies acuáticas aerobias.

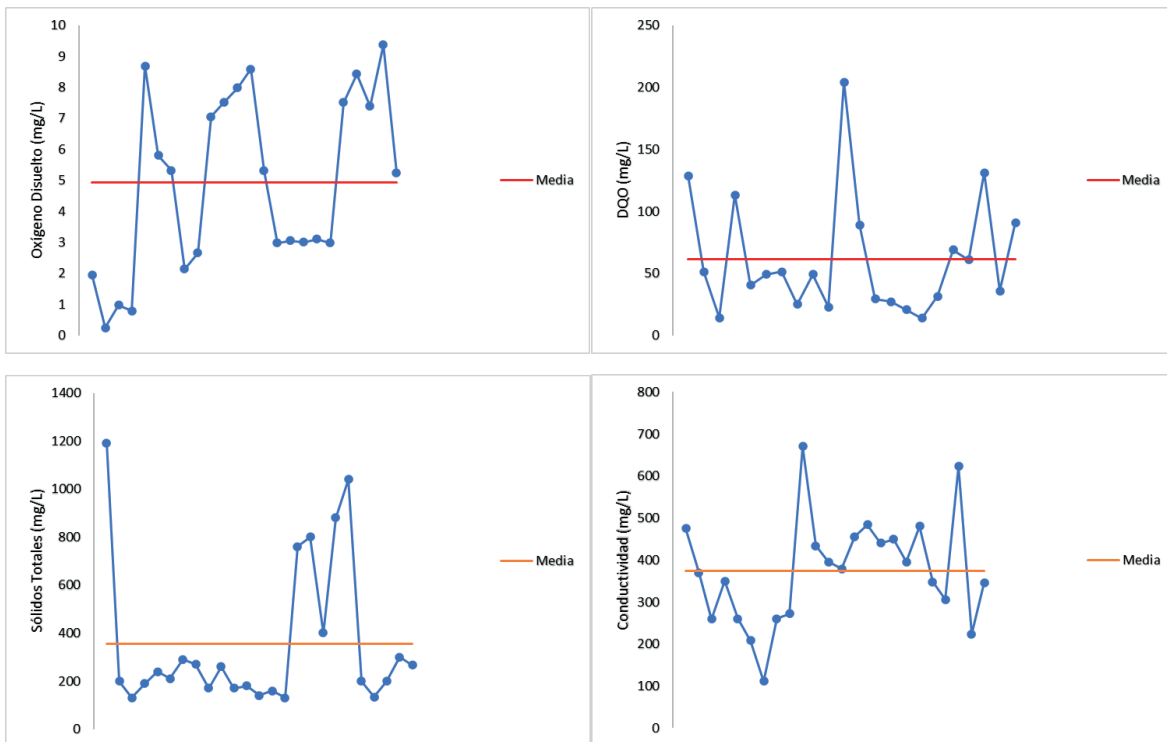


Figura 2. Indicadores del ISQA.

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) refleja la cantidad de oxígeno necesaria para que los microorganismos descompongan la materia orgánica biodegradable en el agua. Niveles elevados de DQO ejercen un impacto negativo en la calidad del agua y la vida acuática [19]. Según se observa en la Figura 2, las magnitudes de DQO en el río Ocloro son significativamente altos, con valores que superan los 100 mg/L. Destaca un dato máximo de 204 mg/L en el punto de muestreo 4 (San Pedro, Montes de Oca) durante la época seca. Estos valores suelen estar asociados a la descarga de aguas residuales sin tratamiento, situación notoriamente presente en la zona a simple vista. Esta información se alinea con el informe del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, que, mediante un diagnóstico del río María Aguilar, identificó que su principal afluente, el Río Ocloro, es el más contaminado en la cuenca [20].

En el caso de los sólidos totales el muestreo revela una media de 356,4 mg/L, no obstante, se observan valores por encima de los 1000mg/L, esto hace referencia a la materia suspendida o disuelta en el agua normalmente compuesta por minerales, metales y sales, los cuales producen un efecto nocivo en la calidad del cuerpo de aguas debido a que ocasiona turbiedad y favorecen la absorción de calor lo que incrementa la temperatura [20], [21].

Por su parte, el indicador conocido como conductividad eléctrica está vinculado a la concentración de sales en disolución en el agua, las cuales son capaces de transportar la corriente eléctrica [22]. La media de CE obtenida para el río Ocloro ronda los 375,1mg/L.

Finalmente, la temperatura del agua es un indicador que tiene incidencia en procesos como la solubilidad de gases y sales en agua, así como en las reacciones y relaciones biológicas propias del ecosistema [23]. Propiamente en el caso del río Ocloro la temperatura promedio registrada en las muestras fue de 21,7°C. Según el Reglamento para la Calidad del Agua Potable, el rango de temperatura es de 18 a 30 °C, por lo que valor se encontraría dentro de lo esperado [24], sin embargo se registraron mediciones de 19, 67 °C durante la época de verano en el punto 1, por lo que debe de mantenerse vigilado este parámetro.

Según el Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de los Cuerpos de Aguas Superficiales, con los valores promedio que se tienen de sólidos totales, DQO y turbiedad, el río puede ser catalogado como clase 5, es decir utilizable únicamente para navegación y generación hidroeléctrica [25], usos que sin duda por las características del sitio no son factibles. Dicha categorización deja en evidencia las condiciones negativas en las que se encuentran las aguas que escurren por el Ocloro y el evidente riesgo a la salud de quienes habitan en las zonas aledañas las cuales a su vez se recurrentemente se ven afectadas por inundaciones.

Conclusiones y recomendaciones

El ISQA, al integrar cinco indicadores de gran relevancia, proporciona una visión integral del estado de la calidad del agua. De los datos obtenidos durante las campañas de muestreo, se observa que los valores tienen a empeorar en la época seca ya que la ausencia de lluvias no permite la disolución y movilización de los contaminantes, lo que produce incluso la presencia de malos olores en las zonas aledañas al cauce del río lo que puede ser perjudicial para la salud de quienes viven cerca.

En general, con los resultados del ISQA las aguas del río Ocloro son catalogadas como de mala calidad o muy mala calidad lo que restringe su uso y refleja la problemática ambiental existente en el sitio. Asimismo, en una revisión a los parámetros establecidos como complementarios en el Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de los Cuerpos de Aguas Superficiales la clasificación corresponde a la Clase 5 que de igual manera se asocia a aguas altamente contaminadas.

La DQO, que revela la presencia de contaminación orgánica originada por residuos industriales y domésticos en el río Ocloro, lo que también se evidencia con las bajas concentraciones de oxígeno disuelto. La mala gestión de las aguas residuales en las ciudades que se encuentran alrededor produce efectos perjudiciales en la vida acuática y el ecosistema, lo que repercute sin duda en la calidad de vida de sus habitantes. Es urgente un abordaje integral del problema de contaminación de manera que se concientice a todos los actores involucrados sobre la necesidad e importancia de una correcta gestión de los residuos.

Referencias

- [1] C. Sierra-Ramírez, *Calidad de Agua*, Primera. Medellín: Digiprint Editores E.U., 2011.
- [2] S. Gyawali, K. Techato, C. Yuangyai, and C. Musikavong, "Assessment of Relationship between Land uses of Riparian Zone and Water Quality of River for Sustainable Development of River Basin, A Case Study of U-Tapao River Basin, Thailand," *Procedia Environ. Sci.*, vol. 17, pp. 291–297, 2013, doi: 10.1016/j.proenv.2013.02.041.
- [3] M. . Jurado and I. . Mercado, "Revisión sistemática de técnicas no convencionales para la evaluación de la calidad del agua de ríos contaminados con plaguicidas," *Entre Cienc. e Ing.*, no. 21, pp. 56–65, 2017, [Online]. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/ecei/v11n21/1909-8367-ecei-11-21-00056.pdf>.
- [4] W. Ocampo-Duque, C. Osorio, C. Piamba, M. Schuhmacher, and J. L. Domingo, "Water quality analysis in rivers with non-parametric probability distributions and fuzzy inference systems: Application to the Cauca River, Colombia," *Environ. Int.*, vol. 52, pp. 17–28, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.envint.2012.11.007.
- [5] J. A. Villena Chávez, "Calidad del agua y desarrollo sostenible," *Rev. Peru. Med. Exp. Salud Publica*, vol. 35, no. 2, p. 304, Jun. 2018, doi: 10.17843/rpmpesp.2018.352.3719.
- [6] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), "ODS: Agua Limpia y Saneamiento," 2023. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/wp-content/uploads/sites/3/2016/10/6_Spanish_Why_it_Matters.pdf.
- [7] N. Monroy, "Análisis de la situación jurídica actual de los recursos hídricos en la república de Guatemala y la necesidad de crear la ley de aguas y rectoría del recurso hídrico," Universidad de San Carlos, 2011.
- [8] P. D. Palomino Avellaneda, "Evaluación de la calidad del agua en el río Mashcón, Cajamarca, 2016," *An. Científicos*, vol. 79, no. 2, p. 298, Dec. 2018, doi: 10.21704/ac.v79i2.1242.

- [9] J. I. Pérez, A. G. Nardini, and A. A. Galindo, "Análisis Comparativo de Índices de Calidad del Agua Aplicados al Río Ranchería, La Guajira-Colombia," *Inf. tecnológica*, vol. 29, no. 3, pp. 47–58, Jun. 2018, doi: 10.4067/S0718-07642018000300047.
- [10] G. Calvo-Brenes and A. Araya-Ulloa, "Evaluación de dos índices de calidad del agua en varios sitios de la quebrada La Central, Pacayas de Alvarado, Costa Rica," *Rev. Tecnol. en Marcha*, Oct. 2018, doi: 10.18845/tm.v31i4.3966.
- [11] I. de Bustamante, J. . Sanz, F. . González-Fernández, J. . Encabo, and J. Mateos, "Estudio de la calidad de aguas superficiales en los espacios naturales del sur de las provincias de Salamanca y Ávila: Aplicaciones del índice ISQA," *Geogaceta*, vol. 31, pp. 103–106, 2002, [Online]. Available: <https://rabida.uhu.es/dspace/bitstream/handle/10272/9483/Estudio-de.pdf?sequence=2>.
- [12] L. C. Losada Benavides, C. A. Rueda Sanabria, and P. Martínez Silva, "Evaluación de la calidad del agua en el embalse hidroeléctrico El Quimbo," *Entre Cienc. e Ing.*, vol. 14, no. 27, pp. 107–116, 2020, doi: 10.31908/19098367.1800.
- [13] K. Arce-Villalobos, R. Sánchez-Gutiérrez, J. Centeno-Morales, R. Marín-León, and J. A. Rodríguez-Rodríguez, "Calidad del agua superficial y presiones socioambientales en la microcuenca alta del río Poás," *Uniciencia*, vol. 36, no. 1, pp. 1–23, Mar. 2022, doi: 10.15359/ru.36-1.24.
- [14] Municipalidad de San José, "Observatorio Municipal," N°21, San José, Costa Rica, p. 20, 2017.
- [15] D. Pérez, "Percepción y amenaza de Inundaciones en Barrio Luján, San José," 2017. doi: 10.13140/RG.2.2.16481.81764.
- [16] "1060 COLLECTION AND PRESERVATION OF SAMPLES," in *Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater*, American Public Health Association, 2017.
- [17] A. Hamlat, A. Guidoum, and I. Koulala, "Status and trends of water quality in the Tafna catchment: a comparative study using water quality indices," *J. Water Reuse Desalin.*, vol. 7, no. 2, pp. 228–245, Jun. 2017, doi: 10.2166/wrd.2016.155.
- [18] A. Jorge, "Evaluación de calidad de las aguas del arroyo Aguapey mediante el empleo del Índice Simplificado de Calidad de Agua," *Rev. sobre Estud. e Investig. del Saber Académico*, no. 7, pp. 9–12, 2013, [Online]. Available: <https://revistas.uni.edu.py/index.php/rseisa/article/view/92/91>.
- [19] M. Euba Neto, W. O. da Silva, F. C. Rameiro, E. S. do Nascimento, and A. de S. Alves, "Análises físicas, químicas e microbiológicas das águas do balneário Veneza na bacia hidrgráfica do médio Itapecuru, MA," *Arquivos do Instituto Biológico*, vol. 79. scielo , 2012.
- [20] W. F. Silva, F. C. Castillo, and C. A. S. Sierra, "Evaluacion de la precision y exactitud para la determinacion gravimetrica de solidos disueltos totales en aguas," *Julio-Diciembre*, no. 2, 2015, [Online]. Available: <http://revistas.uniguajira.edu.co/index.php/cei>.
- [21] A. G. Pérez-Castillo and A. Rodríguez, "Índice fisicoquímico de la calidad de agua para el manejo de lagunas tropicales de inundación," *Rev. Biol. Trop.*, vol. 56, no. 4, pp. 1905–1918, 2008, doi: 10.15517/rbt.v56i4.5769.
- [22] Y. Solís-Castro, L. A. Zúñiga-Zúñiga, and D. Mora-Alvarado, "La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica," *Rev. Tecnol. en Marcha*, vol. 31, no. 1, p. 35, Mar. 2018, doi: 10.18845/tm.v31i1.3495.
- [23] J. Rodríguez, "Parámetros fisicoquímicos de dureza total en calcio y magnesio , pH , conductividad y temperatura del agua potable analizados en conjunto con las Asociaciones Administradoras del Acueducto , (ASADAS), de cada distrito de Grecia , cantón de Alajuel," *Rev. Pensam. Actual, Univ. Costa Rica*, vol. 9, no. 12, pp. 125–134, 2009, [Online]. Available: <file:///C:/Users/Miqueas/Downloads/2842-4409-1-SM.pdf>.
- [24] República de Costa Rica, "Reglamento para la Calidad del Agua Potable." Costa Rica, 2023, [Online]. Available: http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=80047.
- [25] República de Costa Rica, "Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de los Cuerpos de Aguas Superficiales." Costa Rica, p. 16, 2007, [Online]. Available: [https://www.aya.go.cr/centroDocumetacion/catalogoGeneral/Reglamento evaluaci3n y clasificaci3n de calidad de cuerpos de agua superficiales.pdf](https://www.aya.go.cr/centroDocumetacion/catalogoGeneral/Reglamento%20evaluaci3n%20y%20clasificaci3n%20de%20calidad%20de%20cuerpos%20de%20agua%20superficiales.pdf).

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Para la revisión gramatical y ortográfica de este artículo, empleamos la herramienta de IA ChatGPT. Esta nos permitió identificar errores y mejorar la fluidez del texto. No obstante, realizamos una revisión final para garantizar que el artículo cumpliera con los estándares de calidad de la revista.

New procedure for the maintenance in the electric substations of interiors to achieve their operational efficiency

Nuevo procedimiento para el mantenimiento de las subestaciones de interiores para lograr su eficiencia operacional

Carlos Manuel Ruano-González¹


Fecha de recepción: 24 de enero, 2024

Fecha de aprobación: 2 de junio, 2024

Ruano-González, C.M. New procedure for the maintenance in the electric substations of interiors to achieve their operational efficiency. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 1. Enero-Marzo, 2025. Pág. 68-77.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i1.7037>

¹ Departamento de ingeniería eléctrica. Facultad Electromecánica. Universidad de Camagüey. Cuba

 cmruanog@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-9647-8759>

Keywords

Diagnostic; half tensión; generalities of the maintenance; new procedure; indicators of world class

Abstract

The electric substations of half tension are fundamental parts of the groups of distributed generation, which play an important paper in the readiness of the Electric System of Powers. These for their nature, it changes the conception when analyzing the maintenance techniques regarding those that know each other traditionally or usually used in the conventional substations of external, for what the administration of a methodology for its realization should be well conceived and based. On this work line he/she goes the analysis and conception from the maintenances to the electric cells that conform a substation of half tension of interiors that you/they are used in the groups of distributed generation. Where to carry out the maintenances, the methods and procedures are used applied to the substations of external in their great majority, based on the application of the preventive maintenance, after analysis and studies carried out by the frequent mishaps that you happens, committing the electric power service to the users and existing damages to the primary teams that compose the electric cells, becomes necessary to implement a methodology for the diagnosis and the administration of the maintenance, where other types of maintenances like the preventive ones and predictive are conjugated, we will use for their control and evaluation the maintenance to electric substations by means of indicators of world class, proposing a methodology that is able to improve their operational efficiency.

Palabras clave

Diagnostico; media tensión; generalidades del mantenimiento; nuevo procedimiento; indicadores de clase mundial.

Resumen

Las subestaciones eléctricas de media tensión son partes fundamentales de los grupos de generación distribuida, los cuales juegan un papel importante en la disponibilidad de los Sistema Eléctrico de Potencias. Estas por su naturaleza, cambia la concepción a la hora de analizar las técnicas de mantenimiento respecto a las que se conocen tradicionalmente o usadas normalmente en las subestaciones convencionales de exteriores, por lo que la gestión de una metodología para su realización debe estar bien concebida y fundamentada. Sobre esta línea de trabajo se dirige el análisis y concepción de los mantenimientos a las celdas eléctricas que conforman una subestación de media tensión de interiores, que se utilizan en los grupos de generación distribuida. Donde para realizar los mantenimientos, se utilizan los métodos y procedimientos aplicados a las subestaciones de exteriores en su gran mayoría, basado en la aplicación del mantenimiento preventivo, después de análisis y estudios realizados por las frecuentes averías que se suceden, comprometiendo el servicio de energía eléctrica a los usuarios y existiendo daños a los equipos primarios que componen las celdas eléctricas, se hace necesario implementar una metodología para el diagnóstico y la gestión del mantenimiento, donde se conjuguen otros tipos de mantenimientos como los preventivos y predictivos, utilizaremos para su control y evaluación el mantenimiento a subestaciones eléctricas mediante indicadores de clase mundial, proponiendo una metodología que logra mejorar su eficiencia operacional.

Introduction

Due to the constant interruptions, more the problems so much economic as social, including the affectations to the environment and the security of the human capital that can cause the flaws of the cells that conform the electric substations of the groups of Distributed Generation, makes imperative the search of alternative of solution to this problem, using technical of maintenances and diagnostic that are effective in the moment of their application.

The electric substations of interiors, associated to the distributed generation, independently that in a conceptual way they complete the same objective that the electric substations of external, have their particularities in their design that makes that the conception of their diagnosis and maintenance, they should have other considerations regarding the substations of external traditionally employees, for this reason it is of supreme importance to count a methodology for the diagnosis and the administration of the maintenance, appropriate to avoid the frequent mishaps that commit the electric power service to the users and to guard against damages to the primary teams that compose the electric cells.

The maintenance according to the Institute of Electric and Electronic Engineers (IEEE for their initials in English) it is not more than the act of to preserve or to maintain the conditions of a team for their correct operation, that is to say, the combination of all the technical and administrative actions that they include supervision actions that can maintain or to restore the state for which fulfills the functions tunes to their acting a team or certain system (IEEE Std C37.10, 2011) [1], the objective of the administration of the maintenance to the electric substations of half tension of interiors, is to assure the maximum dependability and readiness from the cells to low costs so that they fulfill its operative functions inside a context operational, preventing or correcting, when it is necessary, condition that they put in risk the operation of the same ones and of the installation to the one that are associate, as well as to the teams and neighboring facilities.

On the other hand, according to more recent investigations carried out by groups of work of the International Council in Big Electric Systems of High Tension (CIGRE for their initials in French) [2], he thinks about that inside the outlines of more used maintenances they are the preventive maintenance in 55%, this generally consists on to recondition or to substitute to regular intervals a team or their components, independently of their state in that moment, those intervals are established by the makers based on previous experiences, however, the investigations demonstrate that the effectiveness of these methods is strongly linked to the frequency of the maintenance inspections, and in the case of the electric cells many of the flaws that happen are not simply detected for it is necessary to use other techniques non to invade that you/they help to determine its state. The maintenance based on the condition represents 8% and 37% the combination of both.

The design was developed under a descriptive qualitative focus using the methodology of case study in a group of Distributed Generation with fuel oil HYUNDAI of 40 MW, the same one is compound for four batteries conformed with four motors of the type HSR77198P of 2,5 MW each one, each battery has a generation of 10 MW for a total of 40 MW whose a substation is conformed for:

- Transformers type KMO - 0542 of exit of the batteries of 12,5 MVA and 34.5/6,6 kV.
- Four electric lines of exit, one of bar connection and two connection exits with a substation of 110 kw of exit of plant of a Thermoelectric Power station.

Independently of to be electric substations of interiors and to be in a reduced space of metallic and acclimatized booths, penetration of polluting particles always exists as powders in suspension and soot that, before the condensation of the humidity, they cause, an abnormal condition of operation, arriving to discharges of tension among the energized parts or you

activate of the teams and until to severe flaws for contamination with an appreciable flaw index. For the before exposed, a special attention has been paid to the techniques of diagnostic and maintenance of these substations. As the technologies advance a new focus it is also needed in the maintenance, for it the specialists created what is known now as the Maintenance To predict or Based in the Condition, the same one consists on to inspect the teams to regular intervals and to take action to avoid the flaws or the consequences of the same ones according to the condition. It includes the objective inspections so much (with instruments) and subjective (with the senses), as the repair of the defect (it fails potential), these techniques of the maintenance have had a certain advance in some primary teams of substations like they are the transformers of powers, but not the rest of the elements that you compose the fields in the substations of external and the electric cells of the substations of interiors.

The study of the art in the administration of the maintenances to the electric substations of half tension of interiors, refers to the application of technical and advanced tools in the environment of the electric engineering to improve the efficiency, quality and security of the maintenance operations. It is observed that in none of the studies, he has been carried out a deep analysis of the administration of the maintenance to avoid in some way the different flaws and mishaps registered in the electric cells, for that in spite of the gradual increase of the different scientific investigations and thesis related with the diagnosis and checkup of the technical conditions of the primary teams of substations, a hole is denoted in the studies carried out in the world with respect to the administration of the maintenance of the electric substations of half tension of interiors.

Methodology

Investigation methods

Theoretical methods

Historical: To know the most common methods developed in the realization of the administration of the maintenances and diagnostic, from their emergence, evolution and development.

Analysis-synthesis: To analyze the primary components of the electric cells in an integral way and to understand their structure. In the synthesis they should unite the previously analyzed parts harmoniously, in order to reveal their relationships and general characteristics.

Systemic Method

To establish the relationship among the factors that intervene in the waste or aging of the primary teams

Statistical method

For the obtaining of the patterns of behavior of the state variables to validate it.

Existent assets [3], with a view to reducing the maintenance costs, to prevent the exits for emergency, and to achieve that the teams work a bigger term and in a surer way [4].

The monitor is the continuous and systematic process by means of which is verified the efficiency and the effectiveness of a product by means of the identification of its achievements and weaknesses and in consequence measured to correct is recommended to optimize the prospective results [5]. It is, therefore, condition for the rectification or deep of the execution and to assure the feedback among the objectives and theoretical budgets and the lessons

learned starting from the practice. Also, it is the responsible one of to prepare and to contribute the information that makes possible to systematize results and processes, therefore, it is a basic input for the diagnosis.

So that the monitor is successful it requires of the establishment of a system of information, identifying the users of the information, the types of high priority information, linking the necessities and the sources of information, establishing appropriate methods to make the summary of data and to identify the necessary resources [6].

Generalities of the Maintenance

For each one of them, they are described their main ones next characteristic and definitions:

- Preventive maintenance: It is a group of activities (you inspect, tests, adjustments, repairs, taking of samples) regularly programmed and applied to the teams of a certain installation, in order to minimizing their degradation or loss of useful life.
- Maintenance predictive: It is a technique that consists regularly on monitor (followed than in the preventive maintenance) the key parameters of a team in operation, with the purpose of to detect and/or to correct a potential problem on time before the flaw of the team takes place.
- Maintenance corrective: When it is detected that the acting of some team begins to diminish and one shows off the possible causes of this first floor acting, it should be attacked to this causes and to carry out a maintenance of the team to avoid that the problem is increased.
- On the base of the obtained results of tests carried out to the electric team, the personnel responsible for the maintenance, has the enough arguments for to make the decision of maintaining energized or to move away of service a team in operation that requires maintenance, for the maintenance of the team, it is convenient to consider the following aspects:
 - I file historical and analysis of results obtained in inspections and tests, is necessary also to consider the operative conditions of the teams, as well as the recommendations of the makers.
 - To establish the maintenance necessities for each team.
 - To formulate the activities of the maintenance programs.
 - To determine activities with maintenance priority for each team in particular.
 - He she should have specialized and competent personnel to carry out the maintenance activities to the team and to establish methods for their control.

A change of mentality is required in people and tools are used like:

- Engineering of the risk (to determine consequences of shortcomings that can be acceptable or not).
- Analysis of reliability (to identify feasible and profitable preventive tasks).
- It improves of the Maintenance (to reduce times and maintenance costs).

Results

Control and evaluation of the maintenance to electric substations by means of indicators of world class.

To know how efficient it is the planned maintenance politics's application, it is needed to control and to evaluate the administration of the maintenance, this allows to act in a quick and precise way about the weak factors in the maintenance [7]. They should be carried out concise and specific reports, formed by charts of indicators and their respective graphics for some of these, these reports should allow an analysis easy and appropriate at each administration level, on the base of indicators of world class, called this way to be used and obtained in almost all the countries in the same way, of the six indicators of world class, four refer at the analysis of the administration of teams and two to the administration of costs. In this alone work one kept in mind three indicators of the first group, the indicative Half Time For Repairs (THFR) it is not analyzed, to refer to repaired teams. And they were carried out the calculations of the indicative Half Time Among Failure (TMEF), the three analyzed indicators are:

Half Time For Repairs (THFR): relationship among the total time of intervention correct in a group of elements with flaw and the total number of flaws detected in those elements, in the observed period, has the following expression:

$$THFR = \frac{\sum HTMN}{NTMC} [h] \quad (1)$$

Where:

HTMN: total time of maintenance (h).

NTMC: total number of flaws detected in the observed period.

Available (A): percentage of the total time that the team was to disposition of the operation organ to carry out its activity.

$$A = \frac{HROP}{HROP + HTMN} \times 100 \quad (2)$$

Time Means Among Fails (TMAF): it indicates the interval of more probable time between an outburst and the appearance of a failure; that is to say, it is the time half lapsed until the arrival of the event failure. While adult is his value, adult it is the dependability of the component or team, he has the following expression:

Where:

NOIT: total of analyzed elements.

HROP: total time of operation (h).

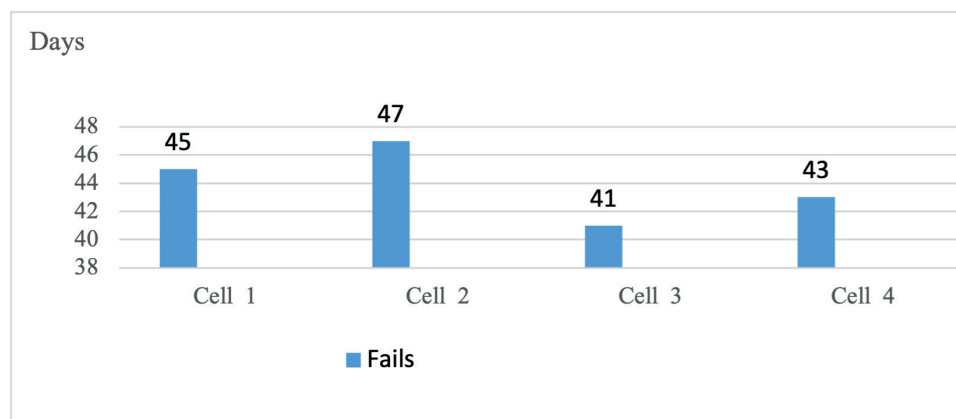
On this work line he goes the analysis to the cells that conform the electric substation of the group of distributed generation, keeping in mind the indicators mentioned previously and carrying out the calculation of the one Time Means Among Fails (TMAF) and the generated databases of the administration of the maintenance applied to the reference substation, it is obtained that the time average among shortcomings taking as example a cell that you conform it seven primary elements has like average two flaws in the trimester.

When keeping in mind the indicators mentioned previously and the generated databases of the administration of the maintenance applied to this electric substation of the group distributed generation, where the time average among shortcomings (1) it is considered much smaller than the time average to consider it appropriate. To demonstrate it he takes as example a cell (cell 1) where electric elements of power is analyzed that conforms it, a switch of high tension, four mensuration transformers (three transformers of currents and a potential transformer), a lightning

rod game and a bar switch all of a level of tension of 34,5 kV that he has like average two flaws in the trimester in some of the element that composes it, then applying the formula of time average among shortcomings has.

$$TAAS = \frac{7 \times 2160}{2} = 7560 \text{ [h]}$$

In the figure 1 are appreciated, by means of a graph of bars the obtained values of the half time among flaws for the cells 1, 2, 3 and 4, reflecting that the average among shortcomings in a cell is approximately of 44,25 days.



Figures 1. Time Means Among Fails (TMAF) for the first trimester of the year 2021. Source: [6].

When comparing the values of this indicator with some calculations carried out by the author in substations of external these they have given values of the half time among flaws many higher, where most of the elements begin to give signs of flaws or passed waste 90% of their useful life and others surpass their useful life without any problem and it is due to the correct application of the administration of the maintenance and the use of the techniques of diagnosis employees. For what the values goals of this indicator will depend on

New methodology

Methodology proposal for the maintenance to electric substations of 34, 5 kV used in the groups of distributed generation, the facilities of the groups for the distributed generation, even in these moments they play main list as complement of the generation it bases of the Electric System of Powers [8]., until it is not possible to modify the energy womb in the concerning thing to the electricity generation with renewable energy sources and keeping in mind the methodology from the maintenances to the electric substations of these facilities, they don't present a to proceed and the standards are applied settled down in the procedure of the electric substations of external in most of the cases and when not existing any foreseen diagnosis activity [9] and keeping in mind that this type of electric substation presents a specific situation for its configuration, that they are conformed by cells inside a local acclimatized to a work temperature among 21 and 23 °C, which is not always completed and a total staunchness doesn't exist that causes the accumulation of solids in suspension and soot that are deposited in the surfaces causing conduction between the active parts of the elements and earth. Existing jumps of potential not wanted that bear to flaws or exits outside of service of the electric cells, for what needs to diminish the frequency of verification of their bony parameters that the time between a maintenance or control of its parameters can vary, where a relationship of minimum time

is looked for to carry out the intervention before it happens the mishap [10-11], this leaning with an action of diagnostic termografico once a week like he/she is carried out in the electric substations of exterior that it allows the i monitor of the condition [12].

This proposal is based on the experience of the exploitation, maintenances and attention of the mishaps in the electric substation of the Group of 40 MW of the Distributed Generation that according to the studies and due carried out analysis to the frequent flaws presented in the cells that compose the electric substation bear to implement a technique of diagnostic of infrared termografía that is possible to execute, since it is had the technology and the realization of maintenances in a smaller term of time [13].

The indicators of administration of the maintenance once applied the new methodology, you can appreciate that it reaches a bigger dependability when diminishing the events of shortcomings or detection precociously their occurrence, which allows a better planning of the maintenance, in this case the events of observed failure, diminished their frequency, obtaining of the equation of time average among shortcomings, indexed to three months a value of: $TMAF = 30240 [h]$.

Carrying out a comparison with the time average of the previous methodology sees a substantial improvement, the time average among failure in the previous year's Table 1. With the previous methodology it was of approximately of 7560 [h] and now with the new methodology it is of 30240 [h], very superior value [14-15].

Table 1. Comparison of the time failure average, in the last three years.

Years	2020	2021	2022
Time average of failure	7555	7855	7560

Source: [6].

This new methodology is not static as the previous one that its planning is conceived following a constant pattern of carrying out the maintenances once a year, in this, the administration of the maintenance and their planning is carried out from chord to the condition, the obtained data of the visual impactions, the application of technical of diagnostic, historical data of the maintenances and its operation, which can be implemented through the methods of Artificial Intelligence achieving a bigger efficiency in the administration of the maintenance [16-17].

He she has been able to check that the elements with bigge index of failure probability in a cell constitutes it the switch of half tension, the transformers of bony mensuration the transformer of currents and that of potential and the lightning rod. The switch in the devaluation of their contact resistance, which brings gets a deterioration of their means of extinction of the arch, in this case the gas hexafloruro of sulfur (SF6). For what is very important their operational control through the statistic and using the curve of waste of their contacts given by the makers, it should be considered that the waste of the contacts has an exponential behavior

The other elements like they are the mensuration transformers and the lightning rod game, their main cause of flaws is the potential jumps among the active part and its isolation product of the relative condensation of the humid one that he/she has a behavior average of 80 % during the year.

We exemplify in the table 2 of the maintenance plan made for the substation, the concerning action to the cell 1, in this case only the switch of half tension the one is exposed which presents deviation of their value norm of contact resistance detected by the applied actions of diagnoses, the control of their operational parameters, but in the same one the rest of the components is captured that conforms it.

Table 2. Maintenance action and I diagnose programmed.

Teams to maintain.	That to verify.	Rhythm of the intervention.
Switch in Sf6 of 34,5 kV	- Pressure of the gas to the nominal value, Quality of the Gas. -Resistance contact dynamics. -Infrared termografía.	Once per week to carry out visual inspection and infrared termografía. Biannually cleaning and tests.
Switch of 34,5 kV.	-Resistance contac dynamics. -Infrared Termografía.	Once per week to carry out visual inspection and infrared termografía. Once a year maintenance.
Switch of earth.	-Absence of corrosion in the contacts. -Adjust correct of the screws. -He/she witnesses of fat in the union.	- Once a year maintenance.
Current transformer of 34,5 kV.	-Absence of corrosion in the borders of the unions.. -Adjust correct of the screws. - Infrared termografía.	Once per week to carry out visual inspection and infrared. Biannually cleaning and tests.
Potential transformer of 34,5 kV.	- Absence of corrosionn -Adjust correct of the screws. - Infrared termografía.	Once per week to carry out visual inspection and infrared termografía. Biannually cleaning and tests.
Lightning rod of 34,5 kV.	-Absence corrosion. - It proves of filtration current. -Infrared termografía.	Eleven per week to carry out visual inspection and infrared termografía. Once a year cleaning and tests.

Source: [6].

Conclusion

In the analysis that was carried out in the electric substation of the group electrógeno for the continuous mishaps taken place by jumps of currents in the elements that compose the electric cells, among the part you activate of the teams and earth that cause exits of service, with their inconveniences as they are lack of service to the client, repair of damaged elements that he brings gets expenses of material resources and of human capital and when not existing a procedure or methodology for the realization of the maintenances, the one is applied used in the substations of high tension of external in their majority of the cases, but the design of these substations conformed by cells inside an acclimatized local he has their specificities, besides not being carried out any type of diagnostic, it is necessary to establish a methodology for their conception,

For what is necessary to use as method of diagnostic the infrared termografía once per week, for which is had the necessary technical means as the infrared camera InfRec model R300R-D and this way to determine early the possible jumps of currents between the active part and earth.

References

- [1] IEEE Std C37.10. IEEE Guide for Investigation, Analysis, and Reporting of Power Circuit Breaker Failures. United States of America: IEEE, 2011.
- [2] CIGRÉ Working Group 13.06, "Final report of the second international enquiry on high voltage circuit-breaker failures and defects in service," *Int. Council Large Elect. Syst.* (CIGRÉ), Paris, France, Tech. Brochure 83, 2010
- [3] J. C. Casaña-Medel, I. Macías-Socarras, I. Morales-Tamayo, "El mantenimiento a partir de los indicadores de clases mundial en la fábrica Lácteos Bayamo" *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 2021, vol. 30, n. 3, p. 115–132 ISSN 2071 – 0054. [Consultado el 25 de enero de 2022]. Disponible en: <http://scielo.sld.cu>
- [4] B. Y. PEREA-LOZANO, H. N. LOPEZ SUAREZ, "Implementación de mantenimiento preventivo y predictivo en la empresa EQUIACERO SA" *Revista UNILIBRE* 2020, vol. 8, n. 3, p. 85–112
- [5] J. J. MONTANÉ-GARCÍA, S.A. DORRBERCKER-DRAKE, O. N. HERNÁNDEZ-AREU, "El mantenimiento a los transformadores de potencia; su análisis en el caso de una central termoeléctrica cubana". *Ingeniería Energética* Vol. XXXII, 2/2011 Abril – Julio p- 56- 64 ISSN 1815 – 5901.
- [6] C. RUANO-GONZÁLEZ, "Metodología para el mantenimiento de interruptores empleados en las maniobras de reactores y bancos de reactores". XIX Simposio de Ingeniería Eléctrica (SIE-2021). III Convención Científica Internacional 2021. Universidad Central de las Villas "Martha Abreu" Santa Clara. Noviembre 2021, ISBN:978-959-312-479-9.
- [7] Revista Mantenimiento Mundial. "Indicadores de Clase Mundial", vol. 3, núm 15[en línea]. [ref. de 16. de agosto 2019]. Disponible en Web: <http://www.mantenimientomundial.com>.
- [8] A. VÉLEZ-QUIROZ, M. FILGUEIRAS- SAINZ DE ROZAS, M. VILARAGUT- LLANES, *Revista Ingeniería Energética*. 2022. Vol. 43, núm. 3, septiembre/diciembre. ISSN: 1815-5901.
- [9] ABB. "Celdas Metal Clad-Metal Enclosed". 2020.
- [10] A. ROQUE-LOPEZ, "Transformadores Eléctricos". Universidad Nacional Autónoma De Honduras. Tegucigalpa 2019.
- [11] L. ZAPATA de la CRUZ, "Filosofía y generación de valores a través de la gestión de mantenimiento", 20 Congreso Peruano Ingeniería de Mantenimiento, Lima. 2020.
- [12] ITESA, soluciones de energía. "Celdas de Media Tensión: ¿Qué tipos hay?", [en línea] 2022. Disponible en Web: <http://www.itesa.com.pe>
- [13] R. Sánchez-Durán, "El futuro y el mantenimiento energético". Universidad de Sevilla (España). Tesis Doctoral. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=283233>, PP.234. 2020
- [14] A. Moreno-Muñoz, Máster en Ingeniería del Mantenimiento (MUEA), " Implementación del mantenimiento TPM, Técnicas Lean y 4.0", Mayo 2022.
- [15] C. DEUS- AGUILERA, J. CABRERA-GÓMEZ, Una mirada a la evolución natural del mantenimiento, Nota técnica 382, CubaMan, Diciembre de 2022.
- [16] Fujitsu, Observatorio de Industria 4.0. España, El Mantenimiento Predictivo en la Industria 4.0, Club Excelencia en Gestión: www.clubexcelencia.org. 2022
- [17] M. en C. M. Luna- Pérez., Doctorado en Ingeniería de Sistemas, Instituto Politécnico Nacional, SEPI ESIME Zacatenco, Diseño de una metodología de mantenimiento predictivo para asegurar procesos de producción de la industria 4.0, *South Florida Journal of Development*, Miami, v.2, n.1, p. 1009-1017, jan./feb. 2021. ISSN 2675-5459.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

El autor aquí firmante declara que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Comprobación de la eficiencia de aplicación con pulverizadora utilizando equipamiento de agricultura digital y de precisión y por medio de guía manual

Verifying the efficiency of application with a spray boom using digital and precision agriculture equipment and manual guidance

Hazel Priscilla Garro-Ureña¹, Isaac Javier Mora-González²,
Natalia Gómez-Calderón³, Oscar Quesada-Chacón⁴

Fecha de recepción: 29 de febrero, 2024
Fecha de aprobación: 17 de junio, 2024

Garro-Ureña, H.P.; Mora-González, I.J.; Gómez-Calderón, N.; Quesada-Chacón, O. Comprobación de la eficiencia de aplicación con pulverizadora utilizando equipamiento de agricultura digital y de precisión y por medio de guía manual. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 1. Enero-Marzo, 2025. Pág. 78-92.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i1.7046>

- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 prisci03gu20@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-3137-6468>
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 ijmora44@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0009-0005-2777-7869>
- 3 Escuela de Ingeniería Agrícola. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 ngomez@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-7961-7529>
- 4 Escuela de Ingeniería de Biosistemas, Universidad de Costa Rica, Costa Rica.
 oscar.quesadachacon@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0009-0006-6816-162X>

Palabras clave

Agricultura digital; tecnología; medio ambiente; procesamiento de datos; optimización.

Resumen

La agricultura digital es la evolución de la agricultura de precisión. Dentro de los avances tecnológicos más importantes en la agricultura se pueden encontrar los tractores con piloto automático, que permiten utilizar de una manera más eficiente los recursos. Por tanto, el proyecto validó la eficiencia de aplicación con pulverizadora comparando dos guías del tractor, una con piloto automático Trimble y otra con la guía manual de un operador al aplicar un compuesto a base de boro y penetrante vegetal. Se realizaron tres pases para cada una de las guías y se recopilaron los datos para posteriormente procesarlos y determinar el porcentaje de traslape presente en cada una. Además, se realizaron tres vuelos con dron, con el fin de observar por medio de imágenes multiespectrales los cambios en la vegetación, antes y posterior a la aplicación del compuesto. Con base a ello se logró concluir que, en los pases del tractor con la guía manual del operador, los porcentajes de traslape son mayores en comparación a los obtenidos mediante el uso de la guía del piloto automático. Además, se determinó que los costos del producto y el impacto ambiental aumentan de manera significativa cuando se usa la guía manual del operador en comparación a la guía automatizada. En los índices de vegetación únicamente SAVI mostró cambios significativos, mientras que los índices EVI y AVI no se deben de utilizar en estos casos, ya que presentan datos con una alta variación y una ausencia de estos.

Keywords

Digital agriculture; technology; environmental; data processing; optimization.

Abstract

Digital agriculture is the evolution of precision agriculture. Among the most important technological advances in agriculture, autopilot tractors allow the most efficient use of resources. Therefore, the project aims to validate the efficiency of sprayer application by comparing two tractor guides, one with Trimble autopilot and the other with an operator's manual guide, when applying a boron-based compound and plant penetrant. Each guide had three passes, collecting data for later processing to determine the percentage of overlap in each. In addition, the team performed three drone flights to capture multispectral images and observe changes in vegetation before and after applying the compound. Based on this, it was concluded that the tractor passes with operator's manual guidance have a higher overlap percentage than those obtained using the autopilot guide. Moreover, it was determined that product costs and environmental impact increase significantly when manual operator guidance is used compared to automated guidance. In the vegetation indices, only SAVI showed significant changes, while the EVI and AVI indices should not be used in these cases, since they present data with a high variation and an absence of these.

Introducción

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO)[1], menciona un aumento de un 30% en el uso de pesticidas a nivel mundial entre el año 2000 y el 2020. Mientras que el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) señala altos índices de uso de plaguicidas en Costa Rica, superior a los índices de los países que

pertenecen a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) de América. El Servicio Fitosanitario del Estado de Costa Rica establece un uso promedio de 11,5 kg por hectárea, sin embargo, el PNUD indica que el promedio entre el año 2012 y 2022 de uso de plaguicidas fue de 34,45 kg por hectárea [2].

Debido al crecimiento de la población mundial, la demanda de alimentos crecerá una tercera parte de la actual para el año 2050. Para lograr satisfacer esta demanda, la agricultura debe adquirir el reto de producir más, con menos recursos, abriendo paso así a la agricultura digital, para así proveer de los alimentos necesarios de una manera más eficiente [3]. El aumento de la población entre el año 2002 y el 2018 fue de un 21%, este aumenta la demanda de alimentos que influye en la intensificación agrícola, que a su vez está asociado a un aumento del uso de plaguicidas [4]. Por esta razón, conforme con el Banco Mundial [5] es necesario que la agricultura se adapte a los cambios tecnológicos, los cuales son necesarios para alcanzar un mayor desarrollo económico y ambiental, y así cumplir con la demanda alimenticia. La agricultura es una de las actividades económicas que más generan impacto ambiental, sin embargo, con el uso de las tecnologías se contribuye a disminuirlo. La automatización en la agricultura permite incrementar la productividad, mejorar la calidad de los productos, el uso eficiente de los recursos, y contribuir en un desarrollo sostenible con el ambiente [6].

La agricultura digital a su vez busca contribuir en el alcance de los objetivos del Desarrollo Humano Sostenible (ODS), específicamente el Objetivo 2 (hambre cero), Objetivo 6 (agua limpia y saneamiento), Objetivo 9 (Industria, innovación e infraestructura) y Objetivo 12 (Producción y consumo responsables). Este proyecto pretende contribuir la meta 12.4, la cual busca “lograr la gestión ecológicamente racional de los productos químicos y de todos los desechos a lo largo de su ciclo de vida, de conformidad con los marcos internacionales convenidos, y reducir significativamente su liberación a la atmósfera, el agua y el suelo a fin de minimizar sus efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente” [7].

Por consiguiente, el proyecto se enfocará en la recopilación de datos de la aplicación de una mezcla a base de boro y penetrante vegetal como identificador visual, que además simule la aplicación de herbicida mediante la utilización de una pulverizadora suspendida, comparando los rendimientos de aplicación utilizando el piloto automático y la guía manual del operador para un tractor agrícola categoría II.

Materiales y métodos

La evaluación de la eficiencia de la pulverizadora con piloto automático se realizó en el campo de Laboratorio de Maquinaria Agrícola de la Escuela de Ingeniería Agrícola, del Instituto Tecnológico de Costa Rica, en la Sede Central. El área de estudio presenta una pendiente transversal de 1.72% y longitudinal de 7.76%, con un tipo de suelo arcilloso, el cual fue dividido en dos parcelas experimentales sembradas de pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis*) (Figura 1). Cada parcela experimental fue aplicada con una mezcla de compuesto de boro y penetrante vegetal como indicador visual con tres pases en paralelo a la pendiente haciendo uso de la pulverizadora en cada pase, grabando el recorrido y comparar las áreas cubiertas utilizando guía automática y guía manual. La operación se replicó tres veces, con dos pases de control sin el producto y uno con la aplicación de la mezcla.

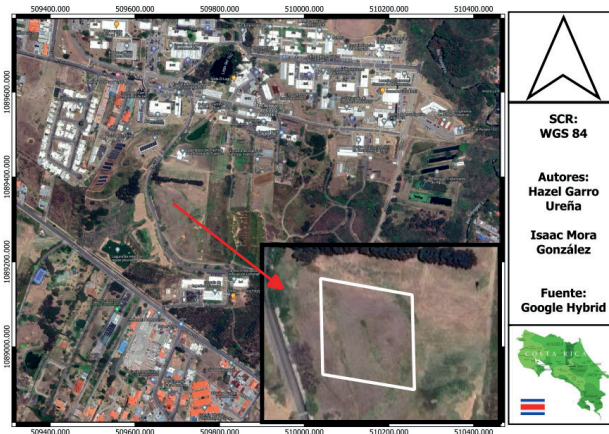


Figura 1. Área experimental para la prueba con pulverizadora.

Delimitación del área experimental

La delimitación de las dos parcelas experimentales se realizó mediante la colocación de marcadores de campo. En la parcela en la que se utilizó la guía manual del operador, se colocaron 4 marcadores de campo espaciados a 9.60m, equivalentes al ancho de trabajo de la pulverizadora, que delimitaron cada pase, para indicarle al operador el ancho de trabajo. Mientras que en la guía con piloto automático se colocaron únicamente dos marcadores con un espacio entre ellos de 28.80m, equivalentes a los 3 pases, ya que en esta guía no se requiere las marcas en campo que delimitan cada pase, dado que el acomodo del tractor en cada uno se realizó con la ayuda del piloto automático.

Características del equipo utilizado

Se realizó el levantamiento topográfico de las estacas colocadas en la delimitación del área con el uso de GNSS-RTK marca Geomax, para contar con el área georreferenciada y determinar la pendiente promedio del área de estudio. Las capturas de las imágenes multiespectrales se realizaron con un vehículo aéreo no tripulado -VANT- DJI Matrice-300 RTK, equipado con una cámara multiespectral modelo MicaSense. Además, se utilizó un sistema de piloto automático RTK Trimble GFX-750. La aplicación de la mezcla del compuesto a base de boro y penetrante vegetal y los pases de control se realizaron con el tractor SAME-Explorer 75 (Cuadro 1) y una pulverizadora Montana 400-TLP (Cuadro 2). La parametrización del sistema de piloto automático se muestra en la Figura 2.

Cuadro 1. Especificaciones del tractor.

Marca y modelo	SAME Explorer 75
Categoría	2
Potencia (HP)	75
Toma de fuerza	540 rpm

Cuadro 2. Especificaciones de la pulverizadora.

Marca y modelo	Montana 400-TLP
Ancho de trabajo (m)	9,60
Ancho de transporte (m)	2,10
Cantidad de boquillas	20
Modelo de boquilla	Magnum 11003-BD
Espaciado entre boquillas (m)	0,5
Tipo de enganche	Tres puntos

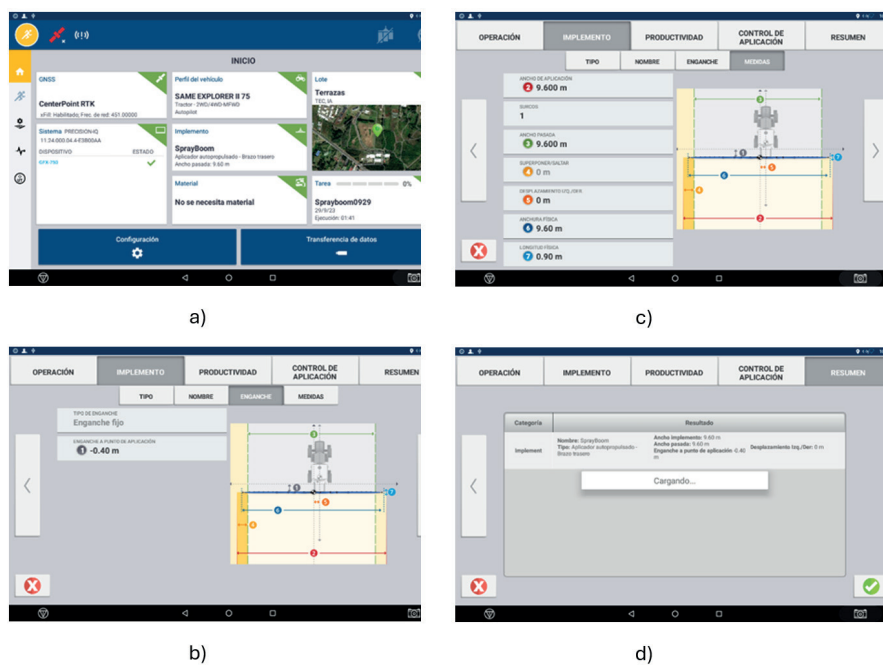


Figura 2. Parametrización de la tarea en el sistema de piloto automático del tractor (a) y del implemento pulverizador utilizado (b, c y d)

Procedimiento experimental

Una vez establecido el diseño experimental se establecieron puntos fijos georreferenciados con RTK en el área de estudio, para dividir las dos parcelas propuestas y ubicar el punto en donde se colocó la base del piloto automático y la antena RTK del VANT. Los pases con la guía del piloto automático se realizaron con la función de línea A-B integrada dentro del software del piloto automático Trimble GFX-750, la cual permite definir la ruta que seguirá el tractor (Figura 3 y Cuadro 3). En la guía manual con operador, se colocaron conos de seguridad sobre los marcadores de campo con el fin de resaltar el inicio y fin de cada uno de los pases. Asimismo, se colocaron en los marcadores de campo, cuerda para la simulación de eras de cultivo, contemplando el ancho de trabajo de la pulverizadora, en los pases con la guía manual del operador (Figura 3). Las especificaciones del vuelo se muestran en el Cuadro 4.

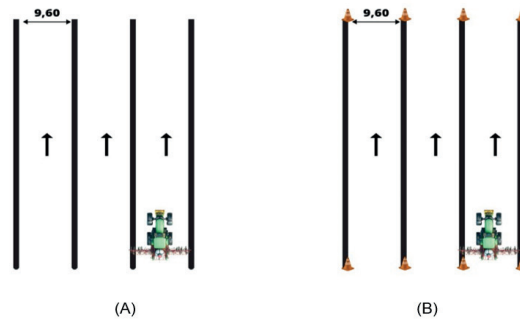


Figura 3. Diseño experimental de las pruebas con la guía del sistema de piloto automático (A) y con la guía manual (B).

Cuadro 3. Especificaciones del diseño experimental a seguir con la guía del sistema de piloto automático para cada parcela.

Guía del tractor	Piloto automático	Operador
Cantidad de pases	Tres	Tres
Aplicación del producto	Una	Una
Repeticiones de control	Dos	Dos
Velocidad de avance del tractor	2.02 km/h	2.02 km/h
Revoluciones del tractor	2200rpm	2200rpm
Marcha y gamma del tractor	3L	3L
Altura de la pulverizadora	50 cm	50 cm
Presión de la bomba	25-50 psi	25-50 psi
Dirección de pase	Norte-Sur, a favor de pendiente	Norte-Sur, a favor de pendiente
Captura de imagen multiespectral	A una altura de vuelo de 80 m, se realizaron 3 vuelos de captura de imágenes con VANT equipado con cámara multiespectral, antes de la aplicación de la mezcla del compuesto a base de boro y penetrante vegetal, una semana después y dos semanas después.	A una altura de vuelo de 80 m, se realizaron 3 vuelos de captura de imágenes con VANT equipado con cámara multiespectral, antes de la aplicación de la mezcla del compuesto a base de boro y penetrante vegetal, una semana después y dos semanas después.

Cuadro 4. Especificaciones del VANT y cámara multiespectral para la captura de imágenes.

Altura del vuelo (m)	80
Velocidad horizontal del vuelo (m/s)	3,9
Superposición	75 %
Tamaño del pixel (cm/pixel)	3.79
Tamaño del sensor (mm)	Anchura: 5.04 Altura: 3.78

Una vez realizados los pases con el tractor en el área experimental, se descargaron los datos obtenidos con el piloto automático para analizar las áreas de aplicación, traslapes de la pulverizadora y tiempos de duración. Mediante los softwares Trimble AG y QGIS, se determinaron las áreas parciales de cada una de las pasadas con los equipos, y el área total de trabajo realizado, para obtener el porcentaje de traslape que presenta, tanto en los pases con piloto automático como los realizados mediante la guía manual del operador. Además, con esta información de áreas se determinó el coeficiente de uniformidad de aplicación según [10] y rendimiento del equipo al realizar aplicaciones con la guía del piloto automático y con la guía del operador.

Por otro lado, basado en los tiempos de aplicación y el área cubierta, se determinaron los costos asociados a la cantidad de producto aplicado, así como el costo económico del uso de la maquinaria necesaria para realizar la aplicación con pulverizadora y se hizo una estimación del impacto ambiental causado, utilizando método de arboleda [11].

Obtención de índices de vegetación

Se obtuvieron los índices de vegetación para el área de estudio antes de la aplicación de la mezcla, 8 días después y 15 días después. Se utilizaron índices de vegetación que se muestran a continuación, con su respectiva ecuación obtenida de [10]:

1.1.1. Índice de vegetación resistente a la atmosfera (ARVI):

$$ARVI = \frac{NIR - (2 * RED) + BLUE}{NIR + (2 * RED) + BLUE} \quad \text{Ecuación 1}$$

1.1.2. Índice de vegetación avanzada (AVI):

$$AVI = NIR * (1 - RED) * (NIR - RED)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ecuación 2}$$

1.1.3. Índice de vegetación mejorado (EVI):

$$EVI = 2.5 * \frac{NIR - RED}{NIR + 6 * RED - 7.5 * BLUE + 1} \quad \text{Ecuación 3}$$

1.1.4. Índice de clorofila (GCI):

$$GCI = \left(\frac{NIR}{GREEN} \right) - 1 \quad \text{Ecuación 4}$$

1.1.5. Índice de vegetación de la diferencia normalizada verde (GNDVI):

$$GNDVI = \frac{NIR - GREEN}{NIR + GREEN} \quad \text{Ecuación 5}$$

1.1.6. Índice de vegetación diferenciada normalizada (NDVI):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad \text{Ecuación 6}$$

1.1.7. Índice de contenido de clorofila en la vegetación (NPCRI):

$$NPCRI = (RED - BLUE) / (RED + BLUE) \quad \text{Ecuación 7}$$

1.1.8. Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI):

$$SAVI = 1.5 * \frac{NIR - RED}{NIR + RED + 0.5} \quad \text{Ecuación 8}$$

1.1.9. Índice de pigmento insensible a la estructura (SIPI):

$$SIPI = (NIR - BLUE)/(NIR + BLUE) \quad \text{Ecuación 9}$$

1.1.10. Índice de vegetación de diferencia normalizada Red Edge (NDVI REEDGE):

$$NDVI \text{ REEDGE} = \frac{RED \text{ EDGE} - RED}{RED \text{ EDGE} + RED} \quad \text{Ecuación 10}$$

1.1.11. Índice de diferencia normalizada al borde rojo (NDRE):

$$NDVI = \frac{NIR - RED \text{ EDGE}}{NIR + RED \text{ EDGE}} \quad \text{Ecuación 11}$$

Procesamiento de datos

Para conocer los tiempos de duración, velocidades de avance y áreas de cada pasada se descargó la información que brinda el piloto automático mediante la aplicación de Trimble AG. Estos datos fueron analizados tanto en QGIS, para la creación de mapas de pases y de traslape, como en Excel para determinar el porcentaje de traslape y eficiencia de aplicación. Con el resultado de las imágenes se creó el mapa de imágenes multiespectrales, mediante QGIS, previo a la aplicación de la mezcla del compuesto y posterior. Finalmente, con la información recopilada se realizó un análisis de varianza mediante el software InfoStat para la confección de análisis de varianzas (ANOVAS) para medir la uniformidad y eficiencia de aplicación entre las dos parcelas. De esta manera se hicieron las comparaciones y recomendaciones validadas a los productores agrícolas y se determinó el impacto ambiental y económico de la aplicación con pulverizadora en la guía manual del operador y con piloto automático. La generación de los gráficos de los índices de vegetación se realizó con el software R Studio.

Resultados

En la Figura 4 se muestra la cobertura de los tres pases con la pulverizadora en las parcelas experimentales. En la comparación de los porcentajes de traslape para los dos pases de control realizados y el pase para la aplicación de la mezcla del compuesto a base de boro y penetrante vegetal (Figura 5), se observa como en los tres casos, al realizar los pases del tractor con la guía manual del operador, los porcentajes de traslape son mayores en comparación a los porcentajes de traslape obtenidos por medio de los pases realizados mediante el uso de la guía del piloto automático. La diferencia entre la guía manual y la guía automática para el pase de control 1 es de 1.8%, para el pase de control 2 es de 0.9%, mientras que para el pase de la aplicación del producto es de un 1.8%.

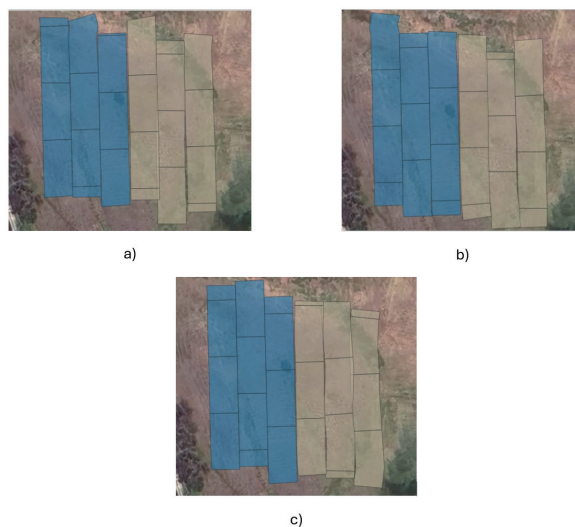


Figura 4. Áreas experimentales aplicadas en las pruebas (a y b) y con la mezcla de boro y aceite vegetal (c).

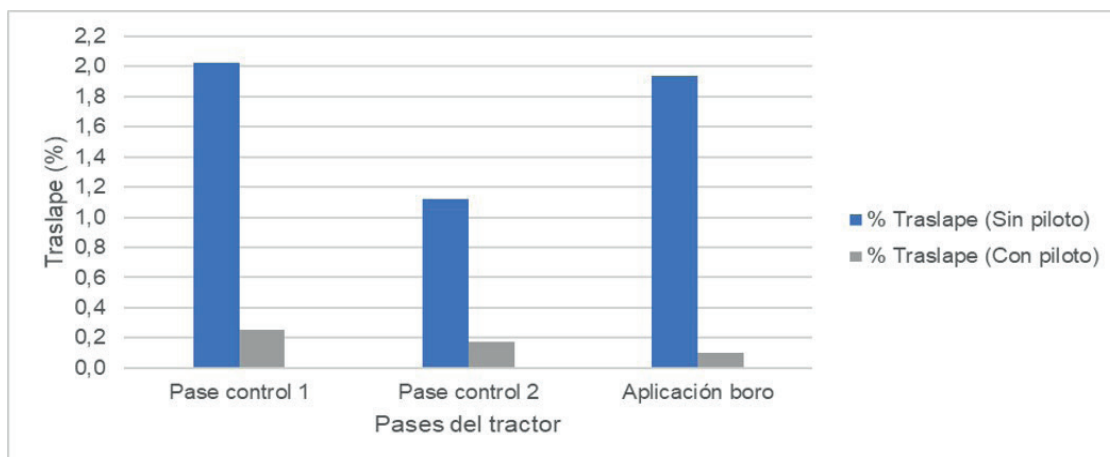


Figura 5. Comparación del porcentaje de traslape entre la guía manual y la guía automática del tractor.

La Figura 6 muestra las áreas (m^2) en las cuales no hubo aplicación de la mezcla del compuesto a base de boro y penetrante vegetal. De igual manera que en el porcentaje de traslape, se observa que la diferencia entre los pases realizados por medio de la guía manual del operador en comparación a los pases realizados por medio de la guía del piloto automático presenta variaciones significativas en las áreas que no fueron aplicadas por el producto. En este caso para la guía con el piloto automático las áreas sin aplicación fueron menores en comparación a las áreas sin aplicación obtenidas en los pases con la guía manual del operador.

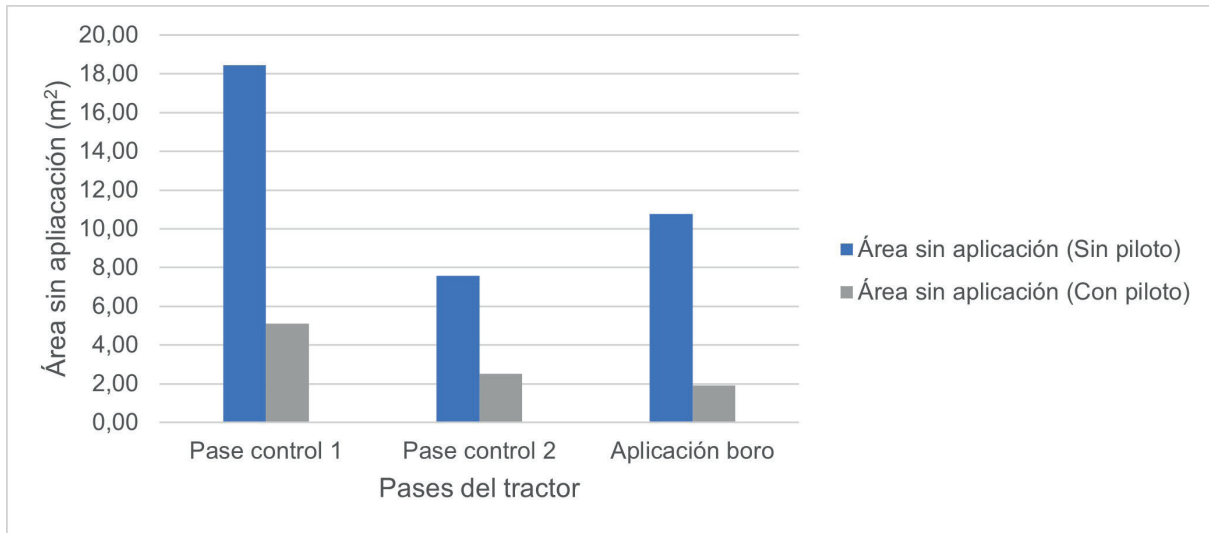


Figura 6. Comparación de las áreas sin aplicación entre la guía manual y la guía automática del tractor.

En referencia al aspecto económico, en la Figura 7 se puede notar como en la guía del tractor por medio del uso del piloto automático los costos en porcentaje del producto aplicado son menores, sin embargo, el costo por el uso del tractor (Figura 8) en los pases realizados mediante la guía automatizada por medio del piloto automático fueron mayores en dos de los tres pases realizados, en comparación a los costos obtenidos en la guía manual por medio de un operador. Esto debido a que las dimensiones de las áreas no son exactamente iguales, sin embargo, el costo del uso del tractor no se ve influenciado por el uso del piloto automático, ya que con y sin piloto automático el promedio de la velocidad en las dos áreas experimentales es la misma. Basado en la Figura 7 la diferencia en el costo del producto trasladado para el pase de control 1 es de 0.72 %, para el pase de control 2 es de 0.39 % y para el pase de la aplicación de boro la diferencia fue del 0.73 %. Por otro lado, en relación con el costo del uso del tractor (Figura 8), para el pase de control 1, la diferencia es de 0.03 %, para el pase de control 2 es de 0.03%, mientras que para el pase para la aplicación de boro la diferencia fue del 0.13 %. De los anterior se puede observar que la diferencia es mayor en la comparativa de los costos asociados a la aplicación del producto, que en la diferencia de los costos asociados al uso del tractor.

Cabe destacar, que, dentro de los cálculos realizados para obtener el costo del producto aplicado, se tomó en cuenta un costo del agua de \$ 0.0018 por litro, según lo establece SENARA para la utilización de agua para riego agrícola.

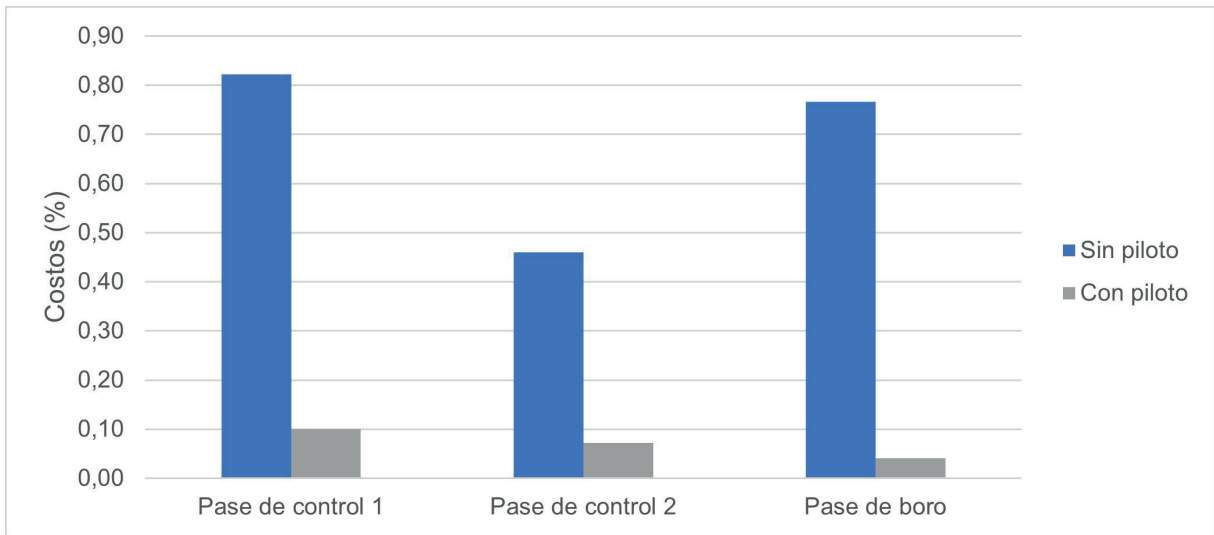


Figura 7. Comparación de los costos del producto aplicado mediante la guía manual y la guía automática.

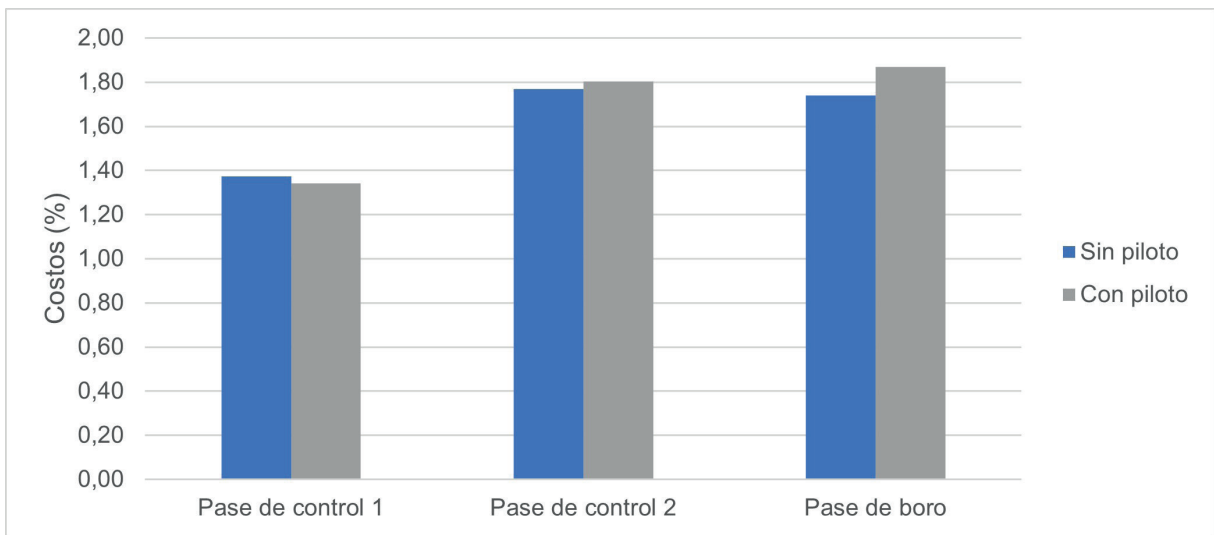


Figura 8. Comparación de los costos por uso del tractor mediante la guía manual y la guía automática.

Con respecto a la evaluación del impacto ambiental realizada se obtuvo que los factores ambientales que se ven afectados en la aplicación con pulverizadora son el suelo, biótico, socioeconómico, agua y aire. En la Figura 9 y Figura 10 se evidencia los resultados obtenidos en la evaluación realizada a la aplicación con la guía manual del operador y la guía con piloto automático, respectivamente. Se destaca en el factor suelo la única diferencia entre ambos métodos de guía del tractor, ya que la importancia del impacto ambiental para el suelo en los pases realizados con la guía manual del operador se clasifica como de importancia moderada, mientras que los pases realizados por medio de la guía automatizada son clasificados como irrelevantes, esto se asocia al porcentaje de traslape obtenido en las pruebas, en donde el mismo fue mayor en los pases con la guía manual del operador, como se evidenció anteriormente, por lo cual se produce una afectación mayor al suelo debido al exceso de producto aplicado.

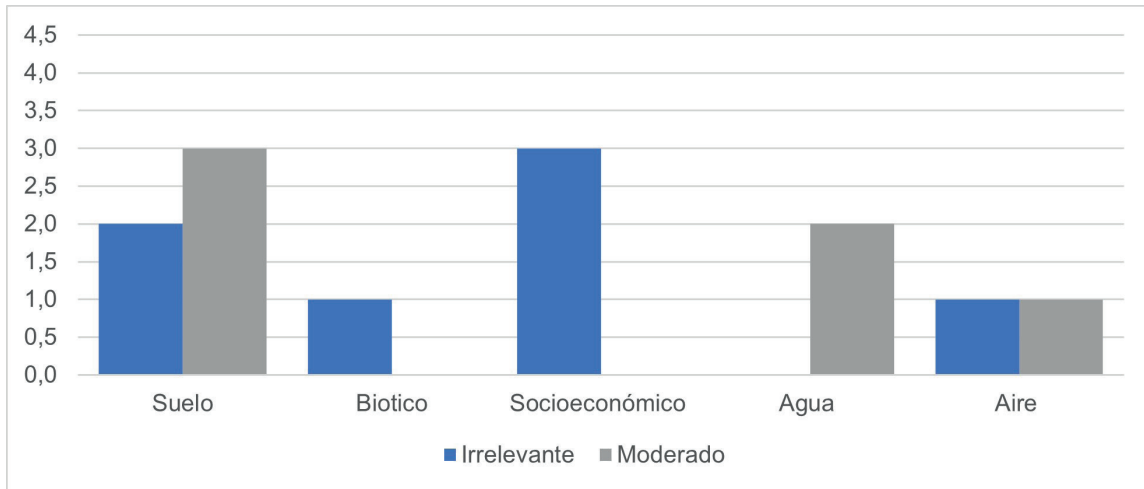


Figura 9. Evaluación del impacto ambiental para los pases realizados con la guía manual del operador.

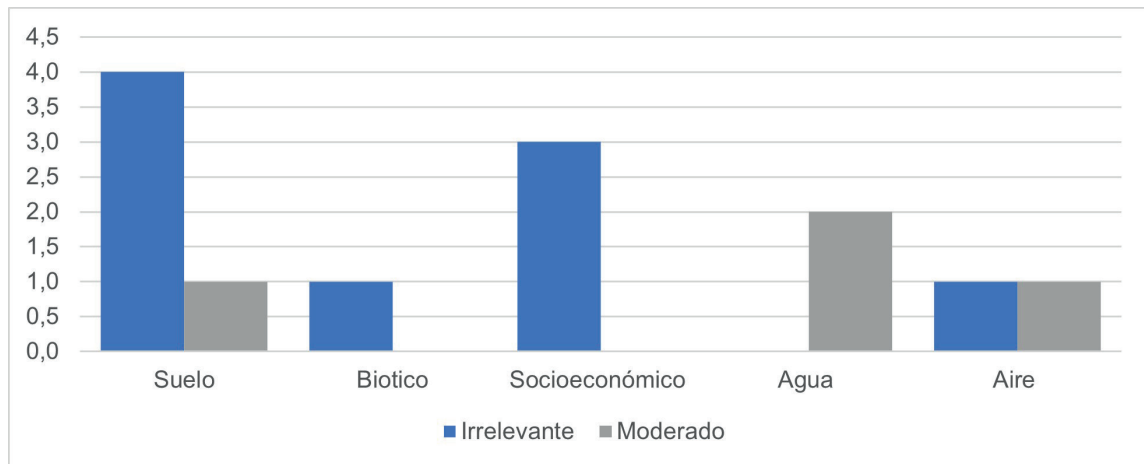


Figura 10. Evaluación del impacto ambiental para los pases realizados con la guía del piloto automático.

Obtención de índices de vegetación

A partir de las imágenes multiespectrales se analizaron los índices de vegetación: NDVI, ARVI, SAVI, SIPI, EVI, GCI, GNDVI, NPCRI, NDVI Red Edge, NDRE y AVI. Siendo el índice AVI el único que arrojó datos incompletos los cuales no fueron posibles de procesar, por lo que dicho índice no fue utilizado. Por otra parte, cabe destacar como el índice EVI, presenta mucha dispersión en sus datos, como se observa en la Figura 11 y Cuadro 5, por lo cual también fue descartado. En el Cuadro 4 donde se muestran los promedios, desviación y variación de los índices de vegetación, se nota como el índice SAVI es el único de todos los índices que se procesaron, que muestra diferencias significativas en los datos de los 8 días posteriores a la aplicación, tanto para las áreas traslapadas y las de sin traslape, por lo cual este es el único índice que puede ser utilizado para representar los cambios en la vegetación posterior a la aplicación del compuesto de boro y penetrante vegetal. En los índices, exceptuando AVI, EVI y SAVI, los datos obtenidos a partir de las imágenes multiespectrales de antes de la aplicación, a los 8 días después y a los 15 días después no presentan diferencias significativas, por lo cual no son útiles como indicadores visuales para este proyecto.

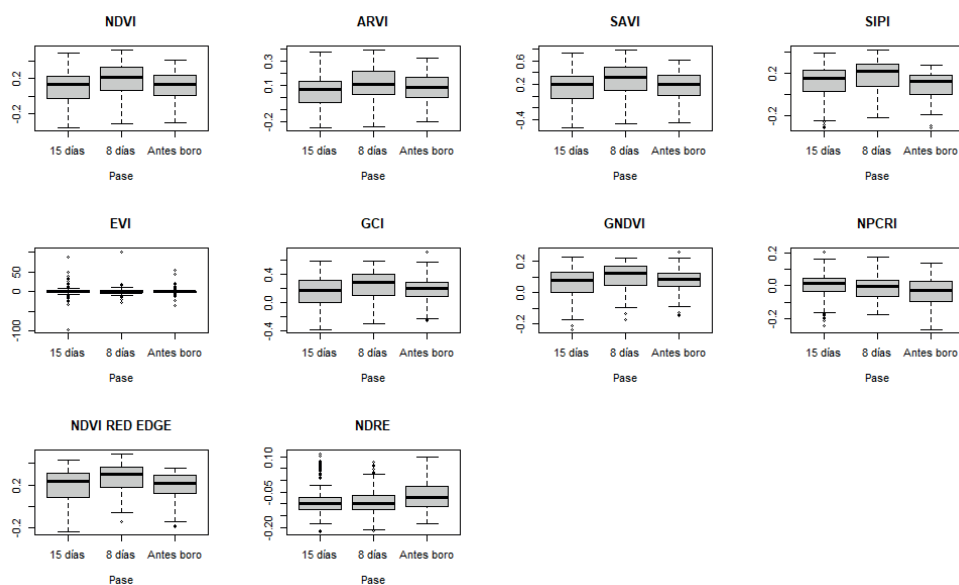


Figura 11. Comparación de la dispersión en los diferentes índices de vegetación utilizados.

Cuadro 5. Promedio, variación y desviación de los índices de vegetación.

Traslape	Índice de vegetación	15 DÍAS			8 DÍAS			ANTES		
		Promedio*	Desviación estandar	Varianza	Promedio*	Desviación estandar	Varianza	Promedio*	Desviación estandar	Varianza
CON	ARVI	0,142 ^{bc}	0,160	0,026	0,182 ^{bc}	0,122	0,015	0,149 ^{bc}	0,117	0,014
CON	EVI	-2,146 ^a	12,125	147,023	-2,401 ^a	5,235	27,409	-0,973 ^{ab}	2,141	4,582
CON	GCI	0,172 ^{bc}	0,227	0,051	0,252 ^{bc}	0,156	0,024	0,163 ^{bc}	0,166	0,028
CON	GNDVI	0,068 ^{bc}	0,105	0,011	0,107 ^{bc}	0,067	0,004	0,070 ^{bc}	0,075	0,006
CON	NDRE	-0,052 ^{bc}	0,091	0,008	-0,060 ^{bc}	0,072	0,005	-0,027 ^{bc}	0,070	0,005
CON	NDVI	0,199 ^{bc}	0,227	0,051	0,267 ^{bc}	0,167	0,028	0,193 ^{bc}	0,169	0,029
CON	NDVI rd	0,252 ^{bc}	0,156	0,024	0,326 ^{bc}	0,107	0,011	0,221 ^{bc}	0,116	0,013
CON	NPCRI	-0,057 ^{bc}	0,090	0,008	-0,058 ^{bc}	0,062	0,004	-0,089 ^{bc}	0,072	0,005
CON	SAVI	0,298 ^{bc}	0,340	0,116	0,401 ^{bcd}	0,251	0,063	0,290 ^{bc}	0,253	0,064
CON	SIPI	0,149 ^{bc}	0,169	0,028	0,217 ^{bc}	0,135	0,018	0,109 ^{bc}	0,123	0,015
SIN	ARVI	-0,002 ^{bc}	0,092	0,008	0,057 ^{bc}	0,094	0,009	0,019 ^{bc}	0,086	0,007
SIN	EVI	2,246 ^{de}	11,924	142,192	2,565 ^e	14,793	218,823	1,085 ^{cde}	10,847	117,656
SIN	GCI	0,137 ^{bc}	0,196	0,039	0,258 ^{bc}	0,215	0,046	0,224 ^{bc}	0,167	0,028
SIN	GNDVI	0,056 ^{bc}	0,090	0,008	0,106 ^{bc}	0,089	0,008	0,096 ^{bc}	0,067	0,004
SIN	NDRE	-0,108 ^{bc}	0,022	0,000	-0,110 ^{bc}	0,025	0,001	-0,097 ^{bc}	0,039	0,002
SIN	NDVI	0,031 ^{bc}	0,152	0,023	0,115 ^{bc}	0,148	0,022	0,049 ^{bc}	0,127	0,016
SIN	NDVI rd	0,136 ^{bc}	0,141	0,020	0,221 ^{bc}	0,129	0,017	0,144 ^{bc}	0,135	0,018
SIN	NPCRI	0,046 ^{bc}	0,038	0,001	0,021 ^{bc}	0,040	0,002	0,020 ^{bc}	0,060	0,004
SIN	SAVI	0,046 ^{bc}	0,228	0,052	0,172 ^{bc}	0,223	0,050	0,074 ^{bc}	0,190	0,036
SIN	SIPI	0,076 ^{bc}	0,135	0,018	0,136 ^{bc}	0,131	0,017	0,069 ^{bc}	0,108	0,012

* Para cada índice de vegetación, letras iguales no presentan diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$) según la prueba de Tukey.

Tal y como lo se menciona en [12] y [13], la distribución de los datos es un factor a considerar debido a que los cuantiles 25 y 75, valores mínimos o máximos podrían correlacionar con algunas otras variables al hacer el análisis de índices de vegetación. Como recomendación para futuras evaluaciones de pases de maquinaria agrícola, se recomienda considerar aspectos agronómicos de la cobertura sobre la que se hagan los estudios y descartar índices previamente evaluados en este proyecto. La metodología de evaluación del traslape por medio de índices de vegetación es válida cuando se presenten diferencias significativas entre índices evaluados.

Conclusiones

Existe una mayor diferencia en el área traslapada cuando se hace uso de la guía manual del operador con respecto a cuando se hace uso de la guía automatizada por medio del piloto automático.

Los costos de la aplicación debido a la cantidad del producto utilizado son menores cuando se utiliza la guía automatizada del tractor en comparación a la guía manual del operador. Por otro lado, los costos obtenidos relacionados al uso del tractor son mayores en los pases con la guía automatizada que los obtenidos con la guía manual. Sin embargo, la diferencia entre los costos relacionados al uso del tractor entre la guía manual y la guía automatizada no es significativa, como si lo es en los costos del producto.

En el aspecto ambiental no hay grandes diferencias entre las guías realizadas, las únicas diferencias que se destacan son las relacionadas al factor suelo, en donde se clasifica como de importancia moderada el impacto ambiental generado en los pases por medio de la guía manual, mientras que en la guía automatizada este factor se clasificó como de importancia irrelevante.

El índice de vegetación que se debe utilizar para notar los cambios realizados por el producto sobre la vegetación presente en las parcelas experimentales es el índice SAVI. Además, los índices NDVI, ARVI, SIPI, GCI, GNDVI, NPCRI, NDVI Red Edge y NDRE no presentan diferencias significativas en las imágenes capturadas antes de la aplicación, 8 días después y 15 días después de la aplicación, para considerarse como un buen indicador visual para este tipo de aplicación. La metodología utilizada es válida para evaluar la eficiencia de la aplicación con pulverizadora, cuando los índices de vegetación muestren diferencias significativas con respecto a otros en el mismo tiempo del estudio de las imágenes multiespectrales.

Agradecimientos

A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) del Instituto Tecnológico de Costa Rica por promover la investigación estudiantil, a la Escuela de Ingeniería Agrícola del Instituto Tecnológico de Costa Rica, a las empresas CRAISA y GEOINN por su colaboración con la academia y a Guillermo Navarro Martínez por su ayuda en la operación de los equipos.

Referencias

- [1] FAO, «Statistical Yearbook,» Roma, 2022.
- [2] E. Vargas Castro, «Uso aparente de plaguicidas en la agricultura de Costa Rica,» Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Costa Rica, 2021.
- [3] N. Gómez , K. Villagra y M. Solorzano , «La labranza mecanizada y su impacto en la conservación del suelo (revisión de literatura),» Tecnología en marcha, vol. 31, n° 1, 2018.
- [4] M. Hernández y N. Chavez, «PNUD,» 2022. [En línea].

- [5] Banco Mundial, «Banco Mundial,» 2019. [En línea].
- [6] FAO, «Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.fao.org/3/cb9479es/online/cb9479es.html>.
- [7] Objetivos de Desarrollo Sostenible, «ODS,» [En línea]. [Último acceso: 2023].
- [8] N. Gomez, F. Watson y M. Solórzano, «Importancia de los coeficientes de uniformidad en las operaciones agrícolas asistidas por maquinaria (Nota técnica),» Tecnología en marcha, vol. 36, n° 1, pp. 163-177, 2023.
- [9] L. Martínez, «Análisis comparativo entre el Método Leopold y el EPM-Arboleda para la identificación de impactos ambientales en la intervención de vías principales urbanas,» Bucaramanga, 2020.
- [10] V. Henrich, G. Krauss, C. Götze y C. Sandow, «Indexdatabase,» 2012. [En línea]. Available: <https://www.indexdatabase.de/db/i.php?&order=-name>.
- [11] A. Madriz, «Costa Rica: el país verde que urge de un monitoreo de plagues altamente peligrosas,» La República, 2022.
- [12] Watson-Hernández, F., Gómez-Calderón, N., & da Silva, R. P. (2022). Oil Palm Yield Estimation Based on Vegetation and Humidity Indices Generated from Satellite Images and Machine Learning Techniques. *AgriEngineering*, 4(1), 279–291. <https://doi.org/10.3390/agriengineering4010019>
- [13] Tan, C., Zhou, X., Zhang, P., Wang, Z., Wang, D., Guo, W., & Yun, F. (2020). Predicting grain protein content of field-grown winter wheat with satellite images and partial least square algorithm. *PLOS ONE*, 15(3), e0228500. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0228500>

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

El autor aquí firmante declara que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Impacto de los marcos de gobierno de TI en la seguridad de la información de las organizaciones







Impact of IT governance frameworks on information security in organizations

Luis Rolando Lecca-Rengifo¹, Harrison Jordi Paz-Medrano², Alberto Carlos Mendoza de los Santos³

Fecha de recepción: 6 de febrero, 2024
Fecha de aprobación: 28 de mayo, 2024

Lecca-Rengifo, L.R; Paz-Medrano, H.J; Mendoza de los Santos, A.C. Impacto de los marcos de gobierno de TI en la seguridad de la información de las organizaciones. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 1. Enero-Marzo, 2025. Pág. 93-103.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i1.7048>

- 1 Escuela de Ingeniería. Universidad Nacional de Trujillo, Perú.
 llecca@unitru.edu.pe
 <https://orcid.org/0000-0003-1005-1744>
- 2 Escuela de Ingeniería. Universidad Nacional de Trujillo, Perú.
 hpazm@unitru.edu.pe
 <https://orcid.org/0000-0003-3201-109X>
- 3 Departamento de Ingeniería. Universidad Nacional de Trujillo, Perú.
 amendezad@unitru.edu.pe
 <https://orcid.org/0000-0002-0469-915X>

Palabras clave

Efecto; impacto; marco de gobierno de TI; organización; seguridad de información.

Resumen

Proteger los activos de la empresa es una labor imprescindible de toda organización; realizar planificaciones, controles y todo un despliegue de actividades para salvaguardar la información de las empresas es una función que todo encargado del área tecnológica tiene que estar en constante monitoreo, para ello los marcos de gobierno de TI trazan un rumbo para poder realizar actividades que mejoren todos las áreas de una organización en cuanto al uso de recursos tecnológicos, pero es necesario tener claro en cuanto se mejora. En la presente investigación se evalúa el impacto de los marcos de gobierno de TI en la seguridad de la información de las organizaciones, así como la comparativa entre los marcos de gobierno para poder llegar a la conclusión de que marcos de gobierno de TI son los que mejor ayudan para la preservación de la seguridad de la información.

Keywords

Effect; impact; IT governance framework; organization; information security.

Abstract

Protecting the company's assets is an essential task for any organization; planning, controls and a whole deployment of activities to safeguard the company's information is a function that every person in charge of the technological area has to be constantly monitoring, for this purpose the IT governance frameworks outline a course to be able to carry out activities that improve all the areas of an organization in terms of the use of technological resources, but it is necessary to be clear about how much it is improved. This research evaluates the impact of IT governance frameworks on information security in organizations, as well as the comparative between governance frameworks in order to reach the conclusion that IT governance frameworks are the ones that best help to preserve information security.

Introducción

Las tecnologías de información (TI) son los procesos que se utilizan para poder procesar la información que una organización o empresa maneja para su respectivo análisis y que esto ayude en la toma de decisiones en las acciones que la empresa esté pensando en realizar o implementar, a dicho proceso se le conoce como integración, en donde una organización realiza distintas acciones con el fin de desarrollar un plan que reúna a todos los procesos involucrados en el negocio [1]. Las TI también son un apartado importante con el cual se logra la integración de los procesos de la empresa, la flexibilidad con los procesos de cambio de datos entre otros puntos importantes los cuales nos dan a conocer cómo es que la tecnología al implementarse puede mejorar considerablemente las empresas; otro punto importante de las TI para las empresas es que crezcan en relación a la globalización y digitalización por la que el mundo está atravesando.

El gobierno de TI se describe como una estructura que dirige las relaciones y procesos que se dan dentro de una organización que permiten encaminar dichos procesos hacia el cumplimiento de sus objetivos, para que una empresa pueda implementar TI se debe de seguir como se comentó un marco referencial en el cual basarse para tener un mejor manejo del área de TI en este caso y de los servicios que se pueden presentar en estos; principalmente

tiene algunos marcos referenciales principales que son : COBIT, ITIL ,ISO, TOGAF, etc. [2]. Todos estos marcos tienen características similares en algunos aspectos mientras que en otros son completamente distintas estas decisiones tienen que regirse concretamente de cuáles son los requerimientos que la organización quiere resolver y como es que se va a sustentar económicamente para que se empiece con la adaptación y el control respectivo.

En este sentido, el gobierno de TI tiene un impacto directo e indirecto en la seguridad de la información, ya que contribuye a establecer una cultura de seguridad, a definir una estrategia y una política de seguridad, a asignar recursos y competencias para la seguridad, a evaluar y gestionar los riesgos de seguridad, a monitorear y auditar el desempeño de la seguridad, y a mejorar continuamente la seguridad. En esta revisión se analiza el impacto de los marcos de gobierno de TI en la seguridad de la información de las organizaciones, basándose en los conceptos teóricos y en las evidencias empíricas disponibles.

En esta revisión se analiza el impacto que genera la implementación de los marcos de gobierno de TI en la seguridad de la información de las organizaciones.

Metodología

Preguntas de investigación

En esta revisión se busca responder las siguientes preguntas:

Preguntas de Investigación	Motivación
RQ1: ¿Cuál es el nivel de impacto positivo de la aplicación de los marcos de TI en la seguridad de la información en las organizaciones?	Identificar el nivel de impacto positivo que ha tenido los marcos de TI en la seguridad de la información de las empresas
RQ2: ¿Qué marcos de TI son los más usados para preservar la seguridad de la información las organizaciones?	Identificar que marcos son los más utilizados para la preservación de la seguridad de la información en las empresas

Objetivo general

Determinar el nivel de impacto de los marcos de gobierno de TI en el campo de la seguridad de las organizaciones

Objetivos específicos

- Determinar el impacto positivo de los marcos de gobierno de TI en la preservación de la seguridad de la información de las organizaciones
- Determinar los marcos de gobierno de TI más utilizados para la preservación de la seguridad de la información

Procesos de recolección de información

Para la presente revisión sistemática se busca toda información relacionada con el objetivo general planteado que nos permite dar un conocimiento del impacto que tienen los marcos de gobierno de TI en la seguridad de la información de las organizaciones.

Criterios de elegibilidad

Para la presente investigación se han tomado diferentes artículos de revistas indexadas de español e inglés y se han tomado artículos que sean revisiones sistemáticas e investigaciones. Así mismo se han tomado en cuenta criterios para su exclusión adicionales:

- Los artículos deben de poseer al menos un término que se relacione con la investigación
- Los artículos tienen que al menos responder a alguna de las preguntas de investigación
- Los artículos deben de tener indicadores cuantitativos y resultados visibles

Tipo de Estudio

Para esta revisión sistemática se hizo uso de la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), la cual nos indica hacer una pregunta para establecer el rumbo de la investigación, la pregunta planteada fue: ¿Cuál es el impacto que tienen los marcos de gobierno de TI en la seguridad de la información de las organizaciones?

Fundamentos de la metodología

Las revisiones sistémicas son resúmenes concisos y metódicos de información que tienen como objetivo responder a una pregunta clínica específica. Como constan de varios artículos y fuentes de información, son la forma de evidencia más elevada en una jerarquía. Al utilizar un proceso de desarrollo claro y comprensible, las revisiones sistemáticas tienen como objetivo recopilar, seleccionar para evaluación mediante análisis crítico y resumir toda la evidencia disponible sobre la efectividad del tratamiento (incluida, entre otras, la precisión del diagnóstico), el pronóstico, etc. [3]

Teniendo en cuenta esta definición se realizaron los siguientes pasos:

1. Se identificó el título de la revisión sistemática y justificación de la revisión sistemática.
2. Se especificaron los criterios de inclusión y exclusión para la búsqueda.
3. Se describieron los resultados de los procesos de búsqueda y selección de la misma.
4. Se interpretaron los datos para dar respuesta a las preguntas anteriormente planteadas.

Procesos de búsqueda

Para la presente revisión sistemática se busca toda información relacionada con el objetivo general planteado que nos permite dar un conocimiento de la relación estrecha que existe entre los marcos de TI y su impacto en la seguridad de la información de las organizaciones

Para ello, se han tomado artículos de las siguientes revistas: DOAJ, REDALYC, DIALNET, SCOPUS, SCIENCE DIRECT de las cuales han sido seleccionadas algunos artículos que cumplan con proporcionar calidad a la investigación. Dicha selección se muestra en el siguiente diagrama de embudo que sigue el modelo prisma.

El gráfico de la Fig.01 muestra las etapas de selección los artículos, en la etapa 1 se seleccionan todos aquellos que nos trajeron como resultados de aplicar una fórmula de búsqueda en las diferentes bases de datos, en la etapa 2 se quitaron de la lista inicial aquellos artículos donde el título no tenga relación con el tema de investigación y los elementos duplicados si existiesen, en la etapa 3 se excluyeron aquellos artículos donde el resumen no tenga relación alguna con el tema a investigar, dándonos como resultado un total de 24 artículos seleccionados para realizar la revisión.

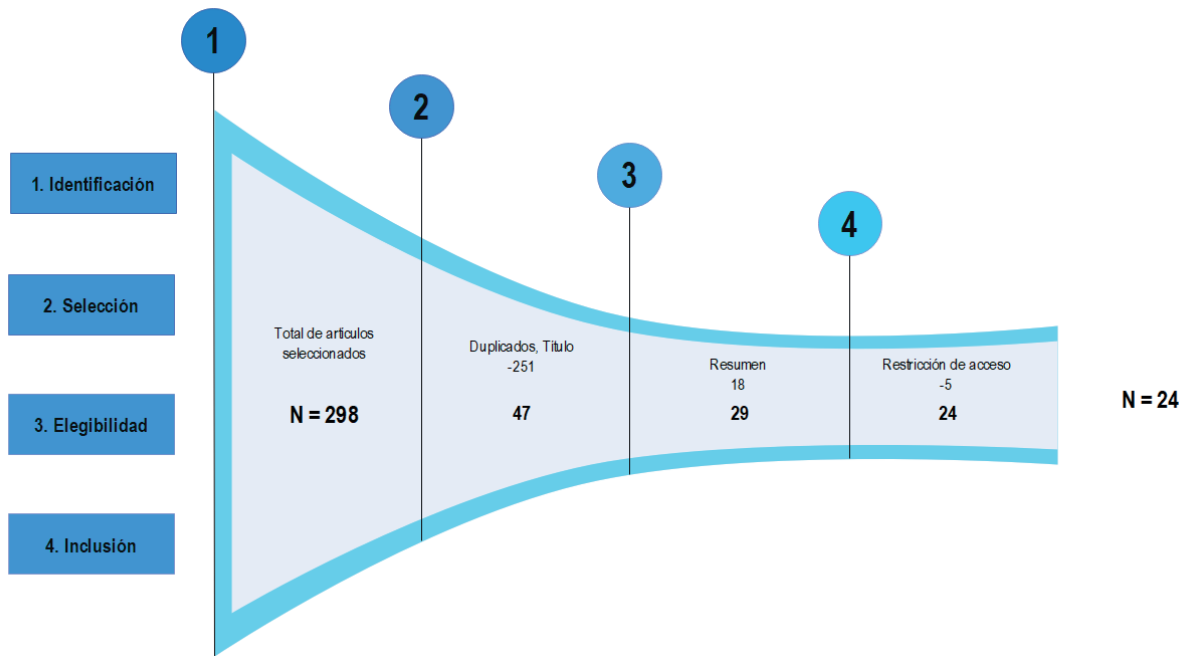


Figura 1. Diagrama de embudo del proceso de selección de los artículos tomados para la presente revisión sistemática

Criterio de elegibilidad

Para la presente investigación se han tomado diferentes artículos de revistas indexadas de español e inglés y se han tomado artículos que sean revisiones sistemáticas e investigaciones. Así mismo se han tomado en cuenta criterios para para su exclusión adicionales:

- Los artículos deben de poseer al menos un término que se relacione con la investigación
- Los artículos tienen que al menos responder a alguna de las preguntas de investigación
- Los artículos deben de tener indicadores cuantitativos y resultados visibles

Proceso de búsqueda

Para la recolección de artículos en las diferentes bases de datos se utilizaron diferentes fórmulas que aseguren una calidad óptima en los artículos seleccionados.

DOAJ

“IT governance” AND “challenges” AND “organization”

“IT governance” AND “challenges” AND “information security”

REDALYC

“IT governance” AND “challenges” AND “information security” AND “organization” AND “data processing”.

Aplicando filtro (disciplina de ingeniería y computación)

SCIENCE DIRECT

“IT governance” AND “challenges” AND “information security” AND “organization” AND “data processing” AND “effects”.

Aplicando algunos filtros a los resultados

- Primer filtro (Área: Computer Science)
- Segundo filtro (Open access & Open archive)
- Tercer filtro (Artículos de investigación)

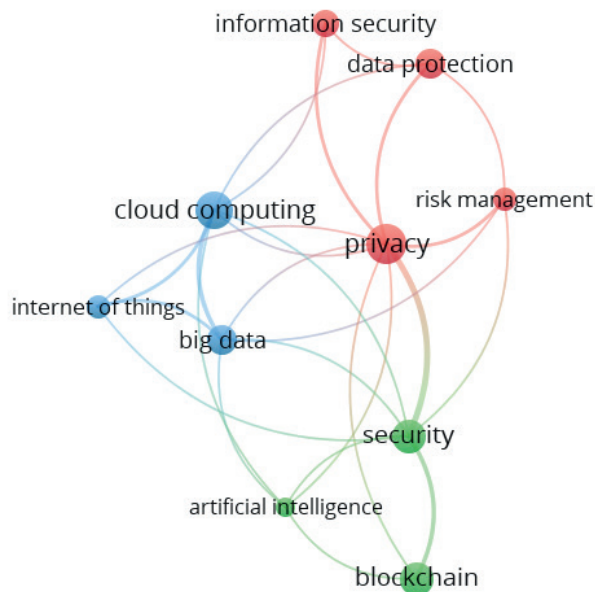


Figura 2: Mapa de coocurrencia de palabras clave de un total de 218 artículos encontrados en Science Direct.

SCOPUS

Las fórmulas utilizadas para la búsqueda en Scopus fueron:

TITLE-ABS-KEY (“its government” AND “challenges”)

TITLE-ABS-KEY (“IT governance” AND “challenges” AND “information security” AND “organization”)

TITLE-ABS-KEY (“IT governance” AND “challenges” AND “information security” AND “effects”)

TITLE-ABS-KEY (“IT governance” AND “challenges” AND “information security”)

Resultados

N°	Título	Año	Autor (es)	País
1	A software gateway to affordable and effective Information Security Governance in SMMEs	(2013)	J. Coertze, R. Von Solms	Sudáfrica
2	A systems-of-systems security framework for requirements definition in cloud environment	(2019)	S.B.O.G. Carturan, D.H. Goya	Brasil
3	A web-based information security management toolbox for small-to-medium enterprises in Southern Africa	(2011)	J. Coertze, J. Van Niekerk, R. Von Solms	Sudáfrica
4	Analisis Tata Kelola Sistem Informasi Dengan Framework COBIT-5: Studi Kasus Pada PT. Batu Karang	(2020)	Raissa Amanda Putri, Fadhlan Hussaini Srg, Sinta Dewi, Tania Yulindra, Wahyu Herlambang	Indonesia
5	Analyzes and solves the top enterprise network data security issues with the web data mining technology	(2009)	W. Chai	China
6	Cloud Computing and Information Technology Strategy	(2013)	Antonio Mariano Carlos Junior, Cesar Augusto Biancolino, Emerson Antonio Maccari	Chile
7	Cloud Sourcing and Paradigm Shift in IT Governance: Evidence from the Financial Sector	(2020)	N. Kazemargi, P. Spagnoletti	Italia
8	Digital certification in the Brazilian e-government	(2011)	Edilson Ferneda, Luiza Beth Nunes Alonso, Lamartine Vieira Braga	Brasil
9	Enterprise information security, a review of architectures and frameworks from interoperability perspective	(2011)	Marzieh Shariati, Faezeh Bahmani, Fereidoon Shams	Iran
10	Ict Strategic Planning at Public Higher Educational Organizations: Building an Approach Through Action Research at Unirio	(2015)	Luiza Goncalves de Paula, Renata Mendes Araujo, Asterio Kiyoshi Tanaka, Claudia Cappelli	Brasil
11	Improving information exchange processes when implementing the State's information function on the internal level	(2021)	Anatoliy Valerievich Tsaregorodtsev, Sergey Dmitrievich Volkov	Rusia
12	Information security control centralization and IT governance for enterprises	(2008)	R.J. Robles, J.-Y. Park, T.-H. Kim	Korea del Sur
13	Information security governance in big data environments: A systematic mapping	(2018)	Reza Saneei Moghadam, Ricardo Colomo-Palacios	Noruega
14	Information Technology Service Management Processes Maturity in the Brazilian Federal Direct Administration	(2015)	Maria Albeti Vieira Vitoriano, João Souza Neto	Brasil
15	Integration of IT governance and security risk management: A systematic literature review	(2017)	D. De Smet, N. Mayer	Luxemburgo
16	IT governance and IT application orchestration capability role on organization performance during the COVID-19 pandemic: An intervening of business-IT alignment	(2021)	Afrizal Tahar, Hafiez Sofyani, Detra Putri Kunimasari	Indonesia
17	IT Governance restructuring challenges in cloud computing utilizing governmental enterprises	(2020)	Mohammad Reza Taghva, Kamran Feizi, Sayed Gholam hasan Tabatabaei, Mostafa Tamtaji	Irán
18	Major Challenges of Systems-of-Systems with Cloud and DevOps - A Financial Experience Report	(2019)	S.B.O.G. Caraturan, D.H. Goya	Brasil
19	Ontology based modeling for information security management	(2011)	P. Saha, N. Parameswaran, P. Ray, A. Mahanti	India
20	Perceived information security of internal users in Indian IT services industry	(2014)	N.R. Mukundan, L. Prakash Sai	India
21	Performance Measurem Ent of Information Technology Governance in Brazilian Financial Institutions	(2014)	Sara C. Boni Barbosa, Ildeberto Aparecido Rodello, Sílvia Inês Dallavalle de Pádua	Brasil
22	Resultados Do 9º Contecsi - Congresso Internacional De Gestão Da Tecnologia E Sistemas De Informação	(2012)	Edson Luiz Riccio, Marici Cristine G. Sakata	Brasil
23	Security in organisations: Governance, risks and vulnerabilities in moving to the cloud	(2017)	M.O. Alassafi, R.K. Hussain,	Reino Unido
24	Should we wear a velvet glove to enforce Information security policies in higher education?	(2022)	H.-J. Kam, D.J. Kim, W. He	Estados Unidos

Posterior a haber revisado los 24 artículos seleccionados, se obtuvieron resultados muy claros con respecto a las preguntas de investigación. Primero observemos la fig.03 que nos indica los países de donde más se han obtenido la información recolectada.

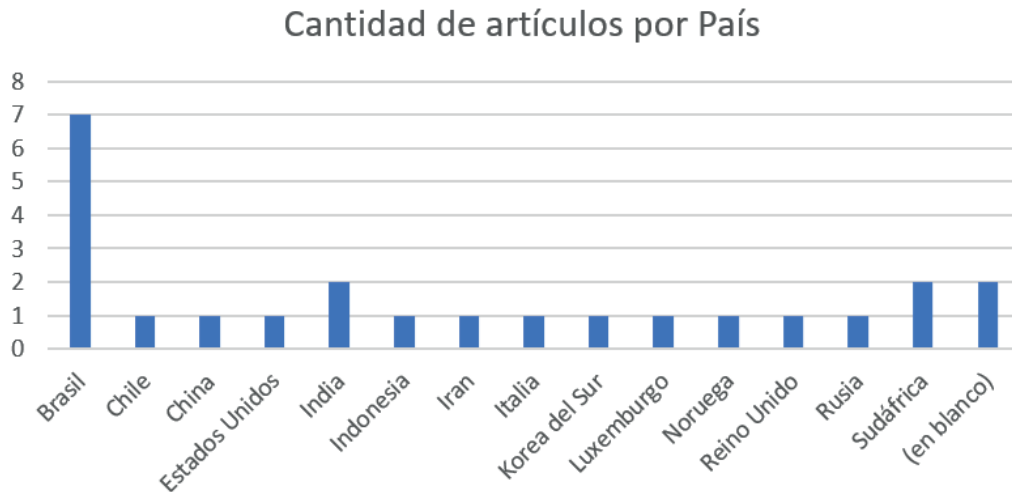


Figura 3. Frecuencia de los artículos por cada país de la lista de artículos seleccionados.

Se puede apreciar de la Fig.03 que el país que más apporto para el presente artículo de revisión es Brasil, con un total de 7 artículos, y luego los demás países tienen al menos 1 artículo seleccionado para su revisión de literatura.

Discusión

Ahora respondiendo a la primera pregunta de la revisión: ¿Cuál es el nivel de impacto positivo de la aplicación de los marcos de TI en la seguridad de la información en las organizaciones?

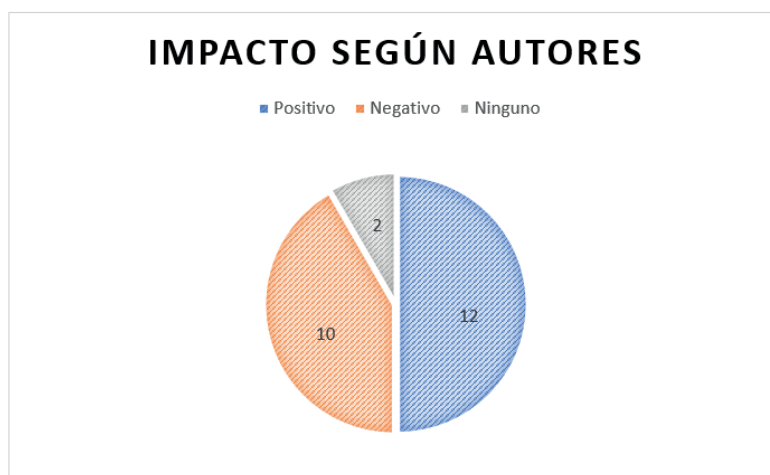


Figura 4. Impacto de los marcos de gobierno de TI según cantidad de artículos.

De acuerdo a la figura 4 se puede inferir que la mayoría de autores indican que la implementación de la guía de seguridad que contiene todo marco de gobierno de TI da un impacto positivo en el manejo interno de todo tipo de organización, así mismo da mecanismos para poder controlarlos y monitorearlos para su futura mejora de acuerdo a cada necesidad.

La implementación de marcos de gobierno de TI conlleva una serie de ventajas sustanciales para las organizaciones. En primer lugar, se destaca la optimización y eficiencia operativa que proporcionan. Estos marcos optimizan procesos internos y la asignación de recursos, lo que se traduce en una notable mejora en la productividad y en la entrega eficiente de servicios de TI. Al estandarizar prácticas y procedimientos, se eliminan redundancias y se logra una gestión más eficaz de los activos de TI.

Además, la seguridad de la información se ve fortalecida significativamente. Los marcos de gobierno de TI suelen incluir directrices y buenas prácticas en materia de seguridad, lo que contribuye a mitigar riesgos y a garantizar la protección de los activos críticos de la organización. La seguridad se convierte en un componente integral de las operaciones de TI, brindando confianza y tranquilidad tanto a la organización como a sus partes interesadas.

Otro aspecto positivo crucial es la alineación estratégica. Estos marcos permiten una alineación efectiva entre las estrategias de TI y los objetivos globales del negocio. Así, la tecnología se utiliza de manera óptima para apoyar y avanzar en la visión y metas organizativas. La TI se convierte en un facilitador estratégico, garantizando que cada acción tecnológica esté alineada con la dirección general de la empresa.

A pesar de los beneficios evidentes, la implementación de marcos de gobierno de TI no está exenta de desafíos. Uno de los aspectos negativos notables es la resistencia al cambio dentro de la organización. La introducción de nuevos procesos y prácticas puede encontrar resistencia por parte de los empleados, lo que puede obstaculizar la adopción exitosa del marco de gobierno de TI.

Otro aspecto negativo se refiere a la inversión inicial requerida. La implementación efectiva de estos marcos puede demandar inversiones considerables en términos de tiempo, recursos financieros y capacitación. Esto puede generar preocupaciones iniciales sobre la rentabilidad y viabilidad a largo plazo de la inversión.

Es fundamental abordar estos desafíos de manera proactiva y planificada para garantizar una adopción exitosa y duradera de los marcos de gobierno de TI en la organización.

Para la segunda pregunta: ¿Qué marcos de TI son los más usados para preservar la seguridad de la información las organizaciones?

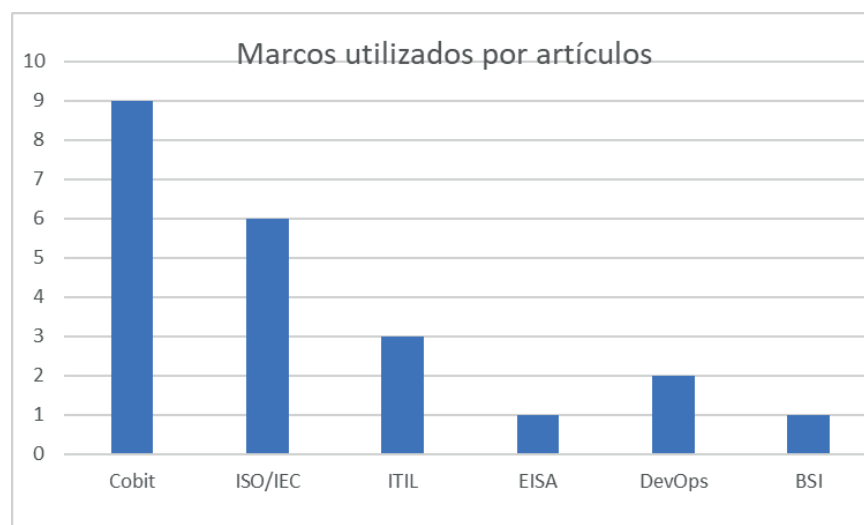


Figura 5. Uso de los framework en los artículos seleccionados.

De acuerdo a la Fig.05 se puede ver que la mayoría de artículos revisados utiliza muchos en particular, algunos usan COBIT 2019, que es el más utilizado. Pero existen otras opciones, así como el marco ISO/IEC, ITIL, etc. que en su mayoría son utilizadas por empresas del rubro tecnológico.

Conclusiones

- Se logró concluir que las implementaciones de los gobiernos de TI en las organizaciones impactan significativamente en la seguridad de los activos de la misma organización.
- Algunos autores refieren que si bien es cierto los marcos de TI son una guía para las buenas prácticas de seguridad de información, estas no son implementadas en todas las organizaciones, debido a que las medianas y pequeñas empresas optan por mejorar sus ingresos y alcanzar sus metas.
- Existe aún poca literatura de qué softwares en específico son las más utilizadas en las empresas para dar soporte a la seguridad en el ámbito gerencial, pero podemos inferir que en la actualidad la gran parte de estas organizaciones están mudando a la computación en la nube para tercerizarla protección de sus activos.

Referencias

- [1] C. Ávila, E. J. Chinchilla y T. Velásquez Pérez, «It governance model for state entities, as support for compliance with the information security and privacy component in the framework of the digital government policy,» *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1409, nº 1, 2019.
- [2] H. A. F. Cano y D. P. Domínguez, «Modelo de gobierno de tecnología de la información para mejorar el desempeño de proyectos de negocio minorista. Investigación Administrativa,» *Investigación Administrativa*, vol. 47, nº 122, pp. 1-15, 2018.
- [3] B. Moreno, M. Muñoz, J. Cuellar, S. Domancic y J. Villanueva, «Revisión Sistemática: definición y nociones básicas,» *Revista clínica de periodoncia, implantología y rehabilitación oral*, vol. 11, nº 3, pp. 184-186, 2018.
- [4] M. A. Vieira Vitoriano y J. Souza Neto, «Information Technology Service Management Processes Maturity in the Brazilian Federal Direct Administration,» *Journal of Information Systems and Technology Management*, vol. 12, nº 3, pp. 663-686, 2015.
- [5] A. Valerievich Tsaregorodtsev y V. Sergey Dmitrievich, «Improving information exchange processes when implementing the State's information function on the internal level,» *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, vol. 15, pp. 181-198, 2021.
- [6] A. Tahar, S. Hafiez y D. Putri Kunisamari, «IT governance and IT application orchestration capability role on organization performance during the COVID-19 pandemic: An intervening of business-IT alignment,» *Jurnal Ilmiah Bidang Akuntansi Dan Manajemen*, vol. 18, nº 1, pp. 1-20, 2021.
- [7] M. Shariati, F. Bahmani y F. Shams, «Enterprise information security, a review of architectures and frameworks from interoperability perspective,» *Procedia Computer Science*, vol. 3, pp. 537-543, 2011.
- [8] R. Saneei Moghadam y R. Colomo Palacios, «Information security governance in big data environments: A systematic mapping,» *Procedia Computer Science*, vol. 138, pp. 401-408, 2018.
- [9] P. Saha, N. Parameswaran, P. Ray y A. Mahanti, «Ontology based modeling for information security management,» Sydney, 2011.
- [10] E. L. Riccio y M. C. G. Sakata, «Resultados Do 9o Contecsi—Congresso Internacional De Gestão Da Tecnologia E Sistemas De Informação,» *Journal of Information Systems and Technology Management*, vol. 9, nº 2, pp. 391-436, 2012.
- [11] M. Reza Taghva, K. Feizi, S. G. Hasan Tabatabaei y M. Tamtaji, «IT Governance restructuring challenges in cloud computing utilizing governmental enterprises,» *Iranian Journal of Information Processing & Management*, vol. 35, nº 3, pp. 785-816, 2020.
- [12] N. R. Mukundan y L. Prakash Sai, «Perceived information security of internal users in Indian IT services industry. Information Technology and Management,» *Information Technology and Management*, vol. 15, nº 1, pp. 1-8, 2014.

- [13] N. Kazemargi y P. Spagnoletti, «Cloud Sourcing and Paradigm Shift in IT Governance: Evidence from the Financial Sector,» *Digital Business Transformation*, vol. 38, pp. 47-61, 2020.
- [14] H. J. Kam, D. J. Kim y W. He, «Should we wear a velvet glove to enforce Information security policies in higher education? Behaviour and Information Technology,» vol. 41, nº 10, pp. 2259-2273, 2022.
- [15] L. Goncalves de Paula, R. Mendes Araujo, A. Kiyoshi Tanaka y C. Cappelli, «Ict Strategic Planning at Public Higher Educational Organizations: Building an Approach Through Action Research at Unirio,» *Journal of Information Systems and Technology Management*, vol. 12, nº 2, pp. 351-370, 2015.
- [16] E. Ferneda, L. B. Nunes Alonso y L. Vieira Braga, «Digital certification in the Brazilian e-government,» *JISTEM: Journal of Information Systems and Technology Management*, vol. 8, nº 2, pp. 331-346, 2011.
- [17] D. De Smet y N. Mayer, «Integration of IT governance and security risk management: A systematic literature review,» *International Conference on Information Society (i-Society)*, pp. 143-148, 2016.
- [18] J. Coertze y R. Von Solms, «A Software Gateway to Affordable and Effective Information Security Governance in SMMES,» de *Information Security South Africa*, Johannesburg, 2013.
- [19] W. Chai, «Analyzes and solves the top enterprise network data security issues with the web data mining technology,» de *2009 First International Workshop on Database Technology and Applications*, Wuhan, 2009.
- [20] S. Carturan y D. Goya, «A systems-of-systems security framework for requirements definition in cloud environment,» de *ECSCA '19: Proceedings of the 13th European Conference on Software Architecture*, Paris, 2019.
- [21] A. M. Carlos Junior, C. A. Biancolino y E. A. Maccari, «Cloud Computing and Information Technology Strategy,» *Journal of Technology Management & Innovation*, vol. 8, nº 1, pp. 178-188, 2013.
- [22] S. Caraturan y D. Goya, «Major Challenges of Systems-of-Systems with Cloud and DevOps—A Financial Experience Report,» de *2019 IEEE/ACM 7th International Workshop on Software Engineering for Systems-of-Systems (SESoS) and 13th Workshop on Distributed Software Development, Software Ecosystems and Systems-of-Systems (WDES)*, Montreal, 2019.
- [23] S. C. Boni Barbosa, I. Aparecido Rodello y S. I. Dallavalle de Padua, «Performance Measurement of Information Technology Governance in Brazilian Financial Institutions,» *Journal of Information Systems and Technology Management*, vol. 11, nº 2, pp. 397-414, 2014.
- [24] R. Amanda Putri y F. Hussaini Srg, «Analisis Tata Kelola Sistem Informasi Dengan Framework COBIT-5: Studi Kasus Pada PT. Batu Karang,» *Jurnal Sistem Informasi*, vol. 4, nº 1, 2020.
- [25] M. O. Alassafi, R. K. Hussain, G. Ghashgari, R. J. Walters y G. B. Wills, «Security in organisations: Governance, risks and vulnerabilities in moving to the cloud,» de *Enterprise Security Springer*, 2017, pp. 241-258.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

El autor aquí firmante declara que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Infraestructura verde para el control pluvial como medida de adaptación al cambio climático

Green infrastructure for stormwater control as a measure of adaptation to climate change

David Borge-Leandro¹


Fecha de recepción: 4 de febrero, 2024

Fecha de aprobación: 11 de junio, 2024

Borge-Leandro, D. Infraestructura verde para el control pluvial como medida de adaptación al cambio climático. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, Nº 1. Enero-Marzo, 2025. Pág. 104-114.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i1.7049>

¹ Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.

 borgeanco@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-9157-8438>

Palabras clave

Cambio climático; bibliometría; tipologías; escorrentía; infraestructura verde; adaptación; soluciones basadas en la naturaleza; infraestructura basada en la naturaleza.

Resumen

El presente trabajo surgió de la necesidad de una revisión bibliográfica exhaustiva sobre infraestructura verde para el control de escorrentía, siendo que en el ámbito de la construcción verde y sostenible, es muy necesario disponer de información validada de los beneficios de este tipo de soluciones basadas en la naturaleza. Para la comunidad científica es muy valioso conocer las nuevas tendencias, las diferentes tipologías y las soluciones que pueden ser implementadas en el trópico americano o bien los vacíos de información científica como punto de partida de nuevos procesos de investigación y desarrollo. Como abordaje metodológico se analizaron bases de datos de Scopus y Web of Science, utilizando 1138 publicaciones científicas de todas ellas no se registró ni una sola publicación en otro idioma que no fuera inglés o chino mandarín esto por medio del paquete Bibliometrix de R. Los principales resultados obtenidos en este trabajo fueron los siguientes, eficiencia en la combinación de diferentes tipologías, falta de investigación registrada en las bases de datos consultadas para la Latinoamérica, existencia de autores de origen latinoamericano sin embargo sus investigaciones son en otras latitudes. Como conclusión general se requiere más investigación desde la región latinoamericana en idioma inglés dentro de las bases de datos más importantes.

Keywords

Climate change; bibliometrics; typologies; runoff; green infrastructure; adaptation; nature-based solutions; nature-based infrastructure.

Abstract

The present work arose from the need for an exhaustive bibliographic review on green infrastructure for runoff control, since in the field of green and sustainable construction, it is very necessary to have validated information on the benefits of this type of solutions based on nature. For the scientific community, it is very valuable to know the new trends, the different typologies and the solutions that can be implemented in the American tropics or the lack of scientific information as a starting point for new research and development processes. As a methodological approach, Scopus and Web of Science databases were analyzed, using 1138 scientific publications, of all of them, not a single publication was recorded in a language other than English or Mandarin Chinese, using the Bibliometrix package in R. The main ones the results obtained in this work were the following: efficiency in the combination of different typologies, lack of research registered in the databases consulted for Latin America, existence of authors of Latin American origin although their research is in other latitudes. As a general conclusion, more research is required from the Latin American region in English within the most important databases.

Introducción

El incremento de la población en zonas urbanas presenta una tendencia al alza. Según el Banco Mundial, 7 de cada 10 personas vivirán en las ciudades para el 2050 [1].

Este ritmo de desplazamiento de lo rural hacia lo urbano, presenta retos no solo en materia de vivienda y transporte sino también en servicios básicos e infraestructura [2] [3]. La magnitud de esta problemática representa un desafío urbanístico al desarrollo tradicional, ya que se produce una presión insostenible sobre los recursos naturales, como el agua y el suelo [4], la calidad de aire, los alimentos. En la ciudad, en términos generales, una persona requiere como mínimo 30 m² de espacio habitacional y consume al menos 80 litros diarios de agua [5] [6]. Conforme la ciudad se expande, la tasa de consumo de superficie aumenta, lo que conlleva a que la tasa de uso del suelo urbano supere en al menos un 50% la tasa de crecimiento de la población. [3] [6].

Lo anterior, produce una transformación de las áreas permeables, reduciendo la capacidad de las cuencas urbanas de absorber los excesos de lluvia. Por lo tanto, los riesgos de desastres suponen un desafío para muchas ciudades ubicadas, principalmente, en zonas costeras y en llanuras de inundación [7]. Solo en China, aproximadamente, 32 millones de personas son afectadas, anualmente, por inundaciones en los periodos que comprenden entre junio y julio [6] [3] [4]. Se estima que cerca de 500 millones de personas son vulnerables a efectos directos del cambio climático [3]. Dicha vulnerabilidad tiene su origen principalmente, en el cambio de la cobertura del suelo en las cuencas naturales por superficies impermeables, con el fin de dar mayor espacio al desarrollo de soluciones grises o duras [7]. Este tipo de superficies se construyen ante la expansión de las ciudades, producto de la ingeniería tradicional, lo cual ha provocado una modificación radical a la respuesta hidrológica de las cuencas, afectando principalmente la dinámica y relación de la infiltración y la escorrentía [3] [4] [8].

Es así como, los sistemas naturales de drenaje de las cuencas han reducido su capacidad de retención y encauzamiento, y a su vez, la infraestructura de control y defensa pluvial tradicional (alcantarillado y defensas fluviales), cada vez son menos suficientes, ante el incremento de la población. Esto, genera un aumento de los volúmenes de agua superficial y consecuentemente; riesgos por desbordamiento de ríos, inundaciones extremas y deslizamientos, incluso ante eventos de precipitación de baja intensidad [6] [9] [10].

Con el fin de dar solución a esta problemática, se han establecido estrategias de infraestructura verde que permitan un continuo desarrollo urbano en conjunto con diseños y materiales de captación de aguas de escorrentía capaces de brindar un equilibrio ambiental, social y económico. Es así como se han promovido estrategias, tales como Soluciones de Desarrollo de Bajo Impacto (LiDs, por sus siglas en inglés “Low Impact Development Solutions”) [4][5], los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenibles (SUDs, por sus siglas en inglés “Sustainable Urban Drainage Systems”) o las Soluciones Basadas en la Naturaleza (NBS por sus siglas en inglés Nature Based-Solutions) (5)[6][7].

Tanto las NBS o SUDs, posibilitan la restauración de las variables hidrológicas en el paisaje degradado de las ciudades creando espacios permeables de retención, filtración, depuración e interceptación de la escorrentía [6] [3] [11] [10] [11] [7]. Estas estrategias se basan en medidas estructurales y no estructurales, estando estas últimas asociadas a políticas y programas de educación y participación ciudadana [12] [7] [9]. Dentro de las medidas no estructurales, se pueden establecer programas de concientización ciudadana sobre las cuencas y los ríos urbanos, políticas de protección ambiental, planes reguladores de construcción y desarrollo de municipalidades y ayuntamientos, planes y programas de limpieza de cauces por medio participación ciudadana, limpieza de residuos sólidos del alcantarillado público, arborizaciones, control de conexiones pluviales ilegales, políticas de reducción de uso de plaguicidas, reubicación de personas en vulnerabilidad o invasión de los cauces de ríos y quebradas, y educación sobre el agua y cambio climático.

Por otro lado, las medidas estructurales son aquellas que *a priori* requieren elementos constructivos y de modificación del paisaje urbanístico; estas medidas manejan la escorrentía superficial en función de la calidad y cantidad del agua, así como la modificación del paisaje [3] [9] [10] [4] [13] [1]. Las principales medidas estructurales son: el establecimiento de cubiertas vegetadas, el uso de pavimentos permeables, zanjas de infiltración, drenes filtrantes, jardines de lluvia, cunetas vegetadas, trampas de tormenta, tanques de almacenamiento y retención, lagunas de retardo, y humedales artificiales.

Los criterios de diseño de las medidas estructurales se basan en la cuantificación de variables hidrológicas de las cuencas naturales y urbanas, además de estudios de hidrodinámica de superficie y del tránsito hidráulico subsuperficial. Requieren así mismo, de estudios edafológicos como permeabilidad, conductividad hidráulica, textura del suelo, y de aspectos geomecánicas para determinar capacidades soportantes para casos particulares [3] [13] [9] [5]. Por otro lado, la topografía y geografía de la cuenca es indispensable para una adecuada gestión y diseño, con el fin de interpretar de manera adecuada la información geoespacial.

En los últimos años, la aplicación de tecnologías de obtención de información geoespacial o sensores remotos, como las aeronaves no tripuladas o drones, información satelital, y tecnología LiDAR y radar, han contribuido a la obtención de mejores resultados con aplicaciones en la gestión adecuada de los diseños en las ciudades como dimensión espacial. [6] [3]. Así mismo, el paisajismo y la arquitectura, son fundamentales para la habilitación de espacios urbanos agradables y funcionales. [2] [3] [7].

Este tipo de sistemas tienen un grado de implementación relativamente nuevo en países como los Estados Unidos de América y el Reino Unido, así como en Europa (principalmente Alemania), sin embargo, China ha sido vanguardista diseñando sistemas SUDS, NBS, y LiDS, desde la década de los 80's hasta la fecha [3] [6] [5] [10] [4] [7].

El presente estudio, planteó la necesidad de realizar una revisión de la bibliografía sobre el uso de estrategias de infraestructura verde, considerando el drenaje urbano sostenible, así como las soluciones basadas en la naturaleza, en Europa, Asia y en América, con el fin de identificar las tipologías más utilizadas en el mundo y su impacto en el manejo de la escorrentía. Asimismo, se exponen las estrategias aplicadas en América Latina con el fin de identificar el alcance que han tenido los SUDs y las NBS en la región.

Materiales y métodos

Se aplicó una metodología cuantitativa, con un tamaño de muestra de 1138 documentos filtrados, de los cuales 957 fueron artículos de revistas, 207 libros, 57 artículos de conferencias y 124 revisiones de los cuales se tomaron los 28 más relevantes para el objeto de este estudio. Se realizó una revisión de la base de datos de Scopus y Web of Science con filtros desde el año 2019 hasta el 2023, el idioma español no se encontró en la base de datos para ningún artículo esto por medio del paquete de R bibliometrix, los filtros de palabras que se aplicaron fueron: Cambio climático, bibliometría, tipologías, escorrentía, infraestructura verde, soluciones basadas en la naturaleza e infraestructura basada en la naturaleza, en la figura 1 se puede observar el resumen general y detalles de la búsqueda y análisis.

En el diagrama de flujo de la búsqueda y aplicación del algoritmo en R bibliometrix, para el cual es necesario la identificación de las principales bases de datos relevantes para el objeto de estudio, posteriormente la selección de las palabras clave, el filtrado de temporalidad de mínimo 5 años en los artículos luego se exportan la base de datos en un formato adecuado y luego se procesa dentro del paquete de Rstudio bibliometrix para su respectiva diagramación.

Resultados

En el siguiente cuadro se puede observar en resumen los datos obtenidos en el análisis bibliométrico en R, se observa la clasificación de fuentes, cantidad de autores para las palabras claves seleccionadas y el enfoque de control de escorrentía pluvial por medio de infraestructura verde.

Cuadro 1. Resumen general de los datos procesados por el algoritmo de bibliometrix.

Descripción	Resultados
Información general de los datos	
Lapso de tiempo	2019:2023
Fuentes(Journals, Books, etc)	207
Documentos	1138
Annual Growth Rate %	0
Documento Average Age	1.92
Average citations per doc	13.08
References	89720
DOCUMENT CONTENTS	
Keywords Plus (ID)	7894
Author's Keywords (DE)	3311
AUTHORS	
Authors	4917
Authors of single-authored docs	23
AUTHORS COLLABORATION	
Single-authored docs	24
Co-Authors per Doc	5.66
International co-authorships %	34.71
DOCUMENT TYPES	
artículo	957
conference paper	57
review	124

En el análisis de frecuencia en el uso de términos en palabras clave en la figura 1 permitió obtener resultados a partir de ocurrencias superiores a ocho: como se muestra en la figura 2, se observa cambio climático, escorrentía manejo de agua de lluvia, inundaciones como las principales palabras clave seleccionadas por los principales autores en el tema.



Figura 1. Palabras clave utilizadas para la búsqueda de artículos. Las palabras con tamaño

de letra más grande corresponden a las palabras más usadas respecto a infraestructura verde según el análisis en las bases de datos de Scopus y web of science, bibliometrix, 2023.

La figura 3, muestra la distribución de producción espacial de las publicaciones consultadas, donde resaltan América del Norte, América del Sur, Europa y Asia. De estos, Estados Unidos, China, Alemania y Australia, resaltan entre los países con mayores publicaciones en el tema de infraestructura verde.

Country Scientific Production

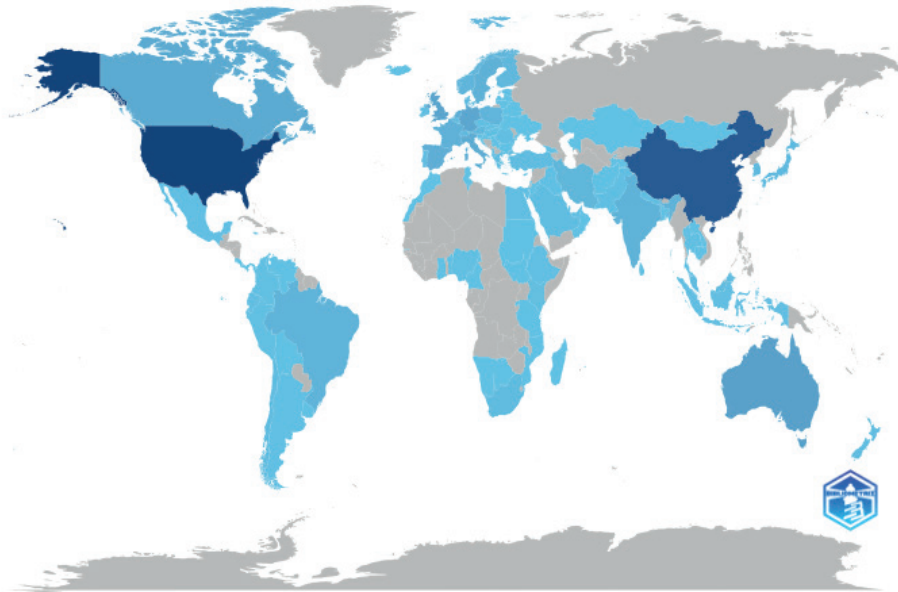


Figura 2. mapa de producción científica por países por colorimetría se observa los estados unidos y china como mayores productores, fuente: bibliometrix, 2023.

La figura 3, muestra las líneas de colaboración entre países entre los principales autores que publican en el tema de infraestructura verde, así como las universidades más activas en el tema, cabe destacar que no necesariamente el país de origen del autor es donde se realizó la investigación.

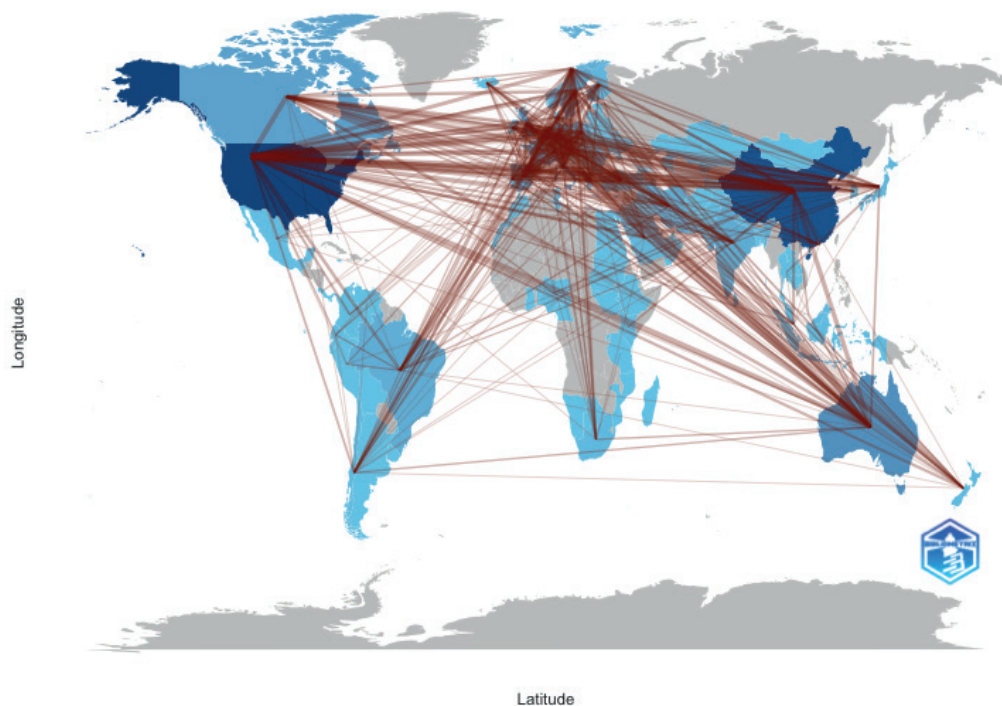


Figura 3. Líneas de colaboración entre los autores desde el origen de las organizaciones académicas y el país origen de los autores, fuente: bibliometrix, 2023.

En la figura 4 se observó los principales autores, obtenidos de las bases de datos de Scopus y web of science que el mayor porcentaje de publicaciones son de la universidad de Wuhan además de autores de origen chino y el tema más frecuente es LID o low impact development seguido de cambio climático e infraestructura verde como palabras clave en la búsqueda.

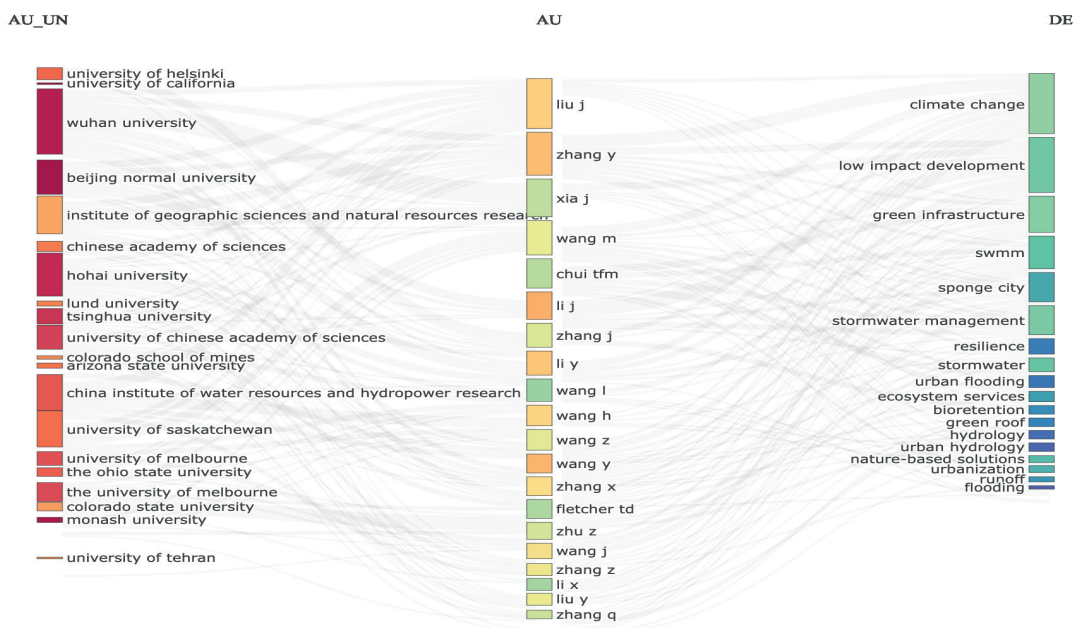


Figura 4. correlación entre casas de producción académica autores y palabras clave más utilizadas fuente: Bibliometrix, 2023 .

La figura 5, Se observa el análisis bibliométrico enfocado a las principales afiliaciones con producción científica en el tema de infraestructura verde. La universidad con mayor producción son Universidad de California seguido de la Universidad normal de Beijín.

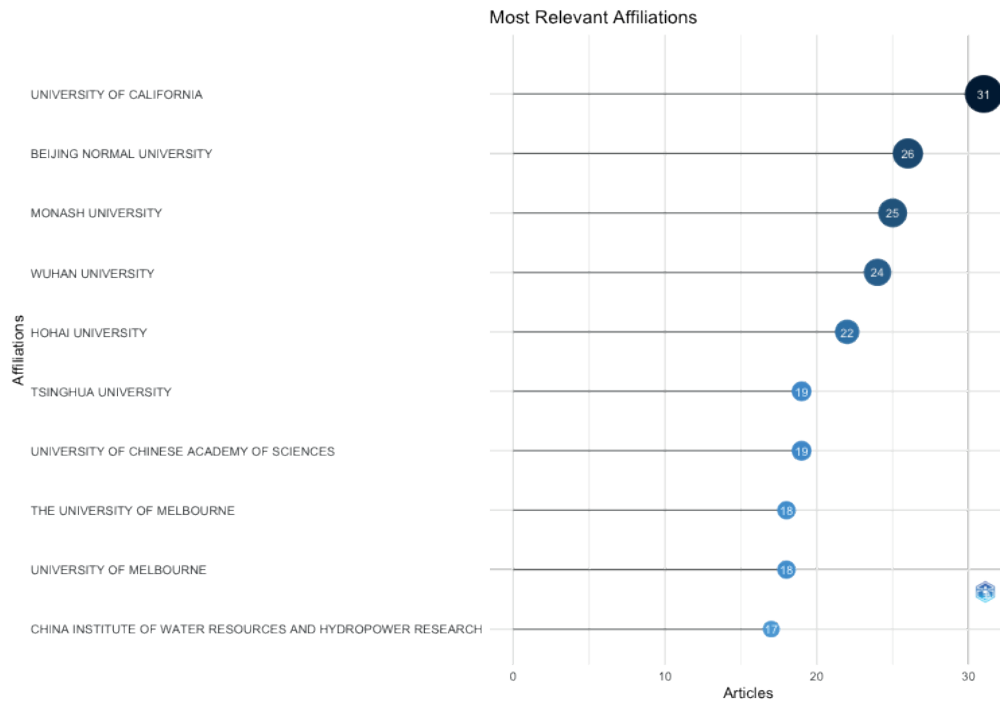


Figura 5. En la figura 5 se observa de afiliaciones académicas más relevantes según la búsqueda, fuente: Bibliometrix, 2023.

Análisis de Resultados

A partir del análisis de bases de datos se seleccionaron los artículos más relevantes para esta investigación donde se pudo observar su impacto por continente y subcontinente en términos de diferentes variables como el porcentaje de control de escorrentía, la efectividad de combinación de infraestructuras en los siguientes cuadros se puede observar las diferentes variables seleccionadas para su respectivo análisis

Cuadro 2. Porcentajes de control por tipología y aplicación en diferentes continentes.

Tipología	% control	Continente	Fuente
Cubiertas verdes	50%	Asia, Europa, américa del norte, Australia	[14] [11] [7] [10]
Bioswale	40%		
Pavimento permeable	80%		
Bioretencion	80%		
Rain Garden	50%		

El cuadro 2 muestra el porcentaje de control de escorrentía según los autores para las tipologías más utilizadas y los continentes respectivos donde se encontró casos de estudio, cabe destacar que para ninguno de los artículos encontrados se observó casos específicos de Latinoamérica

sin embargo a pesar de contar con autores de la región sus estudios fueron aplicados en otras latitudes, destaca que para la mayoría de autores el efecto es exponencial cuando se combinan estas tipología, destacan el pavimento permeable y la bio retención como los más efectivos [15] [12] [16] [7] [17].

Cuadro 3. Efectividad según aplicación y continente.

Tipología	Aplicación	Continente	Fuente
Cubiertas verdes	Zonas puntuales como edificaciones	Asia, Europa, américa del norte, Australia	[14] [11] [7] [10]
Bioswale	Zonas altamente urbanizadas		
Pavimento permeable	Zonas altamente urbanizadas		
Tanques de retención	Zonas altamente urbanizadas		
Rain Garden	Zonas puntuales como pequeños pueblos o municipios		

El cuadro 3 muestra las aplicaciones más efectivas para las tipologías más utilizadas siendo su aplicación más o menos efectiva dependiendo del problema a resolver [14, 11, 7], para zonas altamente urbanizadas y con problemas serios de control de escorrentía se recomienda la colocación de combinaciones de pavimento permeable y bio retención para mejores resultados según los autores [1, 2,3,4,5,6,7,8,9, 14, 7, 11, 10].

Cuadro 4. Combinación de tipología y aplicación por continente.

Tipología	Mejor combinación	Continente	Fuente
Cubiertas verdes	Pavimento permeable, bioswale	Asia, Europa, américa, Australia	[14] [11] [7] [10]
Bioswale	Bio retención		
Pavimento permeable	Bio retención		
Tanques de retención	Pavimento permeable		
Rain Garden	Bio retención y pavimento permeable		

En el cuadro 4 s muestra que, según los autores la efectividad y el factor económico aumenta o disminuye según la combinación de las diferentes tipologías, su aplicación y efectividad en la reducción de los porcentajes unitarios mencionados en la figura 5 mejoran significativamente según estas combinaciones [11, 7, 14, 10, 12,13, 14, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 23,24, 25, 26, 28]

Conclusiones

Es posible que las investigaciones generadas por universidades latinoamericanas no están documentadas en las principales bases de datos del mundo académico como scopus y web of science, esto deja claro la necesidad de publicar desde la región latinoamericana los posibles avances en la materia de infraestructura verde para el control de escorrentía en dichas bases de datos y en idioma inglés.

Es importante la combinación de las infraestructuras verdes ya que estas aumentan lo su porcentaje de efectividad en combinación, cabe resaltar que los continentes y subcontinentes con mayor experiencia en aplicación de estas estrategias son Asia, América del norte y Europa, Oceanía presenta investigación y aplicaciones avanzadas en este tema, África no registro mayor impacto que Latinoamérica es posible que padezca del mismo problema en cuanto al impacto de los autores y las organizaciones que publican y donde se realiza la publicación.

La importancia de este tipo de infraestructuras verdes para el control de la escorrentía es cada día más relevante en la mayoría de países pero sobre todo en el trópico, la mayoría de las investigaciones muestran resultados alentadores de estas soluciones como sustitutos y complemento de la infraestructura gris tradicional, es importante aumentar los incentivos para realizar más investigación en la región latinoamericana y documentar los posibles casos de éxito en los diferentes países de la región en bases de datos de importancia.

Referencias

- [1] V. Kati y N. Jari, «Bottom-up thinking-Identifying socio-cultural values of ecosystem services in local blue-green infrastructure planning in Helsinki, Finland,» *Land Use Policy*, vol. 50, pp. 537-547, 2016.
- [2] C. Calama gonzález, J. M. Calama Rodriguez y C. Cañas Palop, «Rehabilitación hidrológica de Barrios a través de Sistemas urbanos de drenaje sostenible,» *Anales de edificación*, vol. 4, n° 1, 1-13, p. 13, 2018.
- [3] Y. F. Abunnasr, *Climate Change Adaptation: A Green Infrastructure Planning Framework for Resilient Urban Regions*, Massachusetts, 2013.
- [4] J. P. García, D. Butler, J. Comas, G. Darch, C. Sweetapple y A. Thornton, «Resilience Theory incorporated into Urban Wastewater Systems management. State of art,» *Water R*, vol. 115, pp. 149-161, 2017.
- [5] K. Eckart, Z. Mcphee y T. Bolisetti, «Performance and implementation of low impact development – A review,» *Science of the Total Environment*, Vols. %1 de %2607-608, pp. 413-432, 2017.
- [6] F. Chan, J. Griffiths, D. L. Higgitt y S. Xu, «Sponge City in China-A breakthrough of planning and flood risk management in the urban context,» *Land use policy*, p. 8, 2018.
- [7] E. Zimmermann, L. Bracalenti y A. Onocko, «Infraestructura Verde Como alternativa Sustentable para reducir el riesgo hidrico en areas urbanizadas,» *CUADERNOS del CURIHAM*, vol. 21, p. 15, 2015.
- [8] S. J. McGrane, «Impacts of urbanisation an hydrological and water quality dynamics, urban water management a review,» *Hydrolofycal Science Journal*, vol. 61, n° 13, 2016.
- [9] E. D. Cubides y S. G. E., «Control de Escorrentia Urbanas mediante Sistemas Urbanos de drenaje Sostenible (SUDS): Pozos/Zanjas de infiltración,» *Entre Ciencia e Ingeniería*, vol. 12, n° 24, pp. 32-42, 2018.
- [10] T. D. Fletcher, W. Shuster, W. F. Hunt, R. Ashley, D. Butler, S. Arthur, S. Trowsdale, S. Barraud, A. SemadeniDavies, J. L. Bertrand-Krajewski, P. S. Mikkelsen, G. Rivard, M. Uhl, D. Dagenais y M. Viklander, «SUDS, LID, BMPs, WSUD and more-The evolution and application of terminology surroundig urban drainage,» *Urban Water Journal*, vol. 12, n° 7, pp. 525-542, 2014.
- [11] Q. Zhou, «Areview of Sustainable Urban Drainage Systems Considering the Climate Change and Urbanization Impacts,» *Water*, vol. 6, pp. 976-992, 2014.
- [12] A. E. Vásquez, «Infraestructura verde, servicios ecosistemicos y sus aportes para enfrentar el cambio climático en ciudades: el caso corredor ribereño del río Mapocho en Santiago de Chile,» *Revista de Geografía norte Grande*, vol. 63, pp. 63-86, 2016.
- [13] Zellner, M., Massey, D., M. E, g y M. Gonzalez, «Exploring the effects of green infrastructure placement on neighborhood-level flooding via spatially explicit simulations,» *Computer Enviroment and Urban Systems*, vol. 56, pp. 116-128, 2016.

- [14] S. Perales-Momparier y I. A. Doménech, «Los sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible: Una alternativa a la Gestión del Agua de Lluvia,» Directiva del marco del agua, Valencia, España, 2008.
- [15] A. Khadka, T. Kokkonen, T. J. Niemi, E. Lähde, N. Sillanpää y H. Koivusalo, «Towards natural water cycle in urban areas: Modelling stormwater management designs,» *Urban Water Journal*, 2019.
- [16] Z. Zahmatkesh, S. Burian, M. Karamouz, H. Tavakol-Davani y E. Goharian, «Low-impact development practices to mitigate climate change effects on urban stormwater runoff: Case study of New York City,» *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 141, nº 04014043, 2015.
- [17] L. Moore, J. Gulliver, L. Stack y M. Simpson, «Stormwater management and climate change: vulnerability and capacity for adaptation in urban and suburban contexts,» *Climatic Change*, vol. 138, nº 3-4, pp. 491-504, 2016.
- [18] S. Uvino y R. Upaka, «Sustainable urban drainage systems (SUDS)-what it iswhre do we stand today?,» *Engineering and Applied Science Research*, vol. 44, nº 4, pp. 235-241, 2017.
- [19] J. L. Webber, T. D. Fletcher, L. Cunningham, D. Butler y M. J. Burns, «Is green infrastructure a viable strategy for managing urban surface flooding?,» *URBAN WATER JOURNAL*, 2019.
- [20] G. uk, «www.geogreen.co.uk,» 24 abril 2020. [En línea]. Available: <https://www.geogreen.co.uk/applications/suds-tank-applications/>. [Último acceso: 24 4 2020].
- [21] BERA, «<http://www.bera-centroamerica.com/>,» 23 4 2020. [En línea]. Available: http://www.bera-centroamerica.com/Web/bera-gravel-fix-pro_es.html. [Último acceso: 23 4 2020].
- [22] Susdrain, «www.susdrain.org,» 24 4 2020. [En línea]. Available: <https://www.susdrain.org/delivering-suds/using-suds/background/sustainable-drainage.html>. [Último acceso: 24 4 2020].
- [23] Urbanscape, «www.urbanscape-architecture.com,» 24 4 2020. [En línea]. Available: <https://www.urbanscape-architecture.com/>. [Último acceso: 23 4 2020].
- [24] W. Z. X. C. C. J. J. H. X. T. J. Z. Xixin zhang, Assesmet on the Effectiveness of Urban StormWater Management, MDPI Water, 2020.
- [25] Z. Yxin, Z. Weihang, C. Xue , Y. Changhyun, H. Jianli , T. Xiaonan y Z. Jun , «Assessment on the Effectiveness of Urban Stormwater Managemet,» *Water MDPIA*, vol. 13, nº 4, 2021.
- [26] J. H. Amorim, M. Engardt, C. Johannsson, I. Ribeiro y M. Sannebro, «Regulating and Cultural Ecosystem Services of Urban Green Infrastructure in nordic countries: A Systematic review,» *Internacional Journal of Enviromental reseach and Public Health*, vol. 1219, nº 18, 2021.
- [27] J. R. Junqueira, S. Serrano Neumann y I. White, «Developing and testing a cost-efefctiveness analysis to prioritize green infrastructure alternatives for climate change adaptation,» *Water and Enviromental Journal promoting Sustainable Solutions*, 2022.
- [28] F. Rezende Leite y M. L. Pereira Antunes, «Green roof recent designs to runoff control: A Review of building materials and plant species used in studies,» *Ecdological Engineering*, vol. 189, 2023.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

El autor aquí firmante declara que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Evaluación del comportamiento de la demanda en el modelado de las redes de distribución

Demand behavior evaluation in modeling distribution networks

Rebeca Solis-Ortega¹, Gustavo A. Gómez-Ramírez²,
Kervyn Josué Sáenz-González³, Alfredo Josué Ellis-Rodríguez⁴, William Johan Navarro-Alpízar⁵


Fecha de recepción: 1 de febrero, 2024

Fecha de aprobación: 18 de junio, 2024

Solis-Ortega, R; Gómez-Ramírez, G.A; Sáenz-González, K.J; Ellis-Rodríguez, A.J; Navarro-Alpízar, W.J. Evaluación del comportamiento de la demanda en el modelado de las redes de distribución. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 1. Enero-Marzo, 2025. Pág. 115-127.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i1.7050>


1 Escuela de Matemática. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.

 rsolis@tec.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-3065-8386>


2 Escuela de Ingeniería en Electromecánica. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.

 ggomez@itcr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0001-9195-072X>

3 Escuela de Ingeniería en Electromecánica. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.

 sgkervyn356@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0006-8221-9701>

4 Escuela de Ingeniería en Electromecánica. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.

 ellisrodriguez@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0000-0453-4163>

5 Escuela de Ingeniería en Electromecánica. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.

 w.navarro.alp@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0003-1880-8489>

Palabras clave

Gestión de carga; capacidad de alojamiento; planificación del sistema eléctrico; planificación de la red de distribución; respuesta a la demanda.

Resumen

Las compañías eléctricas buscan desarrollar una infraestructura eléctrica de transmisión y distribución confiable para satisfacer las necesidades energéticas de los consumidores. La flexibilidad, la resiliencia y la seguridad de las redes a menudo pueden mejorarse mediante la presencia de una infraestructura eléctrica robusta. Debido a la falta de planificación, muchas veces no se invierte en los proyectos eléctricos necesarios, lo que podría provocar su aplazamiento en determinadas situaciones y comprometer la confiabilidad del sistema. Para realizar una buena gestión del sistema de potencia, se requiere tener datos tanto de la generación, respuesta de la demanda y todo lo necesario para realizar una adecuada planificación. Utilizando la información recopilada de medidores inteligentes y mediciones de redes de distribución, en este artículo se simulará y comparará el modelado de respuesta de la demanda. Modelamos una red de distribución residencial con 634 cargas residenciales utilizando el Programa Analizador de Transitorios Eléctricos (ETAP®) para determinar los efectos en el rendimiento de la red de distribución. Los resultados de la simulación sugieren que simulando la respuesta de la demanda utilizando datos de medidores inteligentes o mediciones del circuito de distribución se pueden lograr variaciones de hasta 13,06%. Además, en ambas situaciones se podrían conseguir distintos perfiles de tensión lo cual en la planificación de las redes eléctricas se puede comprometer las decisiones que puedan ser tomadas al respecto.

Keywords

Load Management; hosting Capacity; power system planning; distribution grid planning; demand respond.

Abstract

Electric utilities aim to establish dependable electrical transmission and distribution infrastructure to fulfill the energy requirements of users. The availability of a strong electrical infrastructure can frequently enhance grid flexibility, resilience, and security. Inadequate planning often leads to insufficient investment in essential electrical projects, resulting in their potential postponement and compromising the system's reliability. In order to effectively manage the power system, it is essential to possess data pertaining to generation, demand respond, and all other relevant factors required for proper planning. This article will simulate and evaluate demand response modeling using data obtained from smart meters and distribution network measurements. We utilized the Electrical Transient Analyzer Program (ETAP®) to simulate a residential distribution network consisting of 634 residential loads. The objective was to evaluate the impact of these loads on the operation of the distribution network. The simulation results indicate that utilizing smart meter data or distribution circuit measurements can lead to differences of up to 13.06% in demand responsiveness. Moreover, in both scenarios, distinct voltage profiles might be attained, which can potentially undermine the decision-making process in the planning of electrical networks.

Introducción

Las redes eléctricas, caracterizadas por su inmensa complejidad, facilitan la transferencia de electricidad desde los generadores (fuentes de energía) hacia los consumidores (cargas) a través de las redes eléctricas de transmisión y distribución. Por lo tanto, una falla o sobrecarga del sistema puede provocar una reducción en las capacidades de transferencia de potencia, provocando desconexiones y de esta forma afectar la productividad de los clientes [1], [2].

Fuentes de energía renovables como la fotovoltaica (PV) y la eólica son cruciales para obtener energía limpia y satisfacer la demanda energética pero también para aumentar la confiabilidad en el suministro de la energía eléctrica. Sin embargo, la potencia variable de los sistemas fotovoltaicos y eólicos exige almacenamiento de energía, particularmente a medida que su integración aumenta dentro la red eléctrica [3], [4], [5]. En consecuencia, a medida que crece la penetración de energía eléctrica variables como las mencionadas anteriormente, los análisis de estabilidad de la red se vuelven esenciales para garantizar operaciones confiables de la red [6], [7].

En el caso específico de la generación de energía fotovoltaica, las condiciones climáticas afectan significativamente su confiabilidad, lo que lleva a una producción de energía solar intermitente. Además, la demanda generalizada de energía durante las horas del día contrasta con la limitada disponibilidad de energía solar, lo que crea un desajuste entre oferta y demanda. Estos desafíos particulares resaltan la necesidad de soluciones de almacenamiento de energía [2], [8]. Los sistemas de almacenamiento ofrecen una variedad de beneficios, entre los que se incluyen: proporcionar servicios auxiliares, aliviar la congestión en la infraestructura de transmisión y distribución, regular el voltaje, abordar la inestabilidad y permitir inversiones diferidas en la red [9].

La integración del almacenamiento junto con la generación distribuida (GD) ofrece una solución potencial para mitigar los desafíos y potenciales problemas que puede traer la generación de energía. Sin embargo, la incorporación excesiva de sistemas de GD en las redes eléctricas puede dar lugar a diversos problemas, incluyendo desviaciones de voltaje, mayores pérdidas en las líneas, transformadores y alimentadores sobrecargados, mecanismos de protección comprometidos y niveles elevados de distorsión armónica que exceden los estándares internacionales establecidos. Estos problemas ocurren cuando el sistema excede su límite de capacidad de alojamiento (HC) [9], [10], [11].

Varios estudios han analizado diversas metodologías para gestionar eficazmente la capacidad de alojamiento dentro de los sistemas integrados de GD. Al sintetizar y evaluar sus principales hallazgos, estos estudios brindan información importante que permiten a los operadores tomar decisiones informadas para facilitar la integración de los sistemas de GD emergentes en la red existente [1], [12], [13]. De cara al futuro, se anticipa la transición de la generación concentrada a la generación distribuida con almacenamiento. Este enfoque promete traer beneficios como una mejor gestión de la demanda de energía, una mayor capacidad de energía disponible, una mejor regulación de la frecuencia y una gestión eficaz de la carga en el sistema de distribución. Además, este cambio ofrece ventajas en la transmisión de energía, incluida la gestión de carga, la mitigación de la congestión, la estabilidad del voltaje y una mejor calidad de la energía. Otras investigaciones han realizado estudios y simulaciones detalladas que buscan analizar escenarios de casos específicos observados dentro de diversas redes reales considerando otro tipo de cargas como lo son los Vehículos Eléctricos [14], [15]. Estas investigaciones no sólo arrojan luz sobre la viabilidad técnica y las implicaciones de rendimiento, sino que también ofrecen información importante sobre las implicaciones de la distribución de energía,

la estabilidad de la red y la transformación general del panorama energético. Por esta razón, el manejo de la información y los datos recopilados son una herramienta vital en la planificación de las redes eléctricas.

De esta manera, extraer la información desde los puntos de medición es crucial para que posterior a realizar los estudios se obtengan resultados confiables y acertados. Para realizar el análisis de capacidad de alojamiento es necesario conocer los datos de las redes eléctricas tales como la respuesta de la demanda, generación eléctrica (de acuerdo con diversas fuentes), pérdidas eléctricas y por su puesto de la topología de la red eléctrica [5], [9], [16], [17].

Los sistemas eléctricos tanto de distribución como transmisión deben ser flexibles desde todo punto de vista. La flexibilidad debe ser alcanzada para la tensión, potencia, transferencia de potencia entre área esto con el fin de brindar continuidad y confiabilidad a los usuarios del servicio eléctrico [6], [18]. Se vuelve necesario por lo tanto evaluar la flexibilidad cuando la planificación incluye una alta penetración de energía variables como el caso de la energía solar que puede ser de uso preferente por los consumidores residenciales e industriales[2], [6], [19], [20].

Este artículo evalúa la respuesta de la demanda dentro de una red de distribución monofásica. La evaluación se basa en datos recopilados de mediciones en una red de distribución con un nivel de tensión de 34.5 kV. Se adquirió la información de la demanda a través de medidores inteligentes durante un período de tiempo específico. Por otro lado, se obtuvo la información de la demanda total del circuito en un punto “aguas arriba” del sistema para tomar en cuenta todas las cargas del sistema evaluado.

El análisis tiene como objetivo comparar el comportamiento de la red de distribución simulando la demanda considerando el caso de analizar a través de los medidores inteligentes o considerado un solo punto de medición para estimar una demanda para cada una de las cargas. De esta manera se hace un análisis del comportamiento de la red para obtener perfiles de carga y tensión.

Este artículo está estructurado de la siguiente manera: la Sección 2 describe el caso de estudio y la sección 3 presenta la metodología. Los resultados y discusiones se presentan en la sección 4 y las conclusiones se muestran en la sección 5.

Caso de estudio

En la Figura 1 se presenta el esquema eléctrico correspondiente al caso de estudio. Este análisis se centra en la evaluación de una red de distribución preexistente, la cual ha sido minuciosamente examinada y simulada a través del software ETAP® [16]. El sistema en cuestión abarca un conjunto de 634 cargas residenciales, 102 transformadores, 239 nodos y opera con una tensión monofásica de 19920/240/120 V.

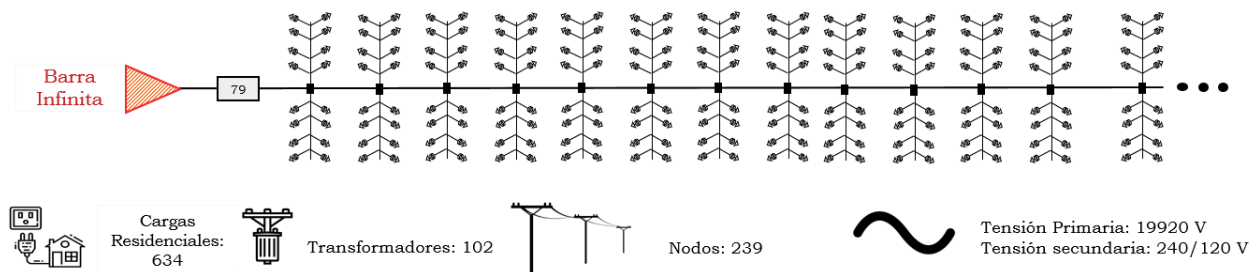


Figura 1. Esquema eléctrico de la red de distribución monofásica usada como caso de estudio.

Se ha desarrollado un modelo de la sección de la Red de Distribución basado en los datos proporcionados por una de las empresas eléctricas regionales. Además, la empresa suministró los valores de los parámetros para las líneas de distribución, transformadores, cargas y otros elementos dentro de la infraestructura eléctrica. En el proceso de simulación, se abordaron dos casos de análisis. En el primero (Caso-1), se consideró la información obtenida de los medidores inteligentes instalados en las cargas. Con la presencia de estos medidores, se extrajeron datos de una semana en específico durante un período de alta demanda de electricidad, con muestreos hechos cada 15 minutos.

En el segundo caso (Caso-2), se recopilaron datos relativos a la demanda total del circuito en la alimentación, como se muestra en la Figura 1 (dispositivo de protección 79). Este enfoque permitió capturar el comportamiento de las 634 cargas, contemplando las pérdidas a lo largo de la red de distribución, con mediciones tomadas cada 15 minutos durante un período de 7 días. Así, se generaron curvas representativas de la demanda para cada carga del sistema, considerando el comportamiento medido en el dispositivo de protección del circuito.

Así, este estudio se enfoca en llevar a cabo una evaluación del impacto de simular el comportamiento del sistema de distribución utilizando los datos del Caso-1 en comparación con los del Caso-2. El objetivo primordial es identificar y analizar las diferencias entre ambos casos, proporcionando así información valiosa para la planificación de las redes eléctricas.

Metodología

Las simulaciones se realizaron usando ETAP® para determinar flujos de potencia monofásico, con el propósito de obtener los perfiles de tensión y demanda en la red de distribución. Se simularon flujos de potencia a lo largo de 24 horas, con intervalos de 15 minutos, durante los 7 días del estudio, con el fin de estudiar el comportamiento de la tensión y la demanda en los casos planteados. En la simulación del Caso-1, se transfirieron datos desde los medidores inteligentes a ETAP®, incluyendo información sobre potencia activa y reactiva de las cargas, así como el factor de potencia. En cambio, para el Caso-2, se ajustó el comportamiento de la curva de demanda en la red de distribución y se adaptó a cada carga del sistema. Los datos de la demanda (D_i) se muestrearon en intervalos de 15, 30 o 60 minutos, según la disponibilidad de información y para un periodo específico de días. Del mismo modo, se extrajo la información del factor de potencia (fp_i). Los datos de demanda generaron el índice α , como indica la ecuación 1.

$$\alpha = \frac{D_i}{D_{max}} \quad (1)$$

Donde D_{max} es la Máxima Demanda presente del periodo. Para obtener los perfiles de demanda de cada instante de tiempo se utiliza la ecuación 2.

$$P_i = \alpha \cdot P_{carga} \quad (2)$$

donde P_{carga} representa la Potencia Nominal Simulada. Con el dato del factor de potencia, se calcula la potencia reactiva (Q_i) de cada carga, conforme a la ecuación 3.

$$Q_i = P_i \cdot \tan(\cos^{-1} fp_i) \quad (3)$$

Una vez que los datos han sido perfilados, se introducen en ETAP® para llevar a cabo la simulación de la red, permitiendo así evaluar el rendimiento del sistema. Este proceso de modelado proporciona una evaluación del desempeño del sistema, como se ilustra en la sección de resultados.

Resultados y discusión

Una vez creados los perfiles de demanda para los casos 1 y 2, se procedió a evaluar el rendimiento del sistema de distribución. En la Figura 2 se presenta el comportamiento de la demanda, comparando ambos casos mencionados anteriormente. De acuerdo con la tabla 1, las desviaciones promedio muestran un valor del 13.06%. Esta tabla presenta las variaciones diarias entre cada uno de los casos, en intervalos de 30 minutos. Se observa que las mayores desviaciones ocurren durante los periodos nocturnos, destacándose la mayor desviación a las 23:15 horas con un valor del 24.60%.

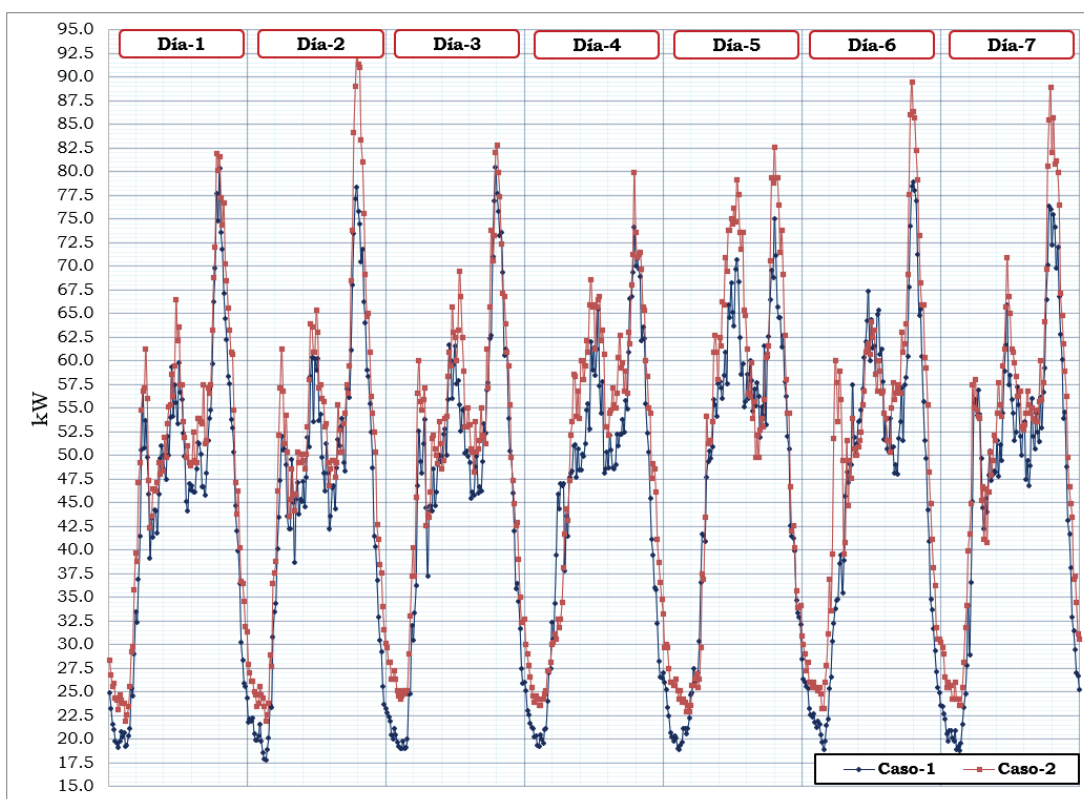


Figura 2. Comportamiento de la respuesta en la demanda en 7 días entre el Caso-1 y el Caso-2

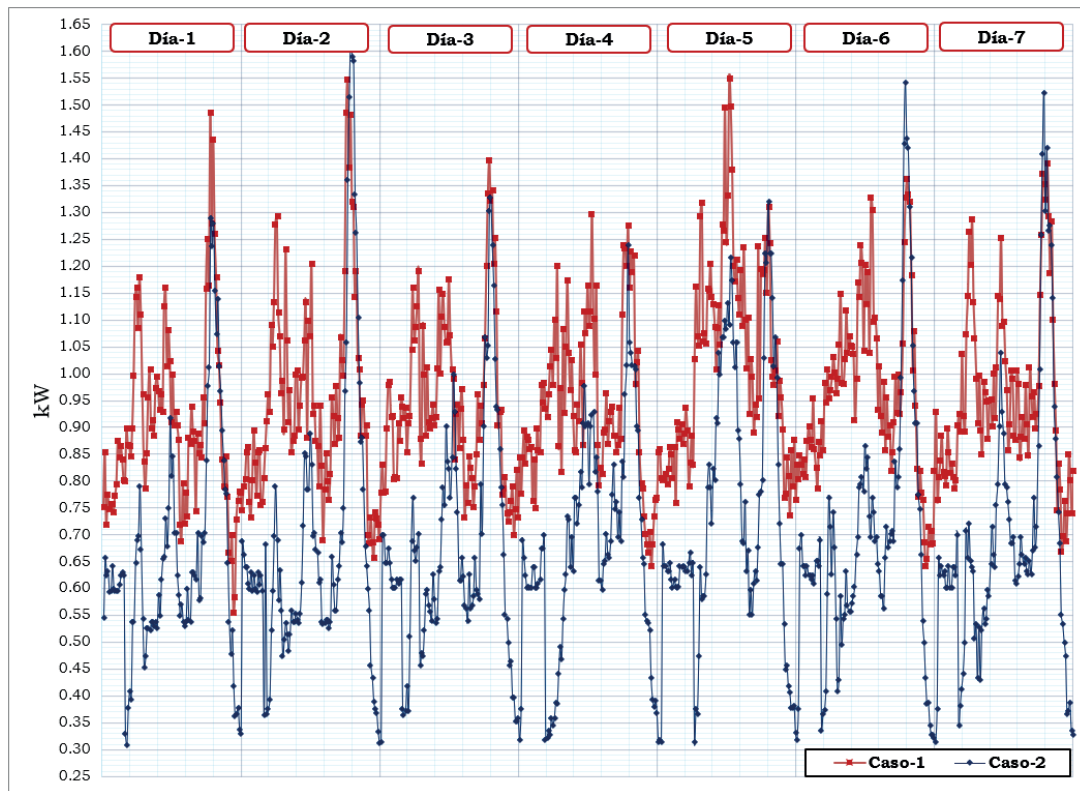


Figura 3. Comportamiento de pérdidas de la red eléctrica comparando los Caso-1 y Caso-2.

El comportamiento resultante de las pérdidas en los casos evaluados se presenta en la Figura 3, donde se pueden observar variaciones significativas entre los casos analizados. Por otro lado, el comportamiento de la tensión en cada uno de los casos muestra características diferentes, tal y como se muestra en las Figuras 4 y 5. Los colores asignados a cada escenario describen la variación en el comportamiento de la tensión medida en cada nodo simulado. Los resultados destacan que un aumento en la tensión conlleva a una notable disminución de las pérdidas.

La respuesta de la tensión muestra comportamientos desiguales en ambas simulaciones. En el caso 1 (ver Figura 4), se muestran perfiles altos de tensión comparados con los mostrados en el Caso-2 (ver Figura 5). Esto demuestra una diferencia significativa no solo en los perfiles de tensión sino en los flujos de potencia a través del día debido al comportamiento de la demanda en el día. La Figura 6, muestra esta variación porcentual del comportamiento de la demanda entre el Caso-1 y el Caso-2. Se pueden observar variaciones mayores que el 13.06% hasta el 24.6% tal y como se mencionó anteriormente. Este tipo de variaciones pueden inducir errores en la planificación de las redes eléctricas y peor aún incurrir en inversiones innecesarias.

Cuadro 1. Diferencias porcentuales entre el caso 1 y el caso 2.

Hora	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Promedio
00:00	13.85	28.10	30.23	19.21	14.07	13.93	26.41	20.83
00:30	18.45	19.68	28.27	23.22	27.18	6.42	20.04	20.47
01:00	23.19	21.74	31.68	19.43	25.54	11.78	31.60	23.57
01:30	21.20	17.63	28.67	18.41	29.92	13.73	23.13	21.81
02:00	15.85	18.82	27.27	25.38	30.70	16.71	22.30	22.43
02:30	14.87	31.05	28.70	15.40	28.01	14.79	28.15	23.00
03:00	16.36	23.48	30.21	24.03	21.21	20.99	25.42	23.10
03:30	20.85	17.97	25.59	18.56	12.94	22.93	18.01	19.55
04:00	21.44	18.56	32.79	0.69	11.60	29.68	28.23	20.43
04:30	18.75	12.54	31.93	7.30	4.78	45.53	16.98	19.69
05:00	27.61	15.19	25.48	9.15	6.55	30.53	22.70	19.60
05:30	8.31	20.74	14.37	28.86	2.67	77.77	0.95	21.95
06:00	12.39	12.36	13.70	30.49	13.21	53.89	0.87	19.56
06:30	12.46	10.57	6.10	18.97	10.12	41.88	0.85	14.42
07:00	8.25	3.06	17.62	1.86	6.14	1.72	4.97	6.23
07:30	12.36	1.97	3.12	0.84	3.77	6.85	2.14	4.43
08:00	4.81	14.06	7.19	10.85	3.60	0.61	3.60	6.39
08:30	7.26	7.00	8.46	14.01	8.92	6.24	1.15	7.58
09:00	3.62	8.60	7.17	12.11	12.59	1.03	7.75	7.55
09:30	6.90	4.71	2.72	24.08	7.92	4.90	5.58	8.12
10:00	2.54	4.94	2.10	16.16	18.26	4.33	8.30	8.09
10:30	2.54	14.03	4.31	13.37	16.33	5.75	9.13	9.35
11:00	3.99	5.25	0.87	24.98	12.14	4.60	6.46	8.33
11:30	19.52	1.11	5.72	11.13	10.01	1.03	16.22	9.25
12:00	6.21	4.56	4.35	4.75	19.66	1.69	9.46	7.24
12:30	2.64	5.57	25.39	1.55	11.92	0.17	15.84	9.01
13:00	3.83	15.77	13.91	14.15	17.81	8.11	1.65	10.75
13:30	15.48	3.99	5.40	26.03	23.23	7.72	9.31	13.02
14:00	5.46	10.91	10.23	5.21	16.21	5.36	0.37	7.68
14:30	13.73	6.36	11.42	4.41	0.93	1.55	14.72	7.59
15:00	1.26	7.68	5.27	17.36	3.18	6.57	18.19	8.50
15:30	5.33	7.07	0.85	12.26	2.31	13.33	1.69	6.12
16:00	14.18	4.97	10.40	18.20	9.61	15.28	5.71	11.19
16:30	11.96	8.39	5.59	13.30	1.51	10.76	2.15	7.67
17:00	10.80	0.73	2.10	8.31	2.29	10.32	7.08	5.95
17:30	4.73	6.01	1.02	2.91	13.31	7.59	1.91	5.35
18:00	3.93	8.40	17.81	7.20	1.71	14.34	4.88	8.32
18:30	5.43	15.37	4.74	2.66	14.10	15.82	11.95	10.01
19:00	1.47	20.45	6.68	5.06	10.07	9.35	13.55	9.52
19:30	3.64	18.27	5.55	2.14	20.75	7.02	9.09	9.49
20:00	9.01	14.00	3.18	12.23	10.69	13.12	10.98	10.46
20:30	12.43	9.68	4.32	4.82	10.39	9.05	6.90	8.23
21:00	13.19	9.89	10.29	11.28	3.18	17.10	14.78	11.39
21:30	8.78	11.91	0.33	19.89	7.48	25.06	15.15	12.66
22:00	4.24	24.69	6.87	24.46	1.14	29.25	12.22	14.70
22:30	10.44	24.97	17.57	28.84	0.63	20.16	32.22	19.26
23:00	28.61	28.45	10.58	37.04	1.41	16.98	26.38	21.35
23:30	24.53	33.79	25.15	31.30	6.48	22.48	17.02	22.96
Promedio	11.25	13.47	12.59	14.20	11.45	15.56	12.90	13.06

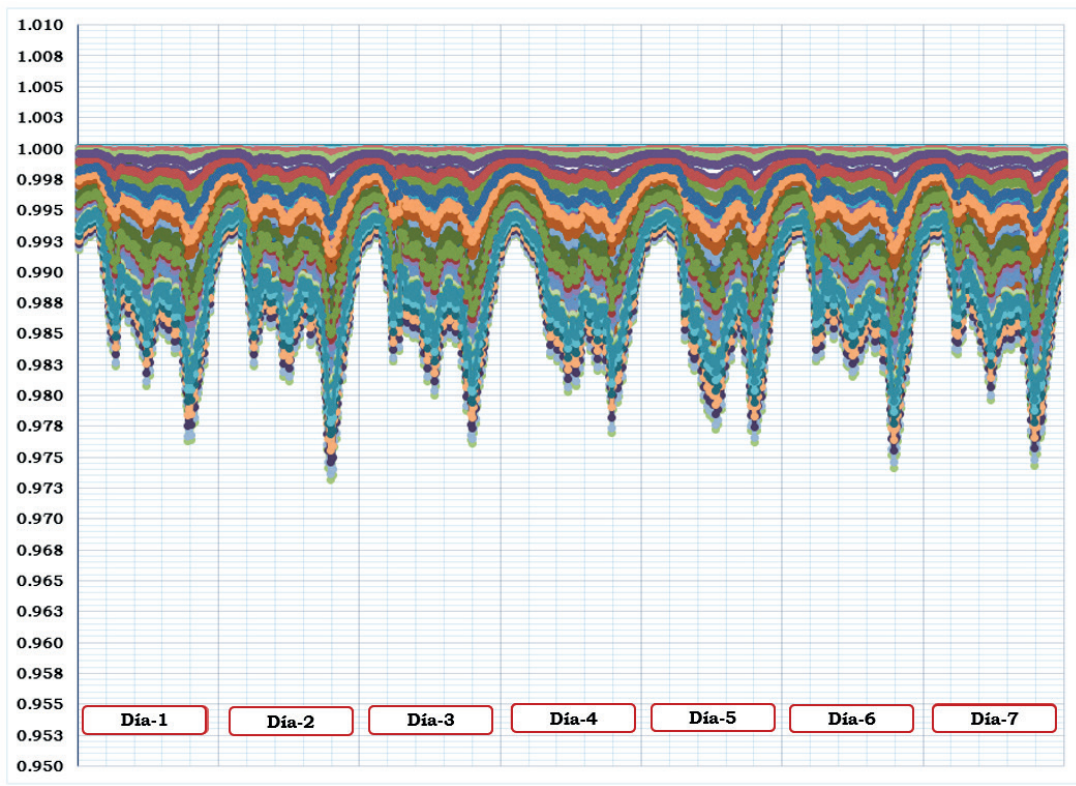


Figura 4. Comportamiento del voltaje (pu) en el caso 1.

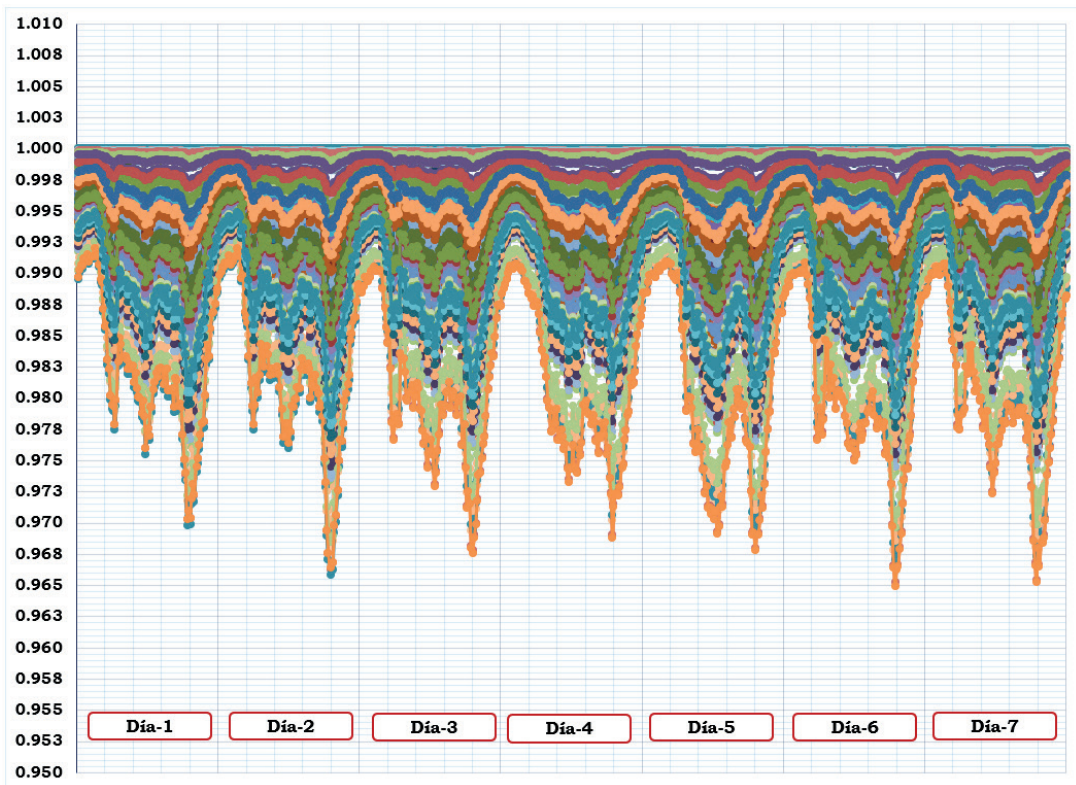


Figura 5. Comportamiento del voltaje (pu) en el caso 2.

Cuando la planificación se hace bajo el esquema tradicional (Caso-2), puede dar lugar a desviaciones significativas como las obtenidas en este estudio. Por esta razón, un conocimiento adecuado del comportamiento de la demanda, así como tener modelos de predicción de la demanda se hacen necesarios para evitar sesgos en la información. Claro está, bajo ciertos contextos situacionales, las empresas de distribución no han alcanzado el nivel de digitalización óptimo de sus redes eléctricas. Esto puede ser una limitante en la planificación, sin embargo, en caso de tener acceso a este tipo de tecnología (medidores inteligentes) la información podría ser herramienta invaluable y poderosa en la planificación de sistemas eléctricos.

En estudios como la determinación de la Capacidad de Alojamiento de Recursos de Generación Distribuida se requiere la utilización de datos confiables para minimizar la posibilidad de suposiciones incorrectas en la integración de recursos distribuidos, como la energía solar. Actualmente, existe una abundancia de datos relacionados con las redes eléctricas, perfiles de demanda, generación, comportamiento de equipos entre otros, por lo que la gestión de estas hoy día se facilita en el modelado y simulación. La información obtenida de los medidores inteligentes son una herramienta vital para gestionar de manera individual las cargas, generación, pérdidas entre otros y de esta manera hacer estimaciones reales del rendimiento de los circuitos de distribución.

Finalmente, la Figura 7 muestra la variación porcentual diaria. Se puede observar que las primeras horas del día y las horas nocturnas presentan algunas de las variaciones más significativas. Se observa el aumento en la variación posterior a las 9:00 p.m., que se mantiene continua hasta las primeras horas del día siguiente. El promedio de desviación del error da como resultado 13.06%, donde el sexto día es el que presenta un mayor porcentaje de desviación.

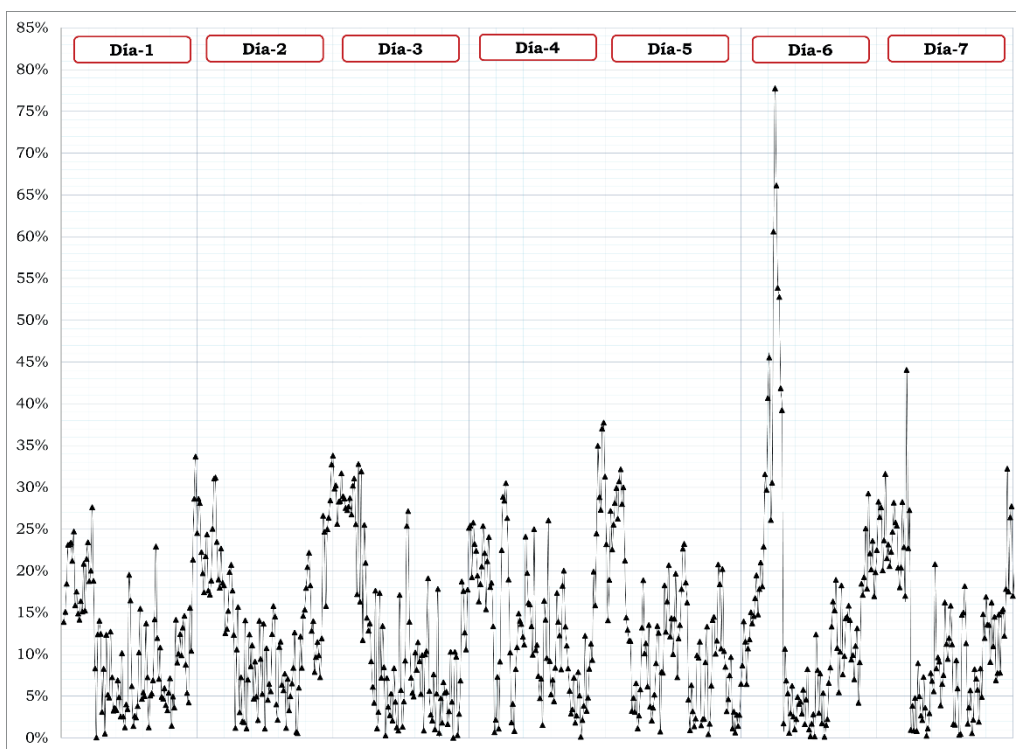


Figura 6. Porcentaje de variación de demanda entre el caso 1 y el caso 2 en una semana.

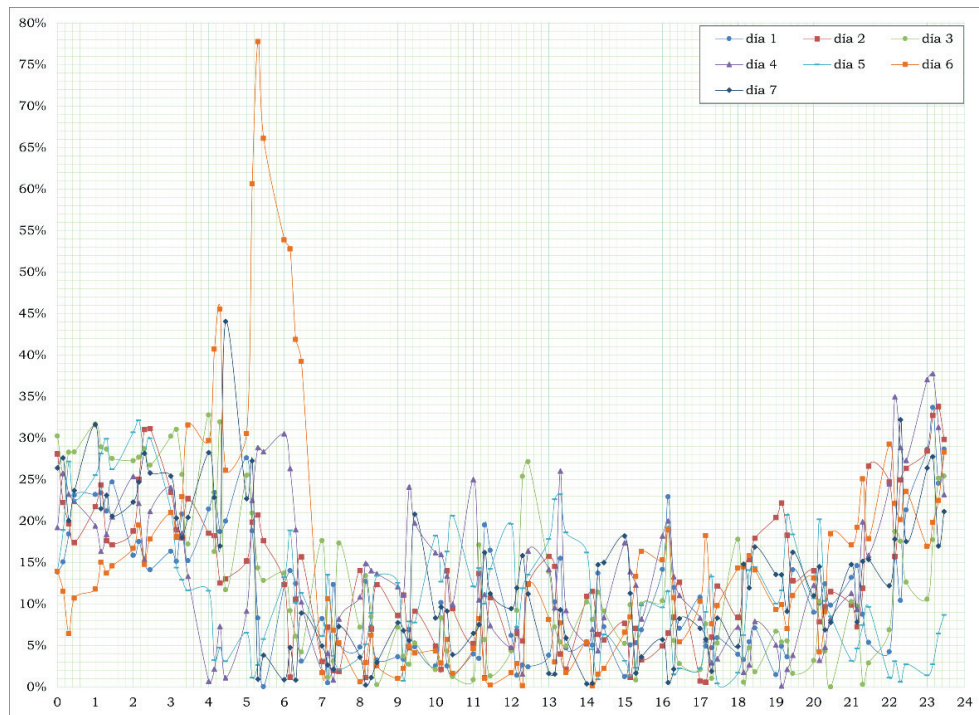


Figura 7. Variación porcentual diaria comparativa entre el caso 1 y el caso 2.

Conclusiones

La disponibilidad de información confiere una importancia significativa al modelado y simulación de las redes eléctricas en la actualidad, especialmente cuando se espera obtener resultados para la toma de decisiones. La disponibilidad de información está intrínsecamente ligada a las inversiones realizadas por las compañías eléctricas en su infraestructura, pero va más allá, incluyendo la forma en que se gestiona e interpreta la información para que sea útil y confiable. La respuesta de la demanda puede ser modelada a través de la información obtenida de los equipos de medición dentro de las redes de distribución o mediante la información real extraída de los medidores inteligentes. Modelar la respuesta de la demanda en ambos casos puede arrojar resultados diferentes. Las diferencias encontradas en este artículo promediaron un 13.06%, alcanzando casi el doble de ese valor en ciertas horas. Por esta razón, los perfiles de tensión también se ven afectados en cada uno de los nodos del sistema. En algunos casos de análisis, resultados con grandes diferencias pueden impactar las decisiones económicas e inversiones que las compañías eléctricas tengan previstas. Por último, otro aspecto de gran importancia es la relevancia de la información al realizar estudios de capacidad de alojamiento para la integración de Recursos de Generación Distribuida. En este tipo de análisis, la gestión de la información será vital para establecer con claridad y fiabilidad los puntos de integración de los Recursos de Generación Distribuida.

Agradecimientos

Esta investigación forma parte del proyecto VIE 5402-1341-1901. Las personas autoras expresan su agradecimiento a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión, la Oficina de Estudios de Posgrado del Instituto Tecnológico de Costa Rica por su apoyo financiero y asistencia durante esta investigación. Además, se agradece a CFS SISTEMAS S.A (representante exclusivo de ETAP para Costa Rica) y a ETAP por proporcionar la licencia de software académico utilizada en las simulaciones presentadas en este documento.

Referencias

- [1] F. Ding y B. Mather, «On Distributed PV Hosting Capacity Estimation, Sensitivity Study, and Improvement», *IEEE Trans Sustain Energy*, vol. 8, n.º 3, pp. 1010-1020, jul. 2017, doi: 10.1109/TSTE.2016.2640239.
- [2] S. Impram, S. Varbak Nese, y B. Oral, «Challenges of renewable energy penetration on power system flexibility: A survey», *Energy Strategy Reviews*, vol. 31. Elsevier Ltd, 1 de septiembre de 2020. doi: 10.1016/j.esr.2020.100539.
- [3] A. Sheikhi, A. Maani, F. Safe, y A. M. Ranjbar, «Distributed generation penetration impact on distribution networks loss», *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 1, n.º 11, pp. 730-735, mar. 2013, doi: 10.24084/repqj11.431.
- [4] Q. Lu, J. Chen, Y. Zhu, S. Liu, Y. Xu, y K. Wang, «Risk Assessment with High Distributed Generations Penetration Considering the Interaction of Transmission and Distribution Grids; Risk Assessment with High Distributed Generations Penetration Considering the Interaction of Transmission and Distribution Grids», 2018.
- [5] N. E. Matute, S. P. Torres, y C. A. Castro, «Transmission Expansion Planning Considering the Impact of Distributed Generation», en *Proceedings of 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe, ISGT-Europe 2019*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., sep. 2019. doi: 10.1109/ISGTEurope.2019.8905460.
- [6] M. I. Alizadeh, M. Parsa Moghaddam, N. Amjadi, P. Siano, y M. K. Sheikh-El-Eslami, «Flexibility in future power systems with high renewable penetration: A review», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 57. Elsevier Ltd, pp. 1186-1193, 1 de mayo de 2016. doi: 10.1016/j.rser.2015.12.200.
- [7] M. Panda y Y. K. Nayak, «Impact analysis of renewable energy Distributed Generation in deregulated electricity markets: A Context of Transmission Congestion Problem», *Energy*, vol. 254, sep. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.124403.
- [8] G. A. Gómez-Ramírez, C. Meza, G. Mora-Jiménez, J. R. R. Morales, y L. García-Santander, «The Central American Power System: Achievements, Challenges, and Opportunities for a Green Transition», *Energies (Basel)*, vol. 16, n.º 11, jun. 2023, doi: 10.3390/en16114328.
- [9] S. M. Ismael, S. H. E. Abdel Aleem, A. Y. Abdelaziz, y A. F. Zobaa, «State-of-the-art of hosting capacity in modern power systems with distributed generation», *Renewable Energy*, vol. 130. Elsevier Ltd, pp. 1002-1020, 1 de enero de 2019. doi: 10.1016/j.renene.2018.07.008.
- [10] E. Mulenga, M. H. J. Bollen, y N. Etherden, «A review of hosting capacity quantification methods for photovoltaics in low-voltage distribution grids», *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 115. Elsevier Ltd, 1 de febrero de 2020. doi: 10.1016/j.ijepes.2019.105445.
- [11] L. Mehigan, J. P. Deane, B. P. Ó. Gallachóir, y V. Bertsch, «A review of the role of distributed generation (DG) in future electricity systems», *Energy*, vol. 163. Elsevier Ltd, pp. 822-836, 15 de noviembre de 2018. doi: 10.1016/j.energy.2018.08.022.
- [12] G. A. Gomez-Ramirez, I. A. Luevano-Reyes, G. Mora-Jimenez, L. Garcia-Santander, M. Z. Laskano, y C. Meza, «Increasing Distribution Network Capacity through Storage in Central American Countries: A Case Study», en *2022 IEEE International Conference on Automation/25th Congress of the Chilean Association of Automatic Control: For the Development of Sustainable Agricultural Systems, ICA-ACCA 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/ICA-ACCA56767.2022.10006043.
- [13] S. Fatima, V. Püvi, y M. Lehtonen, «Review on the PV hosting capacity in distribution networks», *Energies*, vol. 13, n.º 18. MDPI AG, 1 de septiembre de 2020. doi: 10.3390/en13184756.
- [14] G. A. Gomez-Ramirez y R. Solis-Ortega, «Electric Vehicle Penetration Modelling for Costa Rica Power System», en *2021 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies, CHILECON 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. doi: 10.1109/CHILECON54041.2021.9703070.
- [15] G. A. Gómez-Ramírez, R. Solis-Ortega, y L. A. Ross-Lépiz, «Impact of electric vehicles on power transmission grids», *Heliyon*, vol. 9, n.º 11, nov. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e22253.
- [16] G. A. Gómez-Ramírez, G. Mora-Jiménez, y C. Meza, «Simulación del sistema de interconexión eléctrica de los países de América Central usando ETAP», *Revista Tecnología en Marcha*, mar. 2023, doi: 10.18845/tm.v36i2.6007.
- [17] M. Z. Ul Abideen, O. Ellabban, y L. Al-Fagih, «A review of the tools and methods for distribution networks' hosting capacity calculation», *Energies*, vol. 13, n.º 11. MDPI AG, 1 de junio de 2020. doi: 10.3390/en13112758.
- [18] O. M. Babatunde, J. L. Munda, y Y. Hamam, «Power system flexibility: A review», en *Energy Reports*, Elsevier Ltd, feb. 2020, pp. 101-106. doi: 10.1016/j.egy.2019.11.048.

- [19] B. Mohandes, M. S. El Moursi, N. Hatziargyriou, y S. El Khatib, «A Review of Power System Flexibility with High Penetration of Renewables», *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, n.º 4, pp. 3140-3155, jul. 2019, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2897727.
- [20] A. Akrami, M. Doostizadeh, y F. Aminifar, «Power system flexibility: an overview of emergence to evolution», *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 7, n.º 5. Springer Heidelberg, pp. 987-1007, 1 de septiembre de 2019. doi: 10.1007/s40565-019-0527-4.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores declaramos que hemos utilizado una herramienta de inteligencia artificial ChatGPT para asistirnos en la redacción de este artículo. Esta herramienta nos ayudó a mejorar la estructura y la claridad del texto. Los contenidos generados por la IA fueron revisados minuciosamente por nosotros para asegurar su precisión y coherencia con el objetivo del estudio.

Diseño y construcción de un túnel de viento subsónico de circuito abierto

Design and construction of a subsonic open-circuit wind tunnel

Fiorella Garro-Fernández¹, Carlos Alberto Echandi-Jara², Emanuel Fallas-Hernández³, Marco Zúñiga-Pepper⁴, Gustavo Richmond-Navarro⁵

Fecha de recepción: 7 de febrero, 2024
Fecha de aprobación: 30 de mayo, 2024

Garro-Fernández, F; Echandi-Jara, C.A; Fallas-Hernández, E; Zúñiga-Pepper, M; Richmond-Navarro, G. Diseño y construcción de un túnel de viento subsónico de circuito abierto. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 1. Enero-Marzo, 2025. Pág. 128-144.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i1.7051>

- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 fgarrofiorella@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0006-4152-4742>
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 echandijara@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0009-0004-2353-8222>
- 3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 efallashdez@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-2159-0375>
- 4 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 mzunigapepper10@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0008-0788-2348>
- 5 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 grichmond@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-5147-5952>

Palabras clave

Túnel de viento subsónico; sustentación; arrastre; velocidad del viento; número de Reynolds.

Resumen

El Laboratorio de Investigación en Energía Eólica del Instituto Tecnológico de Costa Rica (LIENE) ha diseñado y construido un túnel de viento subsónico de circuito abierto que funciona por succión, con una sección de pruebas 30 x 30 cm, donde se puede caracterizar el comportamiento aerodinámico de modelos en un flujo de aire controlado. El túnel funciona con un motor de 1 caballo de fuerza y puede operar a velocidades de viento entre 7 y 15 m/s; la instrumentación instalada actualmente permite medir fuerzas de sustentación de hasta 100 N y de arrastre de hasta 50 N. En el siguiente trabajo se describe el procedimiento de la concepción, fabricación, instrumentación y caracterización del túnel, desde su base teórica hasta su diseño y operación.

Keywords

Subsonic wind tunnel; lift; drag; wind speed; Reynolds number.

Abstract

The Wind Energy Research Laboratory of the Instituto Tecnológico de Costa Rica (LIENE) has designed and built an open circuit subsonic wind tunnel operating by suction, with a 30x30 cm test section, where the aerodynamic behavior of models in a controlled air flow can be characterized. The tunnel is powered by a 1 horsepower motor and can operate at wind speeds between 7 and 15 m/s; the instrumentation installed allows the measurement of lift forces up to 100 N and drag forces up to 50 N. The following work describes the procedure for the conception, fabrication, instrumentation, and characterization of the tunnel, from its theoretical basis to its design and operation.

Introducción

En la actualidad, la energía representa uno de los mayores retos que tiene la sociedad por delante, debido no solo a la creciente demanda de energía, sino también por el impacto ambiental que esto conlleva; por lo tanto, es necesario implementar nuevas tecnologías de producción energética y especialmente dar un enfoque a las fuentes de energía renovables [1]. Una de las principales fuentes de producción renovable de energía eléctrica es la energía eólica, la cual se ve beneficiada por las investigaciones realizadas en túneles de viento. Esta labor beneficia el aumento de la producción de energía eólica en el mundo [2].

En diferentes latitudes, las universidades se han convertido en centros de investigación y desarrollo en múltiples campos, donde los túneles de viento se han vuelto una herramienta indispensable para el desarrollo [3]. Es por ello que existen centros de enseñanza que cuentan con túneles de viento de gran tamaño que no solo son usados para investigación en un campo concreto, sino que gracias a ellos se abren las puertas a múltiples campos de investigación, desde energía hasta aviación. Una de estas universidades que cuenta con túneles de grandes dimensiones es la Universidad de Kyushu en Japón, esta institución académica cuenta con un túnel de viento de circuito cerrado con dimensiones de 3,6 m de ancho, 2 m de alto y 15 m de largo en la zona de pruebas con motores que impulsan el viento en el túnel de 264 kW [2]. Así como la Universidad de Kyushu, muchas universidades poseen túneles de dimensiones

considerables para investigación y desarrollo, entre ellas se encuentra *T.U. Delft* en los países bajos, *Mie University* en Japón, *Harbin Institute of Technology* en China. Sin embargo, este tipo de equipos son sumamente costosos en su construcción y operación, además de otros requerimientos propios de estos equipos como lo es el área que ocupan y la demanda de potencia eléctrica para su operación, por lo que muchas universidades, al no contar con el presupuesto necesario optan por la construcción de sus propios túneles de viento a una pequeña escala. Un ejemplo de esto es el caso de la Universidad Tecnológica Metropolitana (UTEM) de Santiago de Chile donde se construyó un túnel de viento subsónico de circuito abierto con una sección de pruebas de 430 mm por 430 mm (alto por ancho). Con un motor de 2,2 kW, este túnel es capaz de operar hasta una velocidad de 26,2 m/s en la sección de pruebas [3]. Misma situación se dio en la Universidad Politécnica Salesiana (UPS) de Cuenca, Ecuador, donde se construyó un túnel subsónico de circuito abierto con una sección de pruebas de 300 mm tanto de alto como ancho. Este posee un motor de 0,75 caballos de fuerza que permite operar hasta 23,4 m/s en la sección de pruebas [4].

El Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) se suma al grupo de universidades que ha construido su propio túnel de viento capaz de realizar análisis aerodinámicos. De esta forma, en este trabajo se describe el diseño, construcción y operación del túnel de viento, con el objetivo de proporcionar un entorno de investigación y desarrollo, permitiendo la evaluación y optimización de diseños en condiciones controladas y realistas.

Generalidades de los túneles de viento

Un túnel de viento es un instrumento científico que permite estudiar las características aerodinámicas que tiene el objeto de estudio cuando este se somete a un flujo de aire. Lo anterior se logra por medio de un ventilador el cual genera el flujo de aire mientras que el objeto de estudio se mantiene estático. Esto simula ambas condiciones equivalentes a que el objeto viaje en el aire o el aire viaje a través del objeto [3].

El túnel de viento permite tener un ambiente controlado, lo cual es necesario en el estudio científico para validar los resultados alcanzados. Este se logra al manipular ciertos parámetros del flujo, principalmente la velocidad del viento. El túnel de viento permite mantener un flujo laminar o, si se desea, un flujo con una intensidad de turbulencia controlada [5].

Existen distintas maneras de clasificar los túneles de viento, por ejemplo, si son de circuito cerrado o circuito abierto. Un túnel de circuito cerrado quiere decir que el flujo tiene una trayectoria en la cual no escapa y vuelve a su punto de inicio, mientras que un túnel de circuito abierto tiene extremos en donde el flujo entra y sale. Otra forma de clasificar es por la velocidad del viento: flujo subsónico, transónico, supersónico e hipersónico. De esta forma se relaciona la velocidad del viento con la velocidad del sonido, porque este es un umbral importante que define el comportamiento del flujo [3].

Partes de un túnel de viento

El túnel de viento creado y diseñado en el TEC corresponde un túnel subsónico de circuito abierto, por lo tanto, se limitará la explicación del funcionamiento a este tipo de túnel.

Los túneles de viento constan de 5 secciones principales: tobera, rectificador de flujo, sección de pruebas, difusor y ventilador (ver Figura 1), cada una de ellas cumple una función en la operación del túnel, tal y como se menciona en [3].

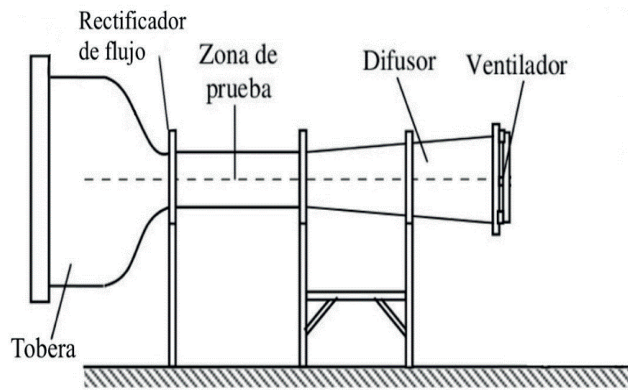


Figura 1. Partes de un túnel de viento [5].

- Tobera: se encarga del ordenamiento y aceleración del flujo de entrada al túnel.
- Rectificador de flujo: ordena el fluido de manera que este tenga un comportamiento laminar.
- Zona de prueba: es dónde se realizan las mediciones sobre el modelo que se encuentra bajo estudio, aquí se ubican todos los instrumentos de medición y los objetos de estudio.
- Difusor: posibilita la salida del fluido de una forma ordenada y uniforme.
- Ventilador: es la parte móvil del túnel que crea el flujo de aire dentro del túnel.

Tobera

Esta sección del túnel es donde ingresa el flujo. Debe tener una geometría específica para que el flujo se mantenga lo más laminar y ordenado posible. Esta geometría corresponde a la que se observa en la Figura 2, en donde los ángulos que forman las esquinas de la entrada y salida, $\alpha/2$ y $\beta/2$ no deben superar los 12 grados [3].

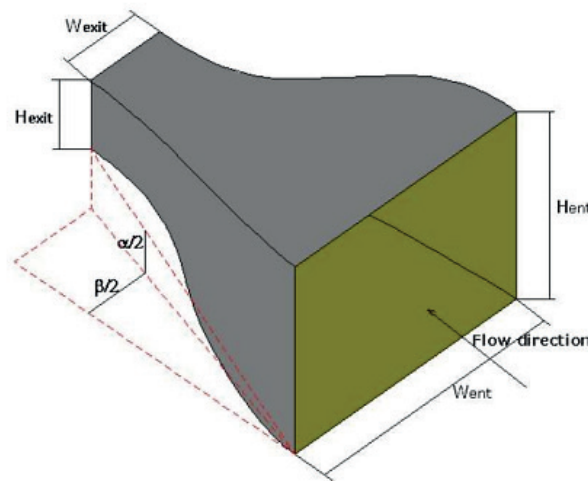


Figura 2. Parámetros para el diseño de una tobera [3].

En el túnel de viento del TEC se diseñó una tobera de 50x50cm, siguiendo las recomendaciones de P. Bradshaw y R.Metha (1979) [6] de seguir la forma de las paredes como segmentos de curvas polinomiales de tercer grado con la finalidad de evitar pérdidas de carga, turbulencia, tal y como se observa en la Figura 3.

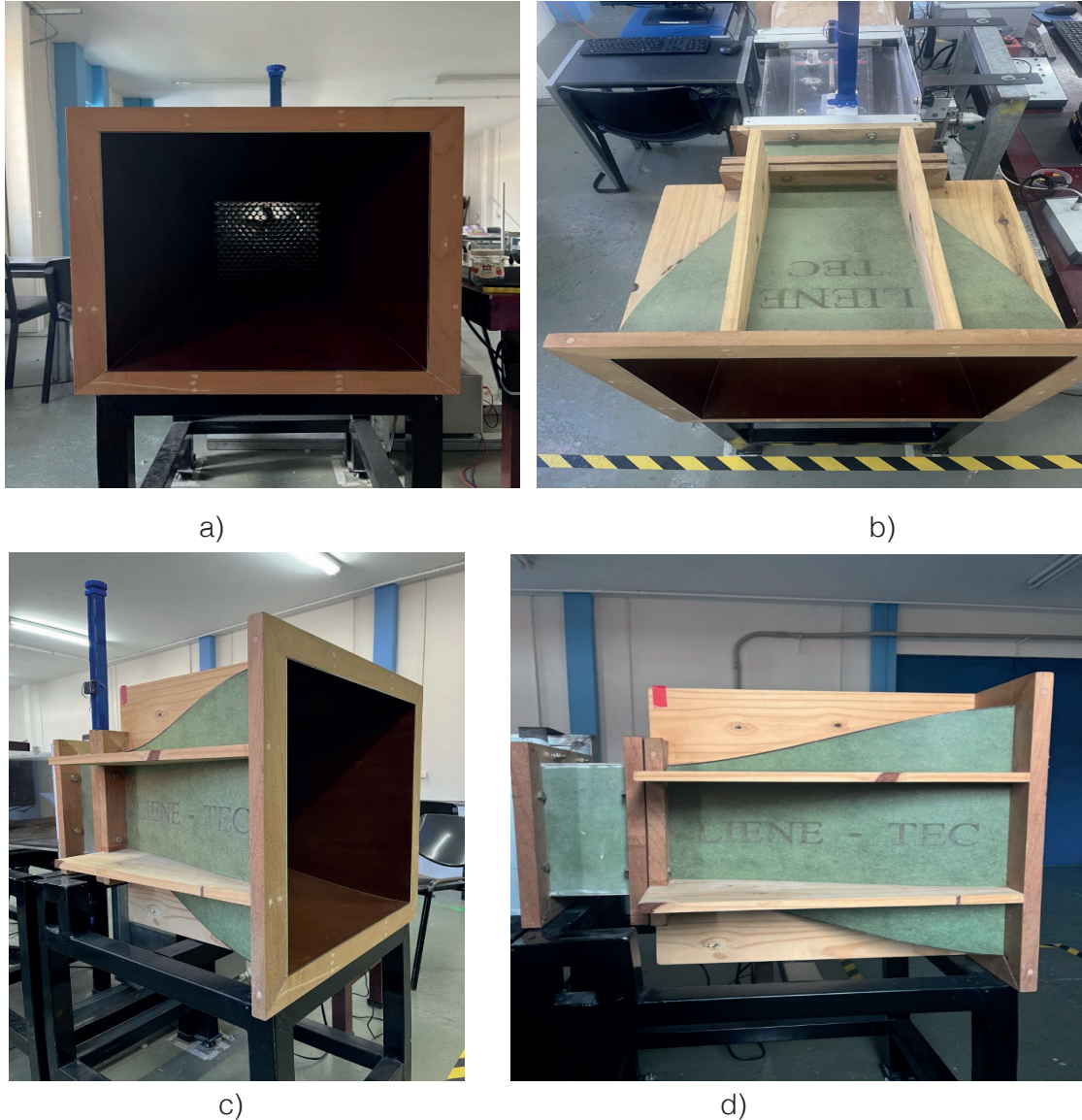


Figura 3. a) Vista frontal de la tobera b) Vista superior de la tobera c) Perspectiva isométrica de la tobera d) Vista lateral de la tobera del túnel de viento del TEC.

Rectificador de Flujo

Un rectificador de flujo es una sección que se encarga de ordenar el flujo proveniente de la tobera de manera que sea laminar y que las líneas de flujo sean lo más paralelas posibles. Usualmente el rectificador de flujo consiste en un arreglo geométrico por el cual el flujo de viento tiene que pasar. Este arreglo puede ser de sección transversal de tubo circular, una malla, o, más comúnmente utilizado, de sección hexagonal tipo panal de abeja como se observa en la Figura 4.

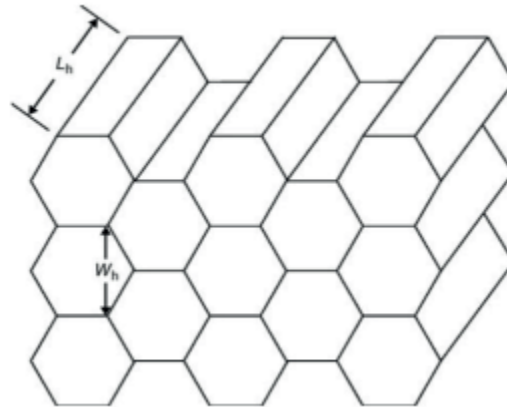


Figura 4. Rectificador tipo panal de abeja [3].

El largo del enderezador de flujo está relacionado directamente con la sección transversal, por lo que para una sección hexagonal el largo debe cumplir la relación $7D \geq L \geq 10D$, donde la D corresponde a la diagonal que forma las aristas del hexágono [7].

A pesar de que el rectificador de panal de abeja es el más utilizado, por razones de practicidad y de disponibilidad de materiales, en el diseño del túnel de viento del TEC se utilizó un rectificador de tubos de 27 x 27cm, tal y como se muestra en la Figura 5.

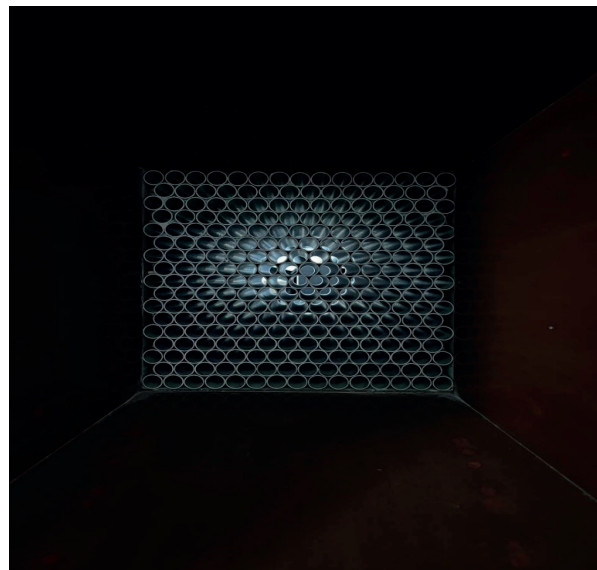


Figura 5. Rectificador de tubos del túnel de viento del TEC.

Sección de Pruebas

En esta parte del túnel es donde se introduce el objeto de estudio, este no debe superar un 10% del área de la sección transversal ya que afecta a las características del flujo [8]. Debido a lo anterior, la sección de pruebas debe tener un tamaño lo suficientemente grande que facilite realizar ensayos y que cumpla con los parámetros necesarios para que, particularmente,

permita alcanzar el rango de número de Reynolds que sea de interés en cada caso. En esta sección también se encuentran los principales dispositivos de medición, como los son la balanza y los tubos de Pitot.

La sección de pruebas del túnel de viento diseñado cuenta con una sección transversal de 275 x 275 mm en el extremo más pequeño y de 300x300 mm en el extremo más grande. La diferencia obedece a la necesidad de compensar el crecimiento de la capa límite y mantener un área con velocidad aproximadamente constante. Esta posee orificios para introducir los tubos de Pitot y la balanza, tal como se muestra en la Figura 6.

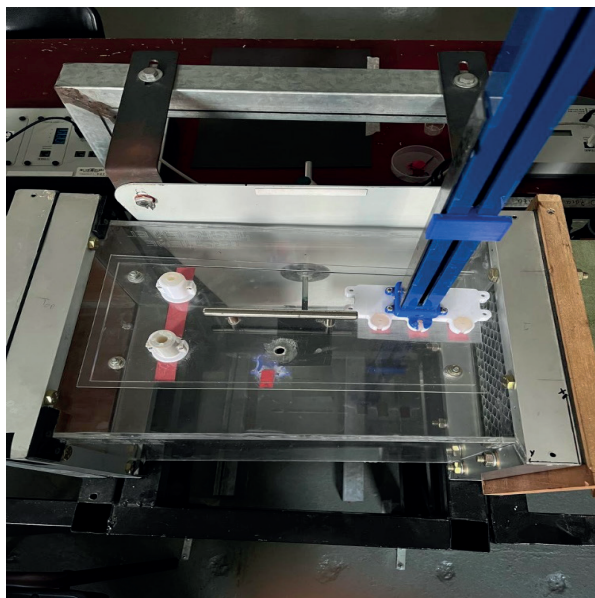


Figura 6. Vista superior de la sección de pruebas del túnel de viento del TEC.

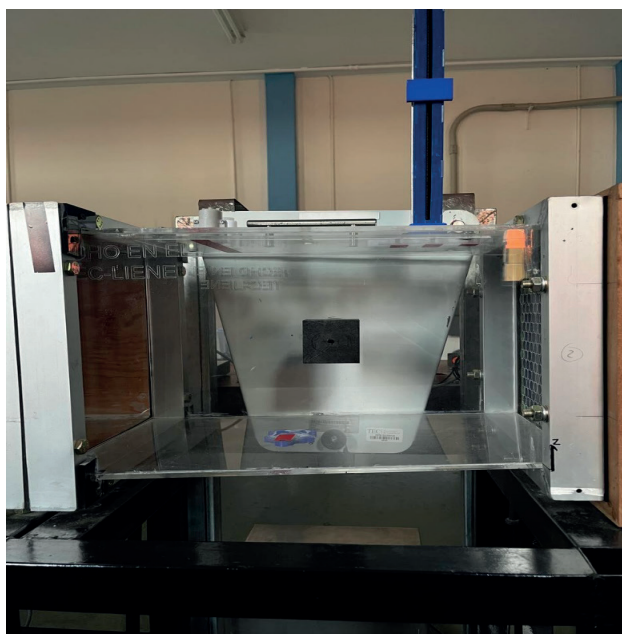


Figura 7. Vista lateral de la sección de pruebas del túnel de viento del TEC.

Difusor

El difusor en el caso del túnel subsónico de circuito abierto es la parte que conecta a la sección del ventilador con la sección de pruebas. Esta sección es sumamente importante para controlar la presión del flujo y que no surja una presión adversa que desordene el flujo laminar. Esto se logra por medio de una apertura progresiva que aumenta el área transversal, como se muestra en la Figura 8.

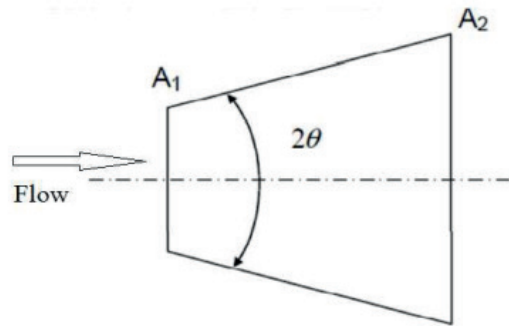


Figura 8. Difusor [3].

Para que sea lo suficientemente progresiva la expansión del área, Jara recomienda que el ángulo de apertura θ no supere los 12° [3].

El difusor del túnel de viento del TEC sigue este mismo principio para estabilizar la presión del flujo, de forma que se diseña una apertura progresiva desde la sección de pruebas hasta el ventilador. Esta se apoya en los soportes posicionados a lo largo del difusor (ver Figura 9-10).



Figura 9. Vista superior del difusor del túnel de viento del TEC.



Figura 10. Vista lateral del difusor del túnel de viento del TEC.

Ventilador

Este es el dispositivo que genera y mantiene el movimiento del aire para obtener un flujo continuo. Dependiendo del tamaño del túnel este puede necesitar de varios ventiladores, pero generalmente para un túnel subsónico se tiene un único ventilador de gran tamaño. Existen dos tipos principales de ventiladores: los centrífugos y los axiales.

Usualmente, en los túneles con ventilador axial la sección de pruebas está aguas arriba del ventilador, por lo tanto, operan por succión. Un ejemplo de esto es el túnel de viento de la Universidad de Tsinghua, donde flujo de aire se dirige desde la entrada del túnel (donde se ubica la sección de pruebas) hacia el ventilador axial [2].

En el caso de los túneles con ventilador centrífugo, la sección de pruebas está aguas abajo del ventilador, por lo que operan del lado de la descarga; como por ejemplo el túnel de viento de la Universidad de Costa Rica, empleado en la investigación de Nestor [8] y el túnel de viento de la UTEM. No obstante, esto no es una regla general, pues el del túnel de viento de la Universidad de Kyushu cuenta con ventiladores axiales y la sección de pruebas está en la descarga [2].

Centrífugo

El principio de este ventilador es hacer uso del fenómeno de la fuerza centrífuga y al rotar las aspas o álabes permite expulsar el aire del centro del rotor hacia el exterior de este. De esta manera el aire ingresa por un lado del ventilador, paralelo al eje de rotación y luego es expulsado de forma tangencial al eje de rotación. El ventilador centrífugo se puede clasificar según las aspas del rotor. Los principales tipos son alabes inclinados adelante, alabes inclinados hacia atrás y alabes radiales, como se muestran en la Figura 11.



Figura 11. Distintos tipos de rotores para ventiladores centrífugos [9].

Axial

Este acelera el viento en dirección al eje de rotación y da un impulso de forma espiral. Estos son los más comunes y se pueden clasificar por la forma de las aspas su cantidad y su inclinación. Uno de los principales usos es en la ventilación que consiste mover grandes caudales en zonas abiertas, por lo que no necesitan generar una presión estática alta. A pesar de esto, si se le hacen modificaciones, estos ventiladores pueden llegar a generar presiones estáticas altas [3].

Se diseñó el túnel de viento con un ventilador axial el cual se encarga de succionar el aire. El ventilador actual es marca Greenheck y modelo TDI (ver Figura 12). Este ventilador tiene 6 aspas de 18 pulgadas de diámetro con un el motor original de 3/4 de caballos de fuerza. Para poder regular la velocidad del motor se implementó un motor nuevo de 1 caballo de fuerza con variador de frecuencia, el cual permite controlar las rotaciones por minuto del motor. De esta forma se consigue una velocidad mínima de 880 RPM y una máxima de 1800 RPM.



Figura 12. Ventilador axial del túnel de viento del TEC.

Construcción

Al ser el túnel de viento del TEC una iniciativa universitaria, todo el proceso de la creación del túnel desde el diseño, modelado y construcción fue realizado principalmente por los estudiantes del Laboratorio de Investigación en Energía Eólica (LIENE), con el apoyo de profesores y personal técnico. Específicamente la construcción se planificó de acuerdo con el presupuesto disponible para lograr un acabado de calidad a un precio económico en cuanto a materiales y mano de obra.

El modelado se realizó utilizando los softwares SolidWorks y Comsol, con los cuales se simuló preliminarmente las dimensiones del túnel junto su funcionamiento para así tener una mejor perspectiva del acabado final del proyecto.

A partir de la verificación de los parámetros de funcionamiento se construyeron las distintas secciones del túnel:

- Tobera: Fue subcontratada a Muebles Ramiro, ubicado en Cartago, Costa Rica. Para construir la tobera con láminas de Plywood, se utilizaron soportes laterales de pino, que fueron manufacturados en el Taller de la Escuela de Producción Industrial del TEC.
- Rectificador de flujo: Fue realizado en el taller de la Escuela de Diseño Industrial del TEC, por parte del técnico Danilo Solano.
- Sección de pruebas: A través del corte y grabado láser del Laboratorio Institucional de Microcomputadoras (LAIMI) del TEC se cortaron láminas de acrílico transparente para visualizar el posicionamiento del objeto dentro de la sección de pruebas.
- Difusor: Se construyó con láminas de Plywood en el Taller de Diseño de la Escuela de Ingeniería en Diseño Industrial del TEC.
- Base de metal: El corte y soldadura de la estructura metálica donde se apoya la totalidad del túnel de viento se realizó en el Taller de Procesos de Manufactura de la Escuela de Ingeniería Electromecánica del TEC.

El túnel terminado tiene una longitud de 2,73 m tomando en cuenta el ventilador. Para su correcta operación requiere en la succión un área libre de 1x1 m y en la descarga un espacio libre de 1 m en dirección del viento y 1 m hacia cada lado en dirección perpendicular al viento.

Este túnel se diseñó con un espacio de succión de 1,6 m y uno de descarga de 1 m lo que en total sería una huella de 5,23 m (ver Figura 13).



Figura 13. Túnel de viento del LIENE, TEC.

Instrumentación

Una vez armado el túnel, se necesita equiparlo para poder comenzar a realizar mediciones y caracterizar el flujo. La caracterización implica no solo determinar las distintas velocidades del viento según la velocidad de rotación del ventilador, sino también determinar si en la sección de pruebas se obtiene un flujo uniforme y por tanto, si se construyó de la manera correcta.

Medición de la velocidad del viento

Es necesario relacionar la velocidad del flujo generado en la sección de pruebas con la velocidad de rotación del motor. Para esto se requiere de un método para medir la velocidad del viento en la sección de pruebas. Las principales herramientas que se utilizan para medir la velocidad del viento son anemómetros de copas, de alabes, de hilo caliente y tubos de Pitot.

El anemómetro copas y el anemómetro de alabes no son comúnmente utilizados en túneles de viento de tan pequeña escala ya que presentan un área de barrido significativa con respecto al túnel y por tanto el efecto de bloqueo afecta el flujo de viento. Por otro lado, el anemómetro de hilo caliente, que funciona mediante cambios de temperatura, permite determinar la velocidad del viento con una afectación mínima del flujo. Esto debido a que, al introducir únicamente un tubo delgado con el sensor en la sección de pruebas, es menos invasivo, por lo que tiene menores efectos en el flujo en comparación a los otros tipos de anemómetros.

En cuanto al tubo de Pitot, este consiste en un tubo con orificios que permite medir la presión estática y la presión total del flujo, con lo cual es posible obtener la presión dinámica y a partir de esta, la velocidad del viento. A parte del tubo de Pitot se necesita un transductor de presión que registra la diferencia de estas presiones y calcula la velocidad del viento.

Actualmente el túnel de viento tiene varios métodos para poder medir la velocidad del viento. Mediante varias mediciones, se obtuvo para el túnel una curva de caracterización y una ecuación que permite relacionar las revoluciones del motor con la velocidad del viento en la sección de pruebas. Esta curva se muestra en la Figura 14.

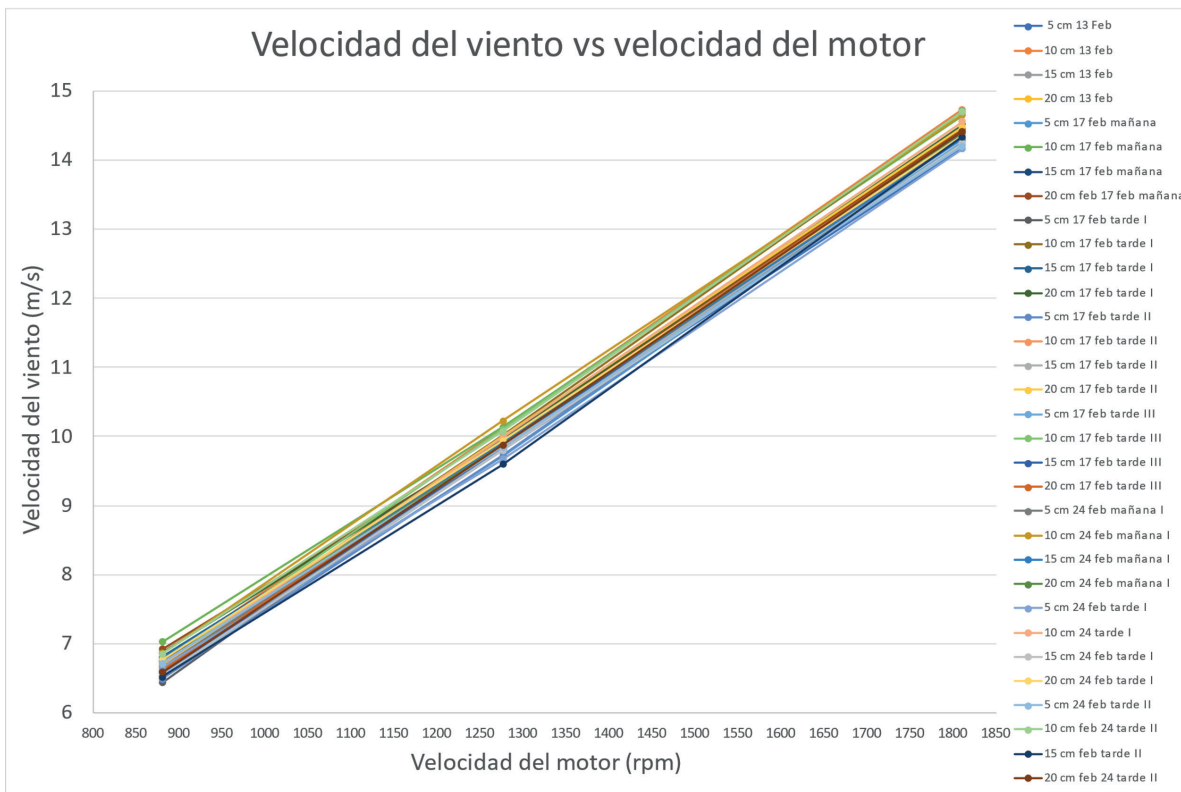


Figura 14. Curva de caracterización del túnel de viento.

Se instaló una estructura impresa en 3D que permite sostener a un tubo Pitot, marca Dwyer Instruments (ver Figura 15), en la sección de pruebas a distintas alturas, para poder tener una medición de la velocidad del viento a la cual el objeto de estudio es sometido. También se posee un anemómetro de hilo caliente Marca DIG-SENSE modelo 20250-16 el cual se puede utilizar para luego comprobar las mediciones del Pitot o utilizarse como equipo principal de medición.



Figura 15. Pitot Dwyer Instruments.

Se cuenta con un transductor de presión TecQuipment que se conecta al Pitot y a un sistema de adquisición de datos (Modelo VDAS), lo que permite registrar la velocidad del viento en una computadora con software especializado. El transductor se muestra en la Figura 16.



Figura 16. Transductor de presión TecEquipment.

Control de Velocidad

Es importante tener un control de la velocidad del flujo para poder hacer análisis en distintas condiciones, teniendo así la posibilidad de operar a distintos números de Reynolds. Por lo tanto, se debe controlar la velocidad de rotación del ventilador, la cual depende del tipo de motor utilizado para el ventilador. Si el motor se trata de uno estilo sincrónico se debe implementar un variador de frecuencia para poder controlar la velocidad del motor.

En el túnel de viento del LIENE se utiliza un variador de frecuencia marca TOSHIBA, modelo VF-S15 (ver Figura 17), que se encarga de regular la velocidad del ventilador, la cual se encuentra en el rango de 7m/s a 15m/s (ver Figura 14).



Figura 17. Variador de frecuencia TOSHIBA VF-S15.

Cargas Aerodinámicas

Al interactuar el objeto de estudio con el flujo se generan múltiples cargas como la fuerza de arrastre y de sustentación. Para poder medir estas fuerzas se necesita un dispositivo o varios que midan la fuerza ejercida sobre el objeto en los distintos ejes. El dispositivo más común para estos casos es una balanza aerodinámica la cual permite la medición de estas fuerzas ya sea de forma simultánea o alterna y dependiendo de su complejidad permite la medición de los momentos.

En el túnel de viento de LIENE se puede medir sustentación y arrastre por separado, esto debido a que la balanza permite medir en una sola dirección a la vez, por lo que se debe rotar 90 grados para cambiar entre sustentación y arrastre (ver Figura 18).

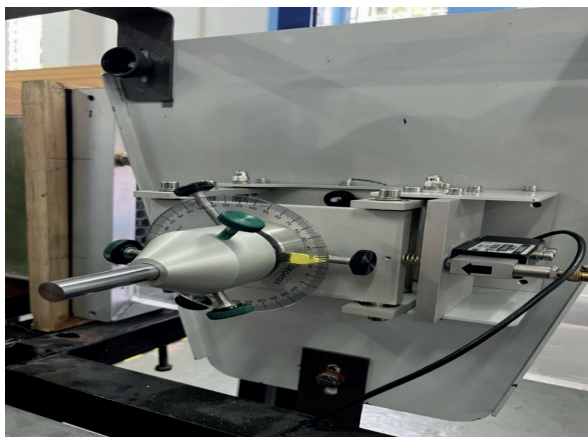


Figura 18. Balanza AF100 Tecquipment (Montaje de la balanza).

Unas barras de aluminio, que se unen por medio de un acople, se sujetan de un lado a la balanza y del otro lado ingresan a la sección de pruebas por medio de un orificio. El objeto de estudio se sujeta al extremo de la barra que se encuentra dentro de la sección de pruebas y de esta manera se somete al flujo y se puede medir la carga aerodinámica deseada.

La balanza actual marca AF100 de TecEquipment consta de dos partes (el montaje de la balanza y la unidad de visualización) y se conecta al sistema de adquisición de datos VDAS (ver Figura 19).



Figura 19. Balanza Af100 Tecequipment Unidad de visualización (izquierda) y sistema de adquisición de datos VDAS (derecha).

La balanza se encuentra montada en un pedestal y placa metálica externa a la estructura del túnel de viento para disminuir los efectos de ruido por vibraciones. El pedestal se encuentra montado al lado derecho de la sección de pruebas visto desde la tobera.

Sistema de adquisición de datos

El sistema de adquisición es fundamental en el análisis de los datos que se toman en el túnel. En este caso se utiliza el módulo VDAS (MkII) de la compañía TecQuipment. A este módulo se le conectan las entradas de los distintos dispositivos y luego este se conecta a una computadora. Actualmente al utilizarse, se conecta el transductor de presión para medir velocidad y la balanza para medir las cargas. Para poder tomar datos se necesita del software "TecQuipment VDAS" el cual permite visualizar los datos en tiempo real y también almacenarlos, con una frecuencia de muestreo de 1 Hz. En la Figura 20 se muestra una imagen de la interfaz de este programa.

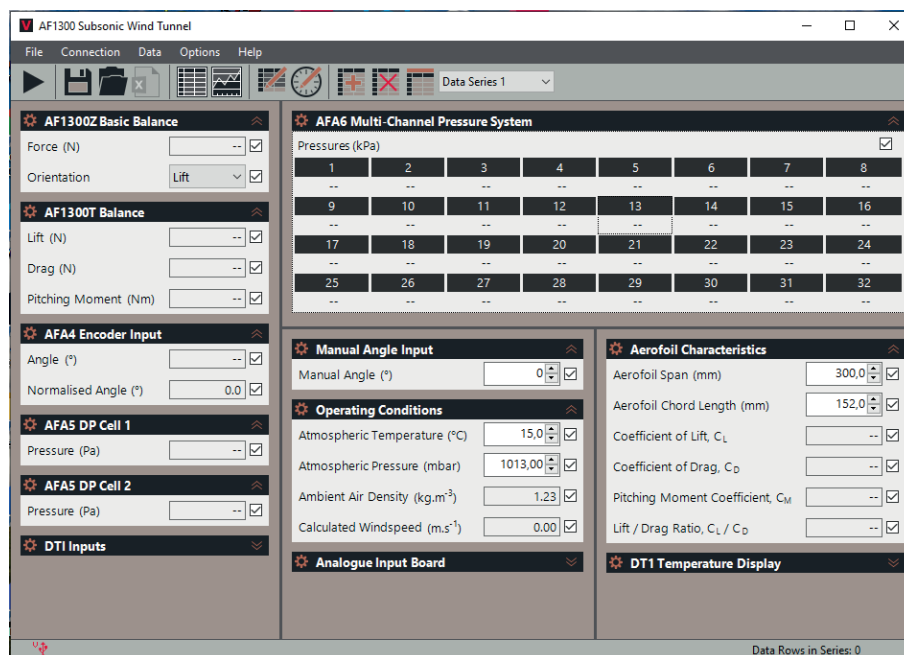


Figura 20. Interfaz gráfica del VDAS.

Conclusiones

Después de conceptualizar, construir, instrumentar y caracterizar un túnel de viento de pequeña escala, mediante la selección de equipos que obedecen a criterios técnicos y que permiten evaluar el comportamiento de modelos estructurales en condiciones controladas y realistas, es posible llegar a las siguientes conclusiones:

- Es posible construir un túnel de viento de pequeña escala, capaz de emplearse en investigación científica de modelos aerodinámicos.
- La construcción de este tipo de dispositivos permite realizar pruebas aerodinámicas en modelos de pequeña escala, en un contexto universitario.
- La construcción de un túnel de viento requiere de múltiples actores e insumos, algunas de las partes fueron fabricadas por estudiantes, otras sub contratadas (como la tobera) y otras compradas, como el variador de frecuencia, el ventilador y la instrumentación.

El diseño del túnel de viento se ha creado con la oportunidad de realizar mejoras ya sea en el equipo o en la instrumentación, así como el agregar componentes que añadan otro grado de profundidad a la investigación que se realiza, por ejemplo, la visualización del flujo alrededor de un perfil aerodinámico.

El TEC muestra un compromiso firme con la investigación, asegurando un espacio que evoluciona constantemente para abordar los desafíos cambiantes en el ámbito de la energía eólica, la aerodinámica y sus diversas aplicaciones.

Referencias

- [1] C. López, «OpenMind BBVA,» BBVA, 2008. [En línea]. Available: <https://www.bbvaopenmind.com/articulos/retos-actuales-de-la-energia/>. [Último acceso: Marzo 2022].
- [2] G. Richmond-Navarro, E. Fallas-Hernández, J.A. Padilla-Barrientos, & M. Jiménez-Ceciliano. «Principales túneles de viento en la investigación sobre energía eólica alrededor del mundo». Revista Tecnología En Marcha 35(3), 2022. Pág. 178–194. <https://doi.org/10.18845/tm.v35i3.5711>
- [3] S. Jara-Romero y D. Millacáriz-González, «Diseño y construcción de un túnel de viento con fines académicos para el estudio de flujos externos,» Universidad Tecnológica Metropolitana, Santiago, 2018.
- [4] J. E. Bermeo-Vallejo, D. F. Sigüencia-Bermeo y P. I. Serpa-Medina, «Diseño y construcción de un túnel de viento para análisis aerodinámico en vehículos a escala,» Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2012.
- [5] C. A. Quispe Gonzáles, W. J. Urcuhuaranga, Esteban y J. E. Chiroque Baldera «Diseño aerodinámico de un túnel de viento de bajas velocidades» Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú, 2015
- [6] R.D. & B.P. Metha, «Design rules for small low-speed wind tunnels», *aero.Journal* (Royal Aeronautic Society), 1979.
- [7] C.B.J.M. Louis Cattafesa, «Fundamentals of wind-tunnel design», EEUU: John Wiley and sons Ltd, 2010.
- [8] N. Martínez-Soto, J.J. Rojas, & G. Richmond-Navarro. «Desarrollo y prueba de un sistema para sensar de manera remota la velocidad del viento». Revista Tecnología En Marcha, 35(7), 2022. Pág. 33–45. <https://doi.org/10.18845/tm.v35i7.6331>
- [9] J. Pérez Nepta. «Ventiladores tipos y características», Bogotá, Colombia, 2018.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores declaramos que hemos utilizado una herramienta de inteligencia artificial ChatGPT para asistirnos en la redacción de este artículo. Esta herramienta nos ayudó a mejorar la estructura y la claridad del texto. Los contenidos generados por la IA fueron revisados minuciosamente por nosotros para asegurar su precisión y coherencia con el objetivo del estudio.

Fundamentos y perspectivas del pensamiento computacional: un análisis integral para la investigación futura

Foundations and perspectives of computational thinking: a comprehensive analysis for future research

Jorge Monge-Fallas¹, Liliana Sancho-Chavarría², César Garita-Rodríguez³, Antonio González-Torres⁴, Ignacio Trejos-Zelaya⁵

Fecha de recepción: 19 de febrero, 2024
Fecha de aprobación: 23 de mayo, 2024

Monge-Fallas, J; Sancho-Chavarría, L; Garita-Rodríguez, C; González-Torres, A; Trejos-Zelaya, I. Fundamentos y perspectivas del pensamiento computacional: un análisis integral para la investigación futura. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 1. Enero-Marzo, 2025. Pág. 145-156.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i1.7055>

- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 jomonge@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-1651-3543>
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 lsancho@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-4522-1259>
- 3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 cesar@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-4592-3266>
- 4 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 antonio.gonzalez@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-5427-0637>
- 5 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 itrejos@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-4361-8444>

Palabras clave

Pensamiento computacional; resolución de problemas; modelos algorítmicos; automatización de procesos; análisis de sistemas; evaluación educativa.

Resumen

Este artículo profundiza en la comprensión y aplicación del pensamiento computacional, una habilidad crucial en la era digital. Concebido inicialmente por Wing en 2006, este concepto no solo implica la codificación y programación de computadoras, sino que también se extiende a la resolución de problemas, el diseño de sistemas y la comprensión del comportamiento humano basado en los principios de la informática. Con el paso del tiempo, este enfoque ha evolucionado para incluir habilidades críticas como la abstracción, el análisis de datos, la modelización y la automatización de soluciones. Este estudio explora diversas interpretaciones del pensamiento computacional, desde ser una técnica para idear soluciones hasta una competencia intelectual para el análisis y solución de problemas reales. A través del análisis de literatura y evaluación de distintas herramientas y metodologías, la investigación destaca en particular la importancia de habilidades como la descomposición de problemas, abstracción, pensamiento algorítmico y evaluación en la educación y práctica profesional. A pesar de la ausencia de una definición unificada, el pensamiento computacional se reconoce como una habilidad multidimensional esencial, subrayando la necesidad de estrategias de enseñanza y evaluación efectivas. Además, se enfatiza la necesidad de establecer una definición universal de pensamiento computacional, seguida de la identificación clara de sus dimensiones y elementos constitutivos. El desarrollo de índices precisos y métricas objetivas es crucial para evaluar eficazmente el nivel de pensamiento computacional, lo que sentará las bases para una investigación rigurosa y metódica en este campo.

Keywords

Computational thinking; problem solving; algorithmic models; process automation systems analysis; educational evaluation.

Abstract

This article delves into the understanding and application of computational thinking, a pivotal skill in the digital era. Initially conceptualized by Wing in 2006, this concept transcends mere coding and programming to encompass problem-solving, system design, and understanding human behavior based on computer science principles. Over the years, this approach has broadened to include critical skills such as abstraction, data analysis, modeling, and solution automation. The study explores various interpretations of computational thinking, from being a technique for devising solutions to an intellectual competency for analyzing and solving real-world problems. Through literature analysis and evaluation of different tools and methodologies, the research emphasizes the importance of skills such as problem decomposition, abstraction, algorithmic thinking, and evaluation in education and professional practice. Despite the absence of a unified definition, computational thinking is recognized as an essential multidimensional skill, underscoring the necessity of effective teaching and assessment strategies. Moreover, it stresses the need to establish a universal definition of computational thinking, followed by a clear identification of its dimensions and constituent elements. Developing accurate indices and objective metrics is crucial for effectively assessing the level of computational thinking, laying the groundwork for rigorous and methodical research in the field.

Introducción

El pensamiento computacional se ha consolidado como un paradigma esencial en el campo de la educación y la investigación, ofreciendo una nueva perspectiva para abordar y resolver problemas complejos de una manera sistemática y eficiente. Esta habilidad multidimensional, que va más allá de la mera codificación y programación, involucra un conjunto de procesos mentales que permiten conceptualizar problemas y soluciones operables por máquinas, pero aplicables a un espectro mucho más amplio de disciplinas y contextos.

La noción de pensamiento computacional fue introducida y popularizada por Jeannette Wing en 2006 [1], marcando un hito en la conceptualización de cómo los individuos pueden integrar y aplicar los principios de la informática en la resolución de problemas, la construcción de sistemas y la interpretación del comportamiento humano. Esta concepción inicial ha sido el punto de partida para una exploración más profunda y detallada del tema, involucrando a académicos, educadores e investigadores en una búsqueda por definir, refinar y expandir nuestra comprensión del pensamiento computacional.

La definición de Wing [2], que inicialmente se centró en los aspectos prácticos de la resolución de problemas y la concepción de sistemas a través de la lente de la informática, ha evolucionado para abarcar un conjunto más amplio de habilidades cognitivas y procesos mentales. Organizaciones como la Computer Science Teachers Association (CSTA) y la International Society for Technology in Education (ISTE) han contribuido significativamente a esta evolución, ampliando el alcance del pensamiento computacional para incluir habilidades como la abstracción, el análisis de datos, la modelización, la automatización de soluciones y la generalización de métodos a diferentes tipos de problemas [3].

La relevancia del pensamiento computacional trasciende el ámbito de la informática, alcanzando diferentes campos y disciplinas. Se ha convertido en una habilidad crucial en la era digital, no solo para quienes se dedican a las ciencias de la computación, sino también para todo aquel que busca soluciones innovadoras y efectivas a problemas complejos. La capacidad de descomponer problemas, abstraer componentes esenciales, diseñar algoritmos y evaluar soluciones, constituye la esencia de esta competencia intelectual, permitiendo a los individuos no solo comprender y operar dentro del mundo digital, sino también transformarlo.

En la siguiente sección, se explorarán las diversas conceptualizaciones del pensamiento computacional, destacando las definiciones proporcionadas por figuras y entidades prominentes en el campo. Se analizarán los elementos comunes y distintivos de estas definiciones, las habilidades y competencias asociadas al pensamiento computacional, y cómo estas habilidades se reflejan y pueden ser evaluadas en entornos educativos y prácticos. Este análisis no solo aclara la naturaleza multifacética del pensamiento computacional, sino que también subraya su relevancia y aplicabilidad en una amplia gama de contextos, preparando el terreno para una comprensión más profunda y una implementación más efectiva de esta competencia clave en el siglo XXI.

Métodos

La metodología de la revisión sistemática de la literatura se estructuró en diversas etapas para garantizar una recopilación exhaustiva y pertinente de la información. La búsqueda de literatura se realizó en bases de datos académicas de renombre como ACM, ScienceDirect, Eric, IEEE Xplore, Directory of Open Journals (DOAJ) y JSTOR. Además, se revisaron las memorias de conferencias destacadas, incluyendo las del 18th Koli Calling International Conference on Computing Education Research y la 2018 ACM Conference on International Computing Education Research, entre otras fuentes relevantes.

Las palabras clave empleadas para la búsqueda fueron “computational thinking” y “computational thinking assessment”. El período de tiempo definido para la recolección de documentos abarcó desde 2006 hasta 2022, lo cual permitió obtener un corpus inicial de 80 documentos incluyendo artículos y libros. En el siguiente Cuadro 1 se muestra los resultados obtenidos

Cuadro 1. Resumen de Artículos por Temática y Fuente.

Theme	ACM	ScienceDirect	ERIC	IEEE Xplore	DOAJ	JSTOR	Conferences	Otras	TOTAL
Computational Thinking	5	2	4	3	0	0	1	5	20
Assessment of Computacional Thinking	9	1	2	2	1	0	1	11	27
Systematic Literature Reviews	0	2	3	0	0	0	0	4	9
Frameworks and Models	1	0	0	0	0	1	1	1	4
Teaching and learning Computational Thinking	4	5	3	3	0	0	0	2	17
Curriculum	1	0	0	0	0	1	0	1	3
TOTAL	20	10	12	8	1	2	3	24	80

Posteriormente, se procedió a una revisión minuciosa de los resúmenes de cada uno de los documentos para realizar una selección inicial. Este proceso de filtrado se enfocó en descartar aquellos trabajos que no alineaban con los objetivos específicos del proyecto. Los documentos seleccionados se clasificaron en varias temáticas: pensamiento computacional, enseñanza y aprendizaje del pensamiento computacional, marcos teóricos y conceptuales, evaluación del pensamiento computacional y revisiones sistemáticas de literatura. Dentro de este esquema, se tomó la decisión de no incluir aquellos documentos relacionados con currículos y los que se centraban específicamente en la enseñanza y aprendizaje del pensamiento computacional, manteniendo el enfoque del estudio en la conceptualización y evaluación del pensamiento computacional.

Este enfoque metódico y detallado en la revisión de la literatura aseguró que la investigación se fundamentara en una base de datos comprensiva y actualizada que nos permitió extraer información relevante que se detalla en las siguientes dos secciones.

Resultados

En esta sección se incluye un análisis de los principales conceptos y enfoques presentados por los documentos seleccionados en la sección anterior, clasificados en términos de artículos orientados a: conceptualización, revisión de literatura y evaluación del pensamiento computacional.

Conceptualización del pensamiento computacional

Como se mencionó anteriormente, el concepto de pensamiento computacional, que trasciende los límites tradicionales de la informática, fue inicialmente introducido por Wing en el año 2006 [80]. Wing conceptualizó el pensamiento computacional como un método comprensivo

que abarca la resolución de problemas, la concepción de sistemas y la interpretación del comportamiento humano, todo ello fundamentado en los principios esenciales de la informática. Más adelante, Wing [2] refinó esta concepción, describiéndolo como la serie de procesos cognitivos implicados en la articulación de problemas y en la estructuración de sus soluciones, de manera que puedan ser ejecutadas de forma óptima por un agente procesador de información. En 2011, la Computer Science Teachers Association (CSTA) y la International Society for Technology in Education (ISTE) [3], ampliaron esta visión, definiendo el pensamiento computacional como una metodología de resolución de problemas que comprende, pero no se limita a, la formulación de problemas de tal manera que puedan ser abordados mediante computadoras y otras herramientas tecnológicas; la organización y análisis sistemático de datos; la modelización de datos a través de abstracciones como modelos y simulaciones; la automatización de soluciones mediante el pensamiento algorítmico, que implica secuencias de pasos definidos y ordenados; la identificación, análisis e implementación de soluciones con el fin de alcanzar una combinación óptima de pasos y recursos; y la generalización y transferencia de esta metodología de resolución a una amplia gama de problemas. De manera específica, la definición operativa propuesta por ISTE y CSTA se destaca por seis características distintivas: abstracción, compilación y análisis de datos, representación de datos, solución automatizada, combinación eficaz de pasos y recursos, y capacidad de transferencia de soluciones.

Por otro lado, Román-González [4] concibe el pensamiento computacional como la habilidad de plantear y resolver problemas apoyándose en los fundamentos de la computación, empleando la lógica y sintaxis inherentes a los lenguajes de programación, como son las secuencias básicas, bucles, iteraciones, condicionales, funciones y variables. Asimismo, Dimos et al. [5] clasifican las distintas interpretaciones del pensamiento computacional en tres categorías alternativas: la primera lo considera como una técnica para idear soluciones a problemas que puedan ser representadas, procesadas y ejecutadas por cualquier agente, como una computadora; la segunda lo aborda como un método exclusivo de resolución de problemas; y la tercera lo percibe como una competencia intelectual aplicable al análisis y solución de problemas reales, mediante la adopción y aplicación de principios y métodos algorítmicos. En particular, identifican las competencias fundamentales del pensamiento computacional en términos de abstracción (el acto de hacer un artefacto más comprensible al minimizar los detalles innecesarios), algoritmos (un enfoque para alcanzar una solución mediante una definición clara de los pasos a seguir), descomposición (un modo de concebir los artefactos en términos de sus componentes individuales), generalización (relacionada con el reconocimiento de patrones, similitudes y conexiones, y la explotación de estas características) y evaluación (un método que valida la eficacia de una solución a un problema más que su corrección).

Varios autores han delineado el pensamiento computacional en términos de habilidades y competencias. Grover y Pea [6], por ejemplo, destacan la abstracción y generalización de patrones (incluyendo modelos y simulaciones), el pensamiento sistémico de la información, sistemas simbólicos y representaciones, nociones algorítmicas (como los diagramas de flujo de control), la descomposición estructurada de problemas (modularización), el pensamiento iterativo, recursivo y paralelo, la lógica condicional, la eficiencia y limitaciones de rendimiento, y la depuración y detección sistemática de errores. De forma similar, Bocconi et al. [7] enfatizan la abstracción, el pensamiento algorítmico, la automatización, la descomposición, la depuración y la generalización como elementos esenciales incluidos en el pensamiento computacional. Cabe destacar la presencia de elementos comunes en diversos estudios, como el de Seiter y Brendan [8], quienes señalan procedimientos y algoritmos, descomposición de problemas, paralelismo, sincronización, abstracción y la representación de datos como los aspectos más generales del pensamiento computacional. Estos conceptos son de naturaleza cognitiva, en tanto se

basan en características latentes de la actividad cognitiva y se centran en abstracciones del pensamiento computacional, cuya evidencia se puede encontrar en programas, a diferencia de las habilidades de procesamiento necesarias para crear y modificar dichos programas.

En 2012, dentro del contexto del lenguaje de programación Scratch, Brennan y Resnick [9] describieron las ideas principales que se aprenden al desarrollar el pensamiento computacional, que incluyen secuencias, paralelismo, bucles, condicionales, eventos, datos y operadores. Si bien estos son elementos básicos, estos autores también consideran aspectos más generales como las prácticas computacionales y las perspectivas computacionales. Las primeras se refieren al desarrollo de procedimientos que aplican conceptos computacionales para resolver problemas, mientras que las segundas sostienen que la naturaleza de resolver problemas computacionales permite a las personas evolucionar y percibir el mundo de manera diferente en cuanto a tecnologías digitales.

Chai et al. [10] definen el pensamiento computacional como un método que asiste a las personas en la resolución de problemas, diseño de sistemas y comprensión del comportamiento humano a través del uso de conceptos fundamentales de la computación. Entre las habilidades medidas se incluyen la abstracción y descomposición de problemas, paralelismo, pensamiento lógico, sincronización, control de flujo, interacción con el usuario, representación de datos y organización de código.

Aho [11] propuso el pensamiento computacional como una metodología de investigación para generar nuevos modelos informáticos subyacentes adecuados para formular problemas. Este enfoque divide el pensamiento computacional en seis habilidades distintas: descomposición (dividir el problema en partes más pequeñas), reconocimiento de patrones (identificar similitudes dentro o fuera de la situación del problema), abstracción (simplificar un problema complejo enfocándose solo en los detalles relevantes), algoritmo (definir los pasos necesarios en orden para resolver el problema), codificación (desarrollar un programa en un lenguaje comprensible para la computadora basado en el algoritmo) y depuración (corregir errores o mejorar el programa).

Revisión de literatura

El Ministerio de Educación de China emitió un currículum estándar en tecnologías de información para la educación secundaria y definió el pensamiento computacional como una actividad que utiliza el conocimiento para resolver problemas en el campo de las ciencias de la computación [12]. A partir del análisis de más de 580 documentos, se realizó un análisis de agrupación (clustering) de términos utilizados en la literatura sobre pensamiento computacional, proponiendo una estructura jerárquica de indicadores dividida en tres niveles, que a su vez se subdividen en categorías y subcategorías. En total, se identificaron más de 30 indicadores en el nivel más bajo, siendo los más relevantes del primer nivel (práctica de pensamiento computacional): abstracción, descomposición, identificación, transformación, codificación, diseño, modelado, combinación, procesamiento de datos, algoritmo, programación, prueba, evaluación, expansión y transferencia.

Otro estudio [13] sintetizó las definiciones de pensamiento computacional refiriéndose a los procesos de pensamiento que emplean los estudiantes para construir soluciones ejecutables por una computadora, aplicando varios conceptos y prácticas computacionales en la resolución de problemas. Los principales indicadores considerados incluyeron secuencia, condicionales, repetición y descomposición.

Un análisis de casi 40 artículos con el objetivo de unificar conceptos relacionados con el pensamiento computacional [14] sugiere que los estudios previos han mostrado poca concordancia entre investigadores, sectores gubernamentales y no gubernamentales sobre

una definición unificada de pensamiento computacional. Basándose en la revisión bibliográfica, definieron el pensamiento computacional como el proceso de pensamiento empleado para resolver problemas, que abarca elementos de descomposición del problema, abstracción y pensamiento algorítmico. Además, argumentan que a la definición de pensamiento computacional le falta el elemento de dependencia, definido como el conocimiento de la comprensión de las interrelaciones entre las diferentes secciones de un problema descompuesto.

Evaluación del pensamiento computacional

Romañ-González [4] considera el pensamiento computacional como un elemento esencial en todas las disciplinas STEM, destacando la importancia de comprender los elementos implicados en el pensamiento computacional, las habilidades que se desarrollan, las estrategias de enseñanza-aprendizaje que se pueden emplear para fomentar el pensamiento computacional, y una pregunta de interés para los investigadores: ¿cómo evaluar el pensamiento computacional?

A pesar de la evidente falta de consenso sobre la definición precisa de pensamiento computacional, sus habilidades o indicadores, es indiscutible que el pensamiento computacional se considera una competencia importante del siglo XXI, al nivel de competencias como la aritmética. Esta competencia, considerada de alto nivel y complejidad, está relacionada con el desarrollo de habilidades de pensamiento abstracto-matemático y con el enfoque pragmático-ingeneril. Por esta razón, en los últimos años, las tendencias en educación están reconociendo a la programación como una actividad fundamental en la educación básica, situada dentro de las competencias requeridas para el desarrollo de futuros profesionales que necesita ser evaluada.

Evaluar el pensamiento computacional es una cuestión crítica que ha motivado una amplia gama de investigaciones. En general, la mayoría de los estudios comienzan con una definición base de pensamiento computacional y construyen un marco teórico que incorpora dimensiones, principios, habilidades y actitudes, entre otros aspectos. Este marco sirve como base para desarrollar metodologías que permitan evaluar el pensamiento computacional de manera efectiva. Es notable que una gran cantidad de estas investigaciones se centran en poblaciones de educación primaria y secundaria, y menos en el nivel universitario. Además, estas investigaciones suelen referenciar herramientas específicas como Scratch, Alice, Kodu, Greenfoot, Agentsheets y Agentcubes. Por ejemplo, en el contexto de Scratch, Brennan y Resnick [9] desarrollan un marco conceptual compuesto por:

1. **Conceptos:** las nociones fundamentales que se adquieren durante el aprendizaje del pensamiento computacional, generalmente incluyen secuencias, paralelismo, bucles, condicionales, eventos y operaciones de datos.
2. **Prácticas computacionales:** se refiere al desarrollo de procedimientos que aplican conceptos computacionales para resolver problemas, centrándose en procesos de pensamiento y aprendizaje. Estos autores resaltan cuatro tipos principales de prácticas computacionales: desarrollo incremental e iterativo, depuración, reutilización y remezcla de soluciones, y abstracción y modularización.
3. **Perspectivas computacionales:** entienden que resolver problemas computacionales fomenta una evolución en la perspectiva sobre tecnologías digitales, ayudando a las personas a ser más críticas, eficientes y estructuradas en la resolución de problemas y en la construcción de criterios para tomar decisiones. Destacan tres perspectivas principales: expresión, conexión y cuestionamiento.

Claramente, la propuesta de Brennan y Resnick se enfoca en el desarrollo gradual de habilidades específicas hacia habilidades más generales aplicables en la vida cotidiana. En lo que respecta a la evaluación del pensamiento computacional, subrayan la necesidad de emplear múltiples herramientas o estrategias, proponiendo el análisis de portafolios de proyectos, entrevistas basadas en proyectos y diseño de escenarios como enfoques complementarios.

Otro grupo de investigadores [17] ha presentado un test de pensamiento computacional, también basado en Scratch, dirigido a estudiantes de primaria y primeros niveles de secundaria. Este test evalúa aspectos como conceptos computacionales, entorno-interfaz del ítem, estilo de alternativas de respuesta, presencia de animaciones y la tarea requerida.

En 2015, Moreno-León y colaboradores [18] analizaron Dr. Scratch, una herramienta web gratuita y de código abierto que evalúa proyectos de Scratch, proporcionando una puntuación automática de pensamiento computacional y detectando posibles errores o malas prácticas de programación. Dr. Scratch se beneficia de plugins desarrollados por Hairball, una herramienta de análisis de código estático. Dr. Scratch evalúa competencias en siete conceptos clave del pensamiento computacional y define cuatro niveles de competencia: nulo, básico, en desarrollo y competente.

En 2019, Roman-González, Moreno-León y Robles [18] realizaron un diagnóstico de las herramientas disponibles para evaluar el pensamiento computacional, clasificándolas en categorías como herramientas de diagnóstico, sumativas, interactivas formativas, de minería de datos, para evaluar vocabulario, de transferencia de habilidades y escalas de percepción de actitudes. Aunque la mayoría de la investigación se centra en niveles de educación primaria y secundaria, un estudio reciente [15] busca abordar la evaluación del pensamiento computacional desde una perspectiva más amplia, considerando habilidades digitales definidas en el Foro Económico Mundial de 2018.

Este enfoque abarca tanto habilidades cognitivas como aspectos afectivos, destacando que el pensamiento computacional no solo es una actividad cognitiva, sino que también incluye elementos afectivos como actitudes y creencias sobre los problemas, dominio del problema y habilidades individuales para resolverlos. La investigación subraya la importancia de actitudes como la confianza, la persistencia, la tolerancia a la ambigüedad, la capacidad de comunicación y colaboración, así como la inteligencia espiritual, entre otras. Además, se enfoca en un conjunto de conceptos relacionados con la programación y, después de un proceso de validación riguroso, define elementos clave para la evaluación del pensamiento computacional, estructurados en tres dimensiones: habilidades cognitivas, actitudes e inteligencia espiritual.

En ese sentido, los investigadores han identificado un conjunto de conceptos relevantes, previamente mencionados, que están directamente relacionados con la programación, incluyendo:

- a) **Abstracción:** la habilidad de simplificar la complejidad enfocándose en la esencia.
- b) **Pensamiento algorítmico:** la competencia para secuenciar instrucciones de manera lógica.
- c) **Automatización:** la capacidad de hacer que procesos o tareas se ejecuten automáticamente.
- d) **Descomposición:** el proceso de dividir un problema complejo en partes más manejables.
- e) **Depuración:** el arte de detectar y corregir errores en el código o algoritmos.
- f) **Evaluación:** la capacidad de juzgar la efectividad o eficacia de diferentes soluciones.
- g) **Generalización:** la habilidad de aplicar soluciones a un rango más amplio de problemas.
- h) **Resolución de problemas:** la competencia de encontrar soluciones a problemas complicados.

- i) **Habilidad comunicativa:** la capacidad de transmitir y recibir información de manera efectiva.
- j) **Habilidad espiritual:** la aptitud para reflexionar y encontrar significado más allá de lo tangible.

Luego de un riguroso proceso de validación, los investigadores han definido los principales elementos a considerar en la evaluación del pensamiento computacional, estructurándolos en tres dimensiones:

a) Habilidades cognitivas, que incluyen:

- **Abstracción:** la habilidad de destilar un problema a su esencia, eliminando detalles innecesarios.
- **Pensamiento algorítmico:** la competencia para definir pasos claros y secuenciales para resolver problemas.
- **Descomposición:** la capacidad de fraccionar un problema complejo en subproblemas más simples.
- **Depuración:** la habilidad para identificar y corregir errores en una solución propuesta.
- **Evaluación:** la capacidad para analizar soluciones y mejorarlas.
- **Generalización:** la habilidad para aplicar soluciones de problemas anteriores a nuevos problemas.

b) Actitudes, que abarcan:

- **Resolución de problemas:** la capacidad para abordar y solucionar dilemas complicados.
- **Trabajo en equipo:** la habilidad para colaborar y trabajar armoniosamente con otros.
- **Comunicación:** la competencia para intercambiar información de manera clara y efectiva.

c) Inteligencia espiritual, que incluye:

- **Autoconciencia:** el conocimiento de las propias fortalezas y debilidades.
- **Integridad:** la adherencia a principios morales en la interacción con otros.
- **Razonamiento creativo:** la habilidad para concebir soluciones innovadoras.

Estos elementos se han establecido como fundamentales en la evaluación de pensamiento computacional y se basan en una comprensión profunda de las capacidades cognitivas, las actitudes y la inteligencia espiritual, como se detalla en la investigación de Roman-González, Moreno-León y Robles.

En el contexto de la programación en Scratch, herramientas como Dr. Scratch, desarrolladas por Moreno-León y otros [18], permiten una evaluación automática de proyectos, destacando su capacidad para analizar y proporcionar retroalimentación sobre las habilidades de pensamiento computacional. Esta herramienta se enriquece con plugins como Hairball, que facilita el análisis estático del código, identificando problemas y sugiriendo mejoras. La arquitectura flexible de Hairball permite la inclusión de nuevas funcionalidades, haciendo de Dr. Scratch un instrumento valioso en la evaluación de las habilidades de pensamiento computacional.

El sistema de evaluación dinámica ponderada (Dynamic Weighted Evaluation System - DWES) propuesto por Chai et al. [12] representa otro avance significativo en este campo, al permitir la evaluación automática de proyectos en Scratch y ajustar los criterios de evaluación en función

de las características específicas de cada proyecto. Este enfoque garantiza que los criterios de evaluación reflejen de manera más precisa las habilidades de pensamiento computacional manifestadas en los proyectos.

Además, investigaciones como la de Zhang et al. [12] subrayan la importancia de desarrollar indicadores de evaluación científicamente válidos que abarquen todas las dimensiones del pensamiento computacional. Estos indicadores son fundamentales para una evaluación precisa de las habilidades de pensamiento computacional y son esenciales para fomentar el desarrollo de estas habilidades. La validación de estos indicadores a través de análisis cualitativos, cuantitativos y evaluaciones de expertos asegura que reflejen de manera integral las capacidades de pensamiento computacional de los estudiantes.

Finalmente, como parte de los principales resultados obtenidos de este trabajo, en el Cuadro 2, se ofrece un resumen de los conceptos que se han mencionado con mayor frecuencia en la literatura consultada como representativos de la definición de pensamiento computacional. En menor medida, también se mencionan conceptos como codificación, automatización, control de flujo, diseño, interactividad, procesamiento de datos, modelo, control de flujo, programa, secuencias y transformación.

Cuadro 2. Frecuencia de conceptos asociados al pensamiento computacional.

Concepto	Ocurrencia
Abstracción	10
Pensamiento Algorítmico	8
Descomposición	8
Representación de datos	5
Depuración	4
Evaluación	4
Generalización	4
Paralelismo	4

Conclusiones

Este artículo representa un paso decisivo hacia la consolidación de un marco conceptual para el pensamiento computacional, subrayando su creciente importancia en la educación contemporánea y el desarrollo profesional. A través de una investigación rigurosa y un análisis detallado de estudios existentes, se ha logrado una comprensión integral del pensamiento computacional, destacando tanto las habilidades fundamentales como los procesos cognitivos asociados y su aplicabilidad en diversos contextos educativos y profesionales.

La contribución principal de este estudio radica en su capacidad para fusionar teorías conceptuales con aplicaciones prácticas, sirviendo de puente entre la teoría y la praxis. El marco conceptual establecido sienta las bases para currículos educativos avanzados y programas de capacitación, enfocándose en el desarrollo estructurado de habilidades esenciales en pensamiento computacional. Este enfoque es crucial para preparar a individuos para los retos de un mundo tecnológicamente avanzado, enfatizando la importancia de comprender, diseñar y optimizar sistemas computacionales.

Un hallazgo fundamental de este estudio es la necesidad imperante de formular una base consensuada para investigaciones futuras en pensamiento computacional. Esto implica la definición universal del concepto, la identificación de sus dimensiones y elementos

constituyentes, la creación de índices precisos, y el desarrollo de métricas objetivas para una evaluación efectiva y confiable del pensamiento computacional. Estos elementos son esenciales para avanzar de manera coherente y estructurada en este campo.

Tomando como base los conceptos más frecuentemente asociados al pensamiento computacional, se considera que los principales criterios para la subsecuente evaluación pueden enfocarse en: abstracción, pensamiento algorítmico, descomposición, representación de datos, depuración, evaluación, generalización y paralelismo.

Finalmente el artículo sienta las bases para futuras investigaciones en pensamiento computacional, ofreciendo un marco exhaustivo que sirve como punto de partida para investigaciones más profundas. La metodología detallada para la evaluación de habilidades computacionales, junto con la valoración de actitudes y la inteligencia espiritual en el aprendizaje, aporta una visión amplia y enriquecedora. Con este estudio, se abren caminos para futuras indagaciones y se proveen herramientas valiosas para educadores y profesionales, contribuyendo significativamente a la evolución y aplicación del pensamiento computacional en diversas disciplinas.

Agradecimientos

Este artículo es fruto del proyecto de investigación titulado “Metodología para el reconocimiento automático de patrones del Pensamiento Computacional en estudiantes de la educación general básica para mejorar los procesos de gestión”, desarrollado bajo el auspicio de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Extendemos nuestro sincero agradecimiento a nuestra institución por su invaluable apoyo y por proporcionar los recursos necesarios para llevar a cabo esta importante iniciativa de investigación. Su compromiso con el fomento de la investigación científica y tecnológica ha sido fundamental para el éxito de este trabajo.

Referencias

- [1] J. M. Wing, “Computational thinking,” *Commun. ACM*, vol. 49, no. 3, pp. 33–35, Mar. 2006.
- [2] J. Cuny, L. Snyder, and J. Wing, “Demystifying computational thinking for non-computer scientists, work in progress,” 2010.
- [3] D. Seehorn, S. Carey, B. Fuschetto, I. Lee, D. Moix, D. O’Grady-Cunniff, ..., A. Verno, “CSTA K–12 Computer Science Standards: Revised 2011,” *ACM*, 2011.
- [4] M. Román-González, “Test de pensamiento computacional: principios de diseño, validación de contenido y análisis de ítems computational thinking test: design guidelines, content validation and item analysis.”
- [5] I. Dimos, C. Velaora, and A. Kakarountas, “Computational thinking in greek educational system for k-12: towards the future teaching approach,” in *2022 Panhellenic Conference on Electronics and Telecommunications (PACET)*, 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/PACET56979.2022.9976359.
- [6] S. Grover and R. Pea, “Computational thinking in k–12: A review of the state of the field,” *Educational researcher*, vol. 42, no. 1, pp. 38–43, 2013.
- [7] S. Bocconi, A. Chiocciariello, G. Dettori, A. Ferrari, and K. Engelhardt, “El pensamiento computacional en la enseñanza obligatoria (computhink). implicaciones para la política y la práctica. developing computational thinking in compulsory education. implications for policy and practice,” 2016.
- [8] L. Seiter and B. Foreman, “Modeling the learning progressions of computational thinking of primary grade students,” in *Proceedings of the ninth annual international ACM conference on International computing education research*, 2013, pp. 59–66.
- [9] M. Resnick and K. Brennan, “Nuevos marcos de referencia para estudiar y evaluar el desarrollo del pensamiento computacional,” 2012.
- [10] X. Chai, Y. Sun, H. Luo, and M. Guizani, “Dwes: A dynamic weighted evaluation system for scratch based on computational thinking,” *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, vol. 10, no. 2, pp. 917–932, 2022. doi: 10.1109/TETC.2020.3044588.

- [11] S. Rijo-García, E. Segredo, and C. León, "Computational thinking and user interfaces: A systematic review," *IEEE Transactions on Education*, vol. 65, no. 4, pp. 647–656, 2022. doi: 10.1109/TE.2022.3159765.
- [12] W. Zhang, X. Zeng, D. Ming, and J. Wang, "Research on the construction of evaluation indicators of students' computational thinking based on spectral clustering," in *2022 10th International Conference on Information and Education Technology (ICIET)*, 2022, pp. 104–112. doi: 10.1109/ICIET55102.2022.9779003.
- [13] F. Luo, M. Israel, and B. Gane, "Elementary computational thinking instruction and assessment: A learning trajectory perspective," *ACM Trans. Comput. Educ.*, vol. 22, no. 2, Feb. 2022. doi: 10.1145/3494579.
- [14] R. Ismail, T. A. Steinbach, and C. S. Miller, "A guide towards a definition of computational thinking in k-12," in *2022 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, 2022, pp. 801–810. doi: 10.1109/EDUCON52537.2022.9766703.
- [15] D. E. Sondakh, K. Osman, and S. Zainudin, "A proposal for holistic assessment of computational thinking for undergraduate: Content validity," *European Journal of Educational Research*, vol. 9, no. 1, pp. 33–50, 2020.
- [16] R. Barrera Capot, R. Montaña Espinoza, and J. Sánchez, "Desarrollo del pensamiento computacional con scratch," *Nuevas Ideas en Informática Educativa*, vol. 11, pp. 616–620, 2015.
- [17] M. Román-González, J. C. Pérez-González, and C. Jiménez-Fernández, "Test de pensamiento computacional: diseño y psicometría general," in *III Congreso Internacional sobre Aprendizaje, Innovación y Competitividad (CINAIC 2015)*, 2015, pp. 1–6.
- [18] M. Román-González, J. Moreno-León, and G. Robles, "Combining assessment tools for a comprehensive evaluation of computational thinking interventions," in *Computational Thinking Education*, 2019, pp. 79–98.
- [19] B. Boe, C. Hill, M. Len, G. Dreschler, P. Conrad, and D. Franklin, "Hairball: Lint-inspired static analysis of Scratch projects," in *Proceedings of the 44th ACM Technical Symposium on Computer Science Education*, 2013, pp. 215–220.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores declaramos que hemos utilizado una herramienta de inteligencia artificial ChatGPT para asistirnos en la redacción de este artículo. Esta herramienta nos ayudó a mejorar la estructura y la claridad del texto. Los contenidos generados por la IA fueron revisados minuciosamente por nosotros para asegurar su precisión y coherencia con el objetivo del estudio.

Effect of instance selection algorithms on prediction error of numerical variables

Efecto de los algoritmos de selección de instancias sobre el error de predicción de variables numéricas

Martín Solís¹, Erick Muñoz-Alvarado²

Fecha de recepción: 7 de diciembre, 2023
Fecha de aprobación: 14 de marzo, 2024

Solís, M; Muñoz-Alvarado, E. Effect of instance selection algorithms on prediction error of numerical variables . *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 1. Enero-Marzo, 2025. Pág. 157-171.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i1.6937>

- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica
 marsolis@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-4750-1198>
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica
 erickamacr3@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-6244-3398>

Keywords

Instance selection algorithms; regression task; machine learning; noise.

Abstract

The main objective of this study is to analyze the effect of instance selection (IS) algorithms on the prediction error in regression tasks with machine learning. Six algorithms were evaluated; four from literature and two are new variants of one of them. Different percentages and magnitudes of noise were added to the output variable of 52 datasets to evaluate the algorithms. The results show that not all IS algorithms are effective. RegENN and its variants improve the prediction error (RMSE) of the regression task in most datasets for high percentages and magnitudes of noise. However, when the magnitude and percentage of noise are lower, for example, 10%-10%, 50%-10%, or 10%-30%, there is no evidence of improvement in most datasets. Other results are presented to answer four new questions about the performance of the algorithms.

Palabras clave

Algoritmos de selección de instancias; tareas de regresión; aprendizaje automático; ruido.

Resumen

El objetivo principal de este estudio es analizar el efecto de los algoritmos de selección de instancias (IS) sobre el error de predicción en tareas de regresión con machine learning. Se evaluaron seis algoritmos; cuatro de la literatura y dos son nuevas variantes de uno de ellos. Se agregaron diferentes porcentajes y magnitudes de ruido a la variable de salida de 52 conjuntos de datos para evaluar los algoritmos. Los resultados muestran que no todos los algoritmos IS son efectivos. RegENN y sus variantes mejoran el error de predicción (RMSE) de la tarea de regresión en la mayoría de los conjuntos de datos para altos porcentajes y magnitudes de ruido. Sin embargo, cuando la magnitud y el porcentaje de ruido son menores, por ejemplo, 10 %-10 %, 50 %-10 % o 10 %-30 %, no hay evidencia de mejora en la mayoría de los conjuntos de datos. Se presentan otros resultados para responder a cuatro nuevas preguntas sobre el rendimiento de los algoritmos.

Introduction

Instance selection (IS) is useful to choose a subset of data without noise or with more relevant instances [1]. Two of the main purposes of instance selection are reducing a dataset and improving performance in data mining or machine learning tasks by cleaning redundant instances, outliers, and noise instances [2]. Our work analyzes how the application of instance selection algorithms affects performance in regression tasks when there is noise in the training dataset.

In supervised tasks, an instance is noisy when it has suffered a corruption that alters the relationship between the informative features and the output [1]. When the noise is present in the input attributes, it is known as attribute noise, and when it is present in the output variable is known as class noise [3]. The last one is more harmful in supervised classification tasks [5], and maybe, for this reason, several filters have been developed for its detection. These filters have been effective for the classification task. For example, Garcia et al. [1] show the effect of three noise filters to detect and delete instances in datasets with uniform class noise and pair-wise class noise at ranges from 5 to 20%. SVM, Ripper, and C4.5's mean accuracy was better when

the filter was applied to delete noise instances from datasets. Also, in [5], it is shown how some filter algorithms contribute to improve the classification performance in problems with different percentages of class noise.

As well as these studies, many others have emerged that analyze the performance of noise detection algorithms in classification problems, for example [6, 10,11,12, 18, 19]. However, for regression problems, the development and performance evaluation of filter algorithms has not been widely studied. Some of the most relevant studies come from [7, 8, 9]. On the hand, the findings for noise detection in classification supervision tasks cannot be generalized to regression tasks. In classification, the instance selection algorithm looks for deviations at a class between a finite number of classes; however, in regression, the output could be continuous or with a broad range of values [7]. Therefore, in regression, the IS algorithm should set a variable threshold of the difference between the predicted and the actual value of the vector output to define an instance as noisy [9].

The main objective of this study is to analyze the effect of IS algorithms on the prediction error in regression tasks. Arnaiz-González et al. [7, 17] analyzed the effect of a few IS algorithms on performance prediction in the regression task, including different noise percentages in 29 datasets. However, in our study, we consider the percentage of noisy instances and the magnitude of noise, while including more datasets, four algorithms taken from literature, and two new variants of one of them. Precisely, we aim to answer the following new questions about IS algorithms for regression:

1. Are the IS algorithms effective in improving the prediction error of the regression task at different percentages of noisy instances and magnitudes of noise in the output variable?
2. Are the IS algorithms effective in improving the prediction error of the regression task when there is no noise in the output variable?
3. Which of the IS algorithms is the best at reducing the prediction errors in the regression task, considering different percentages of noisy instances and magnitudes of noise?

Related work

A few studies have proposed algorithms, for instance selection in regression tasks. These algorithms can be used for noise detection in the output variable [8], but also in data reduction, deleting redundant instances [8] or outlier detection [9].

According to [4], there are two kinds of Instance selection algorithms for regression: evolutionary-based and nearest neighbor-based. In the first group, we found the genetic algorithm developed by [16] to detect outliers in regression problems and the multi-objective evolutionary learning of fuzzy rule-based systems proposed by [15]. In the second group, there are more options: Kordos and Blahnik [9] adapted the Edited Nearest Neighbor rule (ENN) and Condensed Nearest Neighbor rule (CNN) for instance selection in classification problems to regression problems. They were called RegENN and RegCNN, respectively. Arnaiz-González et al. [4, 7, 17] proposed several variations using KNN, for example, 1) discretizes the output variable to apply ENN and CNN, 2) Create a bagging ensemble with RegENN and RegCNN, 3) ensemble of discretization-based ENN and ensemble of discretization-based CNN, 4) adaptations and variants of DROP instance selection methods used in classification. Song et al. [8] developed a KNN algorithm named DISKR that deletes noise or redundant instances to reduce the training dataset.

In [22] the authors evaluate the performance of an evolutionary algorithm, for instance, selection in regression. They evaluated different parameters of the algorithm and its influence on the results. Also, [23] used a genetic algorithm, for instance, selection in regression. The authors demonstrate that their proposal improves the predictive model performance compared to instance selection performed on the complete training dataset. In order to attend to the problem of instance selection for multi-target regression tasks [24], proposed an ensemble algorithm. They showed the effectiveness of their proposal using 18 datasets. Finally, [25] developed an interactive nonparametric evidential regression algorithm with instance selection.

From the previous algorithms, we evaluated RegENN because is considered a noise filter [17] and shows the best RMSE when applied to datasets with 10% of noise [7]; DROP2-RE was selected because shows good performance detecting 10%, 20% and 30% of noisy instances in the datasets; DiscENN because when applied with 20%, 30%, and 40% of noise, the RMSE was the best; DISKR, since it has not been tested in problems with noise as far as we know, and shows good results reducing the dataset and keeping good performance in regression tasks [4, 8]. We propose two new options derived from RegENN, named RegENN2 and RegENN3. In the next section, we will describe these algorithms.

Algorithms ³

RegENN was proposed by [9] as an adaptation of Wilson ENN (used for classification instance selection). For each instance, x_i : a) A model (kNN in our case) for regression is trained without the instance; b) Get k-nearest neighbors of the instance x_i based on T; c) Compute the threshold θ that depends on the standard deviation of the k-nearest neighbors real values and a parameter α ; d) Exclude an instance from T if the prediction error of x_i is bigger than the threshold θ . The purpose of this model is to exclude an instance that has a prediction error α times greater than the variability of the numerical target in similar instances. The algorithm gets more rigorous at excluding instances when α decreases.

<p>Algorithm1: Edited Nearest Neighbor for regression (RegENN)</p> <p>Data : Training set $T = \{ (x_1, y_1) , \dots (x_n, y_n) \}$, x =features, y = numerical target, Model= any model for regression prediction, \bar{y} = prediction, R = k -nearest neighbors, α=parameter, θ= threshold, S=Subset of T</p> <p>Result : Instance set $S \subseteq T$</p> <pre> 1 for $i = 1 \dots n$ do 2 $\bar{y}_i = \text{Model}(T \setminus x_i)$ 3 $R = \text{kNN}(T \setminus x_i)$ 4 $\theta = \alpha \cdot \text{std}(y(x_R))$ 5 if $y_i - \bar{y}_i > \theta$ then 6 $T = T \setminus x_i$ 7 end 8 end 9 $S = T$ 10 Return S </pre>
--

3 The IS algorithms used are at

We proposed two variations to RegENN. The first one was named RegENN2 and had two main differences. One is that the instances considered noisy were removed simultaneously instead of sequentially. We did this change to avoid the influence of the dataset order in the instance selection process. The second and most important, is that we changed the formula of the threshold θ . In RegENN2 θ is the product of the parameter α and the mean absolute error of the k -nearest neighbors. The idea of this change is to exclude an instance that has an absolute error prediction greater α times than the mean absolute error of its more similar instances. The algorithm is more rigorous when α decreases.

Algorithm2: RegENN2

Data : Training set $T = \{ (x_1, y_1) , \dots (x_n, y_n) \}$,

x =features, y = numerical target, \bar{y} = prediction, R = k -nearest neighbors, α =parameter, $MAE(x_R)$ =Mean absolute error of k -nearest neighbors, θ = threshold, S =Subset of T

Result : Instance set $S \subseteq T$

```

1 Remove $i$  =0
2 for  $i = 1 \dots n$  do
3    $\bar{y}_i = \text{kNN}(T \setminus x_i)$ 
4    $R_i = \text{kNN}(T \setminus x_i)$ 
5    $\theta = \alpha \cdot (MAE(x_{R_i}))$ 
6   If  $|y_i - \bar{y}_i| > \theta$  then
7     Remove $i$  =1
   end
end
8  $S = \{ T : \textit{Remove}_i = 0 \}$ 
Return  $S$ 
```

The second was named RegENN3. It assigns a weight to the features when the Euclidean distance is computed in the kNN prediction. The weights are taken from Random Forest Feature importance. This change pretends to reduce the importance of features that are less related to the target. Furthermore, a weight is assigned to the neighbor instances when the mean absolute error is computed. Closer instances of a specific instance have more weight. To that end, we divide the inverse distance of each instance neighbor by the sum inverse distances from all neighbors.

Algorithm3: RegENN3

Data : Training set $T = \{ (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n) \}$, x =features, y = numerical target, imp= feature weight vector given by F score of a Random Forest model with default parameters and 100 trees, \bar{y} = prediction, $R = k$ -nearest neighbors, kNN_weight =kNN using feature weight vector, $distance$ =distance between neighbor and instance i , II = neighbors weight vector (it shows which neighbor is closer to instance i), α =parameter, MAE_weight= weighted MAE by II (it assigns more weight to the error of closer neighbors), ϵ = threshold, S =Subset of T

Result : Instance set $S \subseteq T$

```

1 Remove $i$  =0
2 Imp= RandomForest( $T \setminus x_i$ )
3 for  $i = 1 \dots n$  do
4    $\bar{y}_i = \text{kNN\_weight}(T \setminus x_i, \text{imp})$ 
5    $R_i = \text{kNN\_weight}(T \setminus x_i, \text{imp})$ 
6   foreach  $k$  (instance neighbor) in  $R_i$  do
7      $II_i = \frac{distance_k^{-1}}{\sum_{k=1}^R distance_k^{-1}}$ 
   end
8    $\epsilon = \alpha \cdot (\text{MAE\_weight}(R_i, II_i))$ 
9   If  $|y_i - \bar{y}_i| > \epsilon$  then
10    Remove $i$  =1
   end
end
11  $S = \{ T : \text{Remove}_i = 0 \}$ 
Return  $S$ 

```

DiscENN was also proposed by [7] and showed better performance than RegENN to improve the regression prediction model when there is more than 10% noise [7]. A similar version was used in this paper, but we established the number of discretization categories k as a parameter instead of using leave-one-out entropy to be estimated. In this algorithm, the target value is discretized with equal-width binning. After that ENN instance selection algorithm for classification is applied, and the categorical target is restored to get the subset S finally.

Algorithm4: Discretization for Edited Nearest Neighbor

Data : Training set $T = \{ (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n) \}$,

x =features, y = output variable, ENN= algorithm of instance selection for classification, k =number of discretization categories, S =Subset of T

Result : Instance set $S \subseteq T$

```

1  $y_D$  =Apply discretization of  $y$  with equal-width binning of size  $k$ 
2 Apply ENN on  $(x, y_D)$  to get  $S$ 
3 Restore the numerical value of  $y_D$ 
Return  $S$ 

```

Song et al. [8] developed a kNN algorithm named DISKR that deletes noise or redundant instances to speed up executing prediction and improve the learners' performance in regression tasks. They compare the performance of DISKR with other algorithms that had a similar purpose, using 19 datasets. The results showed that the application of DISKR did not display better or worse R^2 in regression tasks, when compared to other instance selection algorithms. However, the DISKR lowers the storage ratio and therefore speeds up the execution time. This algorithm has three parts: First, excluding outliers instances with a higher absolute prediction error than the threshold $(1 - \theta)$ multiplied by the target. Second, ordering the included instances by the absolute difference between target and prediction. Third, the objective is to remove the instances that generate a higher residual sum of squares when excluded from the dataset.

Algorithm 5: Decremental instance selection for kNN regression (DISKR)

Data : Training set $T = \{ (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n) \}$,

x =features, y = output variable, \bar{y} = prediction, θ =parameter, \bar{y}' = prediction excluded I,
 $Ra_i = \sum_{j \in T-i} (y_j - \bar{y}_j)^2$, $Rb_i = \sum_{j \in T-i} (\bar{y}_j - \bar{y}'_j)^2$, $\Lambda_i = \{i \in NN_j \mid j \in T\}$, S =Subset of T ,
 $A = \pi r^2$

Result : Instance set $S \subseteq T$

```

1 Removei =0,  $S = \emptyset$ 
2 for  $i = 1 \dots n$  do
3    $\bar{y}_i = \text{kNN}(T \setminus x_i)$ 
4   if  $|y_i - \bar{y}_i| > (1 - \theta) y_i$  then
5     Removei =1
6   end
7 end
8  $S = \{ T : \text{Remove}_i = 0 \}$ 
9  $S_r = \text{Sort } S \text{ in decreasing order according to } (y_i - \bar{y}_i)$ 
10 foreach instance  $i$  in  $S_r$  do
11   compute  $Ra_i, Rb_i$ 
12   if  $Ra_i - Rb_i \leq \theta Ra_i$  then
13      $S = S - \{i\}$ 
14     foreach  $j \in \Lambda_i$  do
15       Find another instance  $h$  to replace  $j$  in  $NN_j$ 
16      $\Lambda_h = \Lambda_h \cup \{j\}$ 
17   end
18 end
19 end
20 Return  $S$ 

```

DROP2-RE is an adaptation of Drop methods [20] used in classification problems. According to [17], the idea is to remove an instance if it does not increase its associates prediction error. The instances that have p as one of its k nearest neighbors are called associates of p . DROP2-RE was between the two best algorithms considering the accuracy in the prediction task, when there was a noise percentage of 10%, 20%, and 30%, according to experiments in [17].

Algorithm 6: DROP2-RE: adaptation to regression of DROP2 by using error accumulation.

Data : Training set $T = \{ (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n) \}$,

x =features, y = numerical target , S =Subset of T

Result : Instance set $S \subseteq T$

Let $S = T$

1 **foreach** instance x in S **do**

2 find $x.x.N_{1,\dots,k+1}$ the $k+1$ nearest neighbours of x in S

3 Add x to each of its list of the associates of the neighbours

4 **foreach** instance x in S **do**

5 Let $ewith=0$

6 Let $ewithout=0$

7 **Foreach** associate a of x **do**

8 **Add** $|y(a) - Model(a.N \setminus x, a)|$ **to** $ewithout$

9 **Add** $|y(a) - Model(a.N, a)|$ **to** $ewith$

10 **if** $ewithout \leq with$ **then**

11 Remove x from S

12 **Foreach** associate a of x **do**

13 Remove x from a list of nearest neighbours

14 Find a new nearest neighbour for a

15 Add a to its new neighbour's list of associates

Return S

Methods

Datasets

We used 52 datasets from the Keel repository [13] and UCI machine-learning repository [14]. The datasets used are in Repository. The number of instances of the datasets are between 209 and 5723, with an average of 2429. The number of input features is between 3 and 82. The average correlation between the input features is between 0.03 and 0.86.

Instance selection algorithms and parameters

The algorithms explained in the previous sections could be used with different methods. For example, in RegENN, the model $(T \setminus x_i, x_i)$ could be calculated with KNN or another option. However, we decided to use KNN because of its simplicity. KNN was applied with $k=9$ following the recommendation of the authors [7].

On the other hand, five of the six algorithms have one parameter that should be defined. We evaluated each algorithm with four different parameter values considering what was used in other studies [7, 8, 17]. The parameters used in the experiments are shown below:

- RegENN, RegENN2, RegENN3 were applied with $\alpha = 0.5, 1, 3, 5$.
- DiscENN with bins = 2,3,4,5.
- DISKR with $\alpha = 0.05, 0.1, 0.2, 0.3$
- DROPRE2 = It does not have a parameter

Experimental setup

We followed some principles of the method used by [7, 19] to evaluate the six algorithms' effect on the prediction error of the regression task. Figure 1 describes the experimental process applied for each dataset.

4. First, we split the dataset in training and test (we used 5-fold cross-validation).
5. A magnitude of noise was added to the output variable of some instances of the training set. For the noise incorporation, a percentage of instances were selected randomly. We multiplied the value of the output variable by the magnitude of noise, and the result was added or subtracted to the output variable.
6. Next, we applied the IS algorithm to the training set in order to detect the noisy instances. Each instance classified as noisy was deleted from the training set.
7. Then, we trained a Random Forest Regressor with the training set to predict the output variable. The Random Forest was trained with 100 trees, and a maximum depth of 9. We chose the Random Forest because it is highly used in regression tasks with good performance [26, 27], and has been successfully insensitive to over-fitting [28].
8. Finally, with the model trained, we predicted the output variable of the test dataset and computed the Root Mean Square Error.

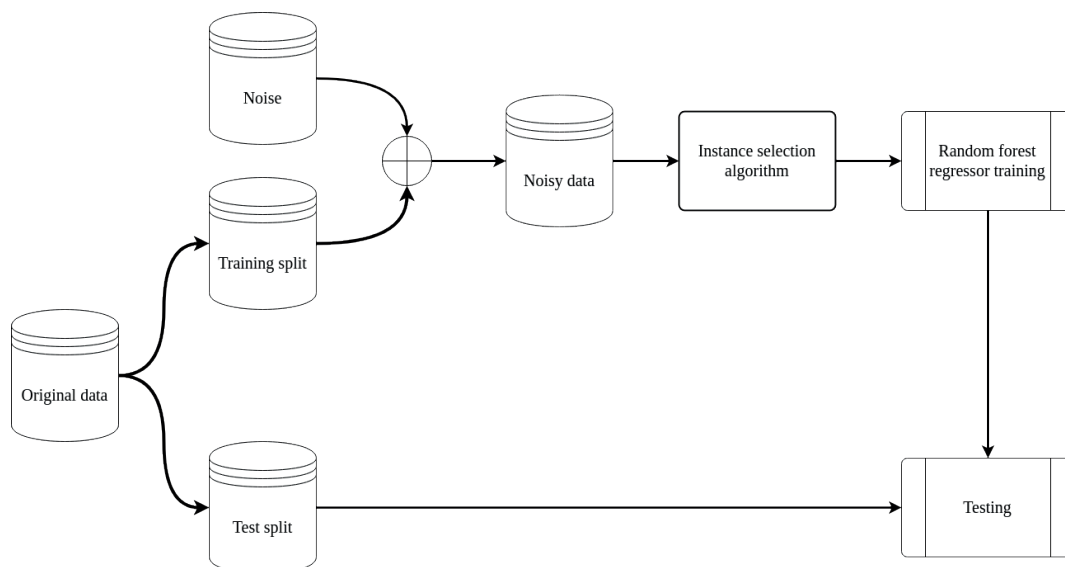


Figure 1. Experimental process, based on [7]

The process depicted in figure 1 was applied 13 times for each dataset. The first time is applied using the original dataset without noise incorporations into the output variable in the step 2. In the following twelve times, we used different magnitudes and percentages of noise. The magnitudes of the noise used were: 10%, 50%, 100% and 200% while the percentages of noisy samples were: 10%, 30% and 50%. Thus, in each of the twelve times, we applied a combination of the percentage of noisy instances and the noise magnitude. In experimental terms, it is a factorial design 4*3 for repeated measures. A random seed was fixed to guarantee the comparability. The algorithms and the experimental setup were programmed in Python, and the data analysis in R.

Results

Influence of IS algorithms on the prediction error of the regression task

In order to show pieces of evidence to questions one and two, we calculated the relative change in the RMSE when using an IS algorithm versus not using it for each percentage and magnitude of noise. Figure 2 shows the confidence interval of the proportions of cases (datasets) where the relative change decreases when the IS algorithm was used at different percentages (percentage) and magnitudes of noise. Figure 3 complements the information of figure 2 with a box plot of the relative change.

According to the punctual percentage estimation and the box plots, the algorithms RegENN, RegENN2 and RegENN3 tend to be more effective as the noise magnitude increases independent of the noise percentage. Based on the interval confidence, we cannot conclude that these algorithms are effective in most cases when there is no noise or when the magnitude and percentage noise are: 10%-10%, 10%-30%. DiscENN is effective in most cases when noise magnitude is 100% and 200% with a noise percentage of 10%, and DROPRE2 is effective when the magnitude is 200% with noise percentages of 10% and 30%, although the percentage decrease in RMSE tends to be modest in these cases for both algorithms (Figure 2).

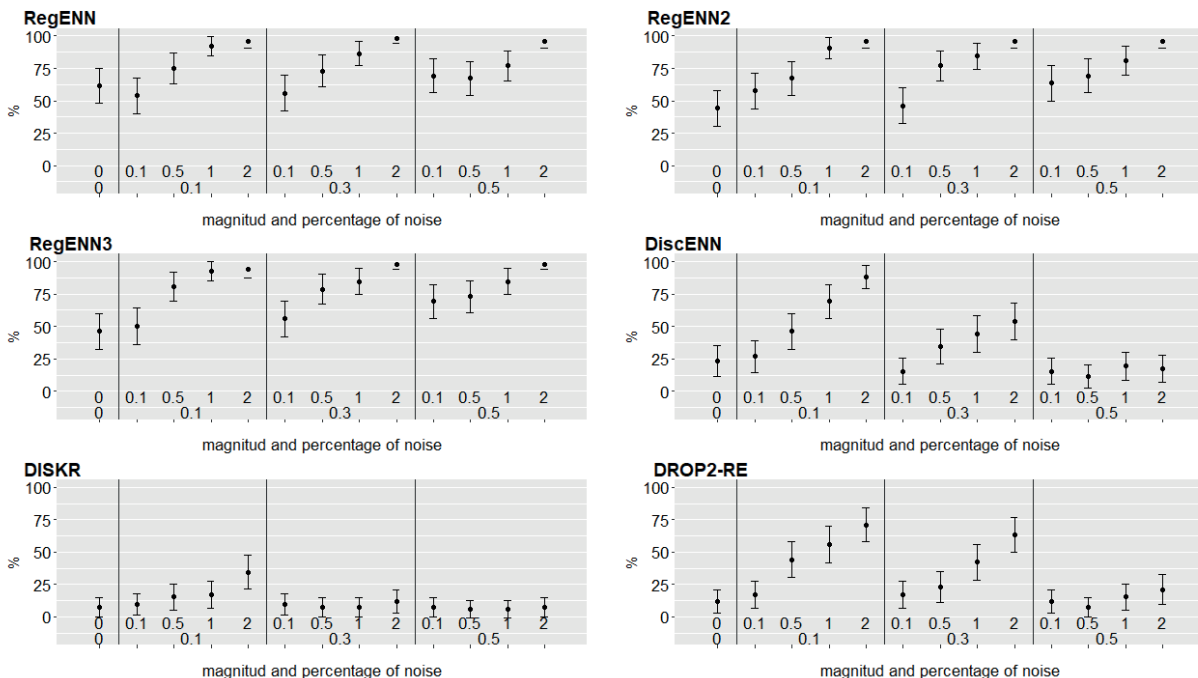


Figure 2. Confidence intervals of the proportion of datasets where the RMSE decreases when the

IS algorithm is applied vs not applied, according to magnitude and percentage of noise.

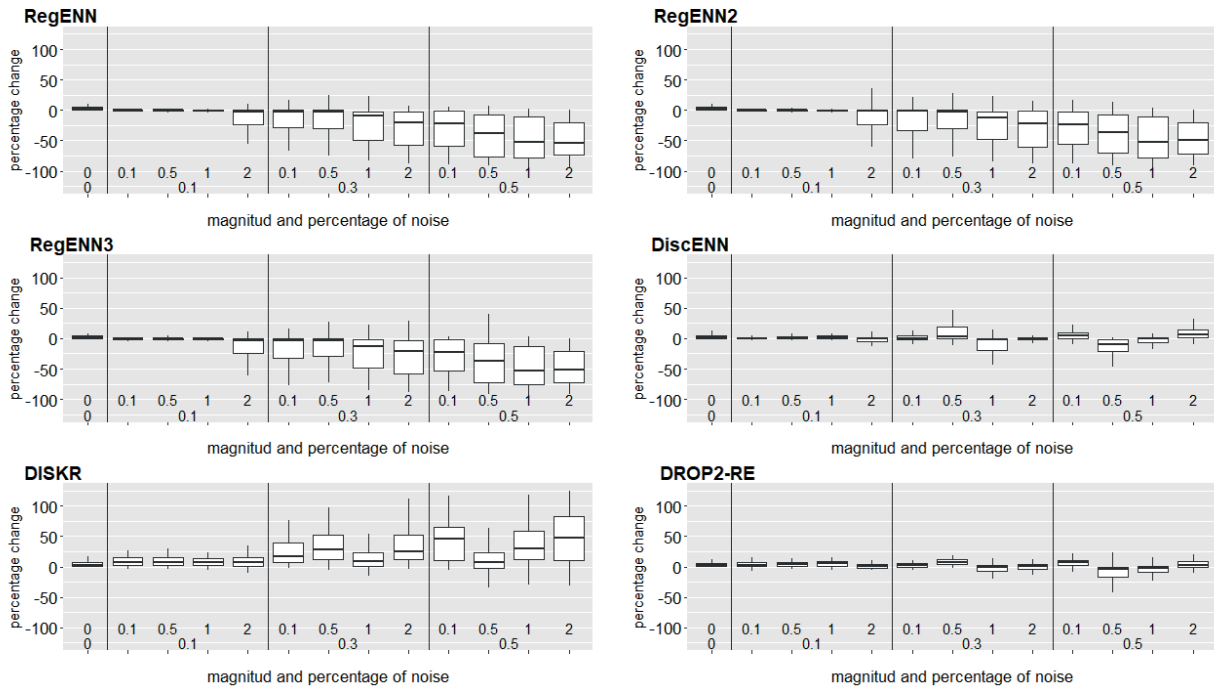


Figure 3. Box plot of the relative change in the RMSE when the IS algorithm is applied vs. not applied, for each percentage and magnitude of the noise

Best algorithm

Table 1 presents evidence for question 3. This table has the average rank of each algorithm for each combination of noise percentage and noise magnitude. For example, the first number in RegENN shows that in the 52 datasets, this algorithm got an average position of 2.1 between the six algorithms when the dataset has 0% of noise. The Anova test indicates that at least one mean differs from the others in each scenario (a combination of percentage and magnitude of noise), $p < 0.05$. Because of the previous result, we applied paired t-test with Bonferroni correction to analyze which means have a significant statistical difference with the best mean. This test showed that RegENN, RegENN2, RegENN3 were the best algorithms in 11 scenarios, while in the scenarios where the percentage of noise was 0.1, and the magnitudes were 1 and 2, the best were RegENN2, RegENN3.

Although the algorithms DiscENN, DISKR, and DROP2-RE had the worst performance on average, in some datasets, these got the best performance (table 2). For example, with a percentage and magnitude of 10%, there were 17% (9 datasets) of datasets where DiscENN gave the best reduction in RMSE.

Table 1. Average rank over the relative change in RMSE when IS is used (vs. not used), for each algorithm.

Percentage	Magnitude	Algorithms					
		RegENN	RegENN2	RegENN3	DiscENN	DISKR	DROP2-RE
0	0	2.1 ^a	2.7 ^a	2.6 ^a	3.5	5.3	4.8
0.1	0.3	2.5 ^a	2.4 ^a	2.4 ^a	3.5	5.4	4.8
0.1	0.5	2.3 ^a	2.5 ^a	2.1 ^a	3.9	5.6	4.6
0.1	1	2.6	2.2 ^a	2 ^a	3.8	5.7	4.7
0.1	2	2.6	1.8 ^a	2.1 ^a	4.2	5.6	4.6
0.3	0.1	2.2 ^a	2.5 ^a	2.2 ^a	3.8	5.5	4.8
0.3	0.5	2.1 ^a	2.4 ^a	2.2 ^a	4.1	5.7	4.5
0.3	1	2.3 ^a	2.3 ^a	2.1 ^a	4.1	5.7	4.6
0.3	2	2.2 ^a	2.3 ^a	1.9 ^a	4.3	5.7	4.6
0.5	0.1	2.2 ^a	2.4 ^a	2.2 ^a	3.9	5.3	5.0
0.5	0.5	1.9 ^a	2.4 ^a	2.4 ^a	4.0	5.8	4.5
0.1	1	2.3 ^a	2.3 ^a	2.2 ^a	3.9	5.8	4.6
0.5	2	1.9 ^a	2.1 ^a	2.2 ^a	4.5	5.8	4.5

^a best algorithms according to paired t-test with Bonferroni correction

Table 2. Relative distribution of the datasets according to the algorithm that got the best relative change in RMSE by each percentage and magnitude of noise.

Percentage	Magnitude	Algorithms						Total
		RegENN	RegENN2	RegENN3	DiscENN	DISKR	DROP2-RE	
0	0	40%	15%	29%	8%	4%	4%	100%
0.1	0.1	23%	31%	27%	17%	2%	0%	100%
	0.5	29%	13%	40%	13%	4%	0%	100%
	1	12%	31%	40%	12%	4%	2%	100%
	2	10%	54%	23%	8%	4%	2%	100%
0.3	0.1	33%	21%	33%	8%	4%	2%	100%
	0.5	37%	23%	29%	8%	4%	0%	100%
	1	25%	23%	42%	6%	4%	0%	100%
	2	31%	19%	44%	2%	2%	2%	100%
0.5	0.1	27%	29%	29%	8%	6%	2%	100%
	0.5	42%	21%	21%	13%	0%	2%	100%
	1	29%	29%	27%	12%	0%	4%	100%
	2	46%	27%	21%	4%	2%	0%	100%

Conclusions

This study provides new evidence about the influence of the IS algorithms on the prediction error in learning regression tasks. The research questions posed in the introduction with our answers based on the results are shown below.

1. Are the IS algorithms effective in improving the prediction error of the regression task at different percentages of noisy instances and magnitudes of noise in the output variable?

Not all IS algorithms are effective. The RegENN and its variants tend to improve the prediction error of the regression task in most datasets for high percentages and magnitudes of noise. The RMSE reduction fluctuates between 0% and 100%. Nonetheless, when the magnitude and percentage of noise are lower, for example, 10%-10%, 50%-10%, or 10%-30%, there is no evidence of improvement in most datasets, and when it occurs, it is close to zero. Concerning the other algorithms, these are not effective in over 50% of datasets for the majority percentages and magnitudes of noise.

2. Are the IS algorithms effective in improving the prediction error of the regression task when there is no noise in the output variable?

The IS algorithms are not effective in improving the prediction error of the regression task when there is no noise in the output variable. The RegENN and its variants tend to be effective around 50% of datasets, and with other algorithms, this percentage is lower. Besides, when there is an improvement in performance prediction, the percentage reduction in RMSE is close to 0%.

3. Which of the IS algorithms is the best at reducing the prediction errors in the regression task, considering different percentages of noisy instances and magnitudes of noise?

RegENN, RegENN2, RegENN3 were the best algorithms in 11 scenarios (combination of percentage and magnitude of noise), while in the scenarios where the percentage of noise was 0.1, and the magnitudes were 1 and 2, the best were our proposals RegENN2, RegENN3. Although the algorithms DiscENN, DISKR, and DROP2-RE had the worst on average, in some datasets, these got the best performance. For this reason, it is convenient to develop a model that can tell us which algorithm is the best option, according to the characteristics of the dataset.

Future Research lines

Future studies should analyze what dataset features influence the effectiveness of IS algorithms to reduce the error in the regression task and develop a model that can tell us which algorithm is the best option according to the characteristics of the dataset.

Our findings suggest that the IS algorithm is not effective when the noise percentage and magnitude is lower, for example, 10% of noise with a magnitude of 10% and 50% of the real value. Therefore, new algorithms should be proposed to reduce the error in the regression task for low values of noise percentage and noise magnitude.

References

- [1] S. García, J. Luengo, F. Herrera, Data preprocessing in data mining, Springer, 2015. doi:10.1007/978-3-319-10247-4
- [2] H.Liu, H.Motoda, On issues of instance selection, Data Min. Knowl. Disc. 6(2) (2002) 115–130
- [3] S. García, J. Luengo, F. Herrera, Tutorial on practical tips of the most influential data preprocessing algorithms in data mining, Knowledge-Based Systems, 98 (2016) 1-29 <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2015.12.006>
- [4] A. Arnaiz-González, M. Blachnik, M. Kordos, C. García-Osorio, Fusion of instance selection methods in regression tasks, Information Fusion 30 (2016) 69–79 <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2015.12.002>

- [5] X. Zhu , X. Wu, Class noise vs. attribute noise: a quantitative study, *Artif. Intell. Rev.* 22 (2004) 177–210 <https://doi.org/10.1007/s10462-004-0751-8>
- [6] J.Sáez, M. Galar, M. Luengo, F. Herrera, INFFC: an iterative class noise filter based on the fusion of classifiers with noise sensitivity control. *Information Fusion* 27 (2016) 19-32 <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2015.04.002>
- [7] A. Arnaiz-González, J. F. Díez-Pastor, J.J .Rodríguez, C. I. García-Osorio, Instance selection for regression by discretization, *Expert Systems with Applications* 54 (2016) 340-350. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.12.046>
- [8] Y.Song, J. Liang, J.Lu, X.Zhao, X, An efficient instance selection algorithm for k nearest neighbor regression, *Neurocomputing*, 251 (2017) 26-34 <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.04.018>
- [9] M.Kordos, M. Blachnik, Instance selection with neural networks for regression problems, in: A.E.P. Villa, W.Duch, P.Érdi, F.Masulli, G.Palm(Eds.),*Artificial Neural Networks and Machine Learning ICANN 2012*, volume 7553 of *Lecture Notes in Computer Science*, Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 263–270 https://doi.org/10.1007/978-3-642-33266-1_33
- [10] L. Daza, E. Acuna, An algorithm for detecting noise on supervised classification, in: *Proceedings of the 1st World Conference on Engineering and Computer Science (WCECS)*, October 2007, San Francisco, USA, pp. 701–706.
- [11] F. Benoît, M.Verleysen, Classification in the presence of label noise: a survey.” *IEEE transactions on neural networks and learning systems* 25(5) (2013) 845-869 <https://doi.org/10.1109/tnnls.2013.2292894>
- [12] B.Zerhari, A. Lahcen, S. Mouline. Detection and elimination of class noise in large datasets using partitioning filter technique. in *2016 4th IEEE International Colloquium on Information Science and Technology (CiSt)*, 2016 <https://doi.org/10.1109/cist.2016.7805041>
- [13] J. Alcalá-Fdez, A. Fernández, J. Luengo, J. Derrac, J, S. García, Keel data- mining software tool: Data set repository, integration of algorithms and experimental analysis framework, *Multiple-Valued Logic and Soft Computing*, 17 (2011) 255–287.
- [14] D, Dua, C. Graff, *UCI Machine Learning Repository* [<http://archive.ics.uci.edu/ml>]. Irvine, CA: University of California, School of Information and Computer Science, 2019
- [15] M. Antonelli, P. Ducange, F. Marcelloni, Genetic training instance selection in multi objective evolutionary fuzzy systems: A coevolutionary approach, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 20 (2) (2012) 276–290 <https://doi.org/10.1109/tfuzz.2011.2173582>
- [16] J. Tolvi, Genetic algorithms for outlier detection and variable selection in linear regression models, *Soft Computing* 8 (8) (2004) 527–533 <https://doi.org/10.1007/s00500-003-0310-2>
- [17] A. Arnaiz-González, J.F.Díez-Pastor, J.J. Rodríguez, C.García-Osorio, Instance selection for regression: Adapting DROP, *Neurocomputing*, 201 (2016) 66-81 <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2016.04.003>
- [18] X. Zhu Wu, X, Class noise vs attribute noise: a quantitative study, *Artif.Intell.Rev.* 22 (3) (2004) 177–210 <https://doi.org/10.1007/s10462-004-0751-8>
- [19] A. Guillen, L. J. Herrera, G. Rubio, H. Pomares, A. Lendasse, I. Rojas, New method for instance or prototype selection using mutual information in time series prediction, *Neurocomputing* 73 (10) (2010) 2030–2038 <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2009.11.031>
- [20] D.R. Wilson, T.R Martinez, Instance Pruning Techniques, *ICML'97*, 1997, pp. 403-411.
- [21] T. Snijders, R. Bosker, *Multilevel analysis: an introduction to basic and advanced multilevel modeling*, Sage, 1999.
- [22] M. Kordos, K. Łapa, Multi-Objective Evolutionary Instance Selection for Regression Tasks, *Entropy*, 20(10) (2018) 1-34 <https://doi.org/10.3390/e20100746>
- [23] M. Kordos, M. Blachnik, R. Scherer, Fuzzy Clustering Decomposition of Genetic Algorithm-based Instance Selection for Regression Problems, *Information Sciences*, 587 (2021) 23-40 <https://doi.org/10.1016/j.ins.2021.12.016>
- [24] C. Gong, P. Wang, Z. Su, An interactive nonparametric evidential regression algorithm with instance selection, *Soft Computing*, 24(5) (2020), 3125–3140 <https://doi.org/10.1007/s00500-020-04667-4>
- [25] O. Reyes, H. M. Fardoun, S. Ventura, An ensemble-based method for the selection of instances in the multi-target regression problem, *Integrated Computer-Aided Engineering*, 25(4) (2018) 305–<https://doi.org/10.3233/ica-180581>
- [26] M. Belgiu and L. Drăguț, Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 114, (2016) 24–31 <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>

- [27] M. Kayri, I. Kayri, and M. T. Gencoglu, The performance comparison of Multiple Linear Regression, Random Forest and Artificial Neural Network by using photovoltaic and atmospheric data, 2017 14th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES), Jun. 2017. DOI: 10.1109/EMES.2017.7980368
- [28] M. Čeh, M. Kilibarda, A. Lisec, and B. Bajat, Estimating the Performance of Random Forest versus Multiple Regression for Predicting Prices of the Apartments, ISPRS International Journal of Geo-Information, 7, (2018), 1-16 doi:10.3390/ijgi7050168

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Evaluación de parámetros microbiológicos en el arroyo Santa María, Jalpa de Méndez, Tabasco, México


Evaluation of microbiological parameters in arroyo Santa María, Jalpa de Méndez, Tabasco, México

María Elena Cárdenas-Córdova¹, Rudy Solís-Silván², Azucena del Rosario Fraire-Vázquez³, Gaspar López-Ocaña⁴, Ricardo Díaz-Palacios⁵

Fecha de recepción: 12 de diciembre, 2023
Fecha de aprobación: 3 de abril, 2024

Cárdenas-Córdova, M.E; Solís-Silván, R; Fraire-Vázquez, A.R; López-Ocaña, G; Díaz-Palacios, R. Evaluación de parámetros microbiológicos en el arroyo Santa María, Jalpa de Méndez, Tabasco, México. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 1. Enero-Marzo, 2025. Pág. 172-184.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i1.7001>

- 1 Tecnológico Nacional de México campus ITS de Comalcalco. México.
 maria.cardenas@comalcalco.tecnm.mx
 <https://orcid.org/0000-0002-6370-6591>
- 2 Tecnológico Nacional de México campus ITS de Comalcalco. México.
 rudy.solis@comalcalco.tecnm.mx
 <https://orcid.org/0000-0001-6373-0893>
- 3 Tecnológico Nacional de México campus ITS de Comalcalco. México.
 azucena.fraire@comalcalco.tecnm.mx
 <https://orcid.org/0000-0002-6555-355X>
- 4 Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.
 ocanagl77@hotmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-8402-8160>
- 5 Tecnológico Nacional de México Campus I.T. de Villahermosa. México.
 ricardo.dp@villahermosa.tecnm.mx
 <https://orcid.org/0000-0001-5452-2769>

Palabras clave

Contaminación fecal; población; calidad del agua; antrópica; enfermedades.

Resumen

La contaminación fecal en cuerpos de aguas superficiales causa impactos negativos en la salud y el medio ambiente a nivel mundial en países subdesarrollados. El objetivo del siguiente estudio fue evaluar la calidad microbiológica del agua del arroyo Santa María de Jalpa de Méndez, Tabasco, México. A lo largo del arroyo se establecieron tres estaciones de muestreos a diferentes profundidades (30 y 60 cm). La estación uno se ubicó en la dirección contraria a la desembocadura del arroyo en un río conocido como los Caballos, el segundo a mitad del arroyo y el tercero donde el arroyo desembocaba en el río. Los parámetros microbiológicos evaluados fueron coliformes fecales (CF) y coliformes totales (CT). Para el muestreo y análisis de los CT y CF se emplearon las recomendaciones y método del número más probable en tubos múltiples de acuerdo NMX-AA-042-SCFI-2015 respectivamente. Se llevó a cabo un análisis de varianza factorial de 3 x 2 para encontrar diferencias estadísticas significativas entre las diferentes estaciones de muestreo y profundidades. Las tres estaciones mostraron valores promedios mínimos y máximos de CF y CT (650 a 1131 y 712 a 1225 NMP/100 ml respectivamente) superiores a los límites establecidos por criterios ecológicos CE-CCA-001/89 (> 200 NMP/100 ml). Así mismo no cumple con los límites máximos permisibles de la Norma Oficial Mexicana de consumo humano NOM-127-SSA1-1994 (2 NMP/100 ml). El arroyo Santa María presenta altas concentraciones de contaminación fecal que impacta directamente a la salud de la gente cercana al arroyo y el medio ambiente.

Keywords

Faecal contamination; population; water quality; anthropic; diseases.

Abstract

Faecal contamination of surface water bodies causes negative impacts on health and the environment worldwide in underdeveloped countries. The objective of the following study was to evaluate the microbiological quality of the water from the Santa María de Jalpa de Méndez, Tabasco, Mexico. Three sampling stations were established along the stream at different depths (30 and 60 cm). Station one, was located in the opposite direction to the mouth of the stream in a river known as Los Caballos, the second, in the middle of the stream and the third where the stream emptied into the river. The microbiological parameters evaluated were Faecal Coliforms (CF) and Total Coliforms (TC). For the sampling and analysis of CT and CF, the recommendations and method of the most probable number in multiple tubes according to NMX-AA-042-SCFI-2015 respectively were used. A 3 x 2 factorial variance analysis was carried out to find statistically significant differences between the different sampling stations and depths. The three stations showed minimum and maximum mean values of CF and TC (650 to 1131 and 712 to 1225 MPN / 100 ml respectively) higher than the limits established by ecological criteria CE-CCA-001/89 (> 200 MPN / 100 ml). In fact, it does not comply with the maximum permissible limits of the Mexican standard for human consumption NOM-127-SSA1-1994 (2 NMP / 100 ml). The Santa María stream presents high concentrations of faecal contamination that directly impacts the health of the people near the stream and the environment.

Introducción

La calidad de las aguas superficiales es un tema de gran prioridad. Diferentes trabajos se han realizado para conocer el estado de eutrofización de los cuerpos de agua y buscar alternativas para mejorar la calidad de estos.

Uno de ellos es el estudio de Elordi et al., [1] evaluó la carga microbiológica de contaminación fecal en los arroyos Las Piedras y San Francisco, considerando la cobertura sanitaria en una zona de aproximadamente 150 km² que afecta a alrededor de 600,000 personas en Quilmes, Provincia de Buenos Aires. El 92.1% de la población tiene acceso a agua de red y el 78.5% a red cloacal. Los investigadores emplearon una metodología internacional para analizar Coliformes Totales (CT), Coliformes Termotolerantes (CF) y *Pseudomonas aeruginosa*. Los niveles de CT y CF en los puntos "Pilcomayo" y "Donato Alvares y Las Piedras" excedieron los estándares aceptados para aguas recreativas o de contacto primario/ secundario. Según los límites de la USEPA para contacto primario (200 CT/100 ml), estos arroyos representan un riesgo para la salud de aquellos en contacto directo o indirecto con ellos.

Guzman-Colis et al., [2] analizaron la variación temporal y espacial de diversos parámetros en el río San Pedro, la principal corriente de Aguascalientes, México. A lo largo de sus 90 km, este río recibe aportes de 24 cursos de agua y alrededor del 96% de las aguas residuales generadas en la región. Recolectaron muestras en 43 estaciones durante épocas de sequía y lluvias, evaluando 23 parámetros. Los autores no observaron una tendencia espacial definida en los parámetros, excepto para los metales pesados. El 95% de las estaciones mostraron concentraciones elevadas de contaminantes, como materia orgánica, nitrógeno total, detergentes y coliformes fecales, sin variaciones temporales significativas. Según el índice propuesto, la calidad global del agua del río San Pedro es generalmente pobre, alejándose de su condición natural o adecuada para uso agrícola.

Así mismo Puente-Miranda et al., [3] señalaron que en el periodo comprendido entre 2012 y 2018 la calidad del agua en tres de los cinco observatorios participativos de la Conagua ubicados en el Norte de México, reportaron que se presentaron altas concentraciones de coliformes fecales, en la estación DLCHI328 donde se cuantificaron 12 098 NMP/100 ml, en la estación DLSAN2286 11 199 NMP/100 ml y en la estación DLSAN2283 17 329 NMP/100 ml y de acuerdo con el Índice de Calidad del Agua (ICA) estos valores la catalogan como "fuertemente contaminada" lo cual representa un riesgo para los habitantes de la población ya que se incumple con los requerimientos necesarios para emplearse como agua de consumo humano.

Por último, Becerra y Cárdenas [4] mencionan que la calidad del agua puede alterarse debido a actividades humanas o naturales, generando efectos adversos en sus propiedades físicas, químicas o ecológicas. Se considera contaminación cuando cualquier cambio indeseado afecta la utilidad o valor ecológico del agua, y un contaminante es la sustancia o factor que causa esa alteración. Las fuentes de contaminación incluyen la contaminación atmosférica, que afecta la calidad de las aguas de lluvia y la superficie del suelo, los usos del suelo (agropecuarios, asentamientos humanos, construcción), disposición de desechos sólidos y líquidos, derrames accidentales en el agua, entre otros, además de las aguas residuales.

La detección de coliformes ha funcionado como un indicador que puede ser asociado con riesgos para la salud humana, es por ello por lo que la evaluación de coliformes totales y fecales siguen siendo una herramienta valiosa para conocer la calidad del agua de manera eficiente.

Es por ello que esta investigación tiene como objetivo evaluar parámetros básicos y microbiológicos en el arroyo Santa María en Jalpa de Méndez, Tabasco, México. La zona circundante al arroyo alberga a una población de alrededor de 1128 habitantes, cuyas

actividades principales están vinculadas al arroyo y las lagunas cercanas. Es crucial determinar si estos cuerpos de agua reúnen las condiciones necesarias para que la población lleve a cabo sus actividades sin riesgos para la salud.

La calidad de las aguas superficiales se ha vuelto una prioridad crucial debido al crecimiento poblacional, al aumento de las actividades pecuarias y al establecimiento de asentamientos humanos en áreas inapropiadas. La contaminación, originada tanto por actividades humanas como industriales, representa un problema cada vez más común en ríos, lagos, lagunas y arroyos.

En la localidad de Reforma, segunda sección, en el municipio de Jalpa de Méndez, Tabasco, alrededor de 1128 personas realizan sus actividades domésticas y económicas en proximidad a cuerpos de agua como el arroyo Santa María, laguna Pomposu, laguna Si Señora, laguna el Eslabón y laguna los Caballos. Sin embargo, la disposición de residuos sólidos urbanos y aguas residuales domésticas sin tratamiento previo es común, lo que podría constituir un foco de infección y ocasionar problemas de salud tanto para la población como para las especies acuáticas.

Sin embargo, tanto problemas económicos y socioculturales sumados a una carencia de programas de superación de la pobreza han contribuido a personas que viven en condiciones precarias a sobreexplotar los recursos naturales, lo cual afecta negativamente la calidad del recurso agua.

A tal efecto, es importante determinar las concentraciones de parámetros microbiológicos en el agua del arroyo Santa María para comparar con los criterios ecológicos de calidad del agua CE-CCA-001/89 [5] y la NOM-001-SEMARNAT-1996 [6] a fin de conocer las condiciones en las que se encuentra el arroyo que den pauta a otras investigaciones.

Materiales y métodos

Área de estudio

El arroyo Santa María se encuentra en las inmediaciones del ejido Úrsulo Galván, Reforma segunda sección del Municipio de Jalpa de Méndez, Tabasco (véase fig. 1); entre los 18°20'12" y 18°24'12" de Latitud Norte y los 93°00'51" y 93°04'15" de Longitud Oeste.

Selección del periodo de estudio

De acuerdo con datos del Servicio Meteorológico Nacional [7] los registros históricos de precipitaciones (1985 a 2014) de los diferentes meses del año fueron consultados por el sitio Clima Jalpa de Méndez, Tabasco. Esto sirvió de referencia para la selección de las temporadas de lluvias y de sequías. En este sentido el periodo de muestreo abarcó de febrero de 2017 a febrero 2018, teniendo un total 13 muestreos, uno por mes entre las 11:00 y 12:00 horas aproximadamente.

Selección de puntos de muestreo

A lo largo del arroyo Santa María se establecieron tres puntos de muestreos a diferentes profundidades (30 cm y 60 cm): el primer punto de muestreo se ubicó en la dirección contraria a donde desembocaba el arroyo en el río conocido como los Caballos, el segundo a mitad del arroyo y el tercero al final del arroyo donde desemboca en el río los Caballos.

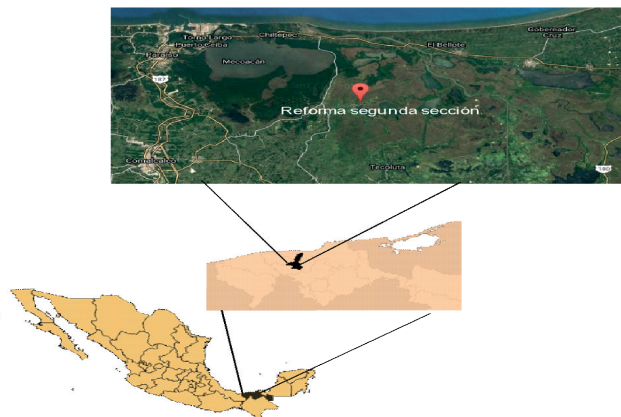


Figura 1. Área de estudio.

Cabe mencionar que a las orillas del arroyo se ubican 121 viviendas, encontrándose el mayor número de casas a la mitad del arroyo. En la mayoría de las casas se crían animales de traspatio (criaderos de cerdos y de pollos) y no cuentan aún con sistemas de drenaje (algunas casas cuentan con fosas sépticas y otras no). Los parámetros medidos en cada punto de muestreo fueron los siguientes: Coliformes Totales (CT), Coliformes Fecales, pH, temperatura y turbiedad (véase cuadro 1). En cada punto de muestreo se realizó la medición de parámetros de campo, así como la toma de muestras simples para su posterior análisis en el laboratorio.

Cuadro 1. Puntos de muestreo.

No.	Puntos	Latitud Norte	Longitud Oeste	Parámetros de campo	Parámetros laboratorio
1	AI	18°20'02.68743"	93°02'32.70653"	pH Temperatura Turbiedad	Coliformes totales Coliformes fecales
2	AC	18°20'07.76059"	93°02'44.66681"		
3	AF	18°20'07.14066"	93°02'51.61719"		

Muestreo y análisis

Tomando en cuenta las características particulares del cuerpo de agua se colectaron dos muestras simples en bolsas estériles de 250 ml de capacidad en cada punto de muestreo a dos niveles de profundidad (30 y 60 cm). Los parámetros de campo se midieron haciendo uso del multiparamétrico marca HANNA modelo 2015 y la sonda HI 9832, midiendo pH, temperatura y turbiedad. La recolección de muestra de agua para el análisis microbiológico se llevó a cabo mediante los lineamientos que establece la NMX-AA-042-SCFI-2015 "Análisis de agua. Enumeración de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (termotolerantes) y Escherichia Coli método del número más probable en tubos múltiples" [8]. Las muestras analizadas en el laboratorio fueron debidamente etiquetadas con los siguientes datos: fecha, lugar de colección, número de muestra, profundidad, así como sus respectivas identificaciones de parámetros (CF y CT). Las muestras fueron analizadas en el laboratorio de microbiología del Tecnológico Nacional de México campus Comalcalco. Para el análisis de los coliformes totales y fecales se empleó el método del número más probable en tubos múltiples de acuerdo con

la Norma Mexicana NMX-AA-042-SCFI-2015 [8], el método permite determinar el número de microorganismos coliformes presentes en una muestra, mediante cultivo en un medio líquido contenido en tubos múltiples y realizando el cálculo del número más probable en la muestra.

Diseño Experimental

Se llevó a cabo un diseño incompleto dirigido factorial de 3 x 2. El primer factor consistió en diferentes estaciones de muestreo (estación 1, estación 2 y estación 3), donde se evaluaron parámetros biológicos y fisicoquímicos (Coliformes fecales, Coliformes totales, pH, Turbiedad y temperatura) del arroyo Santa María, Ejido Úrsulo Galván. El segundo factor hace referencias a que estos parámetros, se midieron a diferentes profundidades (30 y 60 cm de profundidad). El número de observaciones fue de 13 para los coliformes fecales (CF) y totales (CT). El número de observaciones para la turbiedad, pH y temperatura fue de 10. Las mediciones de los parámetros se efectuaron durante los meses febrero-diciembre de 2017 y febrero-marzo 2018.

Análisis Estadístico

Se llevó a cabo un análisis de varianza factorial de 3 x 2 para encontrar diferencias estadísticas significativas entre las diferentes estaciones de muestreo (primer factor: estación 1, 2 y 3) y profundidades (segundo factor: profundidades de 30 y 60 cm) del arroyo Santa María, en cuanto a las concentraciones de Coliformes fecales y totales. Los parámetros de turbiedad y pH fueron evaluados mediante un análisis de varianza (ANOVA) simple, debido a que solo se evaluaron a una sola profundidad, quedando como único factor de interés las estaciones. Para saber las diferencias significativas entre factores evaluados se llevó a cabo un contraste múltiple de Tukey. El análisis de varianza (ANOVA) se llevó a cabo el software Statgraphics Centurión XVI. II.

Resultados

A continuación, se muestran los resultados de coliformes fecales (CF), coliformes totales (CT), turbiedad, pH y temperatura evaluados en el arroyo Santa María, Ejido Úrsulo Galván en las diferentes estaciones y profundidades de monitoreo.

Coliformes Fecales

El análisis de varianza factorial indica que existe un efecto significativo ($P < 0.05$) entre las estaciones evaluadas (primer factor: estación 1, estación 2 y estación 3) en cuanto a la concentración de coliformes fecales (CF). El contraste múltiple de Tukey muestra con letras desiguales tratamientos diferentes. Se observó que en la estación 3 se presentó la menor concentración de CF (NMP/100 ml) con un promedio de 660.962 ± 143.993 . Las concentraciones más altas de CF se observaron en las estaciones 2 y 1 respectivamente con 1131.77 ± 143.993 , 660.962 ± 143.993 (Fig. 2). El factor profundidad no mostró diferencias estadísticas significativas ($P > 0.05$) en las concentraciones de CF (NMP/100 ml) mostrando valores promedios similares (880 ± 203.637 y 894 ± 203.637) (Fig. 3). La interacción de los factores no mostró diferencias estadísticas significativas, ya que no se observó cambio de magnitud y dirección entre los factores, sin embargo, se puede apreciar que la estación 3 con 30 cm de profundidad fue la que mostró la concentración más baja (575) de CF (NMP/100 ml) (Fig. 4). El grado de confiabilidad utilizado por el método estadístico es del 95% de confiabilidad.

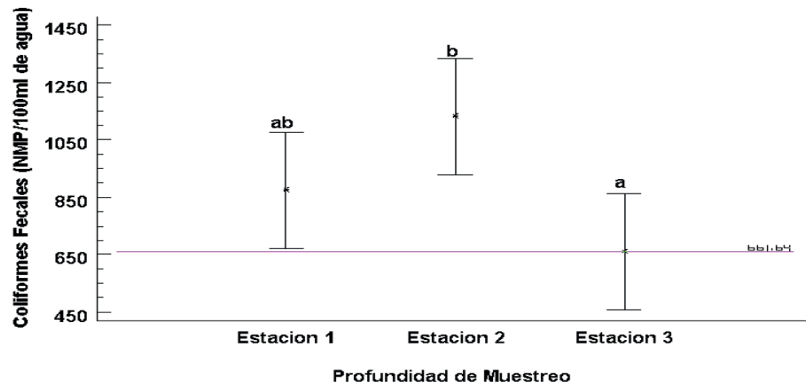


Figura 2. Valores promedios (\pm EE) de la concentración de CF (NMP/100 ml) evaluadas en las diferentes estaciones. Las letras indican que letras desiguales tratamientos diferentes.

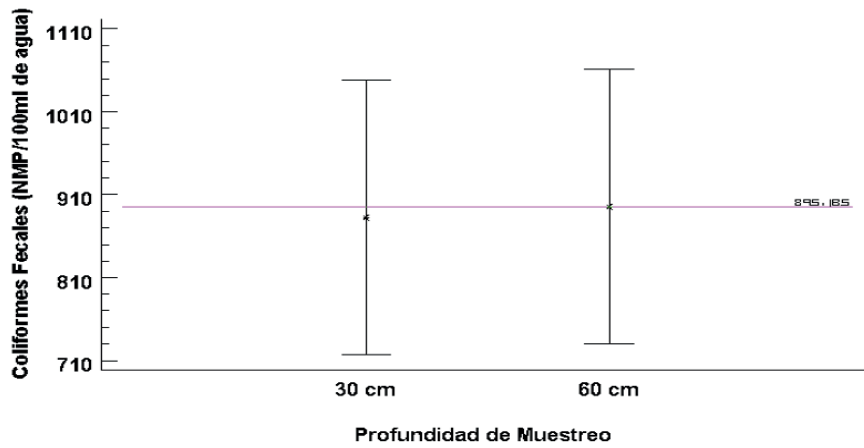


Figura 3. Valores promedios (\pm EE) de la concentración de CF (NMP/100 ml) evaluadas a diferentes profundidades.

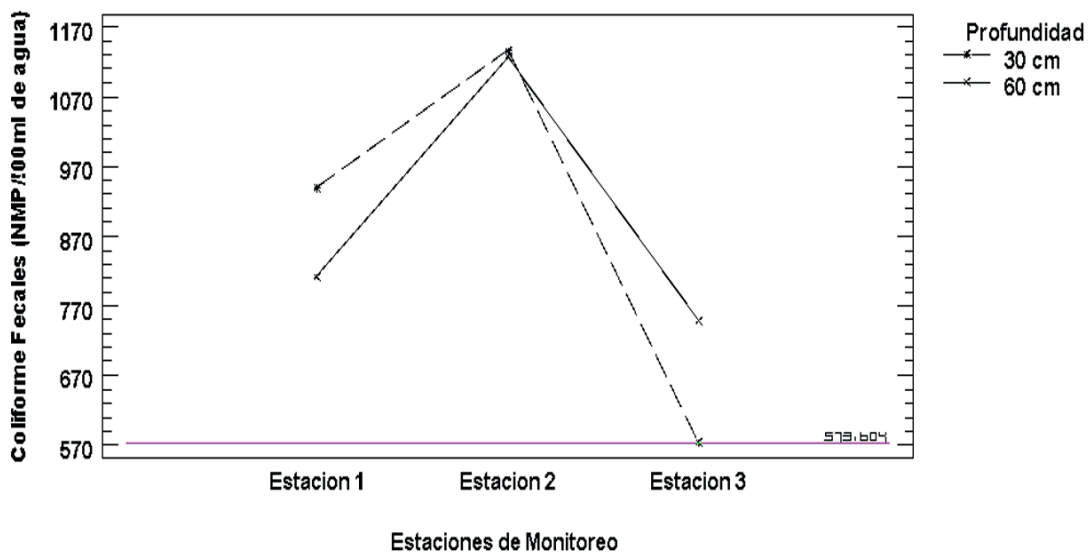


Figura 4. Valores promedios de la interacción de los factores evaluados (estaciones y profundidad) en cuanto a la variable CF (NMP/100 ml).

Coliformes Totales

El análisis de varianza factorial indica que existen un efecto significativo ($P < 0.05$) entre las estaciones evaluadas (primer factor: estación 1, estación 2 y estación 3) en cuanto a la concentración de coliformes Totales (CT). El contraste múltiple de Tukey muestra con letras desiguales tratamientos diferentes. Se pudo observar el mismo comportamiento que en el de CF, ya que se apreció que en la estación 3 se presentó la menor concentración de CT (NMP/100 ml) con un promedio de 712.115 ± 139.305 . Las concentraciones más altas de CT se observaron en las estaciones 2 y 1 respectivamente con 1225.19 ± 139.305 , 895 ± 139.305 (Fig. 5). El factor profundidad no mostró diferencias estadísticas significativas ($P > 0.05$) en las concentraciones de CT (NMP/100 ml) mostrando valores promedios similares (960 ± 197.007 y 927 ± 197.007) (Fig. 6). La interacción de los factores no mostró diferencias estadísticas significativas, ya que no se observó cambio de magnitud y dirección entre los factores, sin embargo, se puede apreciar que la estación 3 con 30 cm de profundidad fue la que presentó la concentración más baja (575) de CT (NMP/100 ml) (Fig. 7)

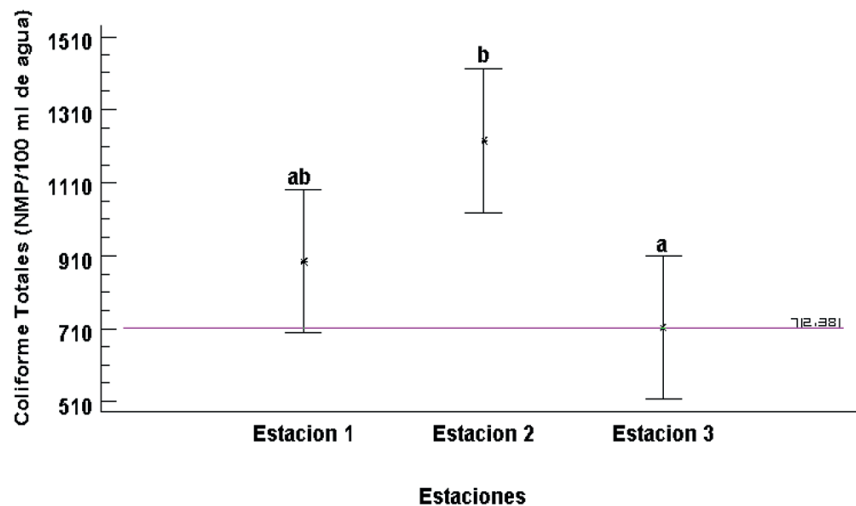


Figura 5. Valores promedios de la interacción de los factores evaluados (estaciones y profundidad) en cuanto a la variable CT (NMP/100 ml).

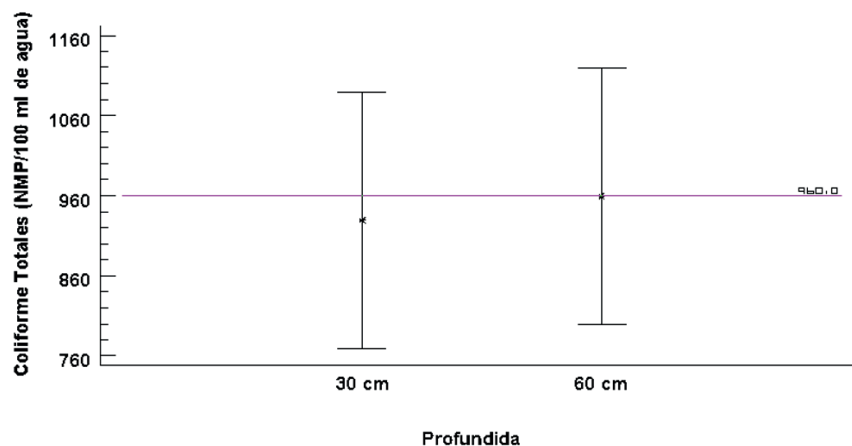


Figura 6. Valores promedios (\pm EE) de la concentración de CT (NMP/100 ml) evaluadas a diferentes profundidades.

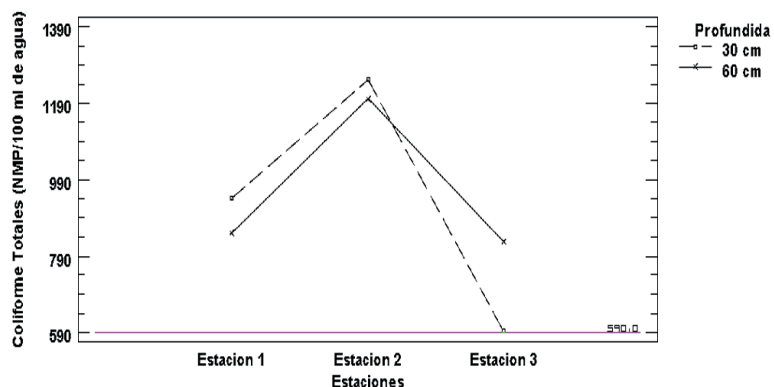


Figura 7. Valores promedio (\pm EE) de la concentración de CT (NMP/100 ml) evaluadas a diferentes profundidad en cada estación.

Turbiedad

El análisis de varianza (ANOVA-simple) mostró que no existen diferencias estadísticas significativas ($P > 0.05$) entre las estaciones evaluadas (estación 1, estación 2 y estación 3) en cuanto a la turbiedad (NTU) del agua con un 95% de confiabilidad, sin embargo, se observa una ligera tendencia a que en la estación 2 la turbiedad es ligeramente más alta que en la estación 1 y 3 con un promedio de 28.25 ± 35.85 . Las estaciones 1 y 3 presentaron valores promedios más bajos de turbiedad (NTU) con 19.35 ± 28.62 , 23.61 ± 33.44 respectivamente (Fig. 8).

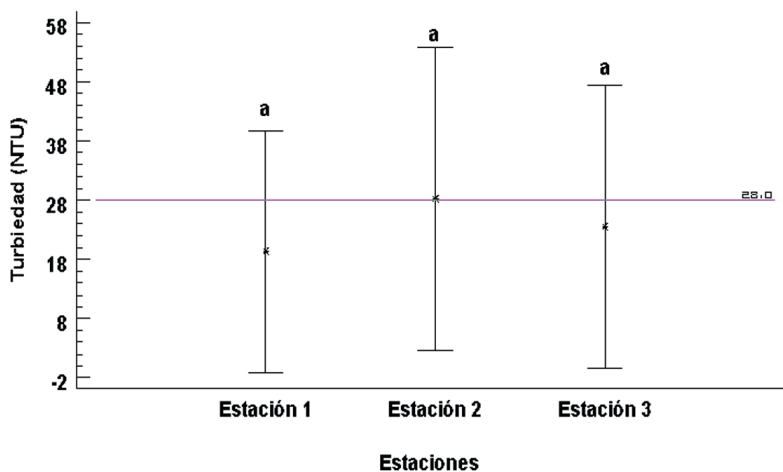


Figura 8. Valores promedio (\pm DE) de Turbiedad (NTU) evaluados en las diferentes estaciones de muestreo. Las letras contenidas en a grafica indican que letras desiguales tratamientos diferentes.

Potencial de Hidrogeno (pH)

El análisis de varianza (ANOVA-simple) mostro que existen diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) entre las estaciones evaluadas (estación 1, estación 2 y estación 3) en cuanto al pH del agua con un 95% de confiabilidad. El contraste múltiple de Tukey muestra con letras desiguales tratamientos diferentes. Se puede observar que el pH ligeramente ácido lo presenta

la estación 3 con un promedio de 6.84 ± 0.336 . Las estaciones 1 y 2 presentan valores de pH ligeramente por encima de la neutralidad con promedios de 7.205 ± 0.386 , 7.068 ± 0.437 respectivamente (Fig. 9).

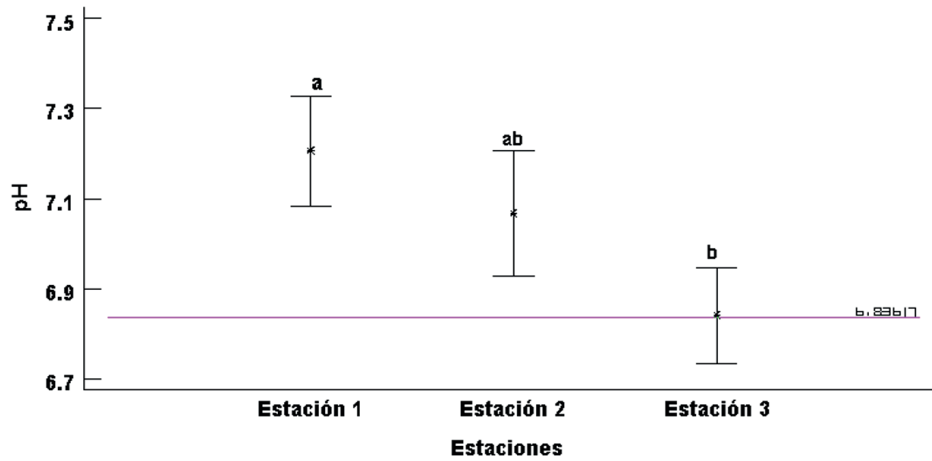


Figura 9. Valores promedios (\pm DE) del pH (UM) evaluados en las diferentes estaciones de muestreo. Las letras contenidas en a grafica indican que letras desiguales tratamientos diferentes.

Temperatura

Se puede observar que las temperaturas más altas en el arroyo Santa María se presentaron en los meses de abril, mayo, octubre, noviembre y las más bajas en los demás meses (ver cuadro 2).

Cuadro 2. Temperaturas in situ de los diferentes meses de muestro en las tres estaciones.

Fecha	Temperatura (°C)		
	Estación 1	Estación 2	Estación 3
Febrero	29.15	28.67	28.6
Marzo	29.15	28.67	28.6
Abril	30.34	30.62	29.6
Mayo	32.46	32.6	32.2
Junio	30.3	30.07	28.8
Julio	30	29.7	29.6
Agosto	28.22	29.2	28.5
Septiembre	29.21	28.2	27.5
Octubre	31.41	32.21	30.8
Noviembre	32.46	31.6	32.4
Diciembre	22.41	23.18	22.48
Febrero	28.23	29.61	28.42
Marzo	29.32	28.56	28.38

Discusión

Coliformes fecales (CF) y totales (CT)

Barahona et al. [9] encontraron concentraciones de CT y CF de 1986.3 NMP/100ml y 85.6 NMP/100mL respectivamente en el Río Manaure en Colombia. Dichos autores atribuyen estas concentraciones en gran proporción a los asentamientos humanos de tipo rural ya que al no poseer un plan de recolección de residuos sólidos y sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas contribuyen a que el agua de escurrimiento corresponda a este tipo de vertimientos. En el 2011 Baquerizo et al., [10] en Villa Achupallas evaluó la calidad del agua del río Yacuambi, obteniendo altas concentraciones de coliformes fecales de hasta 8200 UFC-100ML que al confrontar estos datos con los límites máximos permisibles de la norma vigente se puede observar que sobrepasa por 7200 UFC/100ML, lo que evidencia un deterioro del ecosistema. Al igual que el análisis de Villa Achupallas, el canal ubicado en el Ejido Úrsulo Galvan perteneciente al municipio de Jalpa de Méndez en el estado de Tabasco, exceden los límites máximos permisibles del criterio ecológico (1000NPM/100), en la mayoría de los meses de la estación 1 y 2, mientras que en la estación 3 únicamente el mes de febrero 2017 supero el límite. Los resultados de CT son parecidos a los encontrados en el presente estudio (CF = 1225.19 NMP/100 ml) en la estación 2 del arroyo Santa María y coinciden con las causas de contaminación por CT que mencionan dichos autores, ya que en dicha estación se presenta el mayor número de casas rurales asentadas y no cuentan con sistemas de drenaje (algunas casas cuentan con fosas sépticas y otras no). De igual manera la estación 2 presentó la mayor concentración de CF (1131.77 NMP/100mL) diferentes a las encontradas por estudio contrastado (85.6 NMP/100mL) y esto se deba quizás a las diferentes actividades humanas de los asentamientos humanos. El estudio comparativo atribuye las concentraciones de coliformes fecales (CF) en gran medida a los asentamientos humanos rurales sin planes de recolección ni sistemas de tratamiento de aguas residuales. Aunque nuestro estudio enfrenta la misma problemática, se observó que la mayoría de los hogares cercanos al arroyo están involucrados en la crianza de animales de traspatio, como cerdos y pollos, con descargas directas de aguas residuales sin tratamiento al arroyo. Esta diferencia en las fuentes de contaminación puede influir en las concentraciones de CF. Otros estudios, como el de Arango et al. [11], señalan altos niveles de coliformes totales y fecales en quebradas de Antioquia, atribuidos a vertimientos de aguas residuales domésticas y agropecuarias. Campos et al. [12] informan sobre altas concentraciones de coliformes fecales en el río Bogotá y su riesgo para la salud pública. Además, Barros y Cañizares [13] indican, en un estudio en el río Neverí en Venezuela, que las variaciones de coliformes totales y fecales dependen de la altura de la cuenca, siendo los sectores altos menos contaminados, mientras que la parte media y baja se ve afectada por asentamientos humanos sin servicios sanitarios y vertimientos de aguas residuales domésticas, pluviales e industriales. Pauta- Calle et al. [14] encontraron niveles elevados de contaminación fecal en los ríos de la Península de Osa, Costa Rica, particularmente en las áreas cercanas a poblaciones humanas y zonas agrícolas. Las muestras de agua obtenidas del arroyo Santa María mostraron altas concentraciones de CF en todas las estaciones de muestreo y en los periodos de lluvias y secas por encima de los criterios Ecológicos de Calidad de Agua CE-CCA-001/89 [5]. Dicho criterio menciona que para uso recreativo del agua con contacto primario es ACEPTABLE para concentraciones <200 NMP/100mL. Sin embargo, se pudo apreciar que durante todo el periodo de muestro ninguna presento valores menores a 200 (valor más bajo = 450 NMP/100mL y más alto 1270 NMP/100 ml). Esto es de suma importancia porque según Campos et al.[12] indican que las altas concentraciones de CF representan riesgos a la salud pública. Así mismo las concentraciones altas de CT encontradas en todos los puntos de muestreo y en los periodos de lluvias y secas (valor mínimo = 510 NMP/100 ml y valor máximo

= 1340) no cumplen con los límites máximos permisibles establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, que establece un límite permisible de 2 NMP/100ml. Esto indica que el agua no puede ser utilizada para consumo humano [15].

Turbiedad, pH y Temperatura

La turbiedad no mostró diferencias estadísticas significativas entre estaciones, pero se observó una tendencia a valores más altos en la estación 2 (máximo = 58 NTU), sugiriendo una posible relación con los Coliformes Fecales (CF) y Coliformes Totales (CT), ya que esta estación registró las concentraciones más elevadas. Según Jaya [16], la turbiedad está asociada con la cantidad de materia orgánica, la cual puede influir en la presencia de microorganismos y el consumo de oxígeno. Sin embargo, los niveles de turbiedad excedieron los límites permitidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (5 NTU)[15]. La temperatura (máximo 32 °C) y el pH (6.8 a 7.3) se mantuvieron dentro de los límites permitidos, indicando un equilibrio, a pesar de que estos parámetros pueden tener relaciones con los CF y CT, asociadas a ciclos biogeoquímicos.

Conclusiones

Se reporta para el arroyo Santa María la presencia de altas concentraciones de contaminación fecal (Coliformes totales y coliformes fecales) potencialmente patógenas en las tres estaciones de monitoreo durante el periodo de muestreo. Estas estaciones son afectadas por vertimientos de aguas residuales domésticas, del lavado de animales de traspatio y asentamientos humanos principalmente. La comunidad utiliza estas aguas para uso doméstico, pero debido a las altas concentraciones de CF y CT se recomienda no utilizarlas para uso doméstico, agrícola, recreación y preservación de fauna y flora. Los parámetros de turbiedad se encontraron por encima de la normatividad para consumo humano NOM-127-SSA1-1994. La temperatura y el pH a pesar de la contaminación por CF, CT y turbiedad tienden a estar entre los límites permisibles que marcan las normas y criterios de calidad de agua potable y residuales debido a los ciclos biogeoquímicos de la naturaleza.

Referencias

- [1] M. L. Elordi, J. E. Colman Lerner, y A. Porta, "Evaluación del impacto antrópico sobre la calidad del agua del arroyo Las Piedras, Quilmes, Buenos Aires, Argentina", *Acta Bioquímica Clínica Latinoamericana*, vol. 50, pp. 669–677, 2016, Consultado: el 10 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53550527016>
- [2] G. Guzmán-Colis, F. Thalasso, E. M. Ramírez-López, S. Rodríguez-Narciso, A. L. Guerrero-Barrera, y F. J. Avelar-González, "EVALUACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO SAN PEDRO EN EL ESTADO DE AGUASCALIENTES, MÉXICO", 2011.
- [3] D. G. Puente Miranda, L. I. Valenzuela García, y M. T. Alarcón Herrera, "Determinación histórica de índices de calidad del agua en observatorios participativos en el norte de México", *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 39, pp. 127–137, feb. 2023, doi: 10.20937/RICA.54697.
- [4] N. J. Cely Calixto, D. Becerra Moreno, y J. A. Cárdenas Gutiérrez, *Causas y consecuencias de la contaminación de aguas superficiales*. 2023. Consultado: el 28 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.ufps.edu.co/bitstream/handle/ufps/6720/CAUSAS%20Y%20CONSECUENCIAS%20DE%20LA%20CONTAMINACION%20DE%20AGUAS%20SUPERFICIALES_E%20book.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [5] Centro de Calidad Ambiental, *Criterio Ecológico de Calidad del Agua CE-CCA-001/89*. 1989.
- [6] SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, *NOM-001-SEMARNAT-2021, QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES EN CUERPOS RECEPTORES PROPIEDAD DE LA NACIÓN*. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/convencion-sobre-los-humedales-de-importancia>

- [7] Servicio Meteorológico Nacional, “Resúmenes Mensuales de Temperaturas y Lluvia”. Consultado: el 28 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>
- [8] Secretaría de Economía, Análisis de agua-enumeración de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (termotolerantes) y Escherichia Coli-método del número más probable en tubos múltiples (cancela a la NMX-AA-42-1987).
- [9] Y. M. Barahona Castillo, J. A. Luna Fontalvo, y I. M. Romero Borja, “Bacteriological quality of the water of the manaure and casacara rivers, department of Cesar, Colombia”, *Revista Luna Azul*, vol. 46, pp. 106–124, ene. 2018, doi: 10.17151/LUAZ.2018.46.7.
- [10] J. M. Baquerizo Figueroa, L. G. Sandoval Santos, N. E. Lectong Cusme, N. M. Quiñonez Becerra, V. Y. Parrales Mendoza, y L. W. Moreira Obregón, “Caracterización física del agua del río Jama, Manabí, Ecuador.”, *Revista Científica Dominio de las Ciencias*, vol. 10, núm. 2, pp. 74–85, mar. 2024, doi: 10.23857/dc.v10i2.3792.
- [11] M. C. Arango, L. F. Álvarez, G. A. Arango, O. E. Torres, y A. de J. Monsalve, “CALIDAD DEL AGUA DE LAS QUEBRADAS LA CRISTALINA Y LA RISARALDA, SAN LUIS, ANTIOQUIA”, *Revista EIA*, pp. 121–141, 2008, Consultado: el 10 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=149216913009>
- [12] C. Campos-Pinilla, M. Cárdenas-Guzmán, y A. Guerrero-Cañizares, “PERFORMANCE OF FAECAL CONTAMINATION INDICATORS IN DIFFERENT TYPE OF WATERS FROM THE SABANA OF BOGOTÁ (COLOMBIA)”, *Univ Sci (Bogota)*, vol. 13, núm. 2, pp. 103–108, 2008, [En línea]. Disponible en: www.javeriana.edu.co/universitas_scientiarum
- [13] A. L. Barrios y N. Cañizares, “ESTUDIO PRELIMINAR DE LA CALIDAD BACTERIOLÓGICA DE LAS AGUAS DEL RÍO NEVERÍ, BARCELONA, VENEZUELA”, *Geografía*, 2001, [En línea]. Disponible en: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:126939516>
- [14] G. Pauta-Calle, G. B. Vázquez G., A. F. Abril T., C. S. Torres I., M. C. Loja-Sari, y A. J. Palta-Vera, “Indicadores bacteriológicos de contaminación fecal en los ríos de Cuenca, Ecuador”, *MASKANA*, vol. 11, núm. 2, pp. 46–57, dic. 2020, doi: 10.18537/mskn.11.02.05.
- [15] Gobierno de México., NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. 2021.
- [16] F. E. Jaya Cabrera, “ESTUDIO DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS EN EL AGUA DEL RIO TABACAY Y SU VINCULACIÓN CON LA COBERTURA VEGETAL Y USOS DEL SUELO EN LA MICROCUENCA.”, Licenciatura, Universidad de Cuenca, Ecuador, 2017.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.