



TECNOLOGÍA
en marcha

Revista trimestral
Julio – Setiembre 2026
Volumen 39 N° 3
ISSN-E 2215-3241

ET
Editorial Tecnológica
de Costa Rica

TEC | Tecnológico
de Costa Rica

Publicación y directorio en catálogos

latindex

redalyc.org

Dialnet

melica

SciELO

REDIB
Red Iberoamericana
de Investigación y Docencia Científica

DOAJ

Comisión Editorial

Felipe Abarca Fedullo. Director de revista
Instituto Tecnológico 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

Felipe Abarca Fedullo

Imagen de cubierta

<https://www.pexels.com>

Datos de catalogación en publicación

Tecnología en Marcha / Editorial Tecnológica
de Costa Rica. - Vol. 39-3. Julio-Setiembre,
2026 - 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 consumo de pitahaya en cinco ciudades de Costa Rica Characterization of pitahaya consumption in five cities in Costa Rica <i>José Eladio Monge-Pérez, Michelle Loría-Coto</i>	3
<i>Scrum</i> solo funciona cuando existe un verdadero compromiso con su implementación Scrum only works when there is a genuine commitment to its implementation <i>Carlos Alexander Sánchez-Fonseca</i>	18
Modelos y perspectivas en la adopción de tecnologías digitales disruptivas en pequeñas empresas rurales Models and perspectives on the adoption of disruptive digital technologies in small rural enterprises <i>César Orlando Garita-Rodríguez, Jorge Alfaro-Velasco, Gaudy Gabriela Esquivel-Vega, Abel Méndez-Porras, Eileen Barrantes-Barrantes, Cynthia López-Valerio, Jean Carlos Miranda-Fajardo, Cristian Campos-Agüero</i>	32
Estudio piloto sobre la evaluación del crecimiento de un cultivo de maíz con la utilización de un aislante biodegradable elaborado a partir de hojas de piña Pilot study on the evaluation of the growth of a maize crop using a biodegradable insulator made from pineapple leaves <i>Rooney Meza-Castillo, Gustavo Carazo-Berrocal, Juan José Mora-Román</i>	45
Técnica de modulación temporal basada en Walsh-Hadamard para arreglos de antenas: Análisis comparativo de desempeño Walsh-Hadamard Based Temporal Modulation Technique for Antenna Arrays: Comparative Performance Analysis <i>Jorge Luis Blanco-Orta, María del Carmen Guerra-Martínez</i>	55
Producción de biogás a partir de estiércol porcino y co-sustratos orgánicos: evaluación de la eficiencia de tres tratamientos en Retes, Perú Biogas production from pig manure and organic co-substrates: evaluation of the efficiency of three treatments in Retes, Peru <i>Katherin Jhojanny Huarac-Cadillo, Mahely Nicoll More-Peña, Hellen Yahaira Huertas-Pomasoncco, María del Rosario Grados-Olivera, Keneth Denner Chagua-Namuche</i>	67

Diseño y análisis de un arreglo de antenas compacto con tecnología GGW para la Banda W

Design and analysis of a compact antenna array with GGW technology for W-band

Jorge Luis Blanco-Orta, María del Carmen Guerra-Martínez, Kenneth Marichal-Leyva..... 78

Optimización de la resiliencia en sistemas eléctricos mediante la integración de energía solar: Propuesta para COELCHA

Optimization of resilience in electrical systems through the integration of solar energy: Proposal for COELCHA

Maykop Pérez-Martínez, Josnier Ramos-Guardarrama 91

Identificación y perfilado taxonómico de la comunidad bacteriana en aguas miel de café

Identification and taxonomic profiling of the bacterial community in coffee wastewater

Victoria Yong-Tencio, María Celeste Bonilla-Picado..... 104

Caracterización del transporte turbulento de partículas y optimización del calentamiento del plasma y la regulación de la corriente eléctrica en las bobinas del Stellarator SCR-1

Characterization of turbulent transport of particles and optimization of plasma heating and operation current control in the coils of the SCR-1 Stellarator

Ricardo Solano-Piedra, Luis Alonso Araya-Solano, Ana María Murillo-Morgan, José Esteban Pérez-Hidalgo, Iván Vargas-Blanco, José Andrés Borloz-Chinchilla, Robert David Cerdas-Bermúdez, Manuel Antonio Bojorge-Araya, Julián David Sánchez-Castro, David Fabián Díaz-Sánchez, Kendy Raquel Arias-Ortiz..... 115

Modeling and optimization of operational parameters in pneumatic seeders to enhance corn (*Zea mays*) germination in humid tropical conditions in Costa Rica

Modelado y optimización de parámetros operativos en sembradoras neumáticas para el cultivo de maíz (*Zea mays*) en el trópico húmedo de Costa Rica

Gregory Guevara-Rodríguez, Ronald Fernández-Mesén, Esteban Brenes-Romero, Veonn Calzano-Caines 132

Influencia del contenido aire en la calidad del concreto determinado mediante pruebas de ensayos ultrasónicos

Influence of air content on concrete quality determined by ultrasonic testing

Luis Carlos Calvo-Navarro 148

Caracterización del consumo de pitahaya en cinco ciudades de Costa Rica

Characterization of pitahaya consumption in five cities in Costa Rica

José Eladio Monge-Pérez¹
Michelle Loría-Coto²

Fecha de recepción: 17 setiembre, 2025
Fecha de aprobación: 19 de diciembre, 2025

Monge-Pérez, J.E; Loría-Coto, M. Caracterización del consumo de pitahaya en cinco ciudades de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 N° 3. Julio-Setiembre, 2026. Pág. 3-17.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i3.8109>



1 Máster en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales, Investigador de la 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 Máster en Administración Educativa, Investigadora de la 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

Centroamérica; precio; consumidor; alimento; fruta; Cactaceae; *Selenicereus costaricensis*.

Resumen

El objetivo del trabajo fue caracterizar el consumo de pitahaya en cinco ciudades de Costa Rica. La investigación se desarrolló en las ciudades de San José, Alajuela, Heredia, Cartago y Liberia, entre abril y junio de 2019. Se realizaron 693 entrevistas personales, sobre diversos temas relacionados con el conocimiento sobre esta fruta y su consumo. En San José, Alajuela, Heredia y Cartago, se encontró un menor nivel de conocimiento sobre la pitahaya (44-61% de entrevistados) y una menor preferencia por el consumo de esta fruta (26-39%), en comparación con Liberia (96% y 81%, respectivamente). En Liberia, el 89% de las mujeres y el 73% de los hombres aseguró consumir pitahaya. En las cinco ciudades, la mayoría de las personas que consumen pitahaya lo hacían una o dos veces al año. Las principales características que se asocian a un fruto de pitahaya de calidad fueron: color, firmeza, tamaño grande, y suavidad. En Alajuela, Heredia, Cartago y Liberia, la principal forma de consumo de pitahaya fue en refresco, mientras que en San José se consume mayoritariamente como fruta fresca. Se concluye que existe un nivel importante de consumo de pitahaya en las cinco ciudades incluidas en este estudio, con un resultado muy destacado en el caso de la ciudad de Liberia, pero con una frecuencia de consumo relativamente baja en las cinco ciudades, con una frecuencia un poco mayor en Liberia. Este trabajo constituye el primer estudio sobre la caracterización del consumo de pitahaya en Costa Rica.

Keywords

Central America; price; consumer; food; fruit; Cactaceae; *Selenicereus costaricensis*.

Abstract

The objective of the study was to characterize the consumption of pitahaya in five cities in Costa Rica. The research was conducted in the cities of San José, Alajuela, Heredia, Cartago, and Liberia between April and June 2019. 693 personal interviews were conducted on various topics related to knowledge about this fruit and its consumption. In San José, Alajuela, Heredia and Cartago, a lower level of knowledge about pitahaya was found (44-61% of respondents) and a lower preference for consuming this fruit (26-39%), compared to Liberia (96% and 81%, respectively). In Liberia, 89% of women and 73% of men reported consuming pitahaya. In the five cities, most people who consumed pitahaya did so once or twice a year. The main characteristics associated with a quality pitahaya fruit were: color, firmness, large size, and softness. In Alajuela, Heredia, Cartago, and Liberia, pitahaya was primarily consumed as a soft drink, while in San José, it is mostly consumed as fresh fruit. It is concluded that there is a significant level of pitahaya consumption in the five cities included in this study, with a very notable result in the case of the city of Liberia, but with a relatively low frequency of consumption in all five cities, with a slightly higher frequency in Liberia. This work constitutes the first study on the characterization of pitahaya consumption in Costa Rica.

Introducción

La pitahaya [*Selenicereus costaricensis* (F.A.C. Weber) S. Arias y N. Korotkova], anteriormente conocida como *Hylocereus costaricensis*, es una especie de la familia Cactaceae, orden Caryophyllales, y su origen corresponde a las zonas subtropicales y tropicales de Centroamérica, México y Suramérica [1] [2]. Esta planta se usa como alimento, especialmente el fruto, pero asimismo se utilizan las flores, semillas y brotes tiernos [1] [2]. Con los frutos de esta especie se elaboran refrescos, jaleas, helados, gelatinas, mermeladas, cocteles, dulces, yogurt, entre otros [3]. El aporte nutricional de sus frutos incluye fibra dietética, flavonoides, vitaminas A, C, y B (B1, B2 y B3), potasio, hierro, calcio, fósforo, zinc, sodio y magnesio, y además presenta propiedades antioxidantes y medicinales; también contiene betacianinas (pigmentos solubles en agua) que le dan el color rojo a la pulpa y la cáscara [1] [4] [5] [6] [7] [2].

La pitahaya es una fruta popular debido a sus características fisicoquímicas, nutricionales, y sus compuestos bioactivos, por lo que se considera un alimento funcional, que se usa por sus excelentes características organolépticas y por su valor comercial agregado [5] [1]. Recientemente, se informó que el consumo de jugo de pitahaya protege al organismo contra los daños producidos por las aflatoxinas [8]. Otros investigadores indicaron que el consumo de pitahaya protege contra las enfermedades cardiovasculares [9] [10]. Por otra parte, el consumo de esta fruta aumenta el nivel de hemoglobina en la sangre (lo que ayuda a tratar la anemia), reduce los problemas de estreñimiento, regula el sistema digestivo, y reduce el colesterol [11] [12] [13]. Asimismo, el consumo de bebidas a partir de pitahaya roja congelada, o de frutos de pitahaya en general, demostró un efecto benéfico al reducir el riesgo de padecer diabetes tipo 2, y reduce el nivel de glucosa en la sangre y la presión arterial [14] [15] [16]. Otra característica de esta planta es que los extractos del fruto presentan propiedades antibacteriales y antifúngicas, así como de alto factor de protección solar, lo que podría ser aprovechado en la industria cosmética [17]; y también se ha informado de los efectos anticancerígenos, antiinflamatorios, antivirales, antiobesidad, antioxidantes, hepatoprotectores, neuroprotectores, diuréticos, y de ayuda en la sanación de heridas, a partir del uso y consumo de esta fruta [18] [19].

En Centroamérica e Israel se cultivan principalmente las especies *H. costaricensis*, *H. undatus*, *H. purpusii*, *H. polyrhizus* y *H. triangularis*, las que son conocidas como pitahaya roja, cuyos frutos no presentan espinas [1] [20] [2]. El género *Hylocereus* incluye unas 31 especies, que difieren en la coloración interna y externa del fruto, entre otras características [1] [4] [21]. La especie *H. undatus* se cultiva ampliamente en muchos países del mundo, y tiene cáscara roja y pulpa blanca, mientras que *H. polyrhizus* (cáscara roja y pulpa rojo-violeta) y *H. costaricensis* (cáscara roja y pulpa roja) se cultivan en menor escala [22] [23]. En Costa Rica y Nicaragua se cultiva con más frecuencia la pitahaya con frutos de cáscara roja y pulpa roja, y las variedades más utilizadas son “Rosa”, “Cebra”, “Orejona”, “San Ignacio”, “Nacional”, “Crespa”, “Lisa”, así como la variedad “Amarilla”, de cáscara amarilla y pulpa blanca [24] [25] [22] [20].

Esta fruta se produce principalmente en regiones tropicales y subtropicales de América Latina y Asia [26] [5]. Entre los principales países exportadores de pitahaya se encuentran Vietnam, Tailandia, Colombia, Ecuador, Nicaragua e Israel, entre otros, mientras que los principales mercados importadores son Estados Unidos, Japón, y los países de la Unión Europea [1].

Hasta el momento, no se ha realizado investigación sobre el consumo de esta fruta en Costa Rica. El objetivo del trabajo fue realizar una caracterización cuantitativa descriptiva del consumo de pitahaya en cinco ciudades de Costa Rica.

Materiales y métodos

La investigación se desarrolló en las ciudades de San José, Alajuela, Heredia, Cartago y Liberia, en Costa Rica, entre abril y junio de 2019. Se realizaron en total 693 entrevistas personales (mínimo 121 por ciudad); se procuró entrevistar a un número relativamente similar de personas según ciudad, ámbito etario y sexo (cuadro 1). El instrumento de entrevista se estructuró con un total de trece preguntas, las cuales fueron validadas mediante consultas con otros especialistas en el cultivo de pitahaya. Para la selección de la muestra se utilizó un método de muestreo no probabilístico por conveniencia [27].

Cuadro 1. Distribución de entrevistas, según ciudad, sexo y ámbito etario.

Ciudad	Sexo		Ámbito etario (años)				Total
	Femenino	Masculino	15-29	30-44	45-59	60-99	
San José	73	64	34	34	37	32	137
Alajuela	75	83	38	45	40	35	158
Heredia	73	64	34	36	34	33	137
Cartago	69	71	34	30	39	37	140
Liberia	60	61	30	30	31	30	121
Total	350	343	170	175	181	167	693

Las entrevistas trataron los siguientes temas: conocimiento del fruto y sus tipos, el consumo y su frecuencia, lugar de compra y percepción del precio, características de calidad, y forma de consumo de los frutos. Además, se relacionó la información sobre el lugar de compra con la del precio percibido. La información obtenida se tabuló y organizó por áreas temáticas. Para el análisis de los datos se aplicó la estadística descriptiva; se obtuvo la frecuencia absoluta para cada categoría, según el número de entrevistas por ciudad, sexo, ámbito etario, y total.

Resultados

Conocimiento

Ante la pregunta, ¿sabe qué es la pitahaya?, 423 personas respondieron en forma afirmativa (61,0% del total de personas entrevistadas). En el cuadro 2 se detalla la distribución de las respuestas afirmativas, según ciudad, sexo y ámbito etario. Para las restantes 270 personas entrevistadas (39,0% del total de personas entrevistadas), que no sabían qué es la pitahaya, la entrevista se dio por finalizada.

Cuadro 2. Distribución de respuestas afirmativas sobre el conocimiento de la pitahaya.

Ciudad	Sexo		Ámbito etario (años)				Total
	Femenino	Masculino	15-29	30-44	45-59	60-99	
San José	52	31	20	17	24	22	83
Alajuela	48	39	16	26	23	22	87
Heredia	42	34	15	18	18	25	76
Cartago	33	28	14	18	20	9	61
Liberia	58	58	27	30	30	29	116
Total	233	190	92	109	115	107	423

Para las ciudades de San José, Alajuela, Heredia y Cartago, el porcentaje de personas que sí saben qué es la pitahaya osciló entre 44 y 61% de las personas entrevistadas en cada ciudad, mientras que, para Liberia, dicho porcentaje fue de 96%. En las cinco ciudades, las mujeres mostraron un mayor nivel de conocimiento sobre la pitahaya, en comparación con los hombres.

Con respecto al ámbito etario, en general el nivel de conocimiento sobre la pitahaya tiende a ser mayor conforme aumenta la edad de la persona; esto sucedió en todas las ciudades, con excepción de Cartago, donde solamente el 24% de las personas con una edad entre 60-99 años respondió afirmativamente, mientras que en el ámbito de 30-44 años dicho porcentaje fue del 60%.

Tipos de pitahaya

A las 423 personas que sí conocen qué es la pitahaya, se les hizo la pregunta, ¿qué tipos de pitahaya conoce?, y sus respuestas se presentan en el cuadro 3, según ciudad, sexo y ámbito etario. En esta pregunta las personas podían mencionar varios tipos de pitahaya en su respuesta.

Cuadro 3. Distribución de respuestas sobre los tipos de pitahaya conocidas.

Criterio de clasificación		Tipos de pitahaya conocidos					
		Pulpa roja	Pulpa blanca	Pulpa morada	Cáscara roja	Cáscara amarilla	Otro
Ciudad	San José	47	14	34	64	18	5
	Alajuela	53	9	31	54	6	6
	Heredia	40	9	34	50	12	8
	Cartago	35	9	21	43	12	4
	Liberia	34	2	52	71	9	1
Sexo	Femenino	100	25	103	165	32	10
	Masculino	109	18	69	117	25	14
Ámbito etario (años)	15-29	32	13	39	58	10	7
	30-44	54	13	51	73	17	3
	45-59	62	8	55	82	15	5
	60-99	61	9	27	69	15	9
Total		209	43	172	282	57	24

En general, en las cinco ciudades el tipo de pitahaya más conocido es el de cáscara roja, seguido del de pulpa roja; con excepción de Liberia, donde los tipos más conocidos fueron cáscara roja y pulpa morada. Para ambos sexos y para los cuatro ámbitos etarios, el tipo de pitahaya más conocido fue el de cáscara roja.

Entre los tipos de pitahaya indicados por las 24 personas cuya respuesta fue “otro”, están: pulpa amarilla (3 personas), cáscara rosada (2 personas), pulpa anaranjada (1 persona), pulpa rosada (1 persona), cáscara morada (1 persona), cáscara verde (1 persona), y no responde (15 personas).

Consumo

A las 423 personas que sí conocen qué es la pitahaya, se les hizo la pregunta, ¿ha probado la pitahaya?, y 330 personas respondieron en forma afirmativa (47,6% del total de personas entrevistadas). En el cuadro 4 se detalla la distribución de las respuestas afirmativas, según ciudad, sexo y ámbito etario.

Cuadro 4. Distribución de respuestas afirmativas sobre el hecho de haber consumido pitahaya.

Ciudad	Sexo		Ámbito etario (años)				Total
	Femenino	Masculino	15-29	30-44	45-59	60-99	
San José	38	20	12	14	17	15	58
Alajuela	37	32	11	21	20	17	69
Heredia	31	25	10	16	10	20	56
Cartago	19	19	9	11	11	7	38
Liberia	54	55	23	28	30	28	109
Total	179	151	65	90	88	87	330

En San José, Alajuela y Heredia, el porcentaje de personas que habían probado la pitahaya osciló entre 41-44% de las personas entrevistadas en cada ciudad, pero dicho porcentaje bajó al 27% en Cartago, y subió al 90% en Liberia.

En San José, Alajuela y Heredia, el porcentaje de personas que había probado la pitahaya fue mayor entre las mujeres, en comparación con los hombres; mientras que en Cartago y Liberia los resultados fueron similares entre ambos sexos.

El menor porcentaje de personas que habían probado la pitahaya se encontró en el ámbito etario de 15-29 años en las ciudades de San José, Alajuela y Liberia, mientras que en Cartago se obtuvo entre la población con una edad de 60-99 años, y en Heredia en los rangos de 15-29 años y 45-59 años.

A las 330 personas que sí habían probado la pitahaya, se les hizo la pregunta, ¿le gusta comer pitahaya?, y 295 personas respondieron en forma afirmativa (42,6% del total de personas entrevistadas). En el cuadro 5 se detalla la distribución de las respuestas afirmativas, según ciudad, sexo y ámbito etario.

Cuadro 5. Distribución de respuestas afirmativas sobre la preferencia por el consumo de pitahaya.

Ciudad	Sexo		Ámbito etario (años)				Total
	Femenino	Masculino	15-29	30-44	45-59	60-99	
San José	31	18	10	10	17	12	49
Alajuela	33	26	9	19	16	15	59
Heredia	30	23	10	15	10	18	53
Cartago	18	18	7	11	11	7	36
Liberia	44	54	20	24	28	26	98
Total	156	139	56	79	82	78	295

El mayor porcentaje de personas que manifestaron que sí les gusta comer pitahaya se encontró en la ciudad de Liberia (81% de las entrevistadas), seguido de San José, Alajuela y Heredia (entre 36-39% cada una), y el menor porcentaje se obtuvo en Cartago (26%). En las ciudades de San José, Alajuela, Heredia y Cartago, las mujeres superaron a los hombres en su respuesta afirmativa, mientras que lo contrario sucedió en Liberia. El menor porcentaje de respuestas afirmativas para esta pregunta se obtuvo en el ámbito etario de 15-29 años en las ciudades de Alajuela (24% de las personas entrevistadas) y Liberia (67%), pero en Cartago se obtuvo entre la población de 60-99 años (19%); en San José, los menores porcentajes se obtuvieron en los rangos de 15-29 años y 30-44 años (29% de las personas entrevistadas en ambos casos); y en Heredia, los menores porcentajes se hallaron en los ámbitos de 15-29 años y 45-59 años (29% en cada caso).

Por otra parte, a las 35 personas que respondieron en forma negativa la pregunta anterior (5,1% del total de personas entrevistadas), se les hizo la pregunta, ¿por qué no le gusta la pitahaya?, y en el cuadro 6 se detalla la distribución de sus respuestas, según ciudad, sexo y ámbito etario. En esta pregunta las personas encuestadas podían indicar más de una razón.

Cuadro 6. Distribución de respuestas sobre las razones del no consumo de pitahaya.

Criterio de clasificación		Razones del no consumo		
		Sabor	Presencia de semillas	Otro
Ciudad	San José	7	0	2
	Alajuela	10	1	2
	Heredia	3	0	0
	Cartago	0	1	1
	Liberia	8	3	1
Sexo	Femenino	17	4	5
	Masculino	11	1	1
Ámbito etario (años)	15-29	5	2	3
	30-44	11	0	1
	45-59	6	1	1
	60-99	6	2	1
Total		28	5	6

En San José, Alajuela, Heredia y Liberia, la principal razón para no consumir pitahaya fue su sabor, mientras que en Cartago fueron la presencia de semillas, y “otro”. El sabor también fue la principal razón indicada por ambos sexos, y también en los cuatro ámbitos etarios.

Entre las características brindadas por las 6 personas cuya razón fue “otro”, están: apariencia (1 persona), textura (1 persona), es amarga (1 persona), es amarrosa (1 persona), y no responde (2 personas).

Frecuencia de consumo

A las 295 personas a quienes sí les gusta comer pitahaya, se les hizo la pregunta, ¿cada cuánto come pitahaya (aproximadamente)?, y sus respuestas se presentan en el cuadro 7, en el cual se detalla la distribución según ciudad, sexo y ámbito etario.

Cuadro 7. Distribución de respuestas sobre la frecuencia de consumo de pitahaya.

Criterio de clasificación		Frecuencia de consumo				
		Cada semana	Cada 15 días	Una vez al mes	1 o 2 veces al año	n.d.
Ciudad	San José	1	0	3	45	0
	Alajuela	1	1	3	50	4
	Heredia	2	2	1	47	1
	Cartago	0	0	3	32	1
	Liberia	4	11	32	51	0
Sexo	Femenino	4	11	18	121	2
	Masculino	4	3	24	104	4
Ámbito etario (años)	15-29	0	2	9	45	0
	30-44	1	1	11	64	2
	45-59	3	6	11	61	1
	60-99	4	5	11	55	3
Total		8	14	42	225	6

En las cinco ciudades, la principal frecuencia de consumo de pitahaya fue una o dos veces al año, y el mismo resultado se obtuvo para ambos sexos y para los cuatro ámbitos etarios. Sin embargo, en la ciudad de Liberia se halló que un 26% de las personas entrevistadas afirmaron consumir pitahaya una vez al mes, un 9% indicó que la consume cada 15 días, y un 3% que la consume cada semana.

Lugar de compra

A las 295 personas a quienes sí les gusta comer pitahaya, se les hizo la pregunta, ¿dónde acostumbra comprar pitahaya?, y sus respuestas se presentan en el cuadro 8, en el cual se detalla la distribución según ciudad, sexo y ámbito etario. En esta pregunta las personas encuestadas podían indicar más de un lugar de compra.

Cuadro 8. Distribución de respuestas sobre el lugar de compra de la pitahaya.

Criterio de clasificación		Lugar de compra				
		Feria del agricultor	Verdulería	Supermercado	Otro	No la compra
Ciudad	San José	18	4	7	9	17
	Alajuela	12	1	7	19	24
	Heredia	15	5	7	25	11
	Cartago	12	0	2	11	15
	Liberia	51	22	18	19	27
Sexo	Femenino	60	20	27	45	42
	Masculino	48	12	14	38	52
Ámbito etario (años)	15-29	18	5	11	18	16
	30-44	36	7	6	14	30
	45-59	28	11	14	19	30
	60-99	26	9	10	32	18
Total		108	32	41	83	94

En San José, Cartago y Liberia, el principal lugar de compra de pitahaya fue la feria del agricultor, mientras que en Alajuela y Heredia fue “otro”. En relación con el sexo, en ambos casos se compra la pitahaya mayoritariamente en la feria del agricultor.

En cuanto al ámbito etario, las personas con una edad entre 30-44 años y 45-59 años acostumbran comprar la pitahaya principalmente en la feria del agricultor, mientras que las personas entre 60-99 años lo hacen en “otro”. En el caso de las personas entre 15-29 años, los valores son idénticos entre la feria del agricultor y “otro”.

Por otra parte, en las cinco ciudades, el porcentaje de personas entrevistadas que manifestó que no compra la pitahaya osciló entre 8 y 22%; estas personas indicaron que no la compran debido a que cultivan esta fruta en su propiedad, o a que otras personas le regalan los frutos.

Entre los lugares de compra mencionados por las 83 personas cuya respuesta fue “otro”, están: mercado (33 personas), venta ambulante (13 personas), restaurante (9 personas), finca (6 personas), heladería (6 personas), productor (4 personas), soda (1 persona), y no responde (11 personas).

Percepción sobre el precio

A las 295 personas a quienes sí les gusta comer pitahaya, se les hizo la pregunta, ¿cuál es su opinión sobre el precio de la pitahaya?, y sus respuestas se presentan en el cuadro 9, en el cual se detalla la distribución según ciudad, sexo y ámbito etario.

Cuadro 9. Distribución de respuestas con respecto a la opinión sobre el precio de la pitahaya.

Criterio de clasificación		Opinión sobre el precio				
		Barato	Caro	Precio justo	Muy caro	n.d.
Ciudad	San José	1	5	19	7	17
	Alajuela	1	3	5	10	40
	Heredia	0	8	6	11	28
	Cartago	2	6	5	5	18
	Liberia	3	14	26	35	20
Sexo	Femenino	1	23	36	40	56
	Masculino	6	13	25	28	67
Ámbito etario (años)	15-29	0	5	18	6	27
	30-44	3	7	17	23	29
	45-59	2	11	16	19	34
	60-99	2	13	10	20	33
Total		7	36	61	68	123

En Alajuela, Heredia y Liberia, el mayor porcentaje se obtuvo para la percepción de que la pitahaya tiene un precio muy caro, mientras que en San José se consideró mayoritariamente como un producto que tiene un precio justo, y en Cartago se consideró con valores similares las opciones de percepción de precio caro, muy caro, y precio justo. El porcentaje de personas entrevistadas que no sabía el precio de la pitahaya osciló entre 12 y 25%, según la ciudad. Con respecto al sexo, en ambos casos consideraron mayoritariamente que el precio de la pitahaya es muy caro. En relación con el ámbito etario, en todos los casos las personas lo consideraron principalmente como un producto muy caro, con excepción de las personas con una edad entre 15-29 años, que consideraron mayoritariamente que la pitahaya tiene un precio justo.

Relación entre lugar de compra y precio percibido

La relación entre el lugar de compra y el precio percibido, para las 201 personas a quienes sí les gusta comer pitahaya, y además también la compran, se presenta en el cuadro 10.

Cuadro 10. Relación entre el lugar de compra de la pitahaya y el precio percibido por la persona.

Lugar de compra	Opinión sobre el precio				
	Barato	Caro	Precio justo	Muy caro	n.d.
Feria del agricultor	3	21	29	39	16
Verdulería	0	8	6	13	5
Supermercado	1	4	17	9	8
Otro	1	11	23	18	27

Nota: n.d.: no hay dato.

Para quienes compran en la feria del agricultor y en la verdulería, la mayoría opinó que la pitahaya tiene un precio muy caro. Por otra parte, entre quienes compran en el supermercado, así como en “otro”, la mayoría consideró que el precio de este producto es justo.

Características de calidad del fruto

A las 295 personas a quienes sí les gusta comer pitahaya, se les hizo la pregunta, ¿qué características debe tener una pitahaya de buena calidad?, y sus respuestas se presentan en el cuadro 11, en el cual se detalla la distribución según ciudad. En esta pregunta las personas encuestadas podían indicar más de una característica.

Cuadro 11. Distribución de respuestas sobre las características de calidad del fruto de pitahaya.

Característica	Ciudad					Total general
	San José	Alajuela	Heredia	Cartago	Liberia	
Color	13	20	13	14	41	101
Firmeza	7	5	3	1	11	27
Tamaño grande	7	1	4	3	8	23
Suavidad	4	9	4	5	0	22
Textura	2	0	0	0	15	17
Frescura	5	1	1	3	6	16
Madura	5	0	3	1	6	15
Sabor	2	0	0	0	12	14
Sin golpes	1	1	1	1	10	14
Apariencia	1	0	0	0	11	12
Sin heridas o daños	0	2	1	0	3	6
Sabor dulce	0	0	1	1	4	6
Turgente	3	0	0	2	0	5
Sanidad	1	0	0	0	3	4
Olor	2	0	1	0	0	3
Jugosa	0	0	1	0	2	3
Otras	5	4	3	5	5	22

Las características que más se mencionaron para identificar una pitahaya de calidad fueron: color (15% de las personas entrevistadas), firmeza (4%), tamaño grande (3%), y suavidad (3%).

Entre las características categorizadas como “otras”, que fueron mencionadas por 22 personas, están: brácteas firmes (2 personas), brácteas sanas (2 personas), no muy madura (2 personas), brillante (2 personas), sabor ácido o un poco ácido (2 personas), forma de producción (1 persona), brácteas suaves (1 persona), pulpa firme (1 persona), sin pudrición (1 persona), color verde (1 persona), que tenga pedúnculo (1 persona), pedúnculo que no esté de color verde (1 persona), que se le haya caído la flor (1 persona), tamaño mediano (1 persona), sin manchas (1 persona), sabor no ácido (1 persona), y que se haya cortado en la fase lunar adecuada (1 persona).

Formas de consumo del fruto

A las 295 personas a quienes sí les gusta comer pitahaya, se les hizo la pregunta, ¿de qué forma acostumbra consumir la pitahaya?, y sus respuestas se presentan en el cuadro 12, en el cual se detalla la distribución según ciudad, sexo y ámbito etario. En esta pregunta las personas encuestadas podían indicar más de una opción de consumo.

Cuadro 12. Distribución de respuestas sobre las formas de consumo de pitahaya.

Criterio de clasificación		Forma de consumo			
		Refresco	Fruta fresca	Helado	Otro
Ciudad	San José	28	30	9	9
	Alajuela	35	33	15	2
	Heredia	38	25	7	8
	Cartago	22	17	4	5
	Liberia	94	33	5	3
Sexo	Femenino	113	78	25	17
	Masculino	104	60	15	10
Ámbito etario (años)	15-29	41	25	11	7
	30-44	54	38	16	9
	45-59	64	34	7	8
	60-99	58	41	6	3
Total		217	138	40	27

En Alajuela, Heredia, Cartago y Liberia, la principal forma de consumo de pitahaya fue en refresco, seguida de fruta fresca; mientras que en San José la principal forma de consumo fue como fruta fresca, seguida de refresco.

En cuanto al sexo, en ambos casos la principal forma de consumo fue en refresco, y lo mismo sucedió en los cuatro ámbitos etarios.

Entre las formas de consumo mencionados por las 27 personas cuya respuesta fue “otro”, están: batido (3 personas), postre (3 personas), yogurt (3 personas), cerveza (2 personas), mermelada (2 personas), pulpa (2 personas), chimichurri (1 persona), jalea (1 persona), jalea picante (1 persona), ensalada (1 persona), salsa (1 persona), atol (1 persona), chicha (1 persona), gelatina (1 persona), tostadas (1 persona), y no responde (3 personas).

Discusión

Con respecto al mayor nivel de conocimiento sobre la pitahaya en Liberia, en comparación con las otras cuatro ciudades, probablemente esto se debe a que Liberia se ubica a una altitud (143 msnm) y en una zona que es propicia para este frutal en Costa Rica, pues existen cultivos de pitahaya en las cercanías de dicha ciudad, y en otras zonas de la provincia de Guanacaste (J. E. Monge-Pérez, datos sin publicar). Por otra parte, las otras cuatro ciudades se ubican en zonas con una menor presencia de dicho cultivo en sus alrededores, y además con una menor tradición de consumo de esta fruta. Otros investigadores informaron que las principales zonas productoras de pitahaya en Costa Rica se ubican en las provincias de Puntarenas (cantón Central, Caldera y Montes de Oro) y Guanacaste (Cañas, Liberia y La Cruz) [25].

Con respecto a la frecuencia de consumo de pitahaya, se debe considerar que la producción nacional de esta fruta sucede únicamente entre los meses de mayo a octubre [25], y en los demás meses del año ocasionalmente se encuentra pitahaya de origen importado (proveniente de Nicaragua y Colombia, por ejemplo) [25]; por lo tanto, es prácticamente imposible poder consumir pitahaya durante todo el año en Costa Rica, por la carencia de oferta del producto en algunos meses, ya que actualmente no hay importación de pitahaya durante todo el año, sino solamente en algunos meses (J. E. Monge-Pérez, datos sin publicar).

Según otros investigadores, la demanda de pitahaya como fruta fresca en Costa Rica está determinada por segmentos poblacionales de clase media y media alta, que acostumbran consumir frutas exóticas o poco tradicionales, así como la población de la provincia de Guanacaste, donde el consumo de pitahaya es una tradición ampliamente arraigada, y también entre la población de origen nicaragüense [25]. En el presente estudio se confirmó lo anterior, dado el amplio consumo de pitahaya registrado en la ciudad de Liberia, muy superior en comparación con las otras cuatro ciudades estudiadas, que no se ubican en la provincia de Guanacaste.

Entre los usos de la pitahaya en Costa Rica, se ha informado su consumo como fruta fresca, en bebidas con limón o naranja, y helados (nieves) [28] [25], mientras que otros investigadores en Venezuela han indicado que los frutos de la pitahaya se puede usar para la elaboración de pulpa congelada, jugos, jarabes, licores, salsas, forrajes, medicamentos, colorantes, además de fruta deshidratada, jalea, mermelada, y yogurt [13]; esta información fue parcialmente confirmada por nuestra investigación.

Es llamativo que, mayoritariamente, las personas entrevistadas consumen pitahaya únicamente una o dos veces al año (entre 23 y 42% del total de personas entrevistadas en cada ciudad), lo cual parece una frecuencia relativamente baja. Sin embargo, esto se explica fácilmente al confirmar que la mayor parte de las personas consideran que esta fruta tiene un precio muy caro (entre 4 y 29% de las personas entrevistadas en cada ciudad) o caro (entre 2 y 12%), y solamente entre un 3 y 21% considera que su precio es justo. Por lo tanto, esta situación, hipotéticamente, abriría la posibilidad de que las personas puedan aumentar su consumo de pitahaya, si pudieran obtener esta fruta a un precio más accesible para su capacidad económica, asumiendo un comportamiento elástico de la demanda [29]; esto ya fue demostrado en el caso de pitahaya producida en Israel, que obtuvo un aumento considerable en ventas en el mercado alemán al ofrecer un precio más bajo del normal [30]; este escenario está en consonancia con las posibilidades de que se aumente el área de siembra de pitahaya en el país, para ampliar la oferta del producto, lo que brindaría fuentes de empleo en algunas zonas rurales. En forma similar a los resultados obtenidos en el presente estudio, también en Filipinas se informó que el 40% de los encuestados que compran pitahaya lo hizo una vez al año, y un 21% lo hizo dos veces al año [9]; asimismo, al igual que en nuestra investigación, se identificó en dicho estudio que un 30% de los entrevistados se quejó por el precio relativamente alto de la pitahaya [9].

Otro dato interesante es que, entre el 8 y 22 % de las personas entrevistadas no compra la pitahaya (aunque sí la consume), pues cultivan esta planta, o les regalan las frutas; esto implica o sugiere que muchas personas en las cinco ciudades tienen este cultivo en sus jardines o propiedades, y las regalan a sus vecinos, familiares o conocidos, lo que revela una interesante interacción social asociada a este frutal; en forma similar a lo hallado en el presente estudio, en Filipinas se encontró que el 8% de las personas entrevistadas no compraba la pitahaya, pues la cultivaba en su propiedad [9].

De manera similar a lo hallado en el presente estudio, también en Filipinas se identificaron las siguientes características de calidad de la pitahaya: color de la cáscara, fresca, ausencia de manchas, golpes y daños, así como sabor dulce y firmeza [9]. Sin embargo, en Filipinas se prefieren frutas de tamaño mediano [9], mientras que en Costa Rica se prefieren frutos de tamaño grande, según los datos hallados en el presente estudio.

Por último, dentro de las limitaciones del estudio están que el muestreo fue no probabilístico, por lo que los resultados no se pueden extrapolar a toda la población costarricense. Asimismo, la estacionalidad de la oferta y del consumo de pitahaya pudo haber influenciado los resultados obtenidos. De la misma forma, la subjetividad en la percepción del precio de la pitahaya no permite establecer con mayor certeza la influencia real del precio sobre el consumo de pitahaya.

Conclusiones

Las personas que viven en las ciudades de San José, Alajuela, Heredia y Cartago, mostraron un menor nivel de conocimiento sobre la pitahaya, y un menor consumo de esta fruta, en comparación con las personas que viven en Liberia.

Existe un nivel importante de consumo de pitahaya en las cinco ciudades incluidas en este estudio, con un resultado muy destacado en el caso de la ciudad de Liberia.

La mayor parte de las personas que consumen pitahaya en las cinco ciudades estudiadas, lo hace una o dos veces al año.

El proceso de mejora genética en pitahaya debe dirigirse preferentemente a la selección de frutos grandes, firmes, y de color atractivo; esto puede potenciar un mayor consumo por parte de la población.

Este trabajo constituye el primer estudio sobre la caracterización del consumo de pitahaya en Costa Rica.

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento recibido por parte de la Universidad de Costa Rica para la realización de este trabajo.

Referencias

- [1] A. L. Ángel, C. A. Estrada, A. Rebolledo y R. Zetina, Pitahayas: patrimonio biocultural para diversificar la agricultura y la alimentación, Veracruz, México: Campo Experimental Cotaxtla, Centro de Investigación Regional Golfo Centro, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, 2012.
- [2] J. A. Montesinos, L. Rodríguez-Larramendi, R. Ortiz-Pérez, M. A. Fonseca-Flores, G. Ruíz y F. Guevara-Hernández, "Pitahaya (*Hylocereus* spp.): un recurso fitogenético con historia y futuro para el trópico seco mexicano," *Cultivos Tropicales*, vol. 36, no. especial, pp. 67-76, 2015.
- [3] L. Huachi, E. Yugsi, M. F. Paredes, D. Coronel, K. Verdugo y P. Coba, "Desarrollo de la pitahaya (*Cereus* sp.) en Ecuador," *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, vol. 22, no. 2, pp. 50-58, 2015.
- [4] K. Kishore, "Phenological growth stages of dragon fruit (*Hylocereus undatus*) according to the extended BBCH-scale," *Scientia Horticulturae*, vol. 213, pp. 294-302, 2016.
- [5] A. Verona-Ruiz, J. Urcia-Cerna y L. M. Paucar-Menacho, "Pitahaya (*Hylocereus* spp.): cultivo, características fisicoquímicas, composición nutricional y compuestos bioactivos," *Scientia Agropecuaria*, vol. 11, no. 3, pp. 439-453, 2020.
- [6] K. Abirami, S. Swain, V. Baskaran, K. Venkatesan, K. Sakthivel y N. Bommayasamy, "Distinguishing three Dragon fruit (*Hylocereus* spp.) species grown in Andaman and Nicobar Islands of India using morphological, biochemical and molecular traits," *Scientific Reports*, vol. 11, p. 2894, 2021.
- [7] T. A. Ortiz y L. S. A. Takahashi, "Pitaya fruit quality (*Hylocereus undatus* [Haworth] Britton & Rose) according to physiological maturity. A review," *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, vol. 14, no. 1, pp. 63-75, 2020.
- [8] L. M. Madalosso, F. R. M. Balok, V. C. Bortolotto, M. M. M. Dahleh, L. G. Backes, E. S. S. Escalante, F. V. Benites, F. A. S. Silva, H. J. Segat y S. P. Boeira, "Pitaya juice consumption protects against oxidative damage induced by aflatoxin B1," *Journal of Fungi*, vol. 9, no. 874, pp. 1-13, 2023.
- [9] D. R. Del Carmen, A. A. Gerance y E. B. Esguerra, "Consumer preference and purchase behavior for dragon fruit in the Philippines," in *The 3rd DFNet Workshop "Dragon Fruit Value Chain for Global Markets"*, Taichung, Taiwan, 2020.
- [10] A. Cheok, Y. Xu, Z. Zhang, P. W. Caton y A. Rodriguez-Mateos, "Betain-rich dragon fruit (pitaya) consumption improves vascular function in men and women: a double-blind, randomized controlled crossover trial," *The American Journal of Clinical Nutrition*, vol. 115, pp. 1418-1431, 2022.
- [11] D. D. Anggraini, "Effect of dragon fruit (*Hylocereus*) consumption on cholesterol level in women of childbearing age, in Kediri," in *International Conference on Public Health*, Solo, Indonesia, 2017.
- [12] M. Megasari y R. Pitriani, "The effectiveness of dragon fruit consumption for increasing haemoglobin levels in pregnancy women with light anemia symptoms," *Science Midwifery*, vol. 10, no. 1, pp. 521-524, 2021.
- [13] C. R. Jácome-Pilco, F. A. Ledesma-García, T. L. Vega-Ceballos y S. P. Iza-Iza, "Utilización industrial de la pitahaya (*Hylocereus undatus*)," *593 Digital Publisher CEIT*, vol. 8, no. 3, pp. 98-109, 2023.
- [14] S. M. Lira, M. O. Holanda, J. Y. G. Silva, C. G. Marques, L. C. Coelho, C. L. S. Lima, J. T. G. Costa, J. B. Dantas, G. L. Maciel, G. S. Silva, G. B. M. Santos, G. J. Zocolo, A. P. Dionísio y M. I. F. Guedes, "Pitaya [*Hylocereus polyrhizus* (F.A.C. Weber) Britton & Rose] effect on glycemia and oxidative stress in aloxan-induced diabetic mice," *Food Science and Technology*, vol. 43, no. e56822, pp. 1-9, 2023.
- [15] S. Fadlilah, A. Sucipto, F. Khasanah, D. Setiawan y N. H. Rahil, "Dragon fruit (*Hylocereus polyrhizus*) effectively reduces fasting blood sugar levels and blood pressure on excessive nutritional status," *Pakistan Journal of Medical and Health Sciences*, vol. 14, no. 2, pp. 1405-1412, 2020.
- [16] M. I. M. Flores-Verastegui, S. Coe, J. Tammam, H. Almahjoubi, R. Bridle, S. Bi y P. S. Thondre, "Effects of frozen red dragon fruit consumption on metabolic markers in healthy subjects and individuals at risk of type 2 diabetes," *Nutrients*, vol. 17, no. 441, pp. 1-16, 2025.
- [17] M. Asan-Ozusaglam y I. Celik, "White pitahaya as a natural additive: potential usage in cosmetic industry," *Foods and Raw Materials*, vol. 11, no. 1, pp. 57-63, 2023.
- [18] A. K. Bishoyi, F. Saeed, U. Shehzadi, A. Shankar, J. Balaji, J. Kaur, M. Afzaal, A. Imran, M. Rasheed, B. Hussain, M. Hussain, A. Ahmed, F. Islam y A. B. Kinki, "Nutritional composition, phytochemical profile, and health benefits of *Hylocereus undatus* (pitaya): a comprehensive review," *eFood*, vol. 5, no. e70017, pp. 1-20, 2024.
- [19] T. T. H. Luu, T. L. Le, N. Huynh y P. Quintela-Alonso, "Dragon fruit: a review of health benefits and nutrients and its sustainable development under climate changes in Vietnam," *Czech Journal of Food Sciences*, vol. 39, no. 2, pp. 71-94, 2021.

- [20] Y. Mizrahi, "Vine-cacti pitayas - the new crops of the world," *Revista Brasileira de Fruticultura*, vol. 36, no. 1, pp. 124-138, 2014.
- [21] L. A. García-Rubio, O. Vargas-Ponce, F. J. Ramírez-Mireles, G. Munguía-Lino, C. A. Corona-Oceguera y T. Cruz-Hernández, "Distribución geográfica de *Hylocereus* (Cactaceae) en México," *Botanical Sciences*, vol. 93, no. 4, pp. 1-19, 2015.
- [22] P. Esquivel y Y. Araya, "Características del fruto de la pitahaya (*Hylocereus* sp.) y su potencial de uso en la industria alimentaria," *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, vol. 3, no. 1, pp. 113-129, 2012.
- [23] F. Le Bellec y F. Vaillant, "Pitahaya (pitaya) (*Hylocereus* spp.)," in *Postharvest biology and technology of tropical and subtropical fruits*, Woodhead Publishing Limited, 2011, pp. 247-273.
- [24] INTA, Cultivo de la pitahaya, vol. Guía tecnológica 6, Managua, Nicaragua: Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria, 2002, p. 38.
- [25] M. E. García y O. Quirós, "Análisis del comportamiento de mercado de la pitahaya (*Hylocereus undatus*) en Costa Rica," *Tecnología en Marcha*, vol. 23, no. 2, pp. 14-24, 2010.
- [26] Y. D. Ortiz-Hernández y J. A. Carrillo-Salazar, "Pitahaya (*Hylocereus* spp.): a short review," *Comunicata Scientiae*, vol. 3, no. 4, pp. 220-237, 2012.
- [27] T. Otzen y C. Manterola, "Técnicas de muestreo sobre una población a estudio," *International Journal of Morphology*, vol. 35, no. 1, pp. 227-232, 2017.
- [28] A. Castro, M. Lascrain-Rangel, J. A. Gómez-Díaz y V. Sosa, "Mayan homegardens in decline: the case of the pitahaya (*Hylocereus undatus*), a vine cactus with edible fruit," *Tropical Conservation Science*, vol. 11, pp. 1-10, 2018.
- [29] S. Rebollar, J. Hernández, E. Guzmán, E. Rebollar y F. d. J. González, "La elasticidad precio de la demanda: caso teórico no corroborado," *Revista Mexicana de Agronegocios*, vol. 48, no. 1, pp. 690-699, 2021.
- [30] F. Le Bellec, F. Vaillant y E. Imbert, "Pitahaya (*Hylocereus* spp.): a new fruit crop, a market with a future," *Fruits*, vol. 61, no. 4, pp. 237-250, 2006.

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.

Scrum solo funciona cuando existe un verdadero compromiso con su implementación

Scrum only works when there is a genuine commitment to its implementation

Carlos Alexander Sánchez-Fonseca¹

Fecha de recepción: 5 de agosto, 2025

Fecha de aprobación: 28 de noviembre, 2025

Sánchez-Fonseca, C.A. Scrum solo funciona cuando existe un verdadero compromiso con su implementación. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 N° 3. Julio-Setiembre, 2026. Pág. 18-31.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i3.8143>



¹ Universidad Estatal a Distancia. Costa Rica,
Banco Central de Costa Rica. Costa Rica
 csanchezf@uned.ac.cr; sanchezfc@bccr.fi.cr
 <https://orcid.org/0009-0003-4015-5103>

Palabras clave

Scrum; desarrollo ágil de software; gestión ágil de proyectos; administración de proyectos; desarrollo de software; metodologías ágiles.

Resumen

Este artículo presenta un análisis cualitativo sobre la implementación del marco *Scrum* en un entorno real donde se trabaja bajo el esquema de *SAFe* (*Scaled Agile Framework*). El propósito principal es contribuir, por medio de un estudio empírico, a fortalecer la idea de que *Scrum* solo funciona cuando existe un verdadero compromiso con su aplicación, ya que los errores comunes y las críticas frecuentes hacia este marco suelen derivarse de una implementación parcial o incorrecta de sus principios. El estudio se basa en el análisis de siete retrospectivas de *Program Increments* (PI), realizadas en el departamento de tecnología de información de una institución financiera. Se recopilaron y categorizaron más de 130 comentarios de participantes, agrupados en tres grandes áreas: aspectos positivos, aspectos por mejorar y aspectos negativos. Los resultados muestran coincidencias y tensiones entre la teoría ágil y la práctica cotidiana, destacando elementos como la colaboración entre equipos, la calidad de las ceremonias, el compromiso del negocio y la visión clara del resultado esperado.

Keywords

Scrum, agile software development; agile project management; project management; software development; agile methodology.

Abstract

This paper presents a qualitative analysis of the implementation of the Scrum framework in a real-world environment operating under the SAFe (Scaled Agile Framework) model. The main purpose is to contribute, through an empirical study, to the idea that Scrum only works when there is genuine commitment to its application, as common errors and frequent criticisms often stem from a partial or incorrect implementation of its principles. The study is based on the analysis of seven Program Increment (PI) retrospectives conducted in the IT department of a financial institution. More than 130 comments from participants were collected and categorized, grouped into three main areas: positive aspects, aspects for improvement, and negative aspects. The findings reveal both alignments and tensions between agile theory and day-to-day practice, highlighting elements such as cross-team collaboration, the quality of agile ceremonies, business engagement, and clarity of objectives.

Introducción

Las metodologías ágiles han adquirido una relevancia significativa, ya que permiten a las organizaciones implementar prácticas que mejoran sus procesos y la administración de sus recursos [1]. Las metodologías ágiles han revolucionado en las últimas dos décadas el desarrollo de software y la gestión de proyectos, promoviendo la adaptabilidad, el trabajo colaborativo y la entrega incremental de valor.

En este contexto, marcos de trabajo como *Scrum* y *SAFe* (*Scaled Agile Framework*) han adquirido un gran reconocimiento y empresas de diversos tamaños y sectores los han adoptado para enfrentar la complejidad de los entornos tecnológicos y de negocio. Particularmente *Scrum*, se ha afianzado como un marco de trabajo ágil que permite a los equipos trabajar en ciclos cortos —llamados iteraciones— con el propósito de entregar productos de alta calidad de manera iterativa e incremental [2]. No obstante, su implementación requiere un entendimiento claro de sus principios y prácticas, y su adopción no está exenta de retos [3]. A medida que más organizaciones intentan incorporar *Scrum*, surgen cuestionamientos sobre su verdadera efectividad, la sinceridad con que se implementa y los factores que obstaculizan o potencian su desempeño real en equipos de trabajo.

Por otro lado, en entornos organizacionales más amplios, donde se requiere la sincronización de múltiples equipos, aparecen ideas como *SAFe*, un marco de trabajo ágil escalado diseñado para alinear esfuerzos técnicos, estratégicos y de negocio. *SAFe* incorpora principios de *Scrum* en su nivel de equipos, pero añade estructuras adicionales como el tren ágil — del inglés *Agile Release Train* (ART)— para facilitar la sincronización, la planificación a gran escala y la entrega continua de valor a nivel organizacional [4].

A pesar de ello, en la práctica, la aplicación de estos marcos no siempre refleja lo que indican las guías teóricas. La implementación efectiva de *Scrum* o *SAFe* puede verse afectada por múltiples factores: la cultura organizacional, la claridad de los roles, el compromiso de los patrocinadores, la calidad de las retrospectivas, la preparación de los equipos o incluso la forma en que se interpretan y adaptan las ceremonias -reuniones- ágiles [4] [5].

De ahí que resulte oportuno y necesario estudiar cómo se vive y se percibe la agilidad desde el punto de vista de sus propios equipos. En lugar de enfocarse únicamente en métricas de desempeño o cumplimiento de entregas, este trabajo propone analizar el contenido cualitativo generado por los equipos durante las retrospectivas de *Program Increments* (PI), un espacio clave en *SAFe* donde se reflexiona sobre lo que ha funcionado, lo que no, y lo que se puede mejorar.

Por consiguiente, el objetivo principal de este artículo es contribuir, por medio de un estudio empírico, a fortalecer la idea de que ***Scrum* solo funciona cuando existe un verdadero compromiso con su implementación**, ya que los errores comunes y las críticas a este marco de trabajo suelen provenir de una aplicación incorrecta o superficial de sus principios.

Justificación

El crecimiento de la orientación ágil en la gestión de proyectos ha llevado a que marcos como *Scrum* se conviertan en una práctica frecuente en múltiples industrias, especialmente en el desarrollo de software y servicios tecnológicos. Por lo que resulta apropiado desarrollar investigaciones que analicen no solo los principios teóricos de *Scrum*, sino también su aplicación concreta en contextos organizacionales reales. Evaluar las dificultades más comunes, las percepciones de los equipos que lo aplican y los elementos que afectan su efectividad es una necesidad tanto para la comunidad profesional como para la académica. De ahí que, este artículo se basa en un análisis empírico de siete retrospectivas de *Program Increments* (PI) en un entorno donde se trabaja con *SAFe*, lo cual permite observar de manera directa cómo los equipos perciben la aplicación de *Scrum*, qué valoran, qué les entorpece y qué oportunidades de mejora identifican.

Antecedentes

En ocasiones en algunos escritos, formales o informales, se utiliza de manera indiferente la definición de metodología o de marco de trabajo para referirse al *Scrum*, no obstante, antes de dar una definición de este concepto, es necesario indicar que metodología es un “conjunto de métodos que se siguen en una investigación científica o en una exposición doctrinal” [6], consecuentemente la metodología es específica y puede variar según el tipo de investigación (cuantitativa, cualitativa, mixta), mientras que un marco de trabajo es más general y podría aplicarse a diferentes metodologías. Por consiguiente, la metodología se ocupa de los métodos específicos, mientras que el marco de trabajo proporciona la estructura conceptual necesaria para guiar el proceso de investigación.

La llamada guía de *Scrum* que es el documento que explica en detalle el mecanismo para aplicar este marco de trabajo, sus eventos, sus roles y artefactos, indica que *Scrum* se concibe como un marco de trabajo liviano que facilita a las personas, equipos y organizaciones a generar valor [3]. Así pues, para los padres de *Scrum*, la implementación de este marco es soportada por tres pilares: transparencia, inspección y adaptación.

Como se han indicado hasta aquí, el *Scrum* es un marco de trabajo ágil que se enfoca en la gestión de proyectos mediante iteraciones para un equipo de trabajo. Ahora qué sucede cuando se requiere la coordinación de varios equipos de trabajo, en ese caso surgió *SAFe* que es un marco de trabajo ágil escalado y diseñado para ser aplicado en organizaciones grandes con múltiples equipos de desarrollo [4].

Estado de la cuestión

En el ámbito del desarrollo de software donde son cruciales la adaptación rápida a los cambios y la retroalimentación permanente; *Scrum* se ha afianzado como uno de los marcos de trabajo, proveniente de las metodologías ágiles, más sonados donde se resalta su enfoque iterativo e incremental, en otras palabras “el proceso es repetitivo, por lo que permite crear nuevas versiones del producto en cada iteración” [7].

Ahora bien, la implementación de *Scrum* no está exenta de dificultades; diversos estudios mencionan errores de adopción en su ejecución, como la falta de comprensión de este marco de trabajo, la débil adopción de roles y la confusión entre prácticas ágiles y procesos tradicionales. Sus principios requieren un entendimiento profundo para ser aplicados correctamente [3]. De ahí que cuando los equipos no internalizan estos principios, es probable que adopten *Scrum* de manera superficial, lo que resulta en una implementación fallida y una pérdida de confianza en este marco de trabajo.

A modo de ejemplo, la cantidad de reuniones, que propone *Scrum*, a menudo se consideran improductivas si no se gestionan correctamente. El valor de las ceremonias radica en que pueden incorporarse en varias industrias, el *daily scrum* funciona como una reunión diaria para la organización del trabajo. La ceremonia de *sprint review* permite evaluar los resultados después de un periodo de desarrollo o servicio. La sesión de retrospectiva de la iteración facilita la mejora continua antes de iniciar un nuevo ciclo [8].

La adopción de prácticas ágiles suele implicar transiciones de rol —por ejemplo, pasar de administrador de proyectos y asumir funciones de Scrum Master— lo que exige desaprender concepciones tradicionales de gestión y adoptar un enfoque más facilitador durante la transformación organizacional [9].

Por su parte, estudios como los de Uludağ y otros autores del año 2021, han señalado que los retos más comunes para la adopción de *SAFe* han sido las políticas organizacionales, las dificultades para establecer un pensamiento ágil, la resistencia al cambio y los desafíos en la formación de equipos. Así mismo estos autores argumentan que a pesar de la abundante literatura sobre *Scrum* y *SAFe*, es importante contar con estudios empíricos que ordenen la percepción de los equipos mediante el análisis cualitativo de retrospectivas, especialmente en entornos coordinados por un tren ágil [10].

Por consiguiente este estudio busca contribuir al conocimiento existente mediante el análisis documental e interpretativo de siete retrospectivas de PI (*Program Increment*), realizadas en el Departamento de TI Económica y Financiera del Banco de Central de Costa Rica, en las que participaron entre 9 y 14 equipos por sesión. Este enfoque permite no solo identificar patrones comunes en las valoraciones del proceso ágil, sino también como confrontarlos con los fundamentos teóricos que orientan la aplicación de dichos marcos.

Marco teórico

Scrum “es un marco de trabajo liviano que ayuda a las personas, equipos y organizaciones a generar valor” [3]. Por su parte para uno de los creadores del *Scrum* “este término procede del *rugby* y se refiere al modo en que un equipo se desempeña en común para mover el balón por la cancha. Acoplamiento, unidad de propósito y claridad de metas van de la mano” [5]. Asimismo, se expone que *Scrum* se basa en una idea sencilla, cada vez que se está en ejecución de un proyecto por qué no revisar con cierta frecuencia para ver si lo que se está haciendo sigue el camino correcto y si es lo que la gente de verdad busca. Además, se recomienda revisar si se puede hacer mejor, con mayor velocidad o analizar qué impide que se pueda hacer así, a este principio se le conoce como inspección y ajuste.

En el 2001 surge el Manifiesto Ágil, cuando se reunieron diecisiete críticos del desarrollo de software, y acuñaron el término “Metodología Ágil” para definir a los métodos que estaban surgiendo como alternativa a las metodologías formales [11]. En la Fig. 1 se muestran los valores del Manifiesto Ágil que destacan las prioridades del enfoque ágil.



Figura 1. Representación visual de los cuatro valores del Manifiesto Ágil

Elaboración propia con base en el Manifiesto Ágil

Ahora bien, qué sucede cuando se requiere la coordinación de varios equipos de trabajo, en ese caso aparece *SAFe* que es un marco de trabajo ágil escalado y diseñado para ser aplicado en organizaciones grandes con múltiples equipos de desarrollo. El *SAFe* contiene un elemento clave conocido como el tren ágil, el cual es un equipo de equipos que entrega soluciones incrementales de valor, de manera regular y predecible.

Una revisión bibliográfica sobre marcos escalados como *SAFe* indica que el número de empresas que los adoptan ha aumentado considerablemente en los últimos años [10]. Asimismo, algunos estudios han aportado información sobre el uso de metodologías ágiles en grandes organizaciones. Sin embargo, esta documentación no ha sido revisada a conciencia para determinar la adopción y el uso real de dichos marcos [10]. Además, algunos estudios no incluyen lo que se conoce como literatura gris —aquella documentación científica que, si bien reporta resultados originales de investigación, no se distribuye a través de los canales formales de publicación reconocidos internacionalmente— [12]. En consecuencia, se ha excluido una parte importante de la información disponible sobre los marcos de escalado, lo que genera una visión incompleta, ya que la literatura de investigación actual sobre estos marcos es limitada [10].

Metodología de investigación

La investigación propone la utilización de una metodología cualitativa, con un enfoque descriptivo-exploratorio, dado que busca comprender y analizar las percepciones de los equipos ágiles sobre la implementación del marco *Scrum* en un entorno empresarial que aplica *SAFe* (*Scaled Agile Framework*). De esta forma, se identifican patrones de percepción para contrastarlos con hallazgos de la literatura académica. La documentación oficial del *SAFe® Framework* se mantiene en actualización continua por Scaled Agile, Inc.; por ello, en este trabajo se cita la versión vigente al momento de la consulta.

Como resultado de esta investigación se hizo un estudio de caso único, centrado en una organización específica. Se adopta un diseño no experimental, basado en el análisis documental y en la organización de los datos en temas y patrones recurrentes, con la finalidad de interpretar los comentarios recopilados durante las retrospectivas de los Incrementos de Programa (PI).

El objeto de estudio corresponde a la práctica y adopción de metodologías ágiles, particularmente *Scrum*, dentro del Departamento TI Económica y Financiera del Banco de Central de Costa Rica, que opera bajo el marco escalado *SAFe*.

El grupo de estudio está constituido por los equipos de desarrollo participantes del *Agile Release Train (ART)* del departamento, con una participación promedio de entre 9 y 14 equipos por sesión de retrospectiva.

Por consiguiente, se tiene como contexto temporal el periodo comprendido entre el 22 de enero de 2024 y el 18 de febrero de 2025, mientras que el contexto espacial corresponde al entorno de trabajo del Banco de Central de Costa Rica, en su modalidad remota.

Para la recolección de datos se utilizaron pizarras colaborativas digitales (Azure DevOps, Miro, Mural) empleadas durante las retrospectivas de cierre de los *Program Increments*. En estas sesiones, entre 51 y 73 personas —*Scrum Masters*, *Product Owners*, desarrolladores, analistas de negocio, entre otros— compartieron percepciones

En las sesiones se utilizaron dinámicas estructuradas con preguntas abiertas que giraron en torno a tres ejes: ¿Qué funcionó bien? ¿Qué no funcionó? ¿Qué se puede mejorar?

Los participantes compartieron sus opiniones mediante notas virtuales tipo “*sticky notes*”. Se recopiló un total de 282 entradas que fueron categorizadas en tres dimensiones: Aspectos positivos: beneficios o elementos valorados de la práctica ágil. Aspectos negativos: barreras, tropiezos o disfunciones observadas. Aspectos por mejorar: oportunidades de cambio a futuro.

Los 282 comentarios fueron analizados mediante un proceso de codificación abierta línea por línea, es decir leer cada comentario, frase y asignarle una etiqueta o código por línea que capture la idea central que expresa. Posteriormente, estos códigos fueron reorganizados mediante codificación axial para volver a unir esas piezas buscando relaciones entre ellas. El proceso analítico siguió los principios del análisis cualitativo de contenido, adaptado al contexto del estudio [13].

Se mantuvo un *audit trail*, en la trazabilidad del proceso analítico, donde se documentaron de forma continua las decisiones, la evolución de los códigos y los criterios utilizados para agruparlos en familias y temas. Asimismo, se incorporó un ejercicio de reflexividad, registrando posibles influencias derivadas de la experiencia del investigador en entornos ágiles y tomando medidas para minimizar sesgos interpretativos.

El estudio se realizó respetando los principios éticos de confidencialidad, anonimización y uso responsable de información institucional. Los datos analizados provienen de retrospectivas internas de un departamento de la División de Servicios Tecnológicos del Banco Central de Costa Rica. No incluyen información sensible ni permiten la identificación de personas o equipos organizacionales. La autorización para el uso académico de estos insumos fue otorgada por el director de la división de tecnologías, considerando que el manuscrito tiene un fin estrictamente investigativo y no compromete información estratégica. Todos los comentarios fueron anonimizados y tratados de forma agregada, garantizando la protección de la identidad y privacidad de los participantes. La identificación del departamento y del banco se realizó exclusivamente como parte de la descripción contextual del estudio, sin incluir información operativa o sensible de la institución.

Resultados

Los resultados conseguidos con el primer análisis nacen del análisis de siete retrospectivas del *program increment* (PI) de SAFe. De nueve a catorce equipos participaron en cada sesión, con un promedio de 51 a 73 personas —*Scrum Masters*, *Product Owners*, desarrolladores— por retrospectiva. Se recopilaron y analizaron 282 comentarios, los cuales fueron organizados en tres categorías: aspectos positivos, aspectos por mejorar y aspectos negativos, con base en su contenido y en la frecuencia con que fueron mencionados por los participantes.

Aspectos positivos

Como se observa en el cuadro 1, el alineamiento de equipos, la visibilidad y la comunicación concentraron la mayor frecuencia de menciones, seguidas por aspectos relacionados con la dinámica de las sesiones y el cumplimiento de objetivos.

Cuadro 1. Aspectos positivos

Tema	Menciones
Alineamiento de equipos, visibilidad y comunicación	29
Tiempo de las sesiones y participación más fluida	28
Cumplimiento de objetivos	21
Apoyo, participación y comunicación con el negocio	17
Trabajo en equipo	14
Buena participación de los miembros del equipo	11
Visión a mediano plazo	9
Identificación de riesgos y dependencias	6
Compromiso de los equipos	6
Resiliencia ante cambios	4
Entendimiento del SAFe	3
Capacitación	3
Redacción de los objetivos	5
Refinamiento de historias	1
Apoyo de otros trenes	1

Nota: Frecuencia de menciones en aspectos positivos

Aspectos por mejorar

Los datos del cuadro 2 revelan que los participantes valoraron especialmente los elementos vinculados a uso del tiempo y “demos”, mayor compromiso, asistencia de los dueños de producto y requerimientos bien definidos.

Cuadro 2. Aspectos por mejorar

Tema	Menciones
Uso del tiempo y temas vistos (demos)	21
Más compromiso de los Product Owners	16
Requerimientos bien definidos	11
Redacción de los objetivos	8
Coordinación y planificación previa	8
Clasificación de los riesgos	4
Planificación para 4 iteraciones (cambio frecuente)	4
Entendimiento del SAFe	3
Diferencias entre Product Owners	3
Estimaciones	2
Más tiempo para definición de requerimientos	2
Otros (menciones únicas)	5

Nota: Frecuencia de menciones en aspectos por mejorar

Aspectos negativos

Pese a que hubo una menor cantidad de aspectos negativos, se reportaron elementos relacionados con las interrupciones durante las sesiones o participaciones fuera de lugar, la ausencia de algunos dueños de producto. En resumen, en el cuadro 3 se puede apreciar que el ítem más mencionado fue participaciones muy extensas de los equipos.

Cuadro 3. Aspectos negativos

Tema	Menciones
Participaciones muy extensas	6
Redacción de objetivos y riesgos	6
Participaciones fuera de lugar	4
Más tiempo con los Product Owners	4
Cambios en los objetivos o prioridades	4
Interrupciones innecesarias	3
Cambios en los equipos (curva de aprendizaje)	2
Sin participación de algunos Product Owners	1

Nota: Frecuencia de menciones en aspectos negativos.

Análisis visual

Como complemento al análisis manual, se optó por observar la misma fuente de datos desde una perspectiva distinta, se generaron nubes de palabras (*word clouds*), una técnica de análisis visual exploratorio basada en la frecuencia de aparición de términos o frases clave dentro del conjunto de comentarios recopilados.

La información de la Fig. 2, muestra que los resultados obtenidos robustecen los hallazgos del análisis temático inicial, lo complementan y lo refuerza visualmente, facilitando la identificación rápida de patrones lingüísticos recurrentes.



Figura 2. Nube de palabras sobre aspectos positivos.

Elaboración propia con base en la herramienta *Power BI*.

Como se detalla en la Fig., 3, existe una fuerte coincidencia con los resultados del análisis manual, destacando temas como el involucramiento del negocio, la necesidad de mayor concreción en las reuniones y la importancia de contar con requerimientos bien definidos antes del inicio del PI.

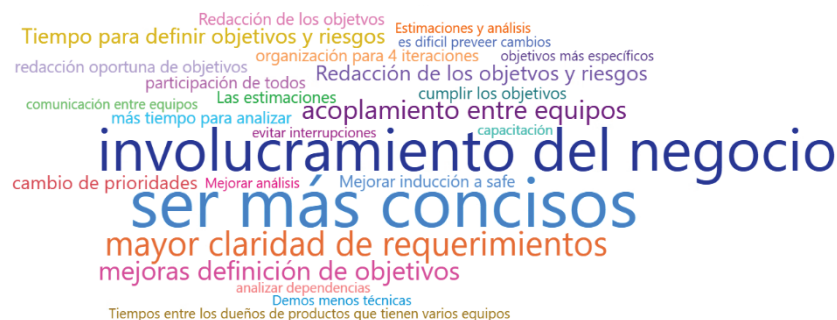


Figura 3. Nube de palabras sobre aspectos por mejorar.

Elaboración propia con base en la herramienta *Power BI*.

Por último, tal como se presenta en la Fig. 4, las observaciones recurrentes se basan en la extensión excesiva de algunas sesiones, lo que ha generado incomodidad, agotamiento o desinterés. También se evidencian dificultades en la redacción del trabajo comprometido del PI, así como la sugerencia de llevarlos previamente definidos para agilizar las dinámicas.

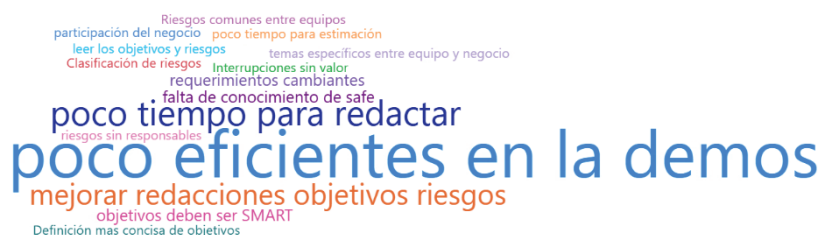


Figura 4. Nube de palabras sobre aspectos negativos.

Elaboración propia con base en la herramienta *Power BI*.

Discusión

Un aspecto repetido mencionado en las retrospectivas fue el alineamiento de equipos, lo que concuerda con el estudio presentado por Uludağ en el 2021 [10], donde encontraron como beneficios de la adopción de marcos de escalamiento ágiles, el mejorar la colaboración, la coordinación y la sincronización entre equipos ágiles que trabajan en el mismo producto. Incluso la documentación oficial de *SAFe*, indica que uno de los principios de *SAFe* estipula la relevancia de establecer ritmos regulares y sincronizados para el desarrollo, lo que ayuda a crear una organización ágil y eficiente [4]. ‘Finalizar el trabajo comprometido’, evaluado positivamente en las retrospectivas, se alinea con lo establecido en la documentación oficial de *SAFe*, donde los objetivos del PI representan compromisos clave que resumen el valor que los equipos planean entregar durante el ciclo [4].

El “apoyo, la participación y la comunicación con el negocio”, está relacionado con un seguimiento adecuado del *SAFe* y de forma subyacente con *Scrum* y su implementación adecuada, el cliente y el equipo de desarrollo definen de manera colaborativa el alcance y la planificación del proyecto; se involucra al cliente en la inspección de los resultados [2]. Desde otro punto de vista, se indica que la alineación en *SAFe* busca garantizar que los equipos trabajen hacia una meta común, de esta forma la alineación garantiza que todos estén unidos en torno a una meta común [14].

También se mencionó como positivo el aspecto de ‘el buen tiempo de las sesiones’ y que hubo ‘participación fluida de los participantes’, esto hace notar que hay salud, madurez del equipo y de las ceremonias. Las sesiones de *SAFe* están bien organizadas, se tiene una visión clara del resultado deseado y los participantes entienden su rol y la importancia de su contribución. Otro punto notorio fue la buena participación de los miembros del equipo que se puede relacionar con el principio de *SAFe* que pretende que los equipos estén comprometidos y contribuyan activamente en las ceremonias y actividades [4].

En primer lugar, sobre los aspectos por mejorar fue el uso del tiempo y los temas vistos durante las sesiones de demostración (demos), con 21 menciones. Esta situación sugiere deficiencias en la gestión del tiempo durante eventos clave de *SAFe*, como la demostración del sistema (*system demo*). La demostración del sistema presenta las novedades de la última iteración, mostrando el avance de los equipos en el tren y permitiendo la retroalimentación [4]. La percepción de uso ineficiente del tiempo podría reflejar la necesidad de reforzar las prácticas de sesiones anticipadas y coordinación de las demostraciones, tal como también recomienda uno de los creadores del *Scrum* cuando indica que el tiempo no es infinito por lo que recomienda dividir el trabajo en lo que se pueda hacer en un período corto, hasta que se le haga una costumbre [5]. De ahí la importancia de ceremonias ágiles concisas y encauzadas.

En segundo lugar, de las áreas por mejorar están el compromiso y participación de los *Product Owners* que fue mencionado en 16 ocasiones. Esta observación es consistente con lo indicado por otro estudio donde se indica que se debe trabajar de una forma cercana todo el equipo -dueños de producto y desarrolladores- a lo largo del proyecto [15].

En relación con los aspectos negativos detectados en las retrospectivas, se observaron principalmente problemas asociados a la dinámica de las sesiones de planificación y coordinación, así como a la participación de algunos roles clave. El tema más mencionado fue la extensión excesiva de las participaciones de los equipos (6 menciones), seguido por la necesidad de mejorar la redacción de los objetivos y riesgos (6 menciones) y las interrupciones fuera de lugar durante las sesiones (4 menciones). Estos resultados son consistentes con las advertencias de Sutherland en su obra del 2014 sobre el riesgo de que las ceremonias ágiles pierdan efectividad cuando no se manejan de manera concisa y enfocada [5].

Aporte académico del estudio: los hallazgos de este estudio enriquecen la literatura sobre Scrum y SAFe desde una perspectiva empírica, al recoger las percepciones de equipos que trabajan con ambos marcos de forma simultánea en un entorno organizacional real. A diferencia de investigaciones de corte teórico, este trabajo explora cómo se viven las prácticas ágiles en la operación diaria de un Agile Release Train, documentando tensiones, coincidencias y desafíos con datos cualitativos internos. Entre los aportes más notables destaca la comprobación de que las fallas atribuidas a Scrum obedecen principalmente a implementaciones incompletas y no a limitaciones del marco en sí. El estudio también identifica factores clave para la efectividad ágil —participación del negocio, claridad de requerimientos, gestión del tiempo y compromiso con las ceremonias—. De esta forma se contribuye a comprender mejor cómo se materializan los principios ágiles en entornos escalados

Conclusiones

Los hallazgos indican que, cuando *Scrum* y *SAFe* son aplicados con un compromiso legítimo y con una comprensión adecuada de sus principios, pueden generar sinergia, colaboración interequipos y resultados positivos en la entrega de valor. Empero, la investigación también reveló fricciones relacionadas con la participación del negocio, la ambigüedad en los requerimientos y las limitaciones en la planificación.

Primeramente, los aspectos positivos destacados por los equipos incorporan la coordinación efectiva entre miembros del tren de *SAFe*, el acompañamiento del negocio, la planificación colaborativa, y el cumplimiento de objetivos de las iteraciones de Scrum. Estos elementos son coherentes con los pilares de *Scrum*: transparencia, inspección y adaptación. Tal como lo sugieren estos principios la esencia de *Scrum* radica en la inspección y adaptación continua, durante la ejecución de un proyecto es fundamental evaluar de forma regular si el rumbo es el adecuado y si el resultado cumple con las expectativas, de esta manera se impulsa la reflexión sobre cómo optimizar el proceso y eliminar impedimentos [5].

Inclusive los hallazgos positivos también reafirman que la metodología puede funcionar eficazmente cuando se respeta su marco teórico y se da espacio a la mejora continua.

En contraste, los aspectos por mejorar revelan desafíos persistentes como la ambigüedad en los requerimientos, la baja participación del negocio en ciertos equipos, y la dificultad para gestionar el tiempo y la planificación en ciclos de trabajo ajustados. Estos hallazgos coinciden con críticas previas a *Scrum* y *SAFe*, en las que se señala que la metodología puede volverse rígida o burocrática si se aplica mecánicamente y no de manera adaptativa. Con respecto a la gestión del tiempo, Scrum fundamenta su práctica en el *timeboxing*: los sprints y sus eventos poseen duración máxima predefinida, lo que favorece el foco, la finalización del trabajo actual

y ciclos breves de inspección y adaptación que sostienen la mejora continua. Esta lógica está establecida en la Scrum Guide y descrita en detalle por Rubin al caracterizar los sprints como timeboxed y consistentes en longitud [16] .

Recomendaciones

Como implicación práctica, este estudio sugiere que la formación continua, la apropiación de los roles y la claridad en la planificación son factores clave para que los marcos ágiles generen valor. Para las organizaciones que buscan escalar la agilidad, es fundamental establecer mecanismos que fomenten la inspección y la adaptación no solo en el equipo, sino también en los procesos organizacionales y en la cultura del liderazgo.

La documentación de *SAFe* propone que de acuerdo con el Manifiesto Ágil se promueve la mejora continua a través de un principio que anima a los equipos a analizar su funcionamiento y a realizar ajustes para ser más eficientes.

A nivel metodológico, la clasificación temática de los datos recolectados por medio de pizarras colaborativas digitales mostró ser una herramienta útil y eficiente para identificar patrones y generar conocimiento empírico sobre la experiencia de los equipos. Esto refuerza la validez de aplicar métodos cualitativos en investigaciones sobre agilidad organizacional.

En términos de contribución académica, este trabajo se suma a la literatura que indica que los marcos ágiles no son una solución universal ni automática, y que su éxito depende en gran medida del contexto, del compromiso con los valores ágiles y del seguimiento disciplinado de sus prácticas.

Referencias

- [1] J. D. Yepes González, C. . J. Pardo Calvache and O. . S. Gómez Gómez, "Revisión sistemática acerca de la implementación de metodologías ágiles y otros modelos en micro, pequeñas y medianas empresas de software," *Revista Tecnológica - ESPOL*, vol. 25, no. 5, pp. 464-479, 2015.
- [2] C. Rodríguez and R. Dorado, "¿Por qué implementar Scrum?," *Revista Ontare*, vol. 3, no. 1, pp. 125-144, 2015.
- [3] K. Schwaber and J. Sutherland, "The Scrum Guide," 2020. [Online]. Available: <https://scrumguides.org/scrum-guide.html>. [Accessed 18 Mar 2026].
- [4] Scaled Agile, Inc., "SAFe® Framework," 2026. [Online]. Available: <https://scaledagileframework.com/>. [Accessed 18 Mar 2026].
- [5] J. Sutherland, *The Art of Doing Twice the Work in Half the Time*, New York: Crown Business, 2014.
- [6] Real Academia Española, "Diccionario de la lengua española," [Online]. Available: <https://dle.rae.es>. [Accessed 10 Feb 2025].
- [7] E. Solano Fernández and D. Porras Alfaro, "El modelo iterativo e incremental para el desarrollo de la aplicación de realidad aumentada Amón_RA," *Tecnología en marcha*, vol. 33, no. 8, pp. 165-177, 2020.
- [8] A. T. Karabulut and E. Ergun, "A new way of management: A scrum management," *International Journal of Commerce and Finance*, vol. 4, no. 2, pp. 108-117, 2018.
- [9] D. Koutsikouri, S. Madsen and N. B. Lindström, "Agile Transformation: How Employees Experience and Cope with Transformative Change," in *Agile Processes in Software Engineering and Extreme Programming – Workshops*, Cham, 2020.
- [10] Ö. Uludağ, A. Putta, M. Paasivaara and F. Matthes, «Agile Processes in Software Engineering and Extreme Programming (XP 2021),» in *Agile Processes in Software Engineering and Extreme Programming*, 2021.
- [11] E. Herrera Uribe and . L. E. Valencia Ayala, "Del manifiesto ágil sus valores y principios," *Scientia Et Technica*, vol. XIII, no. 34, pp. 381-386, 2007.
- [12] V. M. Mendoza-Núñez, "¿Cómo se define la literatura gris en el ámbito científico? Su importancia en las revisiones sistemáticas," *Casos y Revisiones de Salud (CyRS)*, vol. 4, no. 2, pp. 6-10, 2022.
- [13] A. Strauss and J. Corbin, *Basics of Qualitative Research: Techniques and Procedures for Developing Grounded Theory*, 2 ed., Thousand Oaks: Sage Publications, 1998.
- [14] A. Ben Salem, "Understanding the 4 SAFe Core Values," 2024. [Online]. Available: <https://scrum-master.org/en/4-safe-core-values/>. [Accessed 25 Feb 2025].
- [15] L. Valencia Ayala and E. Herrera Uribe, "Del manifiesto ágil sus valores y principios," *Scientia Et Technica*, vol. 13, no. 34, pp. 381-386, 2007.
- [16] K. S. Rubin, *Essential Scrum: A practical guide to the most popular Agile process*, Upper Saddle River: AddisonWesley, 2012.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

El autor aquí firmante declara que se consultó la herramienta de IA *MS Copilot* únicamente como apoyo para la descripción metodológica del análisis cualitativo (codificación abierta, trazabilidad y reflexividad). No procesó datos y el contenido fue revisado y validado totalmente por el autor.

Modelos y perspectivas en la adopción de tecnologías digitales disruptivas en pequeñas empresas rurales

Models and perspectives on the adoption of disruptive digital technologies in small rural enterprises

César Orlando Garita-Rodríguez¹, Jorge Alfaro-Velasco²,
Gaudy Gabriela Esquivel-Vega³, Abel Méndez-Porras⁴,
Eileen Barrantes-Barrantes⁵, Cynthia López-Valerio⁶, Jean
Carlos Miranda-Fajardo⁷, Cristian Campos-Agüero⁸

Fecha de recepción: 19 de agosto, 2025

Fecha de aprobación: 20 de enero, 2026

Garita-Rodríguez, C. O; Alfaro-Velasco, J; Esquivel-Vega, G.G;
MéndezPorras, A; Barrantes-Barrantes, E; López-Valerio, C;
Miranda-Fajardo, J.C; Campos-Agüero, C. Models and perspectives
on the adoption of disruptive digital technologies in small rural
enterprises. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 N° 3. Julio-Setiembre,
2026. Pág. 32-44.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i3.8154>

- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 cesar@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-4592-3266>
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 joalfaro@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-3076-4346>
- 3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 gesquivel@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0009-0008-9735-1208>
- 4 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 amendez@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-8038-7839>
- 5 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 ebarrantes@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-3159-3024>
- 6 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 cylopez@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-5632-339X>
- 7 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 jcmiranda@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0009-0004-4136-7201>
- 8 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 crcampos@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0009-0008-8039-4404>



Palabras clave

Transformación digital; pequeña empresa; revisión sistemática; tecnología avanzada; trabajo de investigación.

Resumen

La adopción de tecnologías novedosas por parte de pequeñas empresas rurales es un proceso necesario para lograr una mayor competitividad en los agresivos mercados de la actualidad. Muchas empresas requieren incrementar a corto plazo su nivel de madurez digital mediante la adopción de tecnologías disruptivas tales como inteligencia artificial, aplicaciones móviles, redes sociales, análisis de datos, internet de las cosas y servicios en la nube. Este artículo explora diferentes modelos y perspectivas sobre la adopción de tecnologías digitales disruptivas en pequeñas empresas rurales a nivel global. El artículo presenta una revisión sistemática de literatura de artículos científicos realizada con base en preguntas de investigación utilizadas para realizar una búsqueda bibliográfica en la base de datos SCOPUS. Los artículos resultantes fueron luego seleccionados y organizados en categorías para facilitar su análisis. Consecuentemente, el artículo resume los hallazgos más importantes de la revisión con respecto a: los principales retos que enfrentan las empresas con respecto a la adopción de nuevas tecnologías; las metodologías más usadas para evaluar la madurez digital; las métricas encontradas para medir el impacto de la adopción de nuevas tecnologías; las tecnologías innovadoras más comúnmente aplicadas para promover la transformación digital; y los casos de estudio relevantes sobre la adopción exitosa de tecnologías innovadoras. En particular, la información presentada sirve de apoyo a las pequeñas empresas rurales que enfrentan el reto de la transformación digital en países en desarrollo.

Keywords

Digital transformation; small enterprise; systematic review; advanced technology; research work.

Abstract

The adoption of novel technologies by small rural enterprises is a necessary process to achieve greater competitiveness in today's aggressive markets. These companies need to increase their digital maturity level in the short term through the adoption of disruptive technologies such as artificial intelligence, mobile applications, social networks, data analysis, the internet of things, and cloud services. This article explores different models and perspectives on the adoption of disruptive digital technologies in small rural enterprises worldwide. The article presents a scientific systematic literature review carried out based on specific research questions, which served as a base to perform a bibliographic search on the SCOPUS database. The resulting articles were selected and organized into specific categories to facilitate their analysis. Consequently, the most important findings of the review are summarized in regards to: the main challenges that companies face regarding the adoption of new technologies; the most used methodologies to assess digital maturity; the metrics designed to measure the impact of the adoption of new technologies; the most commonly applied innovative technologies to promote digital transformation; and relevant case studies regarding the successful adoption of innovative technologies. The presented work aims to assist small rural enterprises facing the challenge of digital transformation in developing countries.

Introducción

La Transformación Digital (TD) se ha convertido en un aspecto crucial para las organizaciones que buscan adaptarse a mercados globales que evolucionan aceleradamente. Incluso algunas empresas tradicionales han colapsado debido al crecimiento de empresas con el uso de competencias digitales. Por tanto, obtener y adaptar adecuadamente Tecnologías Digitales Disruptivas (TDD) se convierte en una necesidad real para mejorar la competitividad y la resiliencia de las empresas ante desafíos constantes.

Aunque la Transformación Digital ha tenido un impacto positivo en el desempeño y el crecimiento empresarial, también existen muchos obstáculos que pueden impedir que una pequeña empresa adopte e implemente tecnologías digitales disruptivas. En particular, las pequeñas empresas rurales de Costa Rica enfrentan retos significativos tales como: limitaciones en infraestructura, altos costos de implementación y falta de conocimiento técnico. Estos factores dificultan el acceso a tecnologías clave como servicios en la nube, inteligencia artificial, internet de las cosas, analítica de datos avanzada, entre otras.

En este contexto, este artículo se deriva del proyecto de investigación “Desarrollo de Capacidades Tecnológicas en Empresas Rurales de la Zona Norte de Costa Rica mediante la Adopción de Tecnologías Digitales Disruptivas”, cuyo objetivo principal es fortalecer las capacidades tecnológicas de las empresas rurales de la zona norte de Costa Rica (ver también [1], [2]). Para alcanzar este objetivo, una de las primeras actividades propuestas consiste en realizar una revisión sistemática de literatura científica y estudios de caso previos sobre digitalización en zonas rurales, así como analizar marcos teóricos existentes para definir capacidades digitales y tecnologías disruptivas aplicables a las empresas rurales.

En particular, este artículo presenta una revisión sistemática de diferentes metodologías, modelos y perspectivas aplicadas para la adopción de tecnologías digitales disruptivas en pequeñas empresas rurales a nivel global. El resto del artículo está estructurado de la siguiente forma. La segunda sección describe la metodología tomada como referencia para realizar la revisión de literatura, incluyendo: la definición de preguntas de investigación, conformación de cadenas de búsqueda sobre una base de literatura científica, y selección y clasificación de artículos examinados. La tercera sección provee un análisis de los principales resultados obtenidos al analizar las respuestas a las preguntas de investigación aplicadas a todos los artículos revisados. Finalmente, la cuarta sección resume las conclusiones y hallazgos más importantes que se derivan de la revisión general, así como las perspectivas del trabajo futuro en el seno del proyecto de investigación mencionado.

Metodología

Para realizar la revisión sistemática de literatura con el enfoque antes mencionado, primero se definieron las preguntas de investigación que sirven de guía para el estudio. Concretamente, las preguntas establecidas fueron las siguientes:

- P1. ¿Cuáles son los principales desafíos de las pequeñas y medianas empresas rurales con respecto a la adopción de nuevas tecnologías digitales?
- P2. ¿Cuáles son las principales metodologías para medir la madurez digital de pequeñas y medianas empresas rurales?
- P3. ¿Qué métricas se utilizan para medir el impacto de la adopción de nuevas tecnologías en pequeñas y medianas empresas rurales?
- P4. ¿Cuáles son las principales tecnologías innovadoras que se utilizan para promover la transformación digital de las empresas objetivo?

- P5. ¿Qué casos de estudio se identifican con respecto a la adopción exitosa de tecnologías innovadoras en empresas rurales en áreas productivas relevantes?

Con base en el texto de estas preguntas, se conformó una cadena de búsqueda con términos en inglés para cada una de ellas. Las cadenas de búsqueda fueron revisadas y probadas preliminarmente sobre la base de datos a utilizar: Scopus [3]. Se escogió esta base de datos principalmente por su extensa cobertura de fuentes de artículos de calidad relacionados con tecnología, además de que se cuenta con una suscripción institucional disponible para los autores. Teniendo en cuenta la cadena de búsqueda construida mediante la unión de las cadenas de las preguntas individuales, se realizó la consulta en Scopus y se revisaron alrededor de 150 artículos utilizando estos criterios de inclusión:

- Periodo: artículos publicados en los últimos 5 años.
- Idioma: publicaciones en inglés y en español.
- Tipo de documento: artículos científicos, revisiones de literatura, estudios de caso y documentos relevantes como tesis de posgrado.
- Temática central: artículos indexados por palabras clave en la cadena de búsqueda.
- Base de datos: trabajos indexados en Scopus.

Con base en este conjunto inicial, se aplicaron criterios de exclusión tales como:

- Falta de relevancia: documentos que no tienen una relación directa con la transformación digital en el ámbito rural.
- Tamaño de las empresas: trabajos más enfocados en empresas grandes.
- Accesibilidad: documentos que no estén disponibles a través de suscripción institucional o fuentes abiertas.

De esta forma, se seleccionaron 25 trabajos que cumplen con los criterios anteriores. También se complementó la lista original de artículos con otros artículos o documentos adicionales, como, por ejemplo, tesis de posgrado almacenadas en repositorios institucionales, obtenidos mediante la técnica de búsqueda hacia adelante, es decir, identificando artículos más recientes que han sido citados por un artículo seleccionado. Los artículos finalmente seleccionados (30 en total) fueron examinados en detalle y se elaboró una tabla resumen con las respuestas a las preguntas de investigación previamente establecidas, así como con información adicional de referencia para cada artículo. Los documentos fueron clasificados de acuerdo con las siguientes categorías según el propósito principal de la investigación:

- Revisión de literatura: el artículo busca sintetizar y evaluar el conocimiento existente sobre un tema en particular relacionado con la adopción de tecnologías en las empresas.
- Estudio de caso: describe un ejemplo y las lecciones aprendidas de un proceso de transformación tecnológica en un contexto real en un sector o región industrial determinado.
- Metodologías y modelos: propone, introduce o describe nuevas estrategias, modelos, marcos o herramientas relacionados con la adopción de TI en empresas.
- Análisis específico: tiene como objetivo diagnosticar, explorar, analizar, examinar o investigar diferentes aspectos de la transformación digital en las empresas.
- A continuación, en el Cuadro 1 se presenta una tabla que resume el flujo de selección de los artículos para la revisión sistemática de literatura, estructurada según las fases metodológicas descritas.

Cuadro 1. Resumen de metodología de selección de artículos.

Fase	Actividad	Descripción / criterios principales	Resultados
Identificación	Búsqueda inicial en Scopus	Aplicación de cadenas de búsqueda en inglés basadas en las preguntas P1-P5.	~150 artículos
Selección Inicial	Aplicación de criterios de inclusión	Periodo: últimos 5 años. Idiomas: inglés y español. Documento: artículos, revisiones, casos y tesis. BD: Scopus.	Artículos potenciales
Evaluación de Elegibilidad	Aplicación de criterios de exclusión	Falta de relevancia: sin relación con lo rural. Tamaño: enfoque en grandes empresas. Acceso: sin disponibilidad de texto completo.	25 artículos seleccionados
Ampliación	Búsqueda hacia adelante	Identificación de artículos recientes que citan a los seleccionados y búsqueda en repositorios institucionales.	+5 documentos adicionales
Inclusión Final	Muestra Total	Artículos seleccionados y clasificados para análisis detallado subsecuente.	30 artículos

Resultados

En esta sección se describen los principales resultados obtenidos al analizar los artículos seleccionados según la clasificación de artículos definida, es decir, esta sección se divide en las siguientes subsecciones: revisiones de literatura, estudios de casos, metodologías de referencia y análisis de aspectos específicos.

Revisiones de literatura

A pesar de que es posible encontrar múltiples revisiones de literatura sobre el tema, aún existe mucha incertidumbre acerca del significado de “Transformación Digital” y lo que este concepto abarca. Por tanto, es importante basarse en conocimiento previo sobre cambio organizacional para comprenderlo adecuadamente e identificar mejores prácticas y enfoques con el fin de gestionarlo de forma adecuada.

En ese sentido, en el artículo [4] se realiza una revisión sistemática en el área de transformación digital con el propósito de identificar implicaciones para estrategias de cambio organizacional. El estudio define varias perspectivas o lentes, como por ejemplo, impacto tecnológico, para clarificar el problema o las limitaciones para investigar el concepto de transformación digital desde la perspectiva del cambio organizacional. Además, se revisa la necesidad de acelerar la transformación digital para sobrellevar cambios turbulentos en los ecosistemas de negocios, como lo evidenció la pandemia. Estos cambios incluyen nuevos modelos de entrega de servicio y de manejo de relación con el cliente, participar en ecosistemas para desarrollar productos digitales novedosos y satisfacer altas demandas de órdenes de compra en línea.

Según el enfoque seguido en [5], a través de una revisión sistemática de la literatura, se identifican factores determinantes según el marco TOE (Tecnología, Organización, Entorno), que explican por qué las PYMES se quedan atrás de las grandes empresas en la adopción de la industria 4.0 (I4.0). Como resultado, se desarrolla una hoja de ruta de digitalización que describe las condiciones necesarias para facilitar la transformación digital de las PYMES bajo la I4.0, destacando factores cruciales como las competencias en términos de conocimiento y la disposición para la digitalización de la cadena de valor. Algunos de los factores identificados que pueden afectar la adopción de tecnologías nuevas incluyen: barreras de carácter sociocultural, la falta de conectividad en las zonas rurales, el costo de la tecnología, y cuestiones regulatorias (gobernanza).

En [6], se provee una revisión sistemática de literatura de cerca de 300 publicaciones en alemán e inglés referentes a modelos de madurez existentes para la Industria 4.0. Se identifica una lista de modelos específicos que luego son categorizados y evaluados según su enfoque y aplicabilidad en las PYMES. El uso de estos modelos es valioso para las empresas, pues les permite implementar una estrategia de digitalización con base en los recursos y capacidades disponibles. El estudio permite identificar características clave de los modelos de madurez de la Industria 4.0 que pueden servir como base para desarrollar una evaluación específica hacia la adopción de la siguiente Industria 5.0.

Finalmente, en [7] se presenta un estudio relacionado con la digitalización en zonas rurales que aborda la intersección entre políticas públicas, tecnología e infraestructura. Destaca el rol de la colaboración intersectorial y el acceso a recursos digitales como catalizadores para superar las limitaciones de las áreas rurales. Se analizan los desafíos de construir ecosistemas emprendedores en lugares periféricos, vinculando la literatura sobre ecosistemas emprendedores con estudios sobre regiones periféricas. Además, presenta un marco conceptual para el desarrollo de ecosistemas en estas regiones, destacando los desafíos de recursos limitados, lejanía y falta de conectividad, pero resaltando cómo las tecnologías digitales pueden mitigar estas barreras a través de un enfoque colaborativo. En [8] y [9] también se presentan modelos clásicos pero aún vigentes de redes de colaboración entre empresas pequeñas que se unen para desarrollar un nuevo producto o servicio, así como soluciones de integración tecnológica basadas en flujos de trabajo.

Finalmente, el trabajo descrito en [10] tiene como objetivo alcanzar una comprensión más clara de la adopción de TI en las PYMES mediante una revisión de la literatura, incluyendo teorías, estudios empíricos y estudios de caso provenientes de varias bases de datos bibliográficas. Se destaca que las PYMES adoptan TI para aprovechar beneficios para sus negocios, pero su proceso de adopción difiere de las organizaciones más grandes debido a las limitaciones de recursos. El estudio también propone un modelo de adopción de TI eficaz para ayudar a gerentes, proveedores, consultores y gobiernos a integrar con éxito la TI dentro de las PYMES.

Estudios de casos

Según los estudios de casos analizados, la transformación digital representa una oportunidad determinante para fortalecer la competitividad y sostenibilidad de las pequeñas y medianas empresas (PYMES) en contextos rurales. Sin embargo, su implementación no depende exclusivamente de la disponibilidad de tecnologías, sino también de factores estructurales, organizativos y culturales que condicionan su adopción de forma efectiva.

Diversos estudios coinciden en que una de las principales limitaciones para avanzar en procesos de transformación digital en PYMES es la falta de alineación entre la visión estratégica de los líderes empresariales y las herramientas tecnológicas que se implementan en las empresas. Por ejemplo, en [11] a partir de una encuesta a más de 1.500 gerentes en Suiza, se identifica una desconexión entre los niveles directivos y operativos en cuanto a la adopción digital, destacando la necesidad de una comprensión organizacional profunda para avanzar en la madurez digital.

Desde un enfoque más estructural, los autores de [12] exploran cómo la brecha digital impacta la adopción tecnológica en empresas agroindustriales en Gales. Mediante un análisis de clúster, clasifican a las empresas según su nivel de integración digital y concluyen que sin infraestructura de banda ancha adecuada, incluso las iniciativas con mayor potencial pueden estancarse.

Complementando este enfoque, en [13] se analiza la correlación entre estructura organizacional y adopción tecnológica en PYMES italianas, concluyendo que la implementación de tecnologías 4.0 exige estructuras ágiles y una fuerte inversión en competencias interpersonales. Este análisis invita a considerar la transformación digital no solo desde la tecnología, sino desde la gestión del cambio humano.

Desde una perspectiva estratégica, los autores de [14] exploran cómo las PYMES de sectores tradicionales italianos utilizan herramientas digitales para innovar en sus modelos de negocio y crear mayor valor para el cliente. Este enfoque resalta que la transformación digital también puede ser una oportunidad para repensar la identidad de marca, reforzar la narrativa territorial y diferenciarse globalmente.

La experiencia de Finlandia, documentada por [15], muestra cómo talleres adaptados a la realidad rural de las empresas pueden fomentar actitudes positivas hacia la tecnología. La confianza, el liderazgo local y la comunicación son factores clave para generar impacto más allá de las herramientas tecnológicas utilizadas. Esto sugiere que los procesos de adopción deben construirse desde abajo, con metodologías inclusivas y contextualizadas.

Ante visiones tecnocéntricas o guiadas por disrupciones externas, en [16] se plantea una reflexión crítica sobre la importancia de adaptar la transformación digital a los procesos reales de las PYMES, priorizando intervenciones progresivas y tecnologías simples alineadas con las capacidades internas. En este estudio, se demuestra cómo soluciones accesibles tales como macros en hojas de cálculo o lectores de códigos QR, pueden generar avances significativos en eficiencia y madurez digital, si se implementan de forma coherente con la operación diaria de la empresa.

Esta perspectiva se alinea con los hallazgos de [17] en el contexto cafetero colombiano, donde se destaca que la transformación digital no puede desligarse del territorio, la cultura y las capacidades operativas locales. En este trabajo se indica que las políticas públicas deben ser integrales, contemplando la conectividad, la alfabetización digital y la identidad regional como dimensiones clave para cerrar la brecha tecnológica rural.

Estos estudios refuerzan la necesidad de replantear el enfoque de la transformación digital desde una lógica centrada en la empresa, en donde el éxito no reside en la sofisticación de la tecnología adoptada, sino en la capacidad de su integración con sentido y coherencia al tejido productivo y social de las regiones.

Metodologías y modelos

En la revisión de literatura también se identificaron diversas metodologías de referencia orientadas a evaluar, guiar o facilitar la adopción de tecnologías digitales disruptivas en pequeñas empresas. Estas metodologías comparten un enfoque estructurado que permite valorar el nivel de madurez digital, identificar brechas tecnológicas y diseñar estrategias adaptadas al contexto específico de las organizaciones, especialmente en entornos rurales con recursos limitados [5].

Por ejemplo, en [18] el trabajo se centra en los desafíos que enfrentan las PYMES en la India durante el proceso de implementación de Tecnologías de la Información. La investigación pone de manifiesto que la literatura existente no aborda adecuadamente los factores de disposición organizacional (“readiness factors”, en inglés) específicos de este contexto. Para suplir esta carencia, se empleó una metodología mixta —que incluyó entrevistas y encuestas— con el fin de desarrollar y validar un marco conceptual que analiza los antecedentes de dicha disposición. Un hallazgo clave fue la influencia determinante del impulso y la motivación de los propietarios

o líderes empresariales para iniciar la preparación tecnológica. El marco conceptual propuesto ofrece implicaciones prácticas para que las PYMES fortalezcan su competitividad a través de una adopción estratégica de TI.

Otro trabajo destacado descrito en [19], tiene como propósito proporcionar lineamientos o guías para que las PYMES identifiquen y aprovechen oportunidades de crecimiento impulsadas por la digitalización. El marco metodológico desarrollado constituye una herramienta práctica que permite a los propietarios o gerentes evaluar el estado actual de madurez digital de sus empresas. La guía provista establece una línea base clara desde la cual se pueden diseñar planes de acción y priorizar iniciativas de transformación tecnológica.

Asimismo, en [20] se realizó un estudio centrado en el análisis de los factores que influyen en la adopción de TIC en PYMES de países en desarrollo, tomando como caso de estudio Bangladesh. Este trabajo propone un modelo conceptual que integra el marco TOE (Tecnológico, Organizacional y del Entorno) con la teoría de Difusión de la Innovación (DOI). A partir de una muestra de más de 500 PYMES, se concluye que variables como el beneficio relativo, la complejidad percibida, el costo, el respaldo de la alta dirección, la presión competitiva y el apoyo gubernamental desempeñan un papel decisivo en el proceso de adopción tecnológica.

Por otra parte, un artículo centrado en empresas manufactureras japonesas analiza los retos de la adopción de tecnologías asociadas a la Industria 4.0 [21]. En este caso, se diseñó un modelo de adopción tecnológica que fue validado empíricamente con 38 empresas. Los resultados indican que la incertidumbre del mercado actúa como un motor clave en las decisiones de adopción tecnológica. Además, la ventaja competitiva de una empresa es especialmente influyente en el corto plazo, mientras que el compromiso de la alta dirección adquiere mayor relevancia en el largo plazo.

Por último, en [22] se señala que los modelos actuales de madurez tecnológica no resultan adecuados para evaluar a muchas PYMES que se encuentran en etapas iniciales de digitalización. En respuesta a esta limitación, se propone un modelo de madurez específico para este tipo de empresas, capaz de ofrecer una evaluación detallada en todas las dimensiones de la Industria 4.0. Este modelo se destaca por su nivel de especificidad en los niveles iniciales, lo cual facilita diagnósticos más precisos.

Análisis específicos

Existen muchos artículos que buscan explorar o investigar aspectos específicos de la transformación digital en las empresas. En particular, según una de las experiencias identificadas en la revisión de literatura, se resalta la importancia de aplicar la digitalización en todas las áreas del negocio para mejorar la competitividad de las PYMES [23]. Para esto se plantea la necesidad de una visión holística, con una estrategia de digitalización que integre los esfuerzos para una transformación integral y sostenible a largo plazo. Una visión estratégica que faculte a las PYMES a identificar necesidades y superar los desafíos para aprovechar las oportunidades les permitirá mantenerse en el mercado para continuar su crecimiento. El estudio se enfoca en la identificación de la existencia de esta estrategia en las empresas y la forma en que la han estructurado.

Por otro lado, con un enfoque en los procesos de negocios de PYMES manufactureras ubicadas en la región de Apulia en Italia, en este artículo se analiza el impulso que han tenido las tecnologías digitales en las empresas [24]. Como parte de los resultados, se identifican como determinantes para la adopción digital, los siguientes cuatro niveles: conciencia, colaboración, consulta y transformación digital. Asimismo, se destaca la necesidad de plantear una hoja de ruta para esta transformación, impulsada desde las gerencias y los emprendedores. Este planteamiento aplica de manera particular cuando el nivel de madurez digital identificado es bajo.

Desde otro punto de vista, un estudio aplicado a 190 PYMES en Dinamarca arrojó que el principal obstáculo para la adopción de la industria 4.0 no está tan relacionado con barreras técnicas, sino más bien con las percepciones limitadas de los directivos sobre los beneficios que podrían obtener con estos procesos de transformación [5]. Se señala también que la adopción de la industria 4.0 se facilita cuando hay claridad en la percepción del valor de estas transformaciones tecnológicas en los negocios.

Por otra parte, esta investigación analizó los factores que influyen en la decisión de las PYMES del estado de Brandeburgo, Alemania, para implementar eficazmente tecnologías digitales [25]. Con base en una encuesta a cincuenta PYMES en el área de manufactura, y un estudio de caso en tres de ellas, se encontró que la gran mayoría de las empresas prioriza la implementación de sistemas de planificación de recursos empresariales al invertir en tecnologías rentables.

Finalmente, en un estudio aplicado a empresas relacionadas con el turismo cultural cafetero en la región de Quindío en Colombia, se identificaron factores clave para aplicar tecnologías innovadoras viables y pertinentes en este sector [26]. Cabe destacar que el estudio incluyó también casos de éxito en otros destinos culturales para determinar qué sistemas digitales eran viables en el sector de interés. El estudio plantea que con los resultados obtenidos, no solo se pretende apoyar a las empresas del sector, sino también a los profesionales encargados de diseñar y mantener las tecnologías necesarias.

Para reforzar los resultados obtenidos, se resumen a continuación los principales hallazgos identificados en cuanto a convergencias, divergencias y vacíos en la literatura revisada:

- Existe un consenso en que la transformación digital no es un fenómeno puramente tecnológico, sino un proceso multidimensional donde el factor humano y la visión estratégica son determinantes. La literatura coincide en que el compromiso y la motivación de la alta dirección actúan como uno de los motores principales para iniciar el cambio. Además, la falta de infraestructura básica y las limitaciones financieras representan barreras universales que frenan la competitividad de las PYMES rurales en diversas regiones.
- El análisis revela enfoques diferentes con respecto a la adopción de soluciones con diversos grados de complejidad inherente. Por ejemplo, algunos casos estudiados se orientan hacia enfoques sofisticados basados en marcos de referencia como la Industria 5.0, en tanto que otros prefieren adoptar herramientas simples y accesibles adaptadas a la operación de empresas con recursos más limitados.
- Se observa una carencia de modelos de madurez específicos para organizaciones en etapas iniciales de digitalización, ya que la mayoría de los marcos existentes son demasiado avanzados para la realidad de muchas empresas pequeñas. Además, existe un vacío en la medición de indicadores clave del impacto real a largo plazo de la adopción de la transformación digital en las empresas.

Conclusiones

Con base en la revisión detallada de los artículos seleccionados, se pueden concluir las siguientes respuestas a las preguntas de investigación formuladas inicialmente:

- Respuesta a P1. Los principales desafíos a los que se enfrentan las pequeñas y medianas empresas rurales en lo que respecta a la adopción de nuevas tecnologías digitales pueden clasificarse en aspectos TOE (tecnológicos, organizacionales y ambientales). Aspectos tecnológicos incluyen principalmente la falta de infraestructura, la alta complejidad y la difícil integración de las tecnologías. En el ámbito organizacional resaltan

los retos asociados con conocimientos informáticos limitados, limitaciones financieras, falta de estrategia y poca cultura de innovación para hacer frente a cambios turbulentos. En cuanto al ambiente se pueden identificar retos relacionados con normativas estrictas, la amplia brecha digital entre zonas urbanas y rurales, y la escasez de proveedores de TI.

- Respuesta a P2. Las metodologías más comúnmente encontradas para medir la madurez digital en las pequeñas y medianas empresas rurales se basan en modelos con una serie de componentes o indicadores asociados a diferentes niveles de madurez. La valoración de estos componentes permite diagnosticar el nivel de madurez asociado a una empresa con el fin de diseñar estrategias y acciones de adopción tecnológica que permitan incrementar el nivel de madurez a corto, mediano o largo plazo.
- Respuesta a P3. Las métricas utilizadas para medir el impacto de la adopción de nuevas tecnologías en las PYMES suelen utilizar las dimensiones de modelos de madurez para medir el nivel antes y después de la implementación de nuevas tecnologías digitales. Encuestas o cuestionarios aplicados en las empresas involucradas en la adopción de nuevas tecnologías también son utilizados para evaluar parámetros de impacto, como la satisfacción de usuarios, el beneficio percibido por la administración y el grado de implementación de medidas adoptadas tras el plan de adopción tecnológica. También se pueden utilizar otras métricas asociadas al rendimiento empresarial e.g. la rentabilidad o la reducción de costes operativos, pero estas requieren períodos más largos para su medición.
- Respuesta a P4. Las tecnologías más influyentes para desarrollar la transformación digital de las pequeñas y medianas empresas incluyen: redes sociales, dispositivos móviles, análisis de datos, nube, internet de las cosas e inteligencia artificial. En todo caso, la selección y adopción de estas tecnologías deben valorarse en función de las necesidades y capacidades reales de las empresas particulares.
- Respuesta a P5. Los estudios de caso más relevantes y detallados encontrados en la literatura revisada incluyen el proyecto finlandés sobre el desarrollo de talleres para la difusión y adopción de innovaciones digitales, así como el diagnóstico de la transformación digital en empresas rurales del sector cafetero en Antioquia, Colombia. El enfoque de transformación digital en pequeñas empresas rurales seguido en estos casos resulta muy relevante para esta investigación.
- Los resultados obtenidos confirman aspectos señalados en la literatura existente, como que la transformación digital en las PYMES rurales trasciende la adquisición de infraestructura y que el compromiso de la alta gerencia y la cultura organizacional son habilitadores críticos universales. Se valida también, en concordancia con estudios previos en diversos contextos geográficos, que las barreras financieras y la brecha de competencias técnicas continúan siendo obstáculos importantes que limitan la competitividad de estas organizaciones frente a sus contrapartes urbanas.
- Además, este trabajo plantea respuestas a preguntas de investigación con un enfoque específico hacia las realidades estructurales de las pequeñas empresas en zonas rurales en un país en vías de desarrollo como Costa Rica, lo cual constituye un factor diferenciador del planteamiento. Por otro lado, la revisión de la literatura existente buscando trabajos relevantes aplicados en zonas rurales y empresas pequeñas representa un insumo significativo para el diseño de planes estratégicos de adopción de tecnología para pequeñas empresas rurales con niveles básicos de madurez tecnológica.

- Finalmente, como revisión sistemática, este trabajo también presenta limitaciones inherentes a la metodología adoptada. Por ejemplo, el uso de Scopus como base de datos principal podría omitir estudios relevantes indexados en otros repositorios. El análisis está sujeto a cierto sesgo temporal y de idioma, al restringirse a publicaciones de los últimos cinco años en inglés y español, así como a un sesgo temático derivado de las palabras clave específicas utilizadas en las cadenas de búsqueda. El alcance se limita a una muestra final de 30 documentos, la cual, si bien es representativa para los objetivos del proyecto, constituye una base que podría ser ampliada en investigaciones futuras para obtener una perspectiva aún más completa.

Agradecimientos

Los autores desean reconocer el apoyo de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica al proyecto “Desarrollo de Capacidades Tecnológicas en Empresas Rurales de la Zona Norte de Costa Rica mediante la Adopción de Tecnologías Digitales Disruptivas” (Código 2188021), del cual se deriva este artículo.

Referencias

- [1] López-Valerio, Cynthia, Mendez-Porras, Abel, Garita, Cesar, y Miranda-Fajardo, Jean-Carlos, «Using artificial intelligence for business creation and development: a case study in the real estate and education sectors», presentado en 20th Iberian Conference on Information Systems and Technologies - CISTI 2025, Lisbon, Portugal, jun. 2025.
- [2] Mendez-Porras, Abel *et al.*, «AI-Based Real-Time Security Monitoring System for Violet Tourism», presentado en 20th Iberian Conference on Information Systems and Technologies - CISTI 2025, Lisbon, Portugal, jun. 2025.
- [3] Elsevier, «Scopus: Abstract and citation database», [www.elsevier.com](https://www.elsevier.com/products/scopus). Accedido: 7 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.elsevier.com/products/scopus>
- [4] A. Hanelt, R. Bohnsack, D. Marz, y C. Antunes Marante, «A Systematic Review of the Literature on Digital Transformation: Insights and Implications for Strategy and Organizational Change», *J. Manag. Stud.*, vol. 58, n.º 5, pp. 1159-1197, jul. 2021.
- [5] M. Ghobakhloo, M. Iranmanesh, M. Vilkas, A. Grybauskas, y A. Amran, «Drivers and barriers of Industry 4.0 technology adoption among manufacturing SMEs: a systematic review and transformation roadmap», *J. Manuf. Technol. Manag.*, vol. 33, n.º 6, pp. 1029-1058, 2022.
- [6] F. Hein-Pensel *et al.*, «Maturity assessment for Industry 5.0: A review of existing maturity models», *J. Manuf. Syst.*, vol. 66, pp. 200-210, 2023.
- [7] Z. Xu y S. Dobson, «Challenges of building entrepreneurial ecosystems in peripheral places», *J. Entrep. Public Policy*, vol. 8, n.º 3, pp. 408-430, sep. 2019.
- [8] L. M. Camarinha-Matos, H. Afsarmanesh, C. Garita, y C. Lima, «Towards an Architecture for Virtual Enterprises», *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 9, pp. 189-199, 1998.
- [9] H. Afsarmanesh, C. Garita, L. M. Camarinha-Matos, y C. Lima, «Workflow Support for Management of Information in PRODNET II», presentado en 5th International Workshop on Intelligent Manufacturing Systems - IMS, Gramado, Brazil, 1998.
- [10] M. Ghobakhloo, T. S. Hong, M. S. Sabouri, y N. Zulkifli, «Strategies for successful information technology adoption in small and medium-sized enterprises», *Inf. Switz.*, vol. 3, n.º 1, pp. 36-67, 2012.
- [11] C. Kraft, J. P. Lindeque, y M. K. Peter, «The digital transformation of Swiss small and medium-sized enterprises: insights from digital tool adoption», *J. Strategy Manag.*, vol. 15, n.º 3, pp. 468-494, 2022.
- [12] R. Bowen y W. Morris, «The digital divide: Implications for agribusiness and entrepreneurship. Lessons from Wales», *J. Rural Stud.*, vol. 72, pp. 75-84, 2019.
- [13] C. Cimini, A. Boffelli, A. Lagorio, M. Kalchschmidt, y R. Pinto, «How do industry 4.0 technologies influence organisational change? An empirical analysis of Italian SMEs», *J. Manuf. Technol. Manag.*, vol. 32, n.º 3, pp. 695-721, 2021.

- [14] M. Matarazzo, L. Penco, G. Profumo, y R. Quaglia, «Digital transformation and customer value creation in Made in Italy SMEs: A dynamic capabilities perspective», *J. Bus. Res.*, vol. 123, pp. 642-656, 2021.
- [15] J. Räisänen y T. Tuovinen, «Digital innovations in rural micro-enterprises», *J. Rural Stud.*, vol. 73, 2020.
- [16] A. Amaral y P. Peças, «SMEs and Industry 4.0: Two case studies of digitalization for a smoother integration», *Comput. Ind.*, vol. 125, 2021.
- [17] J. J. A. Noriega, «Análisis de transformación digital en empresas rurales del sector cafetero en el municipio de Santa Fe de Antioquia», PhD Thesis, Universidad Cooperativa de Colombia, 2024.
- [18] J. Nair, A. Chellasamy, y B. N. B. Singh, «Readiness factors for information technology adoption in SMEs: testing an exploratory model in an Indian context», *J. Asia Bus. Stud.*, vol. 13, n.º 4, pp. 694-718, 2019.
- [19] K. North, N. Aramburu, y O. J. Lorenzo, «Promoting digitally enabled growth in SMEs: a framework proposal», *J. Enterp. Inf. Manag.*, vol. 33, n.º 1, pp. 238-262, 2020.
- [20] M. M. H. Shahadat, M. Nekmahmud, P. Ebrahimi, y M. Fekete-Farkas, «Digital Technology Adoption in SMEs: What Technological, Environmental and Organizational Factors Influence SMEs' ICT Adoption in Emerging Countries?», *Glob. Bus. Rev.*, 2023.
- [21] M. Prause, «Challenges of Industry 4.0 technology adoption for SMEs: The case of Japan», *Sustain. Switz.*, vol. 11, n.º 20, 2019.
- [22] A. Amaral y P. Peças, «A framework for assessing manufacturing smes industry 4.0 maturity», *Appl. Sci. Switz.*, vol. 11, n.º 13, 2021.
- [23] W. Becker y O. Schmid, «The right digital strategy for your business: an empirical analysis of the design and implementation of digital strategies in SMEs and LSEs», *Bus. Res.*, vol. 13, n.º 3, pp. 985-1005, 2020.
- [24] A. Garzoni, I. D. Turi, G. Secundo, y P. D. Vecchio, «Fostering digital transformation of SMEs: a four levels approach», *Manag. Decis.*, vol. 58, n.º 8, pp. 1543-1562, 2020.
- [25] P. Kilimis, W. Zou, M. Lehmann, y U. Berger, «A survey on digitalization for SMEs in Brandenburg, Germany», en *IFAC-PapersOnLine*, 2019, pp. 2140-2145.
- [26] J. N. P. Rosero, «Los sistemas digitales y el turismo en el paisaje cultural cafetero, Departamento del Quindío, Colombia», 2018.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

En este estudio empleamos la herramienta de IA *Gemini* integrado en *Google Sheets* para resumir y analizar información sobre artículos revisados. Los autores verificamos que la información suministrada fuera válida y coherencia con el objetivo del estudio.

Estudio piloto sobre la evaluación del crecimiento de un cultivo de maíz con la utilización de un aislante biodegradable elaborado a partir de hojas de piña

Pilot study on the evaluation of the growth of a maize crop using a biodegradable insulator made from pineapple leaves

Rooney Meza-Castillo¹, Gustavo Carazo-Berrocal²,
Juan José Mora-Román³

Fecha de recepción: 29 de setiembre, 2025
Fecha de aprobación: 20 de enero, 2026

Meza-Castillo, R; Carazo-Berrocal, G; Mora-Román, J.J.
Estudio piloto sobre la evaluación del crecimiento de un cultivo de maíz con la utilización de un aislante biodegradable elaborado a partir de hojas de piña. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 3. Julio-Setiembre, 2026. Pág. 45-54.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i3.8209>



- 1 Facultad de Farmacia, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
 rooney.meza@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0009-0003-4430-8525>
- 2 Departamento de Farmacia Industrial, Facultad de Farmacia, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
 gustavo.carazo@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-1778-5559>
- 3 Departamento de Farmacia Industrial, Facultad de Farmacia, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
 juanjose.moraroman@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-9148-3025>

Palabras clave

Radiación electromagnética; aislante electromagnético; *Ananas comosus*; jaula de Faraday; *Zea mays*.

Resumen

Se han investigado aislantes electromagnéticos por su capacidad de atenuación. Una de las materias primas con las que se cuenta en Costa Rica son los residuos de las hojas de piña (*Ananas comosus*). Por ello, el objetivo de la investigación fue evaluar, a través de un estudio piloto, la eficacia de un aislante biodegradable para el bloqueo de las ondas electromagnéticas generadas por un transmisor frecuencia modulada, para la promoción de la germinación apropiada de un cultivo de maíz (*Zea mays*). Su metodología implicó desarrollar un mini invernadero junto con su sistema de riego, un transmisor frecuencia modulada y un medidor de flujo magnético. Asimismo, el aislante se obtuvo a partir de hojas de piña, que se sometieron a un proceso para conseguir una pasta, la cual fue puesta a secar con luz solar hasta que estuviera seca. Luego, se aplicó a las semillas de maíz y se midieron las condiciones de cultivo y la radiación no ionizante durante ocho días, estableciendo además el índice de degradación del aislante. El análisis de las variables reveló que las alturas máxima y mínima de las plántulas, ocho días después de iniciado el ensayo, fueron mayores para el grupo con el aislante (17 centímetros y 8 centímetros, respectivamente) respecto al grupo control (12 centímetros y 1 centímetro, respectivamente), por lo que el producto promovió un crecimiento apropiado. En adición, el índice de degradación fue del 15,96 % ocho días después de su colocación y la predicción de su descomposición completa correspondió a 41 días, lo que permite deducir que la formulación es biodegradable.

Keywords

Electromagnetic radiation; electromagnetic insulator; *Ananas comosus*; Faraday cage; *Zea mays*.

Abstract

Electromagnetic insulators have been investigated for their attenuation capacity. One of the raw materials available in Costa Rica is pineapple leaf waste (*Ananas comosus*). Therefore, the objective of this research was to evaluate, through a pilot study, the effectiveness of a biodegradable insulator in blocking electromagnetic waves generated by a frequency-modulated transmitter to promote proper germination of a corn (*Zea mays*) crop. The methodology involved developing a mini-greenhouse with its irrigation system, a frequency-modulated transmitter, and a magnetic flux meter. The insulator was obtained from pineapple leaves, which were processed into a paste and then dried in sunlight. It was then applied to the corn seeds, and the growing conditions and non-ionizing radiation were measured for 8 days, thereby also establishing the insulator's degradation rate. Analysis of the variables revealed that the maximum and minimum seedling heights, eight days after the start of the trial, were greater for the group with the insulator (17 centimeters and 8 centimeters, respectively) compared to the control group (12 centimeters and 1 centimeter, respectively), indicating that the product promoted appropriate growth. In addition, the degradation rate was 15.96 % eight days after application, and the predicted time for complete decomposition was 41 days, suggesting that the formulation is biodegradable.

Introducción

Las ondas electromagnéticas transportan energía al propagarse por el espacio y están constituidas por campos eléctricos y magnéticos entrelazados, los cuales existen de manera simultánea [1]. Engloban una amplia variedad de radiaciones, incluyendo las ondas de radio y televisión, las microondas, la luz visible, los rayos ultravioleta y los rayos X. Cada una de ellas posee características únicas en términos de su longitud de onda, frecuencia y energía [2].

Adicionalmente, la radiación electromagnética se divide en dos grupos según su energía. La ionizante tiene la capacidad de tomar electrones desde los átomos de la materia, inicialmente neutros, con los que interactúan, produciendo pares ion-electrón [3]. En contraposición, la energía de la no ionizante es insuficiente para desencadenar el proceso de ionización en el medio que atraviesa. Esta última abarca ondas de radio, microondas, infrarrojas, visibles y ultravioletas [4].

La radiación electromagnética es capaz de producir efectos no térmicos y atérmicos. Los primeros ocurren cuando la energía de la onda es insuficiente para elevar la temperatura del sistema biológico por encima de sus fluctuaciones normales, aunque su exposición prolongada a baja intensidad puede ser potencialmente perjudicial. En contraposición, los atérmicos conllevan un incremento de la temperatura corporal sin cambios evidentes en la temperatura ambiental, y con la capacidad de afectar la salud humana y animal, manifestándose en síntomas como fatiga, cefaleas, alteraciones cardiovasculares y riesgos de ciertos tipos de cáncer como linfomas y tumores cerebrales [5].

Para el estudio de estos fenómenos, se ha desarrollado la jaula de Faraday. Es elaborada de material conductor, que puede ser sólido o estar constituido por una matriz de conductores, y es capaz de distribuir la carga eléctrica de manera uniforme por su exterior, anulando el campo eléctrico en su interior. Sus principales funciones comprenden el impedimento de que los campos eléctricos externos, tanto estáticos [6] (campos constantes, que no cambian de intensidad o dirección a lo largo del tiempo) [7] como no estáticos, penetren en su interior, proveyendo un blindaje electrostático, donde el material conductor redirige y redistribuye las cargas [6].

También se han investigado aislantes con propiedades absorbentes para la atenuación de las ondas electromagnéticas [8]. El propósito es prevenir o debilitar su propagación y eliminar la interferencia o el daño al cuerpo humano y al medio ambiente [9]. En la actualidad, se ha propiciado el empleo de materiales biodegradables, producto de la preocupación ambiental por el uso de polímeros sintéticos como el plástico, y la creciente consciencia sobre la protección de los ecosistemas. Por ello, se han desarrollado polímeros bioplásticos derivados de fuentes renovables como el maíz o la caña de azúcar [10]. Poseen celulosa y compuestos químicos relacionados, cuyas ventajas abarcan biodegradabilidad, estabilidad térmica, fácil procesamiento y bajo costo. Por consiguiente, pueden considerarse para la manufactura de materiales que contrarresten la radiación electromagnética [11].

Una de las materias primas con las cuales se cuenta en Costa Rica son los residuos provenientes de la piña (*Ananas comosus*). Botánicamente, es una hierba terrestre que alcanza de 0,75 a 1,5 metros de altura y de 0,9 a 1,2 metros de ancho. La planta tiene un tallo corto y robusto, y una roseta de hojas cerosas y acintadas. Las hojas son puntiagudas y miden de 50 a 80 centímetros de largo, y espinas afiladas y curvadas hacia arriba en los márgenes [12].

En Costa Rica se produce gran cantidad de desechos agrícolas que aún no se han aprovechado en su totalidad. Algunos de ellos comprenden las hojas de piña, que contienen celulosa, holocelulosa, hemicelulosa y lignina [13].

El uso de los aislantes biodegradables puede favorecer la obtención de cultivos apropiados. La luz solar es la fuente primaria de energía para las plantas, dado que la radiación controla la fotosíntesis, la morfogénesis, y regula, en mayor o menor medida, la respiración, los movimientos estomáticos y el metabolismo del carbono [14].

Ante este panorama, el objetivo de la presente investigación fue evaluar, a través de un estudio piloto, la eficacia de un aislante biodegradable elaborado con hojas de piña para el bloqueo de las ondas electromagnéticas generadas por un transmisor frecuencia modulada (FM), promoviendo la germinación eficiente de un cultivo de maíz (*Zea mays*). Cabe señalar que este proceso de germinación es propiciado por la incidencia de radiación electromagnética sobre la planta, pero puede ser afectado negativamente en caso de una alta exposición [15].

Metodología

Diseño y construcción del mini invernadero como Jaula de Faraday

El diseño del mini invernadero fue elaborado utilizando la herramienta Procreate®, como se ilustra en la Figura 1. Su propósito fue ofrecer un resguardo contra las ondas específicas en un espacio determinado, disminuyendo el nivel de las interferencias externas.

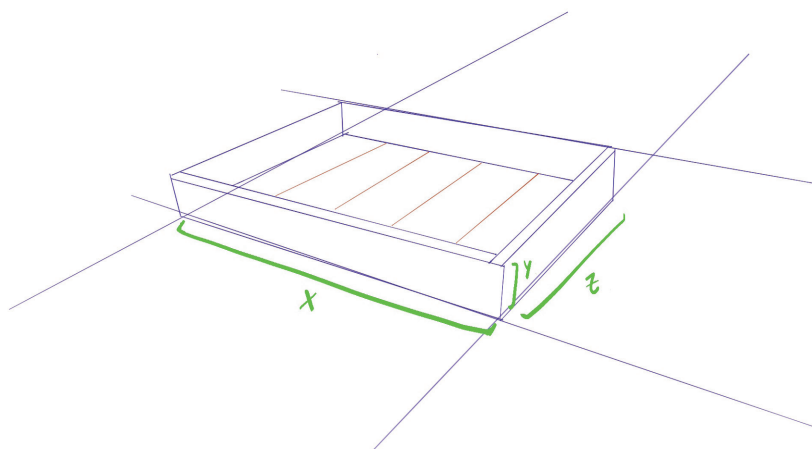


Figura 1. Diseño del invernadero de Faraday empleando la herramienta Procreate®.

Para la estructura de la cubierta, se dispuso de tubería de policloruro de vinilo (PVC) de 1 pulgada. Las dimensiones consistieron en dos tubos de 45 centímetros de longitud (eje x), cuatro de 14 centímetros de longitud (eje y) y dos de 28 centímetros de longitud (eje z), ensamblados con ocho codos para tubos de 1 pulgada, sin rosca. La malla se recortó a una longitud de 2 metros para envolver la cubierta en su totalidad.

Por su parte, la base se desarrolló con tablas de madera de 2,5 centímetros de grosor, requiriendo dos tablas de 58 centímetros de longitud (eje x) con un ancho de 8 centímetros (eje y) y dos de 41 centímetros de longitud (eje z) para conformar el marco. Estos elementos se fijaron con clavos de cabeza plana de 5 centímetros.

Asimismo, se procedió a cortar cinco tablitas con dimensiones de 37 por 11 centímetros para construir una base, la cual se recubrió con una pieza metálica con un tamaño de 39 por 55 centímetros. Finalmente, se incorporaron cuatro tablas en la base, ofreciendo un refuerzo adicional (Figura 2).

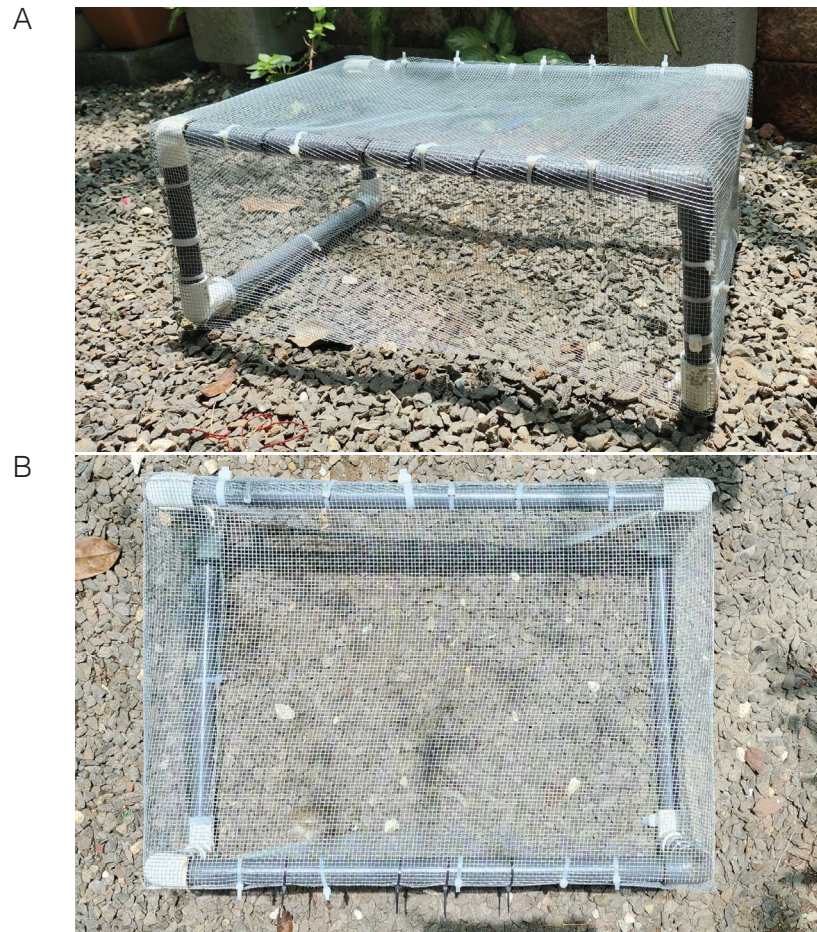


Figura 2. Construcción del invernadero de Faraday. A. Base B. Cubierta.

Elaboración del transmisor FM, del medidor de flujo magnético y del sistema de riego

Los componentes del transmisor FM fueron organizados conforme a lo establecido en la Figura 3. Cabe señalar que, a diferencia de los lineamientos brindados para su construcción, se reemplazó el condensador de 27 pF por dos condensadores de 15 pF conectados en paralelo.

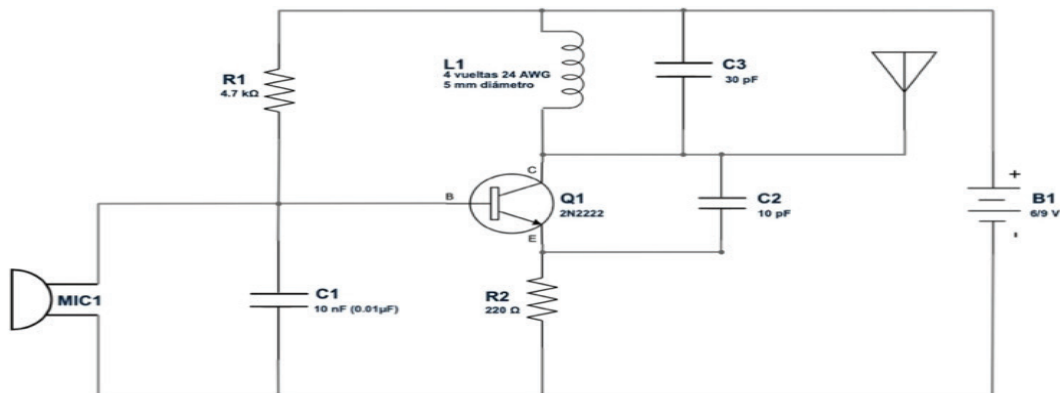


Figura 3. Diseño del transmisor FM.

En cuanto al medidor de flujo magnético, se siguieron las instrucciones indicadas para su diseño [16]. De forma análoga, para el sistema de riego se procedió de acuerdo con las directrices presentes en el sitio de Techmake Solutions [17], implementando una mejora por la adición de una manguera de media pulgada con orificios en la boquilla de salida del agua de la bomba para el riego.

Obtención del aislante de hojas de piña

Se tomaron 225 g de hojas de piña a partir de 1 kilogramo de dicho material, el cual se obtuvo de la feria del agricultor de Barranca, Puntarenas. Las hojas separadas se lavaron con 1,5 litros de agua. Luego, se procedió a cortarlas en trozos, con un diámetro de 2 a 3 centímetros.

Después, los trozos se hirvieron con 3 litros de agua durante 30 minutos. A continuación, se transfirieron a un recipiente con 140 mililitros de una mezcla de NaClO al 3,5 % y NaOH al 0,1 %. La mezcla se mantuvo en reposo durante 24 horas. Después de este período, las hojas se lavaron con 9 litros de agua para eliminar el NaClO y el NaOH. Posteriormente, se licuaron con 500 mililitros de agua caliente hasta obtener una pasta.

La pasta se exprimió y se depositó en un molde circular de 7,5 centímetros de diámetro y 4,5 centímetros de alto. Para finalizar, se puso a secar con luz solar, hasta que estuviera lo más seca posible.

Aplicación del aislante de piña

Se trabajó con dos grupos: una muestra sin aislante y otra con aislante sobre el cultivo, cada una compuesta por cinco semillas. Estas semillas se seleccionaron independientemente de su peso o tamaño, tras verificar que no presentaban indicios de patógenos o signos de deterioro. Se midieron las variables de cultivo, específicamente humedad del aire, humedad del suelo, temperatura y luminosidad.

Medición de ondas electromagnéticas no ionizantes

Para la medición de las ondas electromagnéticas no ionizantes se acercó el sensor SS49e por fuera y por debajo del aislante. Ambas mediciones se hicieron a una distancia aproximada de 15 centímetros del transmisor. De esta forma, se obtuvo el flujo magnético y el voltaje de las ondas circulantes.

Determinación del índice de degradación del aislante de hojas de piña

Para la determinación del índice de degradación del material elaborado, el aislante fue pesado previamente a su colocación en el invernadero. Durante los ocho días siguientes, se controló el peso para determinar la pérdida de material y estimar el tiempo de degradación total. Para ambas mediciones, la muestra de aislante se manipuló con cuidado para evitar su remoción o la de la tierra.

Variables dependientes e independientes

Las variables dependientes fueron la exposición a la radiación electromagnética no ionizante, tanto en presencia como en ausencia del aislante de hojas de piña, su intensidad (flujo magnético y frecuencia) y el índice de degradación de dicho aislante. Como complemento, las variables dependientes correspondieron al porcentaje de germinación de las semillas y la altura de las plántulas.

Análisis de datos

El seguimiento se efectuó durante ocho días, tiempo donde se tomaron datos sobre radiación emitida, a través del sensor SS49e. También se empleó la aplicación Spectroid® para la medición de dichas radiaciones y la obtención de datos.

Resultados

Las condiciones ambientales del mini invernadero fueron monitoreadas a lo largo del experimento. Se aprecian en el cuadro 1.

Cuadro 1. Condiciones ambientales del mini invernadero durante el ensayo con el aislante de hojas de piña.

Día	Humedad del aire %	Humedad del suelo %	Temperatura °C	Luminosidad lux
1	72	25	30	976
2	74	26	31	859
3	73	25	31	988
4	77	26	32	1002
5	69	24	29	946
6	65	24	29	948
7	60	23	31	929
8	60	29	32	961

Se realizaron las mediciones de las onda electromagnéticas no ionizantes emitidas por el transmisor FM durante los ocho días. Para ello, se utilizó el medidor de flujo electromagnético SS49e y la aplicación Spectroid®. Asimismo, se llevaron a cabo observaciones al cultivo de maíz sin aislante (cuadro 2) y con aislante (cuadro 3).

Cuadro 2. Mediciones de las ondas electromagnéticas no ionizantes y observaciones relacionadas al crecimiento en el cultivo de maíz sin aislante de hojas de piña.

Día	Flujo magnético μT	Frecuencia Hz	Altura máxima cm ¹	Altura mínima cm ¹	Observaciones adicionales
1	110,56	431	0	0	No hubo crecimiento, ni germinación.
2	139,88	558	0	0	No hubo crecimiento, ni germinación.
3	137,34	539	2	1	Germinación de las primeras semillas.
4	157,89	678	4	1	Coloraciones verdosas en tallos y hojas.
5	128,94	478	6	1	Coloraciones verdosas en tallos y hojas.
6	146,28	637	8	1	Coloraciones verdosas en tallos y hojas, dos semillas seguían sin germinar.
7	125,90	458	9	1	Coloraciones verdosas en tallos y hojas, dos semillas seguían sin germinar.
8	164,16	665	12	1	Coloraciones verdosas en tallos y hojas, dos semillas seguían sin germinar.

¹Las mediciones se hicieron desde la base del tallo hasta el ápice de las plántulas.

Cuadro 3. Mediciones de las ondas electromagnéticas no ionizantes y observaciones relacionadas al crecimiento en el cultivo de maíz con aislante de hojas de piña.

Día	Flujo magnético μT	Frecuencia Hz	Altura máxima cm^1	Altura mínima cm^1	Observaciones adicionales
1	30,51	173	0	0	No hubo crecimiento, ni germinación.
2	27,66	130	1	0	Germinación de las primeras semillas.
3	28,96	154	3	1	Coloraciones verdosas en tallos y hojas.
4	34,81	130	6	1,5	Coloraciones verdosas en tallos y hojas.
5	38,96	157	8	2	Coloraciones verdosas en tallos y hojas.
6	75,72	370	11	3	Coloraciones verdosas en tallos y hojas.
7	71,67	278	16	4	Coloraciones verdosas en tallos y hojas, una semilla seguían sin germinar.
8	91,43	324	17	8	Coloraciones verdosas en tallos y hojas, una semilla seguían sin germinar.

¹Las mediciones se hicieron desde la base del tallo hasta el ápice de las plántulas.

Durante el período establecido, la muestra control (sin aislante) mostró un crecimiento lento y de reducida vigorosidad, dado que de las cinco semillas, únicamente tres lograron germinar. En adición, de las tres que sí lo consiguieron, una mostró un desarrollo radicular deficiente (solamente dos raíces) y ausencia de un tallo uniforme. Las otras dos contaron con una germinación exitosa y tallos verdes que alcanzaron una altura considerable.

Por su parte, la muestra tratada con el aislante tuvo un crecimiento rápido y de alta calidad fisiológica. Tres semillas lograron un desarrollo estable y una cuarta creció más lentamente, pero con un sistema de raíces extenso. Cabe resaltar que al sexto día, producto del aumento longitudinal acelerado, se decidió hacer un agujero en la parte superior del contenedor, incrementando la exposición a la radiación. Como consecuencia de esta acción, las plantas comenzaron a deteriorarse gradualmente y su capacidad para mantenerse erguidas disminuyó.

De la misma forma, se calculó el índice de degradación del aislante los días cinco y ocho del ensayo, partiendo de que el peso inicial era 0,94 gramos. Los resultados obtenidos fueron de 9,57 % y 15,96 %, respectivamente.

Discusión

Para que las semilla de maíz puedan germinar y crecer, se requiere la presencia de humedad en el sustrato, suficiente oxígeno para la respiración celular y una temperatura adecuada para los procesos metabólicos y el desarrollo vegetal. Asimismo, se necesita una temperatura mínima diurna por encima de los 10 °C, sin superar los 38 °C, y se debe proporcionar agua durante el ciclo del cultivo [18]. En cuanto a las condiciones del mini invernadero, el cuadro 1 muestra que se mantuvieron constantes: una humedad del aire entre el 60 % y el 77 %, una humedad del suelo entre el 23 % y el 29 %, una temperatura entre 29 °C y 32 °C y una luminosidad entre 856 lux y 1002 lux. La jaula de Faraday propició el mantenimiento de tales elementos. Cabe destacar que se incorporó una fuente de luz de mayor intensidad y consistencia (2500 lux), como se ha reportado en investigaciones previas [19].

Respecto al índice de degradación del aislante, la medición al cabo de ocho días fue del 15,96 %. La estimación es que el aislante se degrada por completo en el suelo en un lapso de 41 días.

En cuanto a los cuadros 2 y 3, las mediciones de emisión de ondas electromagnéticas empleando el aislante evidenciaron una disminución considerable en el flujo magnético y la frecuencia de la radiación electromagnética no ionizante, con una atenuación del 65 % y 62 %, respectivamente. De la misma forma, y como se demostró en este estudio, aunque la radiación electromagnética beneficia la etapa inicial de germinación, su impacto negativo ocurre durante el desarrollo de las plántulas, lo cual fue comprobado a través de su apariencia y su altura. Los resultados sugieren que, si bien la radiación puede tener un efecto estimulante en las semillas, una aplicación excesiva resulta en estrés, lo que a su vez afecta negativamente el crecimiento vegetal posterior [15].

En un trabajo anterior, las semillas, ubicadas en la proximidad de radiación no ionizante, específicamente un decodificador de telefonía móvil WiFi, experimentaron un impacto negativo en su capacidad de germinación, llegando incluso a impedirla. Por el contrario, aquellas que se encontraban a mayor distancia del instrumento mostraron un mejor desarrollo [20].

Estos hallazgos son coherentes con los resultados obtenidos en este ensayo, donde se observó que, a medida que se incrementaba la exposición a la radiación, la germinación se volvía más problemática. Evidencia de ello es que, debido al tamaño que habían alcanzado las plántulas, se hizo un agujero para facilitar que continuaran su crecimiento. No obstante, tal acción ocasionó un deterioro gradual y que no se mantuvieran erguidas.

En relación con la eficacia del aislante, la caña de azúcar ha mostrado reducciones en el flujo magnético y la frecuencia de la radiación electromagnética de un 45 % y un 66 %, respectivamente [21]. Al comparar estos datos con los conseguidos con las hojas de piña, se demuestra que este último aislante es más eficiente, puesto que únicamente se necesitó una capa del material para atenuar las ondas electromagnéticas. Por tanto, podría contar con mejores propiedades fisicoquímicas, las cuales serían capaces de superar a las de la caña de azúcar.

Conclusiones

Este estudio pilotó constituyó una aproximación sobre cómo la exposición excesiva de un cultivo de semillas de maíz a la radiación electromagnética no ionizante afecta negativamente su crecimiento, evidenciando la necesidad de disminuir dicha incidencia. Un hallazgo preliminar reveló que el aislante, producido a partir de hojas de piña, promovió un desarrollo apropiado con características superiores a aquellas encontradas en un cultivo sin su aplicación. Tal panorama se vio reflejado en las alturas máxima y mínima de las plántulas ocho días después de iniciado el ensayo: 17 centímetros y 8 centímetros, respectivamente, para el grupo con el aislante, frente a 12 centímetros y 1 centímetro, respectivamente, para el grupo control. Asimismo, se determinó que la formulación es biodegradable, con una predicción para su descomposición completa de alrededor de 41 días, fundamentada en un índice de degradación del 15,96 % tras ocho días desde su uso.

Es importante continuar con investigaciones de esta naturaleza usando una muestra mayor y bajo otras condiciones de cultivo. A mediano plazo, se espera que estos hallazgos deriven en beneficios para las labores agrícolas, la salud de las personas y el fomento de tecnologías amigables con el medio ambiente.

Referencias

- [1] R. K. Amineh, "Applications of electromagnetic waves: Present and future," *Electronics*, vol. 9, no. 5, Art. no. 808, 2020.
- [2] P. J. Bhattacharjee, "Fundamental to electromagnetic waves," *Int. J. Trend Sci. Res. Dev.*, vol. 7, no. 1, pp. 454-462, 2023.

- [3] J. Morales-Aramburo y J. A. Puerta, "Bases físicas de la radiación ionizante," *Rev. Colomb. Cardiol.*, vol. 27, no. S1, pp. 32-40, 2020.
- [4] H. Omer, "Radiobiological effects and medical applications of non-ionizing radiation," *Saudi J. Biol. Sci.*, vol. 28, no. 10, pp. 5585-5592, 2021.
- [5] L. Pérez Escalona, Y. Valdés Roque, M. A. Sariago Riumbau y Y. Valdés Roque, "Influencia de las emisiones electromagnéticas no ionizantes en la salud," *Panorama Cuba Salud*, vol. 13, no. especial, pp. 20-22, 2018.
- [6] A. K. Sisodia, "The faraday cage: A foundational principle in electromagnetic shielding and its modern applications," *Int. J. Sci. Res. Arch.*, vol. 14, no. 1, pp. 954-960, 2025.
- [7] International Commission on Non-ionizing Radiation Protection, "Static Magnetic Fields (0 Hz)," ICNIRP.org. <https://www.icnirp.org/en/frequencies/static-magnetic-fields-0-hz/index.html> (accedido el 27 de agosto, 2025).
- [8] M. Mahdavinia, G. Kiani, A. K. Ghavidel, and H. Nasiri, "Sustainable composite insulator for thermal, moisture, and electromagnetic shielding using recycled waste polymers/bimetallic MOF-grown porous carbon," *Sci Rep*, vol. 16, no. 1, Art. no. 11252, 2026.
- [9] Y. Chen, J. Li, T. Li, L. Zhang, and F. Meng, "Recent advances in graphene-based films for electromagnetic interference shielding: Review and future prospects," *Carbon*, vol. 180, pp. 163-184, 2021.
- [10] P. Rodríguez Sandoval y M. I. Arévalo, "Los materiales biodegradables, una alternativa a la contaminación de los polímeros sintéticos," *Rev. Esc. Ing. Tecnol. Unimonserate*, no. 1, pp. 31-37, 2020.
- [11] M. Li et al., "Recent Progress in the application of cellulose in electromagnetic interference shielding materials," *Macromol. Mater. Eng.*, vol. 307, no. 7, Art. no. 2100899, 2022.
- [12] S. R. Assumi, P. T. Singh, and A. K. Jha, "Pineapple (*Ananas cosmosus* L. Merr.)," in *Tropical Fruit Crops: Theory to Practical*, S. N. Gosh and R. R. Sharma, Eds. New Delhi, India: Jaya Publishing House, 2021.
- [13] M. O. Aremu, M. A. Rafiu, and K. K. Adedeji, "Pulp and paper production from Nigerian pineapple leaves and corn straw as substitute to wood source," *Int. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 2, no. 4, pp. 1180-1188, 2015.
- [14] A. Benavides Mendoza y H. Ramírez Rodríguez, *Respuestas de las Plantas a la Radiación Electromagnética*. Saltillo: Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, 2002.
- [15] A. Armesto Arenas, W. Angarita y R. Lobo Jácome, "Efectos de la radiación electromagnética sobre la germinación del maíz," *Tecnura*, vol. 19, no. 45, pp. 65-73, 2015.
- [16] M. Maleki, "Interfacing SS49E Linear Hall Effect Sensor Module with Arduino," Electropeak.com. <https://electropeak.com/learn/interfacing-ss49e-linear-hall-effect-sensor-module-with-arduino/> (accedido el 3 de setiembre, 2025).
- [17] Equipo Techmake, "DIY desde casa - 5C: Sistema de riego automático," Techmake.com. <https://techmake.com/blogs/tutoriales/diy-desde-casa-5c-sistema-de-riego-automatico> (accedido el 3 de setiembre, 2025).
- [18] Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, *Variedades e híbridos de maíz: Características y recomendaciones para su manejo agronómico*. San José, Costa Rica: Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, 2019.
- [19] G. F. Valencia Plata y F. R. Gómez Devia, "Estudio descriptivo sobre los efectos de la radiación electromagnética no ionizante en las plantas," en *Ciencia Transdisciplinar en la Nueva Era*, E. Serna, Ed. Medellín, Colombia: Editorial Instituto Antioqueño de Investigación, 2022, pp. 437-450.
- [20] W. A. Vásquez Villalobos, "Efecto de ondas electromagnéticas en la etapa de germinación y crecimiento de *Raphanus sativus* (rabanito), *Moringa oleífera* (moringa) y *Citrus reticulata* (mandarina) respectivamente en la ciudad de Chiclayo," trabajo de investigación de bachillerato, Fac. Ing. Arq., Univ. César Vallejo, Trujillo, Perú, 2020.
- [21] G. G. Huamán Bocanegra y Y. F. Tapia Paz, "Aplicación de residuos de *Saccharum officinarum* (caña de azúcar), como barrera de ondas electromagnéticas, Chiclayo," trabajo de investigación de bachillerato, Fac. Ing. Arq., Univ. César Vallejo, Trujillo, Perú, 2020.

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.

Técnica de modulación temporal basada en Walsh-Hadamard para arreglos de antenas: Análisis comparativo de desempeño

Walsh-Hadamard Based Temporal Modulation Technique for Antenna Arrays: Comparative Performance Analysis

Jorge Luis Blanco-Orta¹, María del Carmen Guerra-Martínez²

Fecha de recepción: 3 de octubre, 2025
Fecha de aprobación: 23 de enero, 2026

Blanco-Orta, J.L.; Guerra-Martínez, M.C. Técnica de modulación temporal basada en wals-hadamard para arreglos de antenas: análisis comparativo de desempeño. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 N° 3. Julio-Setiembre, 2026. Pág. 55-66.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i3.8213>



1 Emisora Municipal de Radio Mariel. Cuba.

 jorgeluisblancoorta@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-9592-7818>

2 Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría". Cuba.

 mariagm@tele.cujae.edu.cu

 <https://orcid.org/0000-0003-1989-4414>

Palabras clave

TMA; Walsh-Hadamard; DOA; 6G.

Resumen

Este artículo presenta una arquitectura de arreglos modulados en tiempo (TMA) utilizando secuencias de Walsh-Hadamard (WH-TMA) para aplicaciones 6G. La técnica demuestra mejoras observadas en la estimación de dirección de llegada (DOA), alcanzando una precisión hasta un orden de magnitud mayor que los TMA convencionales en el rango de SNR evaluado. La ortogonalidad inherente de las secuencias WH elimina el solapamiento espectral y reduce la complejidad computacional al reemplazar transformadas de Fourier por operaciones de correlación simples. Además, el sistema reduce los requisitos de muestreo en un 60%. Estas ventajas lo posicionan como una tecnología prometedora para la sexta generación (6G).

Keywords

TMA; Walsh-Hadamard; DOA; 6G.

Abstract

This article presents an architecture for time-modulated arrays (TMA) using Walsh-Hadamard sequences (WH-TMA) for 6G applications. The technique improves Direction of Arrival (DOA) estimation, achieving precision up to one order of magnitude higher than conventional TMAs in the evaluated SNR range. The inherent orthogonality of WH sequences eliminates spectral overlap and reduces computational complexity by replacing Fourier transforms with simple correlation operations. Furthermore, the system reduces sampling requirements by 60%. These advantages position it as a promising technology for the sixth generation (6G).

Introducción

Los arreglos de antenas son clave en las comunicaciones actuales porque permiten dirigir el haz de radiación electrónicamente. Un arreglo no es más que un conjunto de antenas colocadas en posiciones conocidas; ajustando la amplitud y fase de la señal que alimenta cada elemento se consigue un patrón de radiación deseado [1,2,3]. En los últimos años, el tráfico de datos ha crecido mucho, y eso exige redes más eficientes. Para seguir dando servicio, hacen falta tecnologías de antenas que sean flexibles, baratas y fáciles de implementar.

En la actualidad, existe una amplia diversidad de configuraciones de arreglos, cada una de las cuales exhibe características únicas que determinan su comportamiento electromagnético y respuesta operacional. La clasificación de estos sistemas se realiza fundamentalmente según dos criterios principales: su geometría (lineales, planares o conformados) y su esquema de alimentación. Para aplicaciones en redes 6G, las técnicas de direccionamiento de haz se clasifican en arreglos, sistemas cuasi-ópticos, antenas de onda de fuga y metasuperficies [3]. Adicionalmente, la evolución de las técnicas de conformación de haces ha incorporado recientemente enfoques basados en optimización convexa y aprendizaje automático [4]. No obstante, en la última década, la tendencia en el diseño ha evolucionado hacia soluciones innovadoras, como los TMA, que ofrecen ventajas operativas significativas. En tal sentido, los arreglos convencionales, el desvío del lóbulo principal mediante variaciones de amplitud requiere el uso de amplificadores de radiofrecuencia (RF, por sus siglas en inglés) para generar excitaciones diferentes en cada elemento. En cambio, con los TMA, este efecto puede lograrse mediante la conmutación temporal de la alimentación de cada elemento, simplificando la arquitectura del sistema y reduciendo su complejidad hardware [5,6].

Los arreglos de antenas para 6G deben ser simples, rápidos y precisos, pero los esquemas convencionales tienen limitaciones en entornos móviles [7,8,9]. Por eso, se necesitan arquitecturas de antenas que ofrezcan buena precisión angular sin aumentar la carga computacional. Asimismo, el desarrollo acelerado de tecnologías de formación de haces conmutados, adaptativos y multi-haz, plantea el reto de optimizar la eficiencia en la obtención de respuestas radiométricas, requiriendo nuevos enfoques algorítmicos, arquitecturas de hardware reconfigurables que equilibren desempeño, flexibilidad y consumo energético. Desde esa perspectiva, los TMA han emergido como una tecnología prometedora para implementar técnicas de modulación direccional, permitiendo transmitir señales únicamente en direcciones específicas mientras se degrada deliberadamente la calidad de la señal en otras direcciones. No obstante, los esquemas TMA convencionales presentan limitaciones significativas en el desempeño de la DOA, lo cual plantea considerables desafíos para su implementación en entornos que requieren alta precisión en la caracterización espacial de los usuarios [10,11,12].

En este trabajo se presenta una propuesta de arquitectura WH-TMA basada en secuencias ortogonales de Walsh-Hadamard. A diferencia de estudios previos que aplican Walsh en comunicaciones por Acceso Múltiple por División de Código (CDMA, por sus siglas en inglés), este trabajo se enfoca en su uso para estimación de DOA en arreglos modulados en tiempo. La contribución principal es el diseño de un esquema de modulación temporal que elimina la necesidad de análisis espectral complejo en la etapa de estimación angular, validado mediante simulaciones en MATLAB que cuantifican la mejora del Error Cuadrático Medio (RMSE, por sus siglas en inglés) frente a TMA convencionales.

La contribución original de este trabajo es doble. Primero, se propone una arquitectura TMA basada en secuencias de Walsh-Hadamard que elimina la necesidad de análisis espectral para la estimación DOA, reduciendo la complejidad computacional y los requisitos de muestreo. Segundo, se cuantifica mediante simulación la mejora en precisión (RMSE) frente a un TMA convencional en función de la SNR. Este estudio es de naturaleza simulada y no pretende demostrar experimentalmente aplicaciones 6G, sino sentar las bases para futuros desarrollos.

Metodología

Para las simulaciones usamos MATLAB R2023a. El arreglo es lineal y uniforme, con 4 elementos separados media longitud de onda (la frecuencia central es 2.4 GHz). Trabajamos en banda base con un ancho de banda de 100 kHz. Hicimos 500 repeticiones por cada punto de SNR, barriendo desde -10 dB hasta 10 dB cada 5 dB. El ruido lo modelamos como blanco gaussiano (AWGN) y fijamos el ángulo real de la fuente en 30°. Como referencia, implementamos un TMA convencional con conmutación periódica a 100 kHz, ciclo de trabajo del 50% y muestreo a 500 kHz; la DOA se estimó con MUSIC aplicado al primer armónico de la FFT.

En el WH-TMA propuesto, generamos una matriz de Hadamard de orden 16. Tomamos las primeras 4 filas y se las asignamos a cada elemento, con secuencias de 16 chips de duración (cada chip es de 1 μ s). A la salida del receptor, después del filtro y la digitalización (1 MHz), correlacionamos la señal con cada una de esas cuatro secuencias y volvemos a aplicar MUSIC para obtener el ángulo. La DFT para demodular los datos va por separado y no afecta la estimación. Calculamos el error cuadrático medio (RMSE) con la fórmula habitual, promediando las 500 estimaciones para cada SNR.

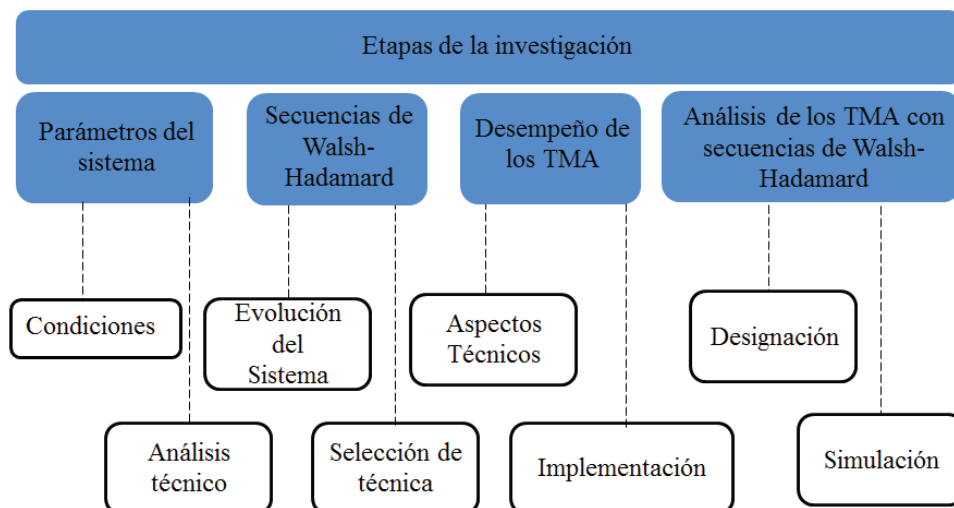


Figura 1. Procedimiento para el desarrollo de la investigación.

Resultados

Para evaluar las ventajas del WH-TMA, se simuló el sistema en MATLAB bajo condiciones realistas de ruido blanco gaussiano. Los TMA convencionales tienen problemáticas fundamentales que limitan su aplicabilidad en sistemas de comunicación avanzados: la inherente necesidad de realizar un análisis espectral complejo mediante transformadas de Fourier rápidas (FFT, por sus siglas en inglés) para extraer la información angular a partir de los armónicos generados, imponiendo requisitos computacionales prohibitivos para aplicaciones en tiempo real; los estrictos requerimientos de frecuencia de muestreo, que deben exceder significativamente el ancho de banda de la señal portadora para capturar adecuadamente los componentes armónicos, generando un consumo energético incompatible con dispositivos de restricción energética; y la dificultad para escalar eficientemente a configuraciones de gran apertura debido a la creciente complejidad en el procesamiento espectral [7,8,10,11].

Teniendo en cuenta estas problemáticas se analizó los parámetros del sistema desde el paradigma de lograr reducir la complejidad computacional al sustituir las FFT por operaciones simples de multiplicación y filtrado, sino también los requisitos de muestreo al vincularlos exclusivamente al ancho de banda de la señal, permitiendo implementaciones de bajo consumo. La implementación de secuencias de WH como mecanismo de modulación temporal aborda eficazmente estas limitaciones al aprovechar el principio de ortogonalidad para desacoplar matemáticamente las señales de cada elemento mediante operaciones en el dominio de código, eliminando la necesidad de análisis espectral para la estimación DOA, aunque se mantiene una DFT para la demodulación de datos, como se ilustra en la (Figura 2). Adicionalmente, la naturaleza binaria y ortogonal de estas secuencias facilita la escalabilidad a arreglos masivos mediante circuitos de conmutación de 1 bit, manteniendo simultáneamente una buena precisión en la estimación angular y posibilitando la integración de funcionalidades de detección y comunicación en futuros sistemas 6G e Internet de Todo (IoE, por sus siglas en inglés), donde la eficiencia energética, la baja latencia y la escalabilidad resultan críticas [11,13].

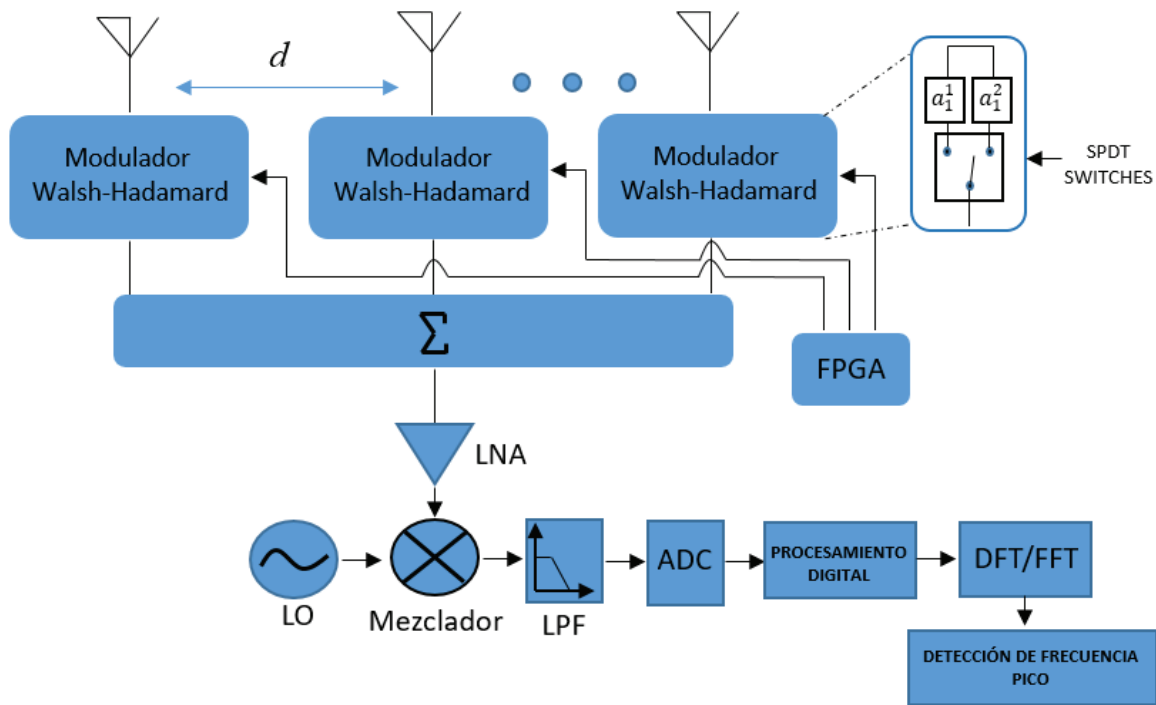


Figura 2. Análisis del diagrama TMA con secuencia WH.

Este sistema consta de un arreglo de N elementos, donde cada uno incorpora un modulador WH independiente, seguido del conmutador simple polo-doble tiro (SPDT, por sus siglas en inglés). La función principal del modulador Walsh-Hadamard es generar secuencias ortogonales binarias, que controlan la conmutación temporal de cada elemento del arreglo. El conmutador SPDT, que selecciona entre dos estados de amplitud compleja predefinidos en función de la secuencia aplicada, permitiendo así la modulación de la señal transmitida en el dominio temporal.

Las secuencias de WH forman la base de la modulación empleada en este sistema. Estas funciones constituyen un conjunto ortogonal completo que toma únicamente valores binarios (+1 y -1), definidas en función del tiempo t y de un índice de orden n . Cada secuencia, denotada como $Wal(n, t)$, se caracteriza por un número específico de cruces por cero en el intervalo de

definición, lo que determina su frecuencia de secuencia. Entre sus propiedades clave destacan su ortogonalidad, la cual permite una separación eficiente de las señales en el receptor, y su facilidad de generación mediante productos de funciones de Rademacher [14, 15, 16].

En este trabajo, la definición de las funciones de Walsh se basa en el enfoque presentado en [14], que utiliza funciones de Rademacher y la representación binaria del índice n . Primero, se introduce la función de Rademacher de orden k , definida como:

$$R(k, t) = \text{sgn}[\sin(2^k \pi t)] \quad (1)$$

Donde $k = 0, 1, 2, \dots$ y

$$\text{sgn}[x] = \begin{cases} +1 & x > 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases}$$

Dado que n es un entero no negativo, su expresión binaria es:

$$n = \sum_{k=0}^{m-1} q_k 2^k \quad (2)$$

Donde $q_k = 1$ o 0

Cuando $P_{m-1}, P_{m-2}, \dots, P_0$ es la codificación de n y $n = 0, 1, 2, \dots, 2^m - 1$, para $0 \leq t < 1$, $Wal(n, t)$ puede definirse mediante el producto de funciones de Rademacher [14]:

$$Wal(n, t) = \prod_{k=0}^{m-1} [R(k+1, t)]^{p_k} \quad (3)$$

De manera similar a las series de Fourier, cualquier señal $f(t)$ puede representarse mediante una suma de funciones de Walsh [14]:

$$f(t) = a_0 \cdot Wal(0, t) + a_1 \cdot Wal(1, t) + \dots + a_n \cdot Wal(n, t) \quad (4)$$

Donde

$$a_n = \int_0^T f(t) \cdot Wal(n, t) dt$$

Así, se define un conjunto de fórmulas de transformada de Walsh [14]:

$$W(k) = \int_0^1 f(t) \cdot Wal(n, t) dt \quad (5)$$

$$f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} W(k) \cdot Wal(n, t) \quad (6)$$

Para casos discretos de $N = 2^n$ puntos de muestreo, las fórmulas de la transformada discreta de Walsh (TDW, por sus siglas en inglés) son [14]:

$$W_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} f_i \cdot Wal(k, i) \quad (7)$$

Basándose en la función de Walsh en orden de Hadamard, la ecuación (7) puede escribirse de la siguiente forma [14]:

$$W_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} f_i \cdot H_N \quad (8)$$

Donde la fórmula de recurrencia de la matriz de Hadamard H_N es [14]:

$$\begin{aligned} H_1 &= [1] \\ H_2 &= \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \\ H_{2^k} &= \begin{bmatrix} H_{2^{k-1}} & H_{2^{k-1}} \\ H_{2^{k-1}} & -H_{2^{k-1}} \end{bmatrix} \quad (9) \end{aligned}$$

La ecuación (8) también se conoce como transformada de WH.

Tomando como base esta ordenación fundamental y aplicando en forma recursiva el procedimiento que se indica a continuación, se puede obtener la ubicación de las funciones de Walsh en cualquier matriz canónica de Hadamard de orden N. Dadas las características de simetría y ortogonalidad de la matriz de Hadamard la señal puede recuperarse en forma única aplicando una vez más la matriz $[H(n)]$ a la transformada directa.

En el receptor, posicionado en la dirección angular θ , la señal incidente es procesada mediante una cadena de acondicionamiento analógico-digital optimizada. La primera etapa consiste en un amplificador de bajo ruido (LNA, por sus siglas en inglés); posteriormente, se mezcla con una portadora generada por un oscilador local (LO, por sus siglas en inglés) para realizar la conversión a frecuencia intermedia o base; a continuación, un filtro paso bajo (LPF, por sus siglas en inglés) elimina las componentes de alta frecuencia no deseadas y prepara la señal para su digitalización mediante un conversor analógico-digital (ADC, por sus siglas en inglés). Una vez digitalizada, la señal se procesa mediante un banco de correladores sintonizados con cada secuencia de Walsh asignada a los elementos del arreglo. Esta operación de correlación permite recuperar las contribuciones individuales de cada elemento sin necesidad de análisis espectral, aprovechando la ortogonalidad de las secuencias WH para separar eficientemente las señales. Posteriormente, para la demodulación de la información transmitida, se aplica una DFT sobre la señal combinada, lo que no afecta el DOA. Este esquema de procesamiento digital permite una implementación eficiente y escalable, reduciendo la complejidad computacional en comparación con los TMA convencionales.

El análisis de los TMA con secuencias de WH propuesto se evaluó mediante simulaciones en MATLAB, centrándose en la métrica fundamental: precisión en la estimación DOA. Las secuencias de WH, generadas a partir de una matriz de Hadamard de orden $L=16$, se asignaron a cada elemento del arreglo ($N=4$) para controlar los patrones de conmutación temporal. La ortogonalidad inherente de estas secuencias permitió una separación espectral eficiente de las señales, facilitando la recuperación de la información angular y la supresión de interferencias. Los resultados indican que la integración de secuencias de WH mejora significativamente el rendimiento del sistema en la dirección objetivo. El enmascaramiento observado en direcciones no deseadas sugiere una posible ventaja para la seguridad en capa física, aunque su validación queda fuera del alcance de este estudio. Además, se establece la relación entre el DoA y los parámetros de conmutación, como se explica en el diagrama de flujo en la (Figura 3).

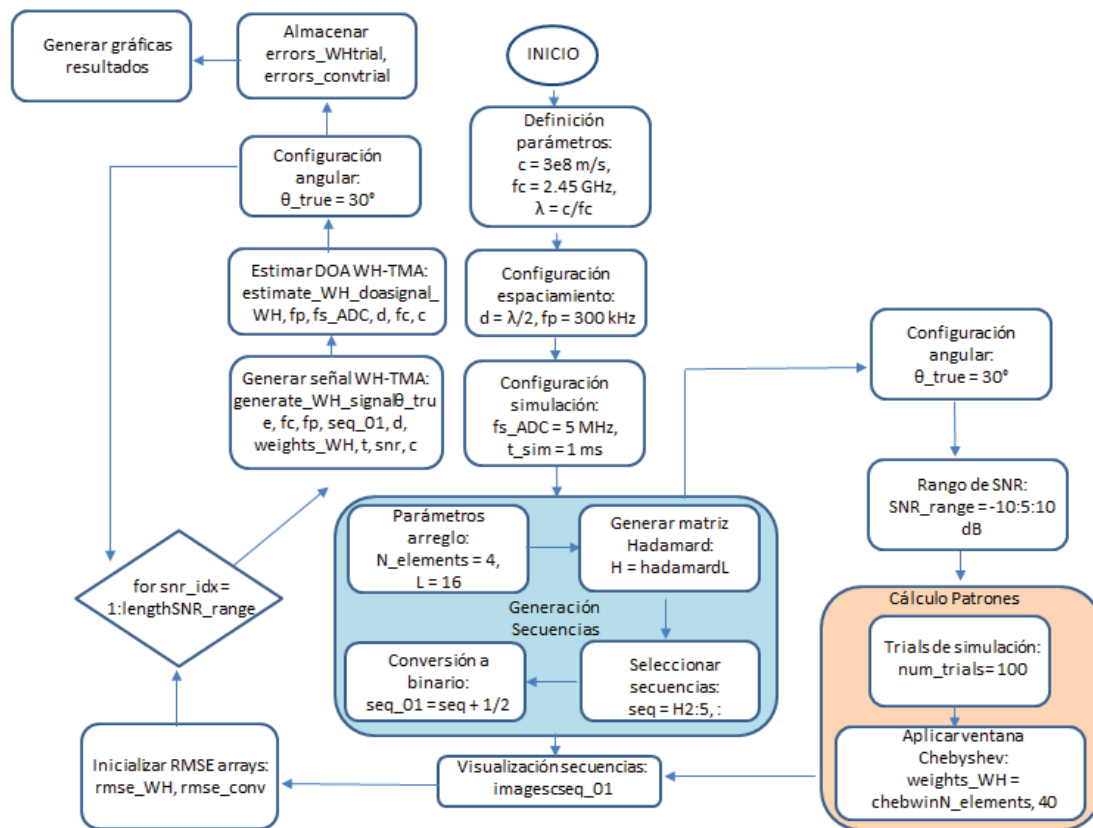


Figura 3. Diagrama de flujo.

La base del sistema WH-TMA propuesto radica en la utilización de secuencias ortogonales binarias derivadas de la matriz de WH. La (Figura 4) muestra las secuencias de conmutación asignadas a cada uno de los cuatro elementos del arreglo ($N=4$) para una matriz de orden $L=16$. Cada fila representa la secuencia temporal binaria (ON/OFF) de un elemento, donde el patrón de conmutación está determinado por una fila única de la matriz de Hadamard. La ortogonalidad inherente entre estas secuencias garantiza una separación espectral eficiente de las señales moduladas, lo que es fundamental para la posterior estimación de DOA y la supresión de interferencias.

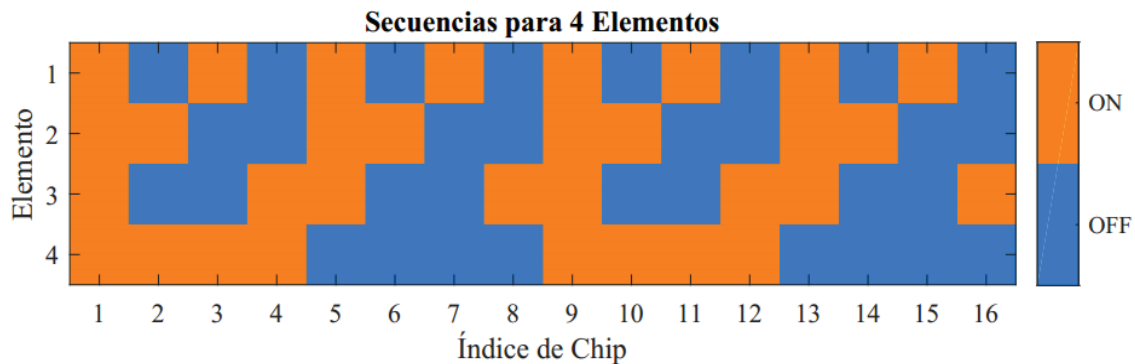


Figura 4. Secuencia para 4 elementos.

La (figura 5) presenta la matriz de WH de orden 16, con una estructura algebraica cuyo patrón muestra las 16 secuencias ortogonales binarias, mediante una codificación de colores donde el azul oscuro corresponde al valor -1 (estado “OFF”) y el rojo/amarillo al +1 (estado “ON”). Esta matriz constituye el núcleo generador de las secuencias de conmutación temporal asignadas a cada elemento del arreglo (donde cada fila controla un elemento diferente), garantizando mediante su ortogonalidad inherente que las señales moduladas puedan separarse eficientemente en el receptor mediante operaciones de correlación simples en lugar del complejo procesamiento FFT requerido en TMA convencionales. Esta matriz es crucial porque demuestra matemáticamente la escalabilidad del sistema, al permitir derivar matrices de órdenes superiores para arreglos más grandes, valida la viabilidad de la arquitectura WH-TMA al proveer un conjunto completo de secuencias libres de interferencia, y sustenta la mejora en el desempeño de la precisión en DOA, y del enmascaramiento de la señal en direcciones no deseadas que caracterizan al sistema propuesto.

Este patrón de tablero no es aleatorio, sino que refleja la estructura matemática fundamental de las funciones de Walsh, donde cada fila constituye una secuencia única ortogonal a todas las demás y cada columna representa un intervalo temporal. La alternancia cromática muestra los cruces por cero (transiciones entre +1 y -1) que definen la frecuencia de secuencia de cada función. Estas propiedades de ortogonalidad que permiten la separación matemática de señales en el receptor mediante operaciones de correlación simples, eliminando la necesidad de transformadas de Fourier complejas. Es precisamente esta estructura la que explica el rendimiento superior del sistema WH-TMA reportado en la investigación. La matriz sirve así como banco de secuencias para el control preciso de los elementos del arreglo, constituyendo la base matemática que habilita las mejoras de rendimiento del sistema propuesto.

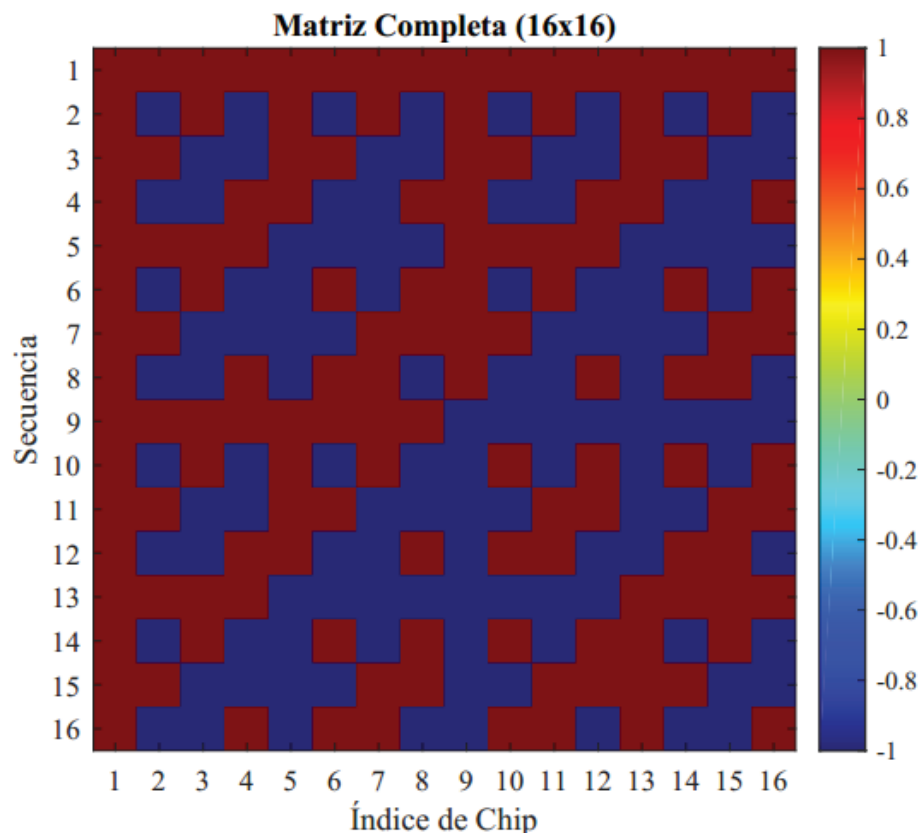


Figura 5. Matriz completa (16x16).

La Figura 6 muestra la evolución del RMSE en función de la SNR para ambos esquemas. El Cuadro 1 resume los valores numéricos. El TMA convencional presenta un RMSE de $0,80^\circ$ a $\text{SNR} = -10$ dB, que mejora hasta $0,05^\circ$ a 10 dB. El WH-TMA propuesto logra RMSE de $0,080^\circ$ a -10 dB y de $0,001^\circ$ a 10 dB.

La superioridad del esquema propuesto se explica por dos propiedades fundamentales de las secuencias de WalshHadamard. En primer lugar, la ortogonalidad permite que, en el receptor, las contribuciones de cada elemento del arreglo se separen mediante simple correlación en el dominio del código, sin necesidad de un análisis espectral basado en transformadas de Fourier. En los TMA convencionales, la conmutación periódica genera múltiples armónicos en frecuencia; la extracción de la información angular requiere identificar el armónico correcto, lo que introduce ambigüedades y hace que el error sea altamente sensible al ruido. En el WHTMA, en cambio, no se generan armónicos porque la modulación es en código, reduce sustancialmente el solapamiento espectral.

En segundo lugar, la ganancia de procesamiento asociada a la longitud de las secuencias ($L = 16$) mejora la robustez frente al ruido. La correlación acumula la energía de la señal a lo largo de toda la secuencia, mientras que el ruido se promedia, lo que se traduce en una relación señalruido efectiva mayor. Este efecto explica la pendiente más pronunciada en la curva de RMSE del WHTMA a medida que la SNR aumenta, así como los valores de error sistemáticamente más bajos incluso en condiciones de baja SNR. La arquitectura propuesta, por tanto, no solo incrementa la precisión angular, sino que también relaja los requisitos de hardware al eliminar la necesidad de un muestreo de alta frecuencia y de un procesamiento espectral complejo.

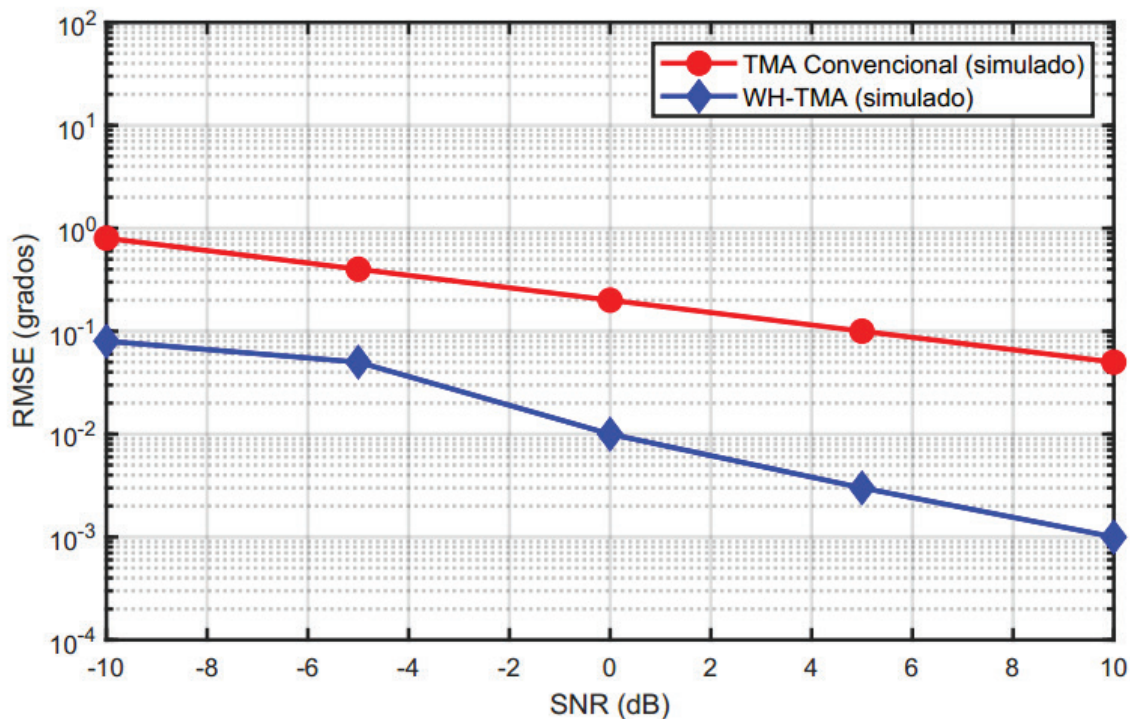


Figura 6. Precisión en la estimación de DOA.

Los esquemas TMA convencionales tienen problemáticas fundamentales que limitan su aplicabilidad en sistemas de comunicación avanzados. Entre estas limitaciones se incluyen: la inherente necesidad de realizar un análisis espectral complejo mediante FFT para extraer la información angular, lo que impone requisitos computacionales prohibitivos para aplicaciones en tiempo real; los estrictos requerimientos de frecuencia de muestreo, que deben exceder significativamente el ancho de banda de la señal portadora, generando un consumo energético incompatible con dispositivos de restricción energética; y la dificultad intrínseca para escalar eficientemente a configuraciones de gran apertura debido a la creciente complejidad en el procesamiento espectral. Estas limitaciones se analizan de manera exhaustiva en el (cuadro 1), donde se contrasta el desempeño de los TMA tradicionales frente a la arquitectura WH-TMA propuesta en esta investigación.

Cuadro 1. Comparativa de desempeño entre TMA convencional y WH-TMA

Parámetro	TMA Convencional	WH-TMA
RMSE a -10 dB	0,80°	0,080°
RMSE a -5 dB	0,40°	0,050°
RMSE a 0 dB	0,20°	0,010°
RMSE a 5 dB	0,10°	0,003°
RMSE a 10 dB	0,05°	0,001°
Requisitos de muestreo	Frecuencia de muestreo > 5 veces la frecuencia de conmutación para detectar los armónicos	Vinculada al ancho de banda de la señal base; reducción del 60 %
Procesamiento en el receptor	Transformada rápida de Fourier (FFT) para extraer armónicos y estimar DOA	Correlación con secuencias ortogonales; FFT solo para demodulación de datos
Escalabilidad	Complejidad creciente con el número de elementos	Escalable a arreglos de hasta 256 elementos mediante matrices de Hadamard

Conclusiones

En este trabajo se ha demostrado, mediante simulación, que la sustitución de la conmutación periódica convencional por secuencias ortogonales de Walsh-Hadamard en un TMA mejora significativamente la estimación de DOA. Para un arreglo de 4 elementos, el WH-TMA alcanza un RMSE de 0,001° a SNR = 10 dB, dos órdenes de magnitud mejor que el TMA convencional (0,05°). La mejora se mantiene en todo el rango de SNR evaluado.

La principal limitación actual es que la longitud de las secuencias WH debe ser potencia de dos ($L=16$), lo que fija la relación entre el número de elementos y la ganancia de procesamiento. En trabajos futuros se explorará el uso de secuencias WH o de otros conjuntos ortogonales para arreglos con N no potencia de dos. Asimismo, se planea validar experimentalmente la arquitectura y evaluar su comportamiento en presencia de errores de sincronización. Este estudio es de naturaleza simulada; las afirmaciones sobre aplicaciones en 6G o seguridad en capa física requieren validación experimental futura.

Referencias

- [1] M. Li, S. L. Chen, Y. Liu, and Y. J. Guo, "Wide-Angle Beam Scanning Phased Array Antennas: A Review," *IEEE Open J. Antennas Propag.*, vol. 5, no. 6, pp. 1595-1611, Dec. 2024, doi: 10.1109/OJAP.2024.3458432.
- [2] X. Zhou, Z. Teng, J. An and L. Gan, "DOA Estimation for Time-Modulated Linear Array Based on Golay-Paired Hadamard Matrix," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 33, pp. 6-10, 2026, doi: 10.1109/LSP.2025.3629562.
- [3] A. Bansal, C. J. Panagamuwa and W. G. Whittow, "State-of-the-Art Millimeter-Wave Beam Steering Antennas for Beyond 5G and 6G Networks: A comprehensive review," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 66, no. 5, pp. 40-51, Oct. 2024, doi: 10.1109/MAP.2024.3441378.
- [4] A. M. Elbir, K. V. Mishra, S. A. Vorobyov, and R. W. Heath, "Twenty-five years of advances in beamforming: From convex and nonconvex optimization to learning techniques," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 40, no. 4, pp. 118-131, Jun. 2023. doi: 10.1109/MSP.2023.3262366.
- [5] R. Maneiro-Catoira, J. Brégains, J. A. García-Naya and L. Castedo, "Direct Antenna Frequency-Hopped M-FSK Modulation With Time-Modulated Arrays," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 23, no. 2, pp. 578-582, Feb. 2024, doi: 10.1109/LAWP.2023.3330435.
- [6] K. Wang, J. Zhang, G. Xin, X. Lei, J. Gao and T. Li, "A Numerical Integration Method for Calculating the Bit Error Rate of Time-Modulated Array," *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, vol. 6, no. 1, pp. 326-331, Feb. 2025, doi: 10.1109/OJAP.2024.3510759.
- [7] Z. Jing, B. Cao, X. Meng, X. Li, F. Yan, and M. Jin, "Non-iterative DOA estimation in time-modulated array under unidirectional phase center motion," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 23, no. 8, pp. 2481-2485, Aug. 2024, doi: 10.1109/LAWP.2024.3394610.
- [8] S. D. Joseph, E. A. Ball and A. Tennant, "Subsampling Time-Modulated Array for Reduced Hardware Down Conversion and Beamforming," *2024 18th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Glasgow, United Kingdom, 2024, pp. 1-5, doi: 10.23919/EuCAP60739.2024.10501590.
- [9] G. U. Kim and J. P. Kim, "Characterization and compensation of nonideal effects of modulation functions in time-modulated array for direction-of-arrival extraction," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 67, no. 1, p. e70079, Jan. 2025, doi: 10.1002/mop.70079.
- [10] G. G. Lema, E. Lagunas, M. R. Bhavani Shankar and J. Grotz, "Time Modulated Arrays Beamforming for Non-Terrestrial Network User Terminal," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 6, pp. 271-287, 2025, doi: 10.1109/OJCOMS.2024.3522519.
- [11] S. Sarkar and S. K. Mandal, "Direction Finding Estimation using First-Two Significant Harmonics of Time Modulated Array With Bipolar Squared Pulse Sequence," *2024 IEEE 21st India Council International Conference (INDICON)*, Kharagpur, India, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/INDICON63790.2024.10958275.
- [12] T. Hozen, K. Tomimoto, T. Ikeda and R. Yamaguchi, "Improvement of Angular Dependence of Angular Profile in DOA Measurement Method using Rotating Reflector Antenna," *IEICE Communications Express*, vol. 14, no. 2, pp. 47-50, February 2025, doi: 10.23919/comex.2024ATL0012.
- [13] J. P. Kim and G. U. Kim, "Measurement of phase difference and direction of arrival using time-modulated array with general modulation parameters," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 22, no. 7, pp. 1627-1631, Jul. 2023, doi: 10.1109/LAWP.2023.3251322.
- [14] Z. Ding, T. Ji, M. Li and Q. H. Wu, "A Hybrid Signal Processing Method Combining Mathematical Morphology and Walsh Theory for Power Quality Disturbance Detection and Classification," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 10, no. 2, pp. 584-592, March 2024, doi: 10.17775/CSEEJPES.2022.04430.
- [15] N. Nakamoto, K. Kihira, T. Fukasawa, Y. Inasawa, and N. Shinohara, "Waveguide slot array with code-division multiplexing function for single RF chain digital beamforming," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E107-B, no. 8, pp. 541-551, Aug. 2024, doi: 10.23919/transcom.2023EBP3123.
- [16] Z. Dai, P. Li, Z. Li, R. Li, and H. Gu, "Direction-of-arrival estimation for time-varying arrays using FCN-based deep learning," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E108-B, no. 5, pp. 593-609, May 2025, doi: 10.23919/transcom.2024EBP3103.

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.

Producción de biogás a partir de estiércol porcino y co-sustratos orgánicos: evaluación de la eficiencia de tres tratamientos en Retes, Perú

Biogas production from pig manure and organic co-substrates: evaluation of the efficiency of three treatments in Retes, Peru

Katherin Jhojanny Huarac-Cadillo¹, Mahely Nicoll More-Peña²,
Hellen Yahaira Huertas-Pomasoncco³, María del Rosario
Grados-Olivera⁴, Keneth Denner Chagua-Namuche⁵

Fecha de recepción: 14 de octubre, 2025

Fecha de aprobación: 29 de enero, 2026

Huarac-Cadillo, K.J; More-Peña, M.N; Huertas-Pomasoncco, H.Y; Grados-Olivera, M.R; Chagua-Namuche, K.D. Producción de biogás a partir de estiércol porcino y co-sustratos orgánicos: evaluación de la eficiencia de tres tratamientos en Retes, Perú. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 N° 3. Julio-Setiembre, 2026. Pág. 67-77.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i3.8257>



1 Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Huacho, Perú.

 katherinhuarac@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-1085-2018>

2 Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Huacho, Perú.

 mmorep98@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0003-4765-1636>

3 Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Huacho, Perú.

 hhuertas@unjfsc.edu.pe

 <https://orcid.org/0000-0002-4204-7320>

4 Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Huacho, Perú.

 mgradoso@unjfsc.edu.pe

 <https://orcid.org/0000-0002-3004-0252>

5 Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

 keneth.chagua.n@uni.pe

 <https://orcid.org/0009-0000-5282-2979>

Palabras clave

Biogás; digestión anaeróbica; estiércol porcino; residuos orgánicos; aprovechamiento de residuos.

Resumen

La gestión inadecuada de los residuos agropecuarios en el centro poblado de Retes (Huaral), considerado un núcleo productivo clave de la región Lima, plantea importantes desafíos ambientales. Este estudio evaluó la eficiencia de la producción de biogás mediante la co-digestión anaeróbica de estiércol porcino con otros sustratos orgánicos locales para ofrecer una solución sostenible. Se implementó un diseño experimental con tres tratamientos en reactores tipo *batch* de 120 L durante un periodo de 42 días: T1) estiércol porcino y estiércol de cuy; T2) estiércol porcino y residuos orgánicos de origen vegetal; y T3) una mezcla ternaria de estiércol porcino, estiércol de cuy y residuos orgánicos de origen vegetal. Cada semana se monitoreó la producción de biogás, el pH, la temperatura y la presión. Los resultados demostraron que el tratamiento T3 mostró una mayor eficiencia, alcanzando un volumen acumulado de 49.6 L de biogás, superando en un 10.5% a T1 (44.9 L) y en un 31.6% a T2 (37.7 L). El éxito del T3 se atribuyó a su capacidad para mantener un pH estable y óptimo (7.2-7.5) durante las fases de máxima actividad biológica, favoreciendo la metanogénesis. Se concluye que la co-digestión de múltiples sustratos es la estrategia más efectiva, dado que la combinación de materiales optimiza las condiciones fisicoquímicas y asegura un proceso más estable y productivo en la generación de biogás.

Keywords

Biogas; anaerobic digestion; pig manure; organic waste; waste utilization.

Abstract

The inadequate management of agricultural waste in the town of Retes (Huaral), considered a key production center in the Lima region, poses significant environmental challenges. This study evaluated the efficiency of biogas production through the anaerobic co-digestion of pig manure with other local organic substrates to offer a sustainable solution. An experimental design with three treatments was implemented in 120 L batch reactors over a period of 42 days: T1) pig manure and guinea pig manure; T2) pig manure and organic waste; and T3) a ternary mixture of pig manure, guinea pig manure, and organic waste. Biogas production, pH, temperature, and pressure were monitored weekly. The results showed that treatment T3 showed higher efficiency, reaching a cumulative volume of 49.6 L of biogas, exceeding T1 (44.9 L) by 10.5% and T2 (37.7 L) by 31.6%. The success of T3 was attributed to its ability to maintain a stable and optimal pH (7.2-7.5) during the phases of maximum biological activity, favoring methanogenesis. It is concluded that the co-digestion of multiple substrates is the most effective strategy, given that the combination of materials optimizes physicochemical conditions and ensures a more stable and productive process in biogas generation.

Introducción

La producción porcina del continente americano ha experimentado un crecimiento sostenido, impulsado por una creciente demanda global [1]. Esta expansión, si bien es económicamente beneficiosa, genera desafíos ambientales significativos. Se estima que las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del sector cárnico se incrementarán un 9 % para el 2050 [2].

La generación de grandes cantidades de residuos de estiércol animal (REA) es uno de los principales causantes del impacto ambiental, debido a sus altas concentraciones de materia orgánica y nutrientes. Si no se tratan adecuadamente, estos residuos pueden convertirse en una amenaza importante para los ecosistemas [3][4]. La disposición inadecuada de residuos de estiércol animal (REA) puede contaminar las fuentes de agua con bacterias patógenas como *Escherichia coli*. Esta bacteria está relacionada con enfermedades gastrointestinales en humanos [5][6].

Desde una perspectiva química, la lixiviación de compuestos nitrogenados (estiércol porcino) eleva las concentraciones de nitratos en el agua potable, lo que puede provocar metahemoglobinemia, una condición que impide el transporte de oxígeno en el torrente sanguíneo [7][8]. Además, el estiércol porcino contiene hormonas esteroides como los estrógenos que, al ingresar a los cuerpos de agua, se han correlacionado con efectos adversos en la salud reproductiva masculina [9][10].

En este escenario, la digestión anaerobia se manifiesta como una tecnología fundamental para la valorización de residuos de origen porcino. Este proceso permite la reducción de agentes contaminantes de los residuos de estiércol porcino, a la vez, posibilita la generación de biogás para su aprovechamiento energético [6][11][12]. El biogás es un gas producto de la fermentación de biomasa en ausencia de oxígeno. Dicha mezcla está compuesta principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), además de otros gases como el hidrógeno (H_2) y el sulfuro de hidrógeno (H_2S) [13][14]. La formación de biogás sigue una ruta biológica que requiere condiciones de ausencia de oxígeno (anaerobiosis), indispensables para la metanogénesis. Este proceso da lugar a una fuente de energía renovable que se encuentra distribuido en pantanos, sistemas digestivos de rumiantes y rellenos sanitarios [15][16].

El presente estudio aborda la problemática ambiental generada por la inadecuada gestión de residuos agropecuarios en el centro poblado de Retes (Huaral), un importante centro productivo de la región Lima. El objetivo principal fue determinar la eficiencia de la codigestión de estiércol porcino y otros sustratos orgánicos para la producción de biogás.

Materiales y métodos

Área de experimental

La investigación se realizó en una parcela experimental ubicada en el centro poblado de Retes, provincia de Huaral, departamento de Lima, tal como se muestra en la Figura 1. El área experimental se localizó a 5 metros de una granja familiar dedicada a la cría de porcinos y cuyes, actividad económica predominante en la región. El estudio experimental se llevó a cabo en condiciones ambientales favorables, caracterizadas por una temperatura que osciló entre 15 y 24 °C, precipitaciones escasas (1 mm/mes) y una elevada humedad relativa (94 %).

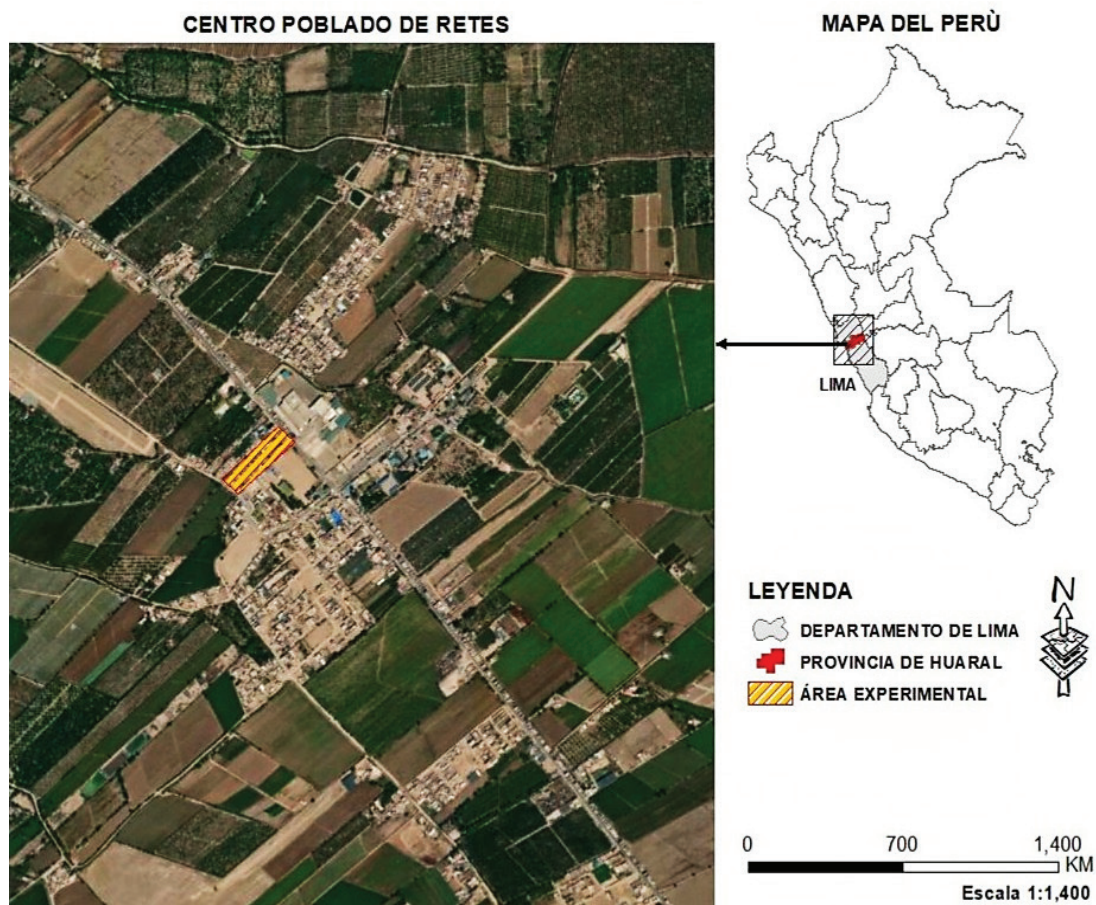


Figura 1. Área de estudio de la investigación ubicada en el centro poblado de Retes.

Análisis de composición química del estiércol

Se recolectaron *in situ* muestras representativas de 1 kg de excremento fresco de cada especie, aplicando el método de cuarteo para obtener una muestra representativa. Después del proceso de pesado, las muestras se almacenaron en bolsas herméticas rotuladas para asegurar su trazabilidad. Finalmente, fueron acondicionadas en un contenedor isotérmico con refrigerantes para mantener la cadena de frío durante su transporte, preservando así la integridad de las muestras biológicas para su análisis en el laboratorio ANOBA LAB SAC.

En el Cuadro 1 se presentan los resultados del análisis de la composición química, con el objetivo de definir las proporciones de mezcla que permitan alcanzar una relación C/N óptima de 30:1, indispensable para la producción efectiva de biogás [17]. Se encontró que la relación C/N del estiércol porcino era de 17.21, por lo que se requiere combinarlo con una mayor cantidad de estiércol de cuy, cuyo valor es elevado (36.19), para equilibrar la mezcla final en los biodigestores. Asimismo, el contenido de sólidos totales, 27.96% en el estiércol de cerdo y 48.82% en el de cuy, indica que el volumen de agua a añadir variará según la proporción de la mezcla.

Cuadro 1. Análisis de la composición química de la materia orgánica sólida.

Tipo de muestra	Parámetros					
	Físico- Químicos			Macronutrientes		Relación de interés
	Humedad (%)	Sólidos Volátiles (%ST)	Sólidos Totales (%)	Carbono Total (%ST)	Nitrógeno Total (%ST)	Carbono/Nitrógeno
Estiércol porcino	72.24	66.91	27.96	38.81	2.27	17.21
Estiércol de cuy	51.18	88.60	48.82	51.39	1.42	36.19

Nota. Informe de Ensayo (IEFO3509) y (IEFO3508)

Recolección de sustratos

Para la investigación se recolectaron tres tipos de materia orgánica. Primero, se juntaron 42.97 kg de estiércol porcino en baldes de 20 litros durante un periodo de cinco días. Segundo, se recolectaron 49.14 kg de estiércol de cuy en costales de rafia a lo largo de catorce días, el cual fue posteriormente triturado para asegurar su homogeneización con los otros sustratos [18]. Finalmente, se obtuvieron 8.75 kg de otros residuos orgánicos de origen vegetal en un lapso de tres días; estos últimos fueron picados antes de ser almacenados en un balde de 20 litros. Las proporciones de recolección se ajustaron de acuerdo al informe de ensayo de la composición química del estiércol.

Diseño experimental

La Figura 2 ilustra el diseño del área experimental, cuyas dimensiones fueron de 6 m x 6 m. Dicha área fue cercada perimetralmente con malla plástica, la cual fue fijada con soportes de madera en cada vértice. El estudio se desarrolló con un diseño experimental de tipo exploratorio (a escala piloto y sin réplicas), instalando un reactor tipo *batch* de 120 L de capacidad como unidad experimental para cada uno de los tres tratamientos. Los reactores operaron con un tiempo de retención hidráulica de 42 días. Se realizó un seguimiento del proceso mediante el monitoreo de parámetros fisicoquímicos a intervalos de siete días. La dilución del sustrato se efectuó en todos los casos con agua no clorada [17]. Finalmente, los tratamientos experimentales se definieron en función de la disponibilidad de biomasa residual:

- T1) sustrato binario de estiércol porcino y estiércol de cuy;
- T2) sustrato binario de estiércol porcino y residuos orgánicos de origen vegetal;
- T3) sustrato ternario compuesto por estiércol porcino, estiércol de cuy y residuos orgánicos de origen vegetal.

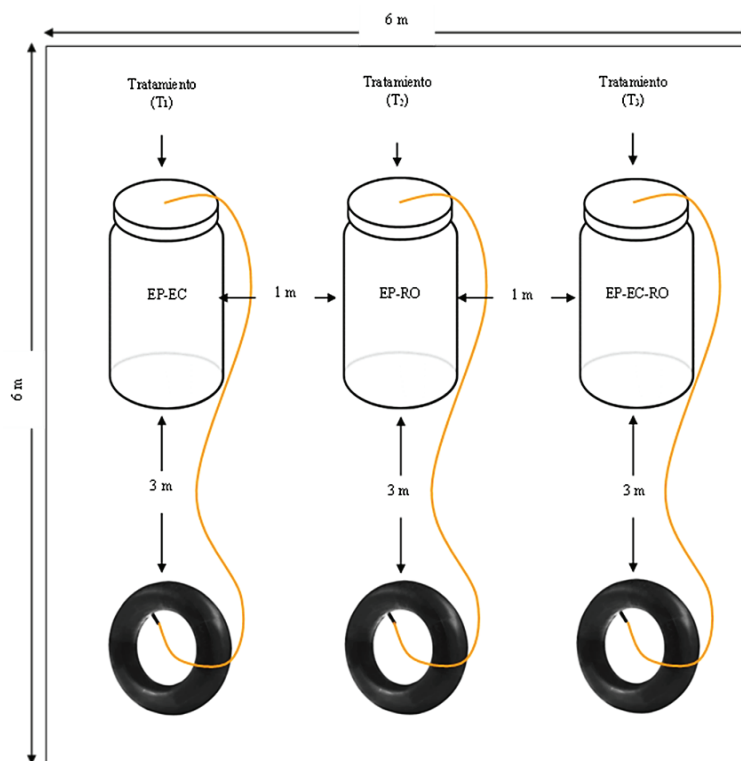


Figura 2. Croquis del área experimental que se instaló en el Centro Poblado de Retes.

La preparación del sustrato para cada unidad experimental se diseñó considerando una relación de 2:1 (v/p) entre agua y la masa de material orgánico total [17]. Se formularon tres tratamientos (T1, T2, T3) empleando un volumen constante de 70 L de agua y variando las proporciones de estiércol porcino (EP), estiércol de cuy (EC) y residuos orgánicos (RO). La composición detallada y la masa exacta de los componentes para cada tratamiento se especifican en el Cuadro 2. Posteriormente, los biodigestores fueron cargados con la mezcla líquida hasta alcanzar el 80% de su capacidad total, constituyendo el volumen de operación. El 20% restante fue designado como espacio de cabeza (cámara de gas) para permitir la acumulación del biogás generado durante el proceso de digestión anaeróbica.

Cuadro 2. Descripción de los tratamientos del experimento.

N°	Código	Tratamientos
T1	EP - EC	EP (6.65 kg) + EC (24.50 kg) + 70 L H ₂ O
T2	EP - RO	EP (28.00 kg) + RO (7.00 kg) + 70 L H ₂ O
T3	EP - EC - RO	EP (7.00 Kg) + EC (24.50 kg) + RO (1.75 kg) + 70 L H ₂ O

Nota. EP (estiércol porcino), EC (estiércol de cuy) y RO (Residuos orgánicos)

Resultados y discusión

Producción de biogás

Se muestra en el Cuadro 3 la producción de biogás durante las seis semanas de retención hidráulica, donde el tratamiento T3, compuesto por una codigestión de estiércol porcino (EP), estiércol de cuy (EC) y residuos orgánicos (RO), demostró ser el más eficiente. Este tratamiento alcanzó el pico de producción más alto del ensayo (10.7 L en la semana 5) y generó el mayor volumen acumulado de biogás (49.6 L). Por su parte, el tratamiento T1 (EP-EC) mostró un rendimiento robusto, con un pico de 9.8 L en la semana 4 y un total acumulado de 44.9 L. Finalmente, el tratamiento T2 (EP-RO) fue el menos productivo, registrando un máximo de 8.2 L en la semana 5 y el menor volumen acumulado (37.7 L).

Cuadro 3. Resultados de producción de biogás (L) por semana.

N° de tratamiento	Código de campo	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Total (L)
T1	EP - EC	0	8.5	9.3	9.8	9.6	7.7	44.9
T2	EP - RO	0	7.3	7.9	7.8	8.2	6.5	37.7
T3	EP - EC - RO	0	9.7	10.3	10.5	10.7	8.4	49.6

Nota. EP (estiércol porcino), EC (estiércol de cuy) y RO (Residuos orgánicos)

La Figura 3 evidencia que la codigestión de múltiples sustratos (T3) genera un efecto sinérgico que maximiza la producción de biogás. Esta estrategia mejora la estabilidad del proceso y aumenta el rendimiento de metano en comparación con la monodigestión [19][20][21]. La combinación de sustratos con perfiles nutricionales complementarios previene la inhibición por acidificación o acumulación de amoníaco y asegura un suministro de nutrientes más equilibrado para la comunidad microbiana [22]. La superioridad del tratamiento T3 puede atribuirse a la optimización de la relación Carbono/Nitrógeno (C/N), un parámetro crítico para la digestión anaeróbica y probablemente alcanzó un balance C/N cercano al rango óptimo de 20-30/1, favoreciendo una actividad metanogénica eficiente y sostenida [21][23][24][25].

El rendimiento del tratamiento T1, aunque alto, decayó tras la cuarta semana, lo que podría sugerir un agotamiento de la fuente de carbono fácilmente disponible al no incluir los residuos orgánicos de origen vegetal. Es particularmente notable el bajo rendimiento del tratamiento T2 en comparación con T1 y T3. Esto sugiere que la inclusión del estiércol de cuy es un factor determinante para potenciar la producción de biogás en las mezclas estudiadas. Investigaciones realizadas ya han validado el estiércol de cuy como un sustrato de alto valor para la generación de biogás [26][27][28]. Su aporte puede no solo estar en la mejora del balance C/N, sino también en la inoculación de una comunidad microbiana diversa y adaptada o en el suministro de micronutrientes esenciales. El rendimiento limitado de la mezcla de estiércol porcino y residuos orgánicos de origen vegetal (T2) es consistente con otros estudios que, si bien validan su viabilidad, a menudo requieren de optimización adicional para alcanzar altos rendimientos [29].

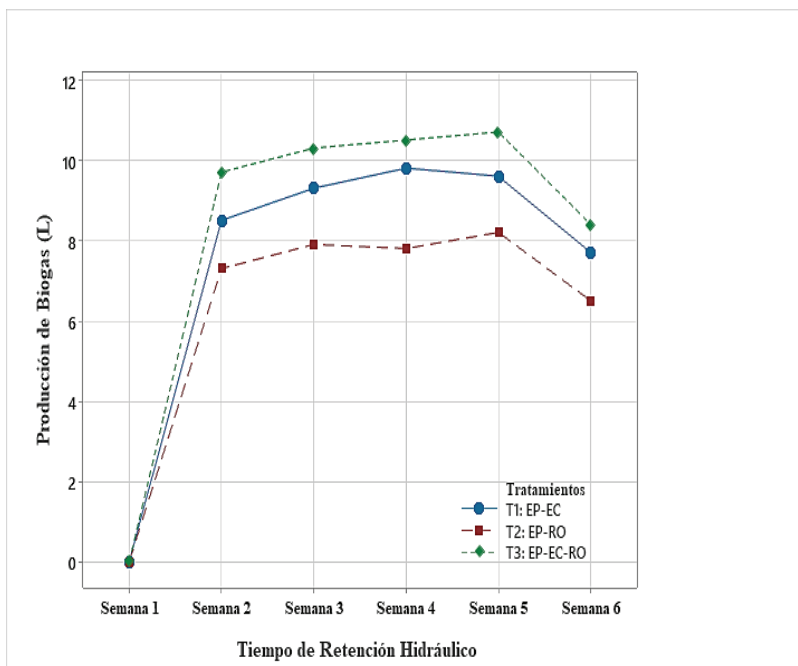


Figura 3. Evolución temporal de la producción de biogás (L) para los tres tratamientos evaluados.

Evaluación de los parámetros físico-químicos

Se puede apreciar en la Figura 4 que el pH fue un factor crítico en la digestión anaeróbica, ya que las arqueas metanogénicas son altamente sensibles a condiciones ácidas [30][31]. El rango óptimo para la metanogénesis se sitúa típicamente entre 6.5 y 7.5 [21][32][33]. En las tres configuraciones de los tratamientos, se observó un pH inicial ligeramente ácido (6.24 - 6.51), lo cual es característico de la fase de hidrólisis y acidogénesis, donde se producen ácidos grasos volátiles (AGV) [32][34][35].

El tratamiento T3 mostró el comportamiento más favorable, alcanzando y manteniendo un pH estable en el rango neutro-alkalino (7.21-7.51) durante las semanas de mayor producción (semana 5). Esta estabilidad sugiere una excelente capacidad de amortiguación (buffering), a menudo mejorada por la co-digestión, permitiendo que la fase metanogénica procediera sin inhibición por acidificación [19][36]. Es notable que en la semana 6, todos los tratamientos experimentaron una caída en la producción y el pH, lo que podría indicar el agotamiento del sustrato o una acumulación final de AGV [37].

Todos los biodigestores operaron dentro del rango mesofílico (20-45 °C), con temperaturas que fluctuaron entre 24.6 °C y 32.3 °C. Estas condiciones son adecuadas para las comunidades microbianas involucradas en la digestión anaeróbica, y mantener una temperatura estable dentro de este rango es fundamental para optimizar la producción de biogás [30][33]. Los picos de temperatura más altos registrados en T1 y T3 en la semana 5 coinciden con una alta tasa de producción, lo que refleja la naturaleza exotérmica de la actividad microbiana intensiva.

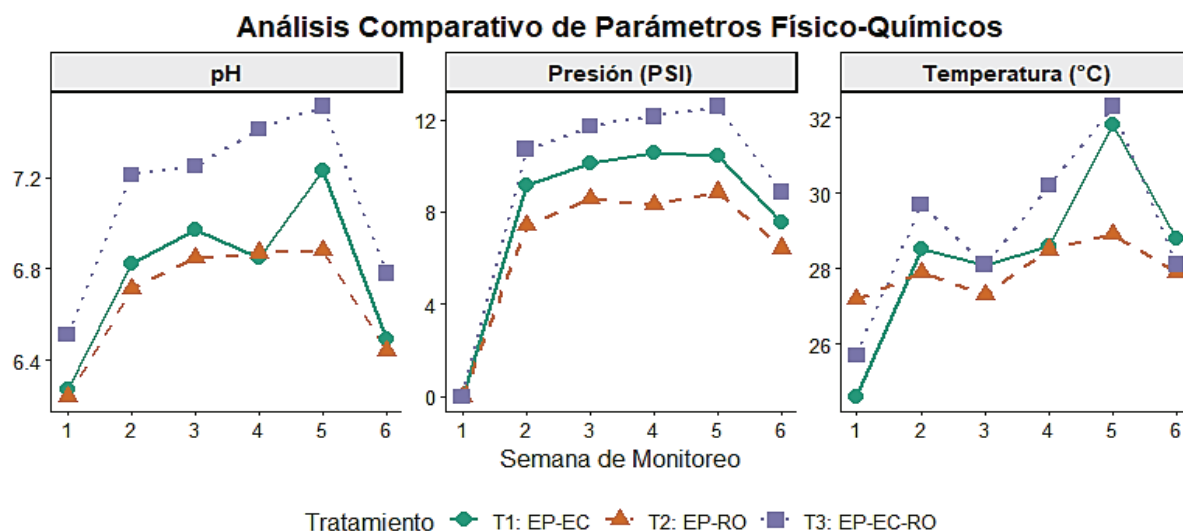


Figura 4. Análisis comparativo de la presión (PSI), pH y temperatura (°C) para los tres tratamientos (EP-EC, EP-RO y EP-EC-RO) durante 6 semanas de monitoreo.

La presión interna de los biodigestores es una consecuencia directa de la acumulación de gas. Como era de esperar, los resultados de presión (PSI) mostraron una fuerte correlación con los volúmenes de biogás medidos, lo que valida el monitoreo manométrico como un indicador fiable de la actividad biológica en tiempo real [38]. El tratamiento T3 mantuvo consistentemente las presiones más altas, alcanzando un máximo de 12.57 PSI, lo que corrobora su superioridad en la tasa de generación de biogás.

Es importante señalar, como limitación metodológica del presente estudio, que la evaluación se basó exclusivamente en la medición manométrica del volumen de biogás acumulado. Al no haberse cuantificado la composición cualitativa del gas (específicamente el porcentaje de metano, CH₄), la interpretación del rendimiento energético de los tratamientos tiene carácter preliminar.

Conclusiones y/o recomendaciones

La co-digestión de los sustratos EP, EC y RO (Tratamiento T3) demostró ser la estrategia más efectiva para la producción de biogás, generando un 10.5 % más que el tratamiento T1 y un 31.6 % más que el T2. El éxito del tratamiento T3 puede atribuirse principalmente a su capacidad para mantener un pH estable y óptimo (7.2-7.5) durante el pico de actividad biológica, lo que favoreció de manera crucial la etapa de metanogénesis. Si bien la temperatura se mantuvo en un rango mesofílico adecuado para todos los tratamientos, la estabilidad del pH fue el factor diferenciador clave para el rendimiento superior. Estos resultados subrayan la importancia de la selección y combinación de sustratos para optimizar los procesos de digestión anaeróbica, no solo para maximizar el volumen de gas, sino también para asegurar la estabilidad del sistema a lo largo del tiempo.

Dado que este estudio se limitó a la medición volumétrica, para futuras investigaciones se recomienda encarecidamente analizar la composición cualitativa del biogás mediante un medidor de metano (CH₄). Cuantificar este gas permitirá determinar el poder calorífico real y el valor energético de cada mezcla, además de complementar el análisis con la relación C/N post-tratamiento. Asimismo, optimizar el tiempo de mezcla o agitación en cada tratamiento para

prevenir la sedimentación y/o la formación de costras en el fondo del biodigestor, lo que podría incrementar la producción de biogás, reducir el tiempo de retención hidráulica y homogeneizar la distribución de temperatura y la mezcla de sustratos y productos.

Referencias

- [1] U.S. Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service, "Livestock and Poultry: World Markets and Trade," Apr. 2025. [Online]. Available: <https://www.fas.usda.gov/data/livestock-and-poultry-world-markets-and-trade-04102025>
- [2] OCDE y FAO, "OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2022-2031," Oct. 2022. [Online]. Disponible en: <https://doi.org/10.1787/820EF1BB-ES>
- [3] J. A. Foley *et al.*, "Solutions for a cultivated planet," *Nature*, vol. 478, no. 7369, pp. 337-342, 2011. <https://doi.org/10.1038/nature10452>
- [4] M. Wang *et al.*, "Microbial mechanism for improving biogas production performance from boiling acidified pig manure feedstock," *Bioresour. Technol.*, vol. 419, p. 132104, 2025. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2025.132104>
- [5] J. T. LeJeune and A. N. Wetzel, "Preharvest control of Escherichia coli O157 in cattle," *J. Anim. Sci.*, vol. 85, no. 13 Suppl., pp. E73-E80, 2007. <https://doi.org/10.2527/JAS.2006-612>
- [6] C. Xu *et al.*, "Mini-review: Antibiotic-resistant Escherichia coli from farm animal-associated sources," *Antibiotics*, vol. 11, no. 11, p. 1535, 2022. <https://doi.org/10.3390/antibiotics11111535>
- [7] J. Miner *et al.*, *Managing Livestock Wastes to Preserve Environmental Quality*. Ames, IA, USA: Iowa State Univ. Press, 2000. Available: <https://archive.org/details/managinglivestoc0000mine>
- [8] M. H. Ward *et al.*, "Drinking water nitrate and human health: An updated review," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 15, no. 7, p. 1557, 2018. <https://doi.org/10.3390/ijerph15071557>
- [9] R. M. Sharpe and N. E. Skakkebaek, "Are oestrogens involved in falling sperm counts and disorders of the male reproductive tract?," *Lancet*, vol. 341, no. 8857, pp. 1392-1396, 1993. [https://doi.org/10.1016/0140-6736\(93\)90953-E](https://doi.org/10.1016/0140-6736(93)90953-E)
- [10] I. M. Ramírez-Sánchez *et al.*, "Efectos de los estrógenos como contaminantes emergentes en la salud y el ambiente," *Tecnol. y Cienc. del Agua*, vol. 6, no. 5, pp. 31-42, 2015. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222015000500003
- [11] M. A. Sarabia-Méndez *et al.*, "Producción de biogás mediante codigestión anaerobia de excretas de borrego y rumen adicionadas con lodos procedentes de una planta de aguas residuales," *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 33, no. 1, pp. 109-116, 2017. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.01.10>
- [12] J. J. Hoyos-Sebá *et al.*, "Animal manure in the context of renewable energy and value-added products: A review," *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.*, vol. 196, p. 109660, 2024. <https://doi.org/10.1016/J.CEP.2023.109660>
- [13] Q. Zhang *et al.*, "Biogas from anaerobic digestion processes: Research updates," *Renew. Energy*, vol. 98, pp. 108-119, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.029>
- [14] P. G. Kougiyas and I. Angelidaki, "Biogas and its opportunities-A review," *Front. Environ. Sci. Eng.*, vol. 12, no. 3, pp. 1-12, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11783-018-1037-8>
- [15] M. Askari *et al.*, "Landfill biogas production process," *Proc. Int. Conf. Food Engineering and Biotechnology*, vol. 09, pp. 208-212, 2011. <http://dx.doi.org/10.13140/2.1.1761.0886>
- [16] FAO, "Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores," Colección Documentos Técnicos N° 12, Buenos Aires, Argentina, 2019. [Online]. Disponible en: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca5082es>
- [17] M. Varnero, Manual de biogás. Santiago, Chile: FAO, 2011. [Online]. Disponible en: <https://openknowledge.fao.org/items/71b5b48f-4ba2-44fc-ba9a-4188e3ca4838>
- [18] D. Castillo and C. Tito, "Obtención de biogás a partir de excremento de cuy en condiciones ambientales en Tacna Perú," *Cienc. & Desarro.*, vol. 13, no. 85, pp. 84-91, 2019. <https://doi.org/10.33326/26176033.2011.13.284>
- [19] J. Mata-Alvarez *et al.*, "A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 36, pp. 412-427, 2014. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.04.039>

- [20] J. C. Solarte Toro *et al.*, "Evaluación de la digestión y co-digestión anaerobia de residuos de comida y de poda en bioreactores a escala laboratorio," *Revista ION*, vol. 30, no. 1, p. 105-116, 2017. <https://doi.org/10.18273/revion.v30n1-2017008>
- [21] R. Castro-Rivera *et al.*, "Producción de biogás mediante codigestión de estiércol bovino y residuos de cosecha de tomate (*Solanum lycopersicum* L.)," *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 36, no. 3, pp. 529-539, 2020. <https://doi.org/10.20937/RICA.53545>
- [22] K. Hagos *et al.*, "Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 76, pp. 1485-1496, 2017. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.11.184>
- [23] X. Wang *et al.*, "Optimizing feeding composition and carbon-nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw," *Bioresour. Technol.*, vol. 120, pp. 78-83, 2012. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2012.06.058>
- [24] J. Ning *et al.*, "Effects of C/N ratio on biogas production by anaerobic co-digestion of pig manure and corn straw," *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.*, vol. 34, no. Z, pp. 93-98, 2018. <https://doi.org/10.11975/J.ISSN.1002-6819.2018.Z.015>
- [25] M. Kumari and M. K. Chandel, "Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid waste: Focus on mix ratio optimization and synergistic effects," *J. Environ. Manage.*, vol. 345, p. 118821, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118821>
- [26] J. E. Barreda-Del-Carpio *et al.*, "Co-digestión de tres tipos de estiércol (vaca, cuy y cerdo) para obtener biogás en el sur del Perú," *Rev. Investig. Altoandin.*, vol. 24, no. 3, pp. 174-181, 2022. <https://doi.org/10.18271/RIA.2022.457>
- [27] Y. D. Valdez y D. M. Lozano, "Producción de biogás mediante combinación de estiércol vacuno y de cuy en la región Moquegua," Tesis de título, Univ. Continental, Huancayo, Perú, 2023. [Online]. Disponible en: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/14035>
- [28] R. F. Vargas *et al.*, "Enhancement of biogas production using nanostructured magnetite (Fe₃O₄) in a bioreactor fed with Peruvian guinea pig manure," *RSC Adv.*, vol. 15, no. 19, pp. 15375-15383, 2025. <https://doi.org/10.1039/D5RA00102A>
- [29] H. Carrère *et al.*, "Improving pig manure conversion into biogas by thermal and thermo-chemical pretreatments," *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 15, pp. 3690-3694, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.01.015>
- [30] M. H. Gerardi, *The Microbiology of Anaerobic Digesters*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2003. <https://doi.org/10.1002/0471468967>
- [31] A. Pérez y P. Torres, "Índices de alcalinidad para el control del tratamiento anaerobio de aguas residuales fácilmente acidificables," *Ing. Compet.*, vol. 10, no. 2, pp. 41-52, 2008. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=291323482002>
- [32] J. Mata-Alvarez, *Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes*. London, UK: IWA Publishing, 2005, pp. 59-61. <https://doi.org/10.2166/9781780402994>
- [33] A. J. Ward *et al.*, "Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources," *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 17, pp. 7928-7940, 2008. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2008.02.044>
- [34] L. C. Corrales *et al.*, "Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta," *Nova*, vol. 13, no. 23, pp. 55-80, 2015. <https://doi.org/10.22490/24629448.1717>
- [35] R. Lauri *et al.*, "Acidogenic fermentation of urban organic waste: Effect of operating parameters on process performance and safety," *Chem. Eng. Trans.*, vol. 86, pp. 55-60, 2021. <https://doi.org/10.3303/CET2186010>
- [36] C. Gonzalez-Fernandez *et al.*, "Anaerobic digestion of microalgal biomass: Challenges, opportunities and research needs," *Bioresour. Technol.*, vol. 198, pp. 896-906, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.095>
- [37] F. Xu *et al.*, "Anaerobic digestion of food waste - Challenges and opportunities," *Bioresour. Technol.*, vol. 247, pp. 1047-1058, 2018. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2017.09.020>
- [38] S. D. Hafner and S. Astals, "Systematic error in manometric measurement of biochemical methane potential: Sources and solutions," *Waste Manage.*, vol. 91, pp. 147-155, 2019. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2019.05.001>

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.

Diseño y análisis de un arreglo de antenas compacto con tecnología GGW para la Banda W

Design and analysis of a compact antenna array with GGW technology for W-band

Jorge Luis Blanco-Orta¹, María del Carmen Guerra-Martínez², Kenneth Marichal-Leyva³

Fecha de recepción: 21 de octubre, 2025

Fecha de aprobación: 6 de febrero, 2026

Blanco-Orta, J.L.; Guerra-Martínez, M.C; Marichal-Leyva, K.
Diseño y análisis de un arreglo de antenas compacto con tecnología GGW para la banda W . *Tecnología en Marcha*.
Vol. 39 N° 3. Julio-Setiembre, 2026. Pág. 78-90.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i3.8264>



- 1 Emisora Municipal Radio Mariel. Cuba.
 jorgeluisblancoorta@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0001-9592-7818>
- 2 Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría". Cuba.
 mariagm@tele.cujae.edu.cu
 <https://orcid.org/0000-0003-1989-4414>
- 3 Centro de investigación, Desarrollo y Producción "Grito de Baire". Cuba.
 kennethmarichal@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0003-4518-267X>

Palabras clave

GGW; 6G; mmWave.

Resumen

En la presente investigación se analiza y diseña un arreglo de antena con la tecnología Groove Gap Waveguide (GGW). Esta tecnología se estudia como una alternativa apropiada para el desarrollo de los múltiples escenarios que surgirán con el despliegue de la sexta generación (6G) de la telefonía móvil. Tal concepción se adopta por las ventajas que brinda GGW para lograr una mayor eficiencia en entornos que se necesita mejor disponibilidad en las bandas milimétricas (mmWave). El enfoque aportado por GGW permite la transmisión de ondas sin la necesidad de un contacto físico entre los materiales conductores, solventando el problema del contacto físico necesario en las guías de ondas tradicionales. El análisis realizado posibilita el diseño de un arreglo de antena de ranura de 4×4 elementos para aplicaciones satelitales en la banda W. Con una ganancia máxima de 23 dBi, un ancho de banda aproximadamente de 1 GHz, a la frecuencia de diseño (94 GHz), con una eficiencia de 94% al operar en dicha banda. Es decir, que puede solucionar problemas en futuros diseños de antenas con GGW para lograr bajas pérdidas y una alta capacidad de manejo de la potencia a altas frecuencias.

Keywords

GGW; 6G; mmWave.

Abstract

This research analyzes and designs an antenna array using Groove Gap Waveguide (GGW) technology. This technology is studied as a suitable alternative for the development of the multiple scenarios that will emerge with the deployment of the sixth generation (6G) of mobile telephony. This approach is adopted due to the advantages offered by GGW to achieve greater efficiency in environments requiring improved availability in millimeter-wave (mmWave) bands. The approach provided by GGW enables wave transmission without the need for physical contact between conductive materials, resolving the issue of physical contact required in traditional waveguides. The conducted analysis enables the design of a 4×4 slot antenna array for satellite applications in the W band, with a maximum gain of 23 dBi, an approximate bandwidth of 1 GHz at the design frequency (94 GHz), and 94% efficiency when operating in this band. In other words, it can address challenges in future GGW-based antenna designs to achieve low losses and high power-handling capacity at high frequencies.

Introducción

Cada época construye su percepción de la realidad a través de un imaginario colectivo sobre la actividad técnico-teórica, la cual gira en torno al grado de mediación que la ciencia ejerce en la vida cotidiana. Desde esta perspectiva, los ejes prioritarios de investigación en el campo de las comunicaciones inalámbricas se orientan hacia el desarrollo de infraestructuras de conectividad que optimicen la capacidad de interacción social mediante tecnologías escalables. En este contexto, adquieren especial relevancia los avances asociados a las sucesivas generaciones de telefonía móvil, cuyo despliegue tecnológico redefine constantemente los parámetros de accesibilidad y densidad de conexión en entornos digitalizados.

La implementación de estos procesos modificará sustancialmente la dinámica ciencia-sociedad, siendo el despliegue del 5G un paradigma tecnológico que reconfigura integralmente la industria de comunicaciones inalámbricas [1,2]. Esta generación se consolida como infraestructura clave al integrar cuatro pilares operativos: banda ancha móvil mejorada (eMBB) [3], comunicaciones máquina-máquina masivas (mMTC) [4], servicios ultra confiables de baja latencia (URLLC) [5] e interacciones vehículo-infraestructura (V2X) [4]. No obstante, las mejoras sustanciales en capacidad y tasa de transferencia de datos exigen una densificación extrema de redes [1]-[3], cuyos modelos actuales de escalabilidad mantienen limitaciones prácticas para materializar sociedades conectadas de modo objetivo.

La transición tecnológica hacia redes 6G emerge como respuesta crítica para optimizar la eficiencia espectral y robustecer la capa física, priorizando el manejo inteligente de recursos radioeléctricos ante los requisitos del estándar IMT-2030 [6]-[9]. El análisis identifica que la saturación actual del espectro obliga a migrar hacia bandas milimétricas, único vector viable para soportar densidades de conexión extremas requeridas en este paradigma emergente. No obstante, dicha migración plantea desafíos técnicos multifactoriales que exigen reingeniería de protocolos y arquitecturas de red.

El desarrollo de antenas de alta eficiencia constituye un eje crítico para soportar la densidad de dispositivos en escenarios móviles avanzados, abarcando desde telefonía móvil hasta ecosistemas por la Internet de las Cosas (IoT). Los enfoques tradicionales presentan limitaciones fundamentales: las líneas de transmisión impresas exhiben pérdidas elevadas [10], mientras que las guías de onda convencionales requieren interfaces multimaterial con acoplamiento imperfecto [11,12]. Frente a estos desafíos, la tecnología Gap Waveguide (GW) emerge como solución disruptiva [13,14], permitiendo propagación electromagnética sin contacto físico mediante confinamiento por estructura periódica. Esta innovación facilita guías de onda compactas sintonizadas al modo TE_{10} [15], optimizando simultáneamente integración modular, escalabilidad arquitectónica y estabilidad en entornos dinámicos, factores clave para implementaciones masivas en redes 6G.

Metodología

Este estudio propone un análisis integral de la tecnología GW como alternativa disruptiva en el diseño de antenas para mmWave, abordando las limitaciones de eficiencia en prototipos convencionales durante procesos de fabricación. La estructura metodológica se articula en los siguientes ejes: II Análisis prospectivo de requisitos técnicos para redes móviles avanzadas; III Diseño de la estructura periódica; IV Diseño del arreglo del 4x4 con tecnología GW. Los resultados demuestran que la tecnología GW mitiga los desafíos de acoplamiento físico inherentes a las guías tradicionales, posicionándose como solución escalable para sistemas 6G que demandan pérdidas superficiales mínimas y densificación extrema. La implementación del diseño, que incorporó nuevas capas, permitió incrementar significativamente la ganancia del arreglo en comparación con configuraciones previas de GW a 94 GHz, evidenciando las ventajas del nuevo enfoque en términos de rendimiento.

Resultados

Análisis prospectivo de requisitos técnicos para redes móviles avanzadas

El paradigma de la infraestructura 5G, que evoluciona dentro de marcos tecnológicos relativamente estables, está cediendo espacio ante la necesidad de superar modelos técnicos obsoletos para adoptar otros más avanzados. Actualmente, la creciente demanda social de optimizar las redes móviles en dimensiones clave, es decir, eficiencia de costos, energética,

espectral y operativa, ha impulsado la estandarización 6G. Este proceso busca resolver desafíos técnicamente complejos y alinear las capacidades tecnológicas con las exigencias sociales emergentes. No obstante, persiste una brecha crítica en la comprensión de los escenarios disruptivos que plantea 6G y su impacto real en las necesidades contemporáneas de la sociedad.

Aunque la 6G aún se encuentra en fase de investigación, ya se proyecta como la sucesora de la 5G, superándolo en velocidad de transmisión (hasta Tbps), control de redes y eficiencia espectral. Las bandas de frecuencias ópticas emergen como candidatas clave para soportar este salto tecnológico, especialmente ante el crecimiento de datos masivos y la complejidad de redes heterogéneas [3,4]. No obstante, como señala [16], el despliegue de esta nueva generación de comunicaciones inalámbricas requiere el desarrollo de formas de onda flexibles en la capa física, capaces de garantizar una alta disponibilidad del servicio en escenarios de conectividad masiva, como los impulsados por IoT. Estas innovaciones, junto con otras características comparativas entre la 5G y la 6G (cuadro 1), facilitarán un uso más eficiente del ancho de banda y la integración de un número exponencialmente mayor de dispositivos interconectados [10,11].

Cuadro 1. Los requisitos tecnológicos planteados por las redes 5G y 6G.

Requerimiento	5G	6G
Velocidad máxima de datos	20 Gbps	1 Tbps
Capacidad de carga	1Gbps	100Gbps
Velocidad de datos percibida por el usuario	100 Mbps	1 Gbps
Eficiencia espectral de pico	30 b/s/Hz	60 b/s/Hz
Experiencia de usuario	50bps	10Gbps
Latencia de extremo a extremo	10 ms	1 ms
Latencia solo de radio	1 ms	100 μ s
Confiabilidad	99.999%	99.99999%

Mientras la 5G se centra en escenarios como eMBB, mMTC y uRLLC, la 6G incorporará tres nuevos pilares: Banda Ancha Móvil Ubícua (uMUB), Comunicaciones de Ultra Alta Velocidad y Baja Latencia (uHSLLC) y Densidad de Datos Ultra Alta (uHDD), ampliando así las capacidades de su predecesora [10,11]. Esta evolución impulsará la transición de IoT al Internet de Todo (IoE), un ecosistema hiperconectado que integrará personas, procesos industriales mediante Internet Industrial de las Cosas (IIoT), y hasta 24.000 millones de dispositivos inteligentes para 2030 [11]. El IoE interconectará redes heterogéneas de sensores, equipos y servicios, aunque su implementación requerirá una fase híbrida 5G/6G (Figura 1) para garantizar eficiencia estructural ante la complejidad técnica de la nueva arquitectura [1]-[5].

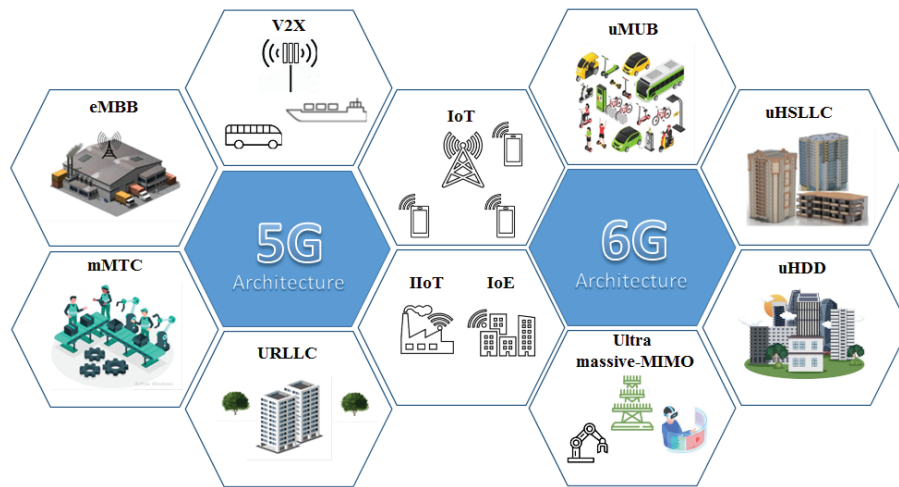


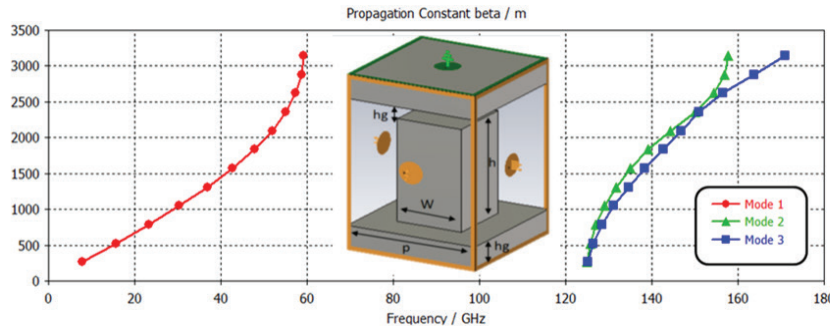
Figura 1. Análisis de infraestructura 5G/6G.

Diseño de la estructura periódica

Esta investigación adopta un enfoque exploratorio, aplicable cuando un campo de estudio es incipiente, para identificar problemas clave y metodologías viables que orienten futuros desarrollos técnicos, particularmente en el diseño de nuevas variantes de antenas. El diseño de antenas en bandas milimétricas exige evaluar tecnologías de guías de onda y sus desafíos, como la precisión en contactos eléctricos para minimizar pérdidas en la fabricación, crítica en la banda W (75-110 GHz) por sus tolerancias submilimétricas.

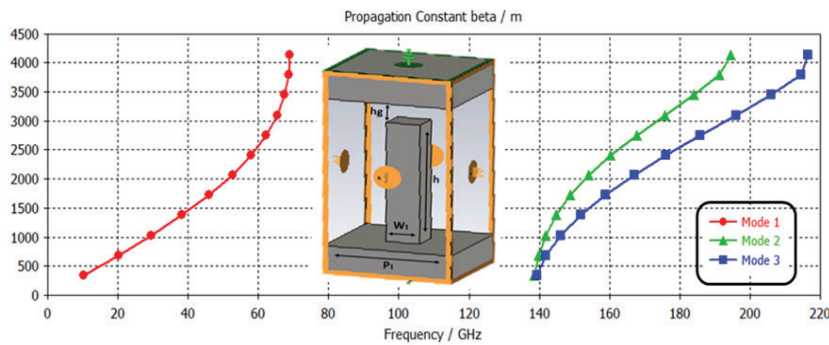
La tecnología GW destaca como alternativa a las antenas clásicas por lograr bajas pérdidas y simplificar su fabricación al eliminar el contacto eléctrico requerido en guías convencionales [12]. Esto permite crear metamateriales artificiales como un Conductor Magnético Artificial (PMC) con propiedades electromagnéticas inexistentes en la naturaleza, capaces de direccionar ondas entre placas metálicas paralelas; mientras que placas Conductor Eléctrico Perfecto (PEC) permiten propagación a cualquier distancia (según ecuaciones de Maxwell), una combinación PMC-PEC con separación $< \lambda/4$ [12,13]. El objetivo es garantizar la propagación monomodo dentro del ancho de banda de trabajo, asegurando que sólo el modo TE_{10} se propague en la banda de operación.

Este efecto se produce debido a la capacidad de los pines para crear una banda de bloqueo con bajas pérdidas y dimensiones compactas, gracias a su diseño específico. Las estructuras de banda prohibida electromagnética, basadas en metamateriales de alta impedancia, suprimen la propagación de ondas en un stopband específico debido a sus propiedades isotrópicas. Dado que las dimensiones y separación de elementos impiden reducir las capas del diseño, la red de alimentación se adapta a la tecnología GGW, optimizando pines clasificados por nivel [13]. La celda unidad es una estructura periódica clave para calcular el stopband que se define en las (Figuras 2a-b), integrando este enfoque en el diseño multicapa de la antena.



Parámetros	Valor(mm)
h	0.85
hg	0.2
w	0.5
p	1.0

Figura 2a. Análisis del pin en la capa I.

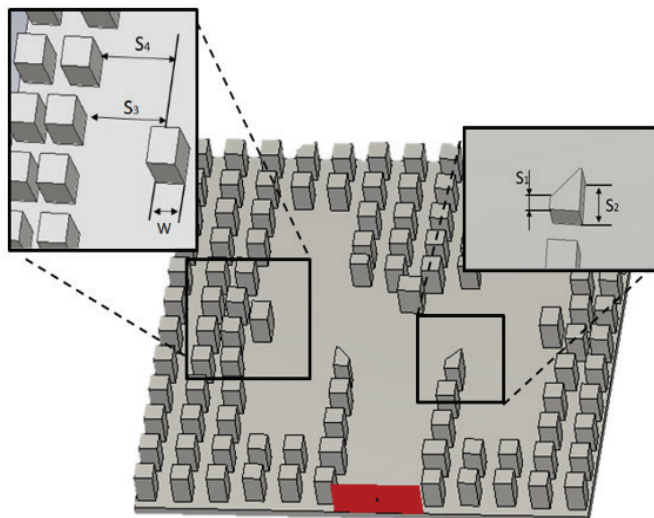


Parámetros	Valor(mm)
h	0.85
hg	0.2
w1	0.2
p1	0.38

Figura 2b. Análisis del pin en la capa II.

Diseño del arreglo del 4x4 con tecnología GGW

El estudio [14] optimiza agrupaciones de ranuras en guías rectangulares para su uso en tecnología GGW, resolviendo primero el problema externo de fuentes magnéticas/eléctricas en entornos multicapa. Para distribuir equitativamente la potencia en los puertos del divisor en T, se sitúa un pin central, cuyos parámetros críticos son las distancias S_1/S_2 entre el pin y la pared. La reducción de pines en las salidas (S_3/S_4) maximiza el ancho de banda y la adaptación del arreglo GGW, minimizando su tamaño y optimizando la propagación mediante dimensiones de pines seleccionadas, como aparece en la (Figura 3).



Parámetros	Valor(mm)
S1	0.80
S2	0.65
S3	0.22
S4	0.50

Figura 3. Capa I que componen la antena disponible y sus dimensiones.

El diseño de la antena en la (Figura 3) inicia con la capa I, seguida de la adaptación de la capa II a tecnología gap para distribuir uniformemente potencia y fase a las cavidades radiantes. Para ello, se emplean pines reducidos y estructuras adaptadoras en los divisores de la (Figura 4), ajustando su longitud (L_a) y anchura (L_b) según el aumento de elementos y las restricciones espaciales. Estas modificaciones optimizan las ranuras de acoplamiento, garantizando un control preciso del lóbulo principal y secundario.

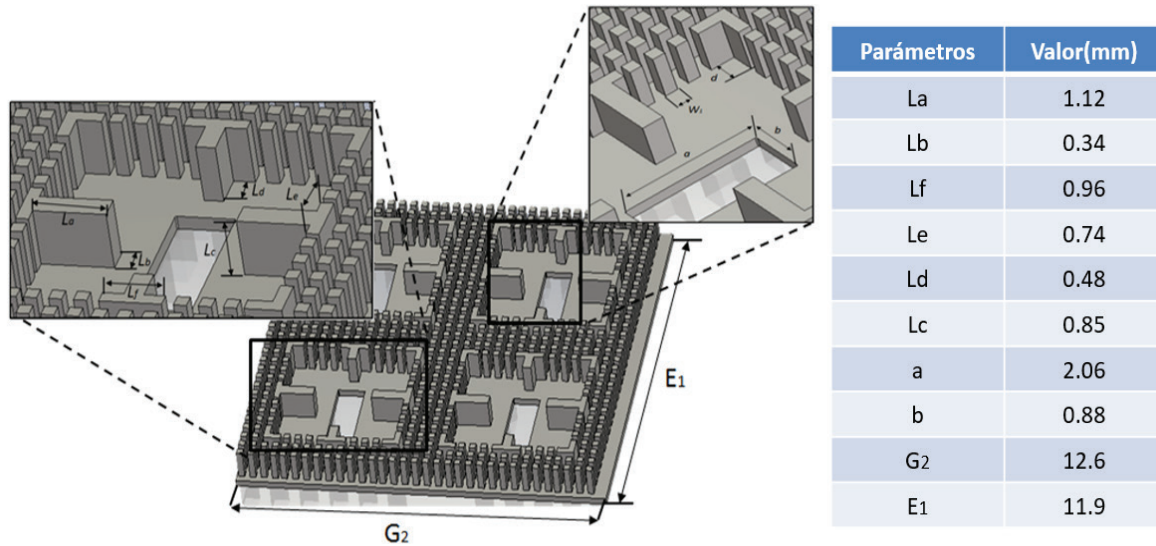
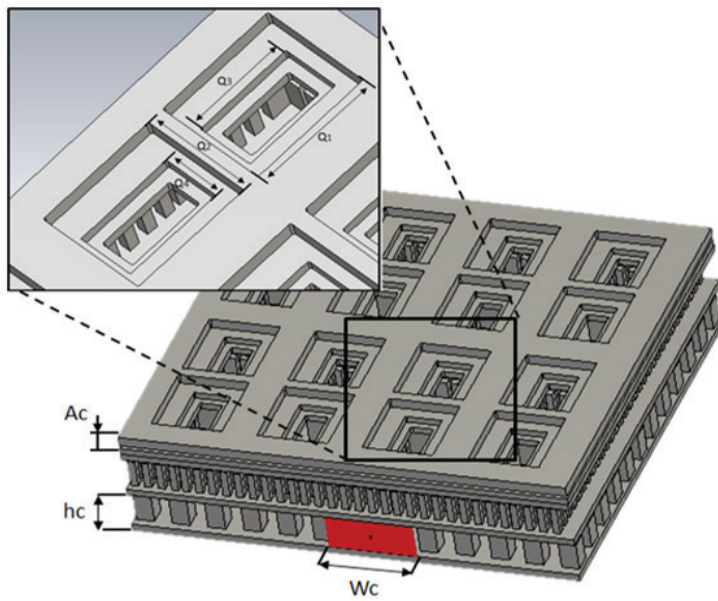


Figura 4. Capa II que componen diseño del módulo 4x4.

La selección de esta estructura en la capa II incrementa la ganancia y directividad de la antena, mientras que la adaptación de los elementos laterales de distribución reduce las pérdidas inherentes al diseño de dicha capa. En este contexto al implementar las capas I y II, se adaptó la capa III para maximizar la ganancia, considerando las restricciones iniciales de diseño y el comportamiento de la estructura en 94 GHz. Aunque la tecnología GGW logra pérdidas mínimas en bandas mmWave, el ancho de banda resultante era insuficiente. Para resolverlo, se incorporó una variante de excitación de elementos radiantes en la (Figura 5) que reduce pérdidas adicionales y optimiza el ancho de banda operativo.



Parámetros	Valor(mm)
Q1	2.16
Q2	1.92
Q3	1.76
Q4	1.25
Wc	2.48
hc	1.05
Ac	0.23

Figura 5. Capa III que componen diseño del módulo 4x4.

Los resultados en la (Figura 6) muestran el parámetro S_{11} , evidenciando que la configuración de la antena logra un coeficiente de reflexión inferior a -10 dB, con un pico de resonancia a 94 GHz. Este resultado indica una excelente adaptación, validando el diseño del arreglo. Para optimizar este equilibrio, se escaló el elemento radiante, identificando que las dimensiones Q_1/Q_2 que influyen en la frecuencia de resonancia, y Q_3/Q_4 en la eficiencia estructural. Con el objetivo de optimizar la adaptación en el diseño de antenas GW, se redujo el tamaño de la estructura.

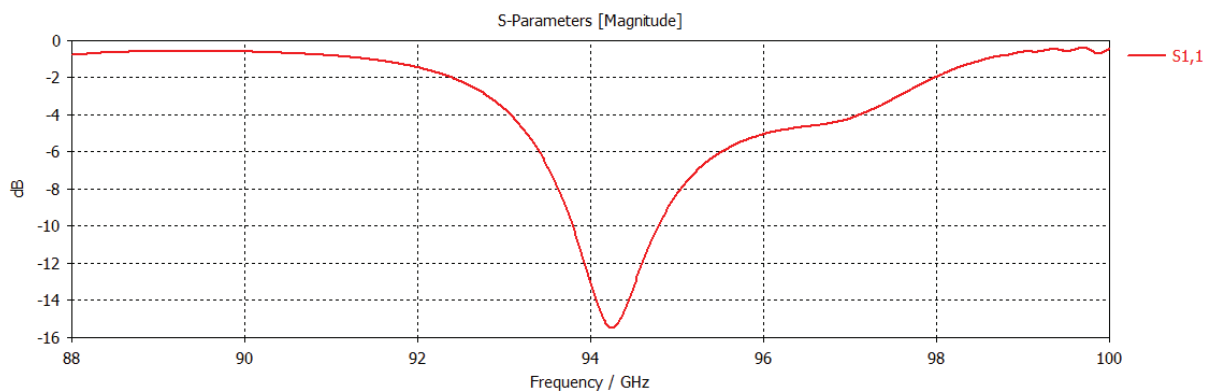


Figura 6. Valores obtenidos del parámetro S_{11} del arreglo.

La (Figura 7) compara el patrón de radiación en coordenadas polares del arreglo en banda W, destacando un lóbulo principal centrado en 0.0° con ancho de haz de $\sim 12^\circ$ (-3 dB), confirmando su alta directividad. Esta focalización angular maximiza la concentración de energía en el eje principal ideal para enlaces en la banda W y radares milimétricos, al reducir la dispersión lateral. La coherencia entre las representaciones polar, valida la estabilidad del patrón incluso en entornos de alta frecuencia, asegurando precisión en aplicaciones críticas.

La representación polar, por su parte, permite un análisis cuantitativo de parámetros críticos, como el nivel de lóbulos laterales (SLL) y la estabilidad del haz en toda la banda operativa. Los resultados evidencian un óptimo equilibrio entre complejidad de diseño y rendimiento radiométrico, clave para sistemas comerciales que requieren fiabilidad en entornos de interferencia multicelda.

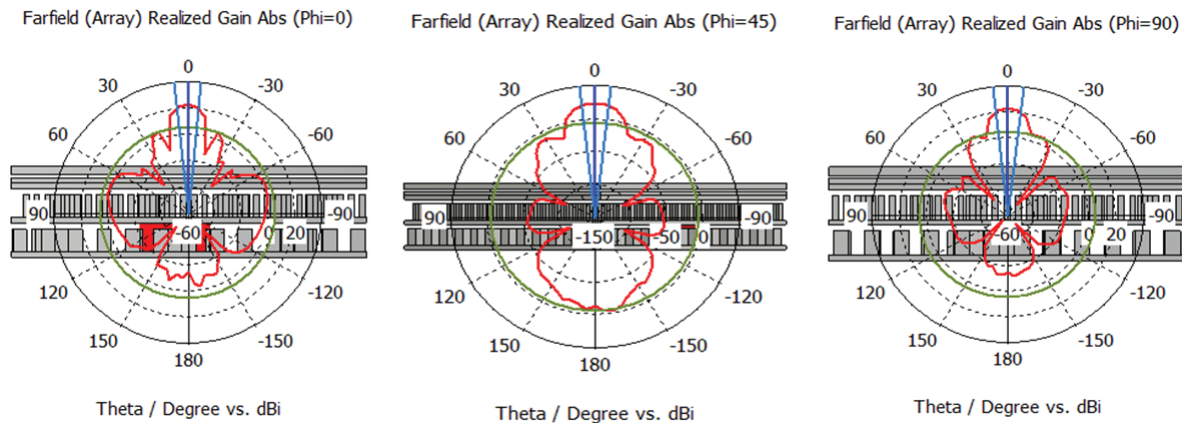


Figura 7. Patrón de radiación del arreglo de antenas entre los planos $\phi=0^\circ$, $\phi=45^\circ$ y $\phi=90^\circ$.

Las (Figuras 8 a,b,c) respectivamente, representan un análisis detallado de los parámetros clave del arreglo, destacando una ganancia máxima de 23 dBi en ambos planos ($\phi = 0^\circ$, $\phi = 45^\circ$ y $\phi = 90^\circ$). Este resultado confirma su alta direccionalidad y eficiencia energética, esencial para aplicaciones en bandas milimétricas donde la concentración de potencia es crítica. El ancho de haz a -3 dB registra 11.8° en el plano $\phi = 0^\circ$ y 12.7° en $\phi = 90^\circ$, revelando una simetría angular destacable con una variación mínima de 0.9° entre planos ortogonales. Esta reducida discrepancia, inferior a 1° , evidencia un control preciso de la direccionalidad del haz, incluso en geometrías críticas donde la falta de alineamientos estructurales suelen amplificar asimetrías. Tal coherencia angular no solo valida la estabilidad del diseño ante perturbaciones, sino que garantiza un rendimiento uniforme en aplicaciones que demandan patrones de radiación predecibles.

La simetría angular entre los planos $\phi=0^\circ$, $\phi=45^\circ$ y $\phi=90^\circ$ evidencia una variación de ganancia entre lóbulos laterales inferior a 0.5 dB en $\phi=0^\circ$ y $\phi=90^\circ$, con niveles de lóbulos laterales (SLL) de -17.9dB. En contraste, el plano $\phi=45^\circ$ presenta una supresión óptima de -28.5 dB, destacando una asimetría controlada que prioriza la direccionalidad en el eje central. Este comportamiento refuerza la coherencia espacial del patrón de radiación, un resultado crítico en tecnologías milimétricas donde la precisión electromagnética es vulnerable a imperfecciones de fabricación. Este equilibrio entre direccionalidad, simetría y supresión de lóbulos laterales lo posiciona como una solución ideal para sistemas 6G.

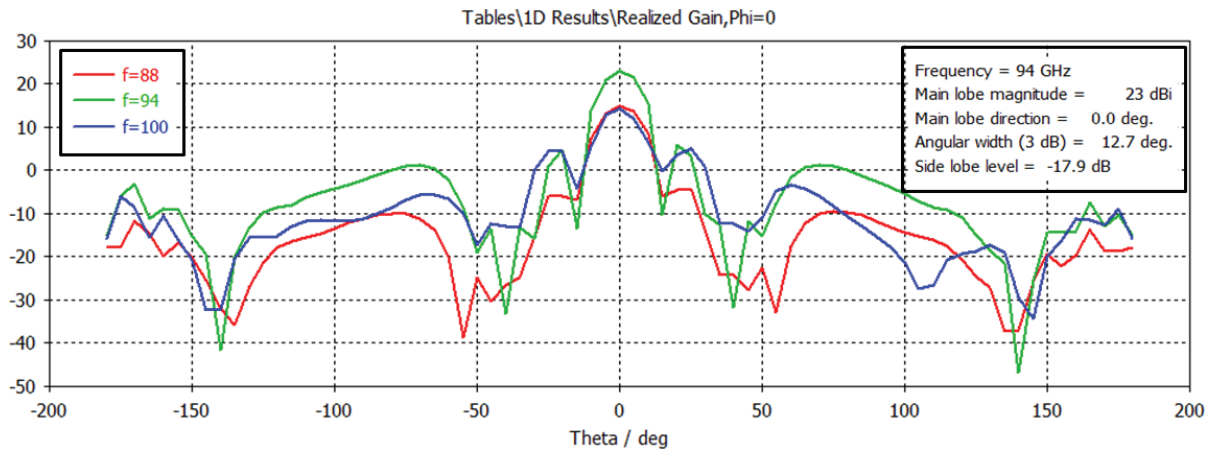


Figura 8a. Diagramas de radiación del arreglo en el plano $\Phi=0$.

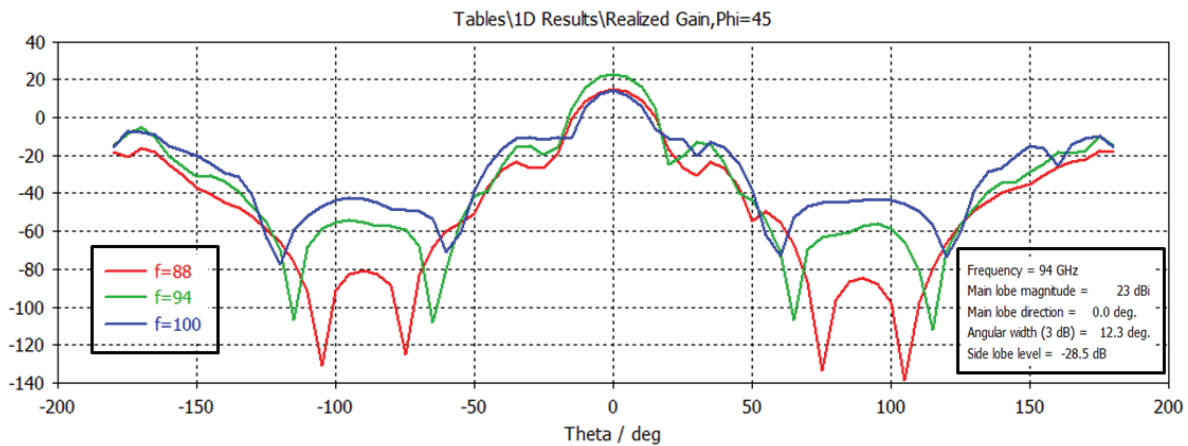


Figura 8b. Diagramas de radiación del arreglo en el plano $\Phi=45$.

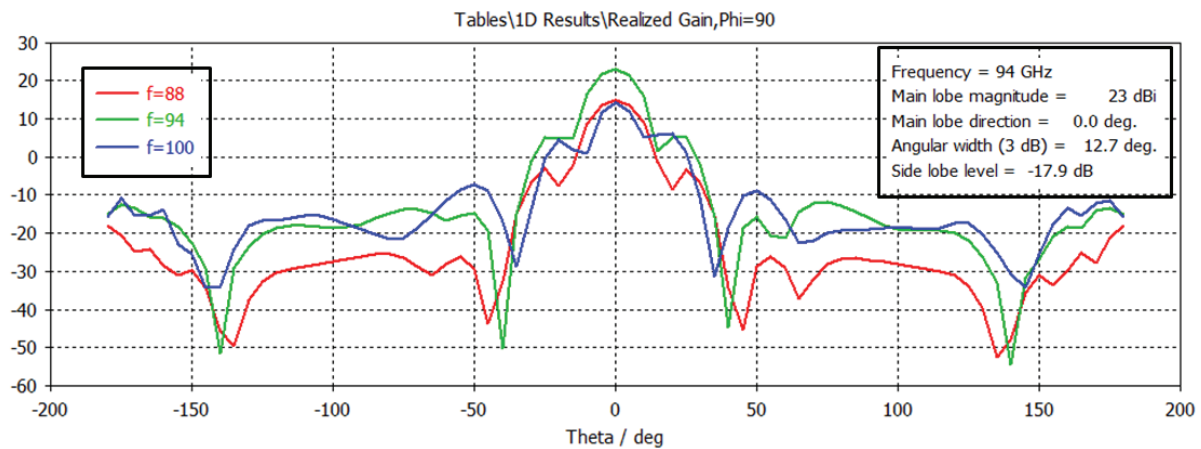


Figura 8c. Diagramas de radiación del arreglo en el plano $\Phi=90$.

La (Figura 9) revela una eficiencia total del 94% a 94 GHz, un valor excepcional que refleja la sinergia entre el diseño optimizado del arreglo y la tecnología GW. Este resultado está respaldado por un coeficiente de reflexión (S_{11}) inferior a -15 dB en toda la banda operativa, lo

que limita las pérdidas por reflexión a menos del 3% ($|S_{11}|^2 < 0.03$) y maximiza la transferencia de potencia al medio radiante. Comparado con soluciones basadas en sustratos convencionales como FR-4 o Rogers RO4003, que suelen alcanzar eficiencias del 70–85% [15], [16] este diseño demuestra una mejora del 10–20% en eficiencia energética, un avance crítico para aplicaciones en bandas milimétricas donde las pérdidas óhmicas y dieléctricas son dominantes.

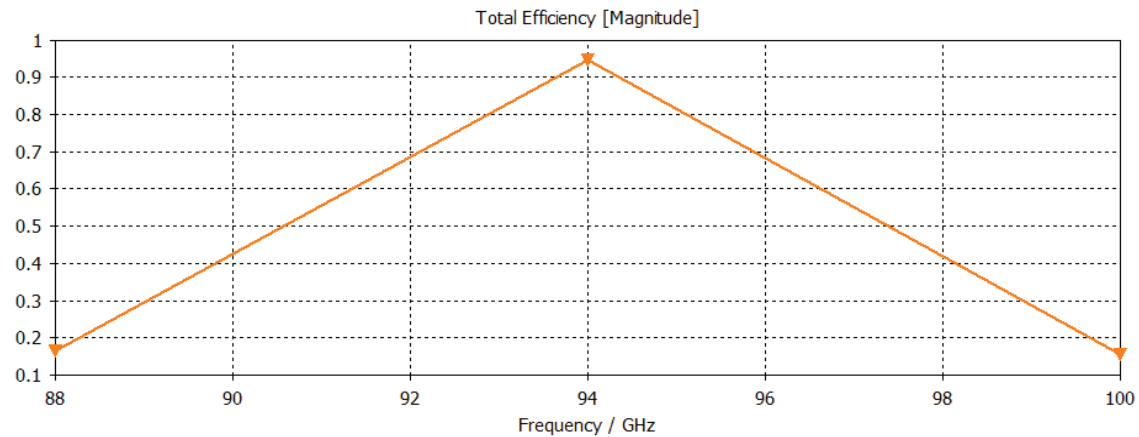


Figura 9. Eficiencia total del arreglo final.

La (cuadro 2) presenta un análisis comparativo fundamental que contextualiza las contribuciones de este trabajo frente a diseños previos reportados en la literatura, específicamente en antenas tipo ranura basadas en tecnología GGW operando en la banda de 94 GHz. En ella se contrasta el arreglo de 4x4 ranuras dobles y 3 capas propuesto, que alcanza una ganancia de 23 dBi, con configuraciones anteriores de 2x2 y una sola capa, cuyas ganancias se sitúan en 12 dBi. Esta comparación no solo cuantifica la mejora en el rendimiento radiante, sino que evidencia la escalabilidad de la tecnología GGW y la eficacia de la estrategia de diseño multicapa adoptada. La inclusión de esta tabla es esencial para validar la relevancia del presente estudio, destacando cómo la evolución en la arquitectura del arreglo en términos de elementos, capas y configuración de alimentación se traduce directamente en un incremento significativo de la ganancia, reforzando así la viabilidad de esta solución para aplicaciones 6G y satelitales que exigen alta directividad.

Cuadro 2. Comparación entre la antena y diferentes antenas tipo ranura.

Referencia	Tipo de antena	Tecnología, N° de Capas	f(GHz)	Ganancia(dBi)
[17]	Arreglo de ranuras	GGW, 1 Capas	94	12
[18]	Arreglo de ranuras	GGW, 1 Capas	94	12
Este trabajo	Arreglo de ranuras dobles	GGW, 3 Capas	94	23

La (Figura 10) exhibe el patrón de radiación resultante de la configuración propuesta, donde se observa un lóbulo principal estrecho y bien definido, acompañado de un nivel de lóbulos laterales suprimido. Esta característica direccional lo hace idóneo para aplicaciones que exigen alta concentración de potencia en el eje de radiación principal, como enlaces punto a punto en la banda W y sistemas de radar milimétrico. La estructura GGW demuestra su viabilidad para superar las limitaciones de fabricación en mmWave mediante una topología compacta con redes de distribución robusta, diseñada para mantener el rendimiento electromagnético ante imperfecciones constructivas propias de las tolerancias submilimétricas en estas frecuencias.

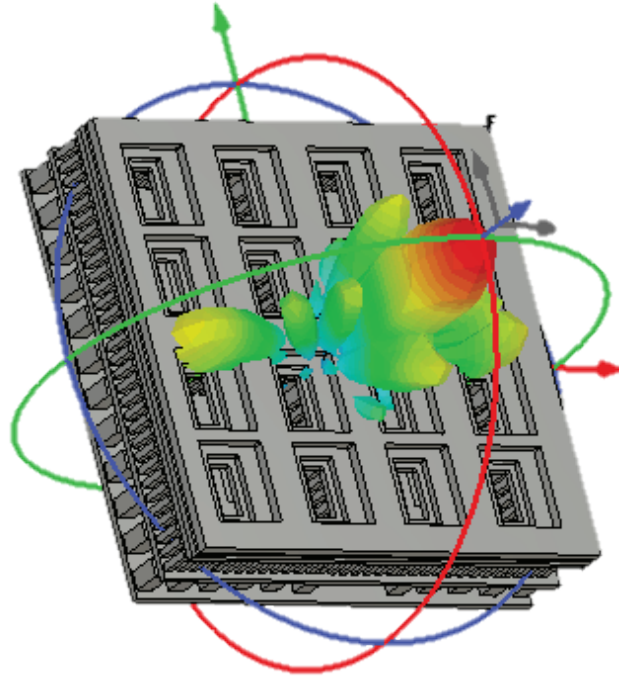


Figura 10. Patrón de radiación.

Conclusiones

Este estudio establece un referente en el diseño de antenas GW de alta ganancia para la banda W, demostrando que la optimización multicapa y la distribución eficiente de alimentación son determinantes para superar las limitaciones de diseños previos. Los resultados no solo validan el potencial de la tecnología GW como pilar para sistemas 6G y de comunicación satelital, sino que también delinean un marco metodológico replicable para futuros desarrollos en bandas milimétricas. El diseño teórico de un arreglo de antena 4×4 elementos en banda W (94 GHz), basado en tecnología GW, demuestra en simulación un rendimiento sobresaliente: ganancia de 23 dBi, ancho de banda de 1 GHz, eficiencia del 94% y control preciso del patrón de radiación. La simetría angular entre los planos $\phi=0^\circ$ y $\phi=90^\circ$, con una variación de ganancia inferior a 0.5 dB y niveles de lóbulos laterales (SLL) de -17.9 dB, junto a una supresión óptima de -28.5 dB en $\phi=45^\circ$, demuestra coherencia espacial y direccionalidad priorizada en el eje central, atributos clave para sistemas satelitales.

Referencias

- [1] N. Chukhno et al., "Models, Methods, and Solutions for Multicasting in 5G/6G mmWave and Sub-THz Systems," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 26, no. 1, pp. 119-159, Firstquarter 2024, doi: 10.1109/COMST.2023.3319354.
- [2] S. F. Ahmed et al., "Toward a Secure 5G-Enabled Internet of Things: A Survey on Requirements, Privacy, Security, Challenges, and Opportunities," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 13125-13145, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3352508.
- [3] B. Adhikari, M. Jaseemuddin and A. Anpalagan, "Resource Allocation for Co-Existence of eMBB and URLLC Services in 6G Wireless Networks: A Survey," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 552-581, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3343250.

- [4] G. Di Gennaro, A. Buonanno, G. Romano, S. Buzzi and F. A. N. Palmieri, "Decentralized Grant-Free mMTC Traffic Multiplexing With eMBB Data Through Deep Reinforcement Learning," in *IEEE Transactions on Machine Learning in Communications and Networking*, vol. 2, pp. 1440-1455, 2024, doi: 10.1109/TMLCN.2024.3467044.
- [5] F. Tan, S. Si, H. Chen, S. Li and T. Lv, "Rate Splitting Multiple Access Assisted Cell-Free Massive MIMO for URLLC Services in 5G and Beyond Networks," in *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 5, pp. 6018-6032, 2024, doi: 10.1109/OJCOMS.2024.3459911.
- [6] G. K. Munasinghe and M. Murtaza, "Analyzing Vehicle-to-Everything Communication for Intelligent Transportation System: Journey from IEEE 802.11p to 5G and Finally Towards 6G," 2020 5th International Conference on Innovative Technologies in Intelligent Systems and Industrial Applications (CITISIA), Sydney, Australia, 2020, pp. 1-7, doi: 10.1109/CITISIA50690.2020.9371804.
- [7] I. Ishteyaq, K. Muzaffar, N. Shafi and M. A. Alathbah, "Unleashing the Power of Tomorrow: Exploration of Next Frontier With 6G Networks and Cutting Edge Technologies," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 29445-29463, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3367976.
- [8] A. Kaushik et al., "Toward Integrated Sensing and Communications for 6G: Key Enabling Technologies, Standardization, and Challenges," in *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 8, no. 2, pp. 52-59, June 2024, doi: 10.1109/MCOMSTD.0007.2300043.
- [9] M. A. S. Syed, S. Mohsin, J. Yu, Y. Yao, M. A. B. Abbasi and S. M. Abbas, "Comparative Analysis of Novel Gliding Walled Multilayer and Traditional Longitudinally Corrugated Waveguides for W-Band Millimeter-Wave Applications," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 138827-138834, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3437413.
- [10] A. Guidotti et al., "The path to 5G-Advanced and 6G Non-Terrestrial Network systems," 2022 11th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 17th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC), Graz, Austria, 2022, pp. 1-8, doi: 10.1109/ASMS/SPSC55670.2022.9914764.
- [11] A. Salh et al., "A Survey on Deep Learning for Ultra-Reliable and Low-Latency Communications Challenges on 6G Wireless Systems," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 55098-55131, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3069707.
- [12] Q. Ren, A. U. Zaman and J. Yang, "Dual-Circularly Polarized Array Antenna Based on Gap Waveguide Utilizing Double-Grooved Circular Waveguide Polarizer," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 11, pp. 10436-10444, Nov. 2022, doi: 10.1109/TAP.2022.3195458.
- [13] M. Rabbanifard, D. Zarifi, A. Farahbakhsh and M. Mrozowski, "Design of Compact and Wideband Groove Gap Waveguide-Based Directional Couplers," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 86346-86354, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3416290.
- [14] I. Zhou, L. Jofre and J. Romeu, "Technology Assessment of Aperture Coupled Slot Antenna Array in Groove Gapwaveguide for 5G Millimeter Wave Applications," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 139556-139564, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3119748.
- [15] M. Abdullah et al., "An Eight Element Wideband DGS MIMO Antenna System for 5G Handheld Devices," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 141476-141488, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3467060.
- [16] Y. -F. Tsao, A. Desai and H. -T. Hsu, "Dual-Band and Dual-Polarization CPW Fed MIMO Antenna for Fifth-Generation Mobile Communications Technology at 28 and 38 GHz," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 46853-46863, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3171248.
- [17] J. L. Blanco Orta, M. del C. Guerra Martínez, M. E. Borrego Corona, K. Marichal Leyva, "Diseño de un arreglo de antena con tecnología Groove Gap Waveguide para operar en la banda W," in *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, vol. 45, no. 3, pp. 1-13, 2024.
- [18] J. L. Blanco-Orta, M. del C. Guerra-Martínez, K. Marichal-Leyva, A. Calzadilla-Ayuso, A. Sánchez-Pompa, "Antenas de ranura con tecnología GGW para aplicaciones 6G en 94GH," in *Revista Tecnología En Marcha*, vol. 38, no. 3, pp. 151-161, 2025, <https://doi.org/10.18845/tm.v38i3.7563>.

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.

Optimización de la resiliencia en sistemas eléctricos mediante la integración de energía solar: Propuesta para COELCHA

Optimization of resilience in electrical
systems through the integration of solar
energy: Proposal for COELCHA

Maykop Pérez-Martínez¹, Josnier Ramos-Guardarrama²

Fecha de recepción: 26 de julio, 2025
Fecha de aprobación: 6 de febrero, 2026

Pérez-Martínez, M; Ramos-Guardarrama, J. Optimización de la resiliencia en sistemas eléctricos mediante la integración de energía solar: Propuesta para COELCHA. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 3. Julio-Setiembre, 2026. Pág. 91-103.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i3.7862>



¹ Universidad de Concepción, Chile.

 maykoperez@udec.cl

 <https://orcid.org/0000-0003-3073-1675>

² Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", CUJAE, Cuba.

 josnier@electrica.cujae.edu.cu

 <https://orcid.org/0000-0002-8796-8481>

Palabras clave

Resiliencia; sistemas eléctricos; energía renovable; eventos climáticos; metodología.

Resumen

El estudio de la resiliencia en los sistemas eléctricos de distribución se ha convertido en un tema crítico en el contexto actual de cambio climático y creciente incertidumbre en la generación y distribución de energía. Este artículo propone una metodología para estimar la resiliencia del sistema de distribución de COELCHA, considerando la integración de fuentes renovables de energía. Para ello, se analizan tres estudios de caso que ilustran cómo la generación fotovoltaica puede mejorar la estabilidad y capacidad de carga de los sistemas eléctricos. El primer estudio de caso presenta el desarrollo de un software para el control de la demanda eléctrica en sistemas industriales, demostrando que la inclusión de paneles solares reduce la demanda máxima en un 27% y aumenta el factor de carga en un 32,5%. El segundo caso describe el diseño de una central fotovoltaica autónoma, que reduce la dependencia de la red eléctrica y aumenta la autonomía energética. El tercer caso evalúa el impacto de una central fotovoltaica en el sistema eléctrico de potencia Matala-Lubango-Namibe, mostrando un aumento de la capacidad de carga en 31,1 MW y una mejora del 11% en la estabilidad del voltaje. A partir de estos casos, se propone una metodología en tres fases (definición, análisis e implementación) para estimar la resiliencia del sistema de COELCHA frente a eventos climáticos extremos. Los resultados demuestran que la integración de energías renovables, junto con herramientas de análisis y simulación, es fundamental para diseñar sistemas eléctricos más resilientes y sostenibles.

Keywords

Resilience; electrical systems; renewable energy; climate events; methodology.

Abstract

The study of resilience in electrical distribution systems has become a critical topic in the current context of climate change and increasing uncertainty in energy generation and distribution. This article proposes a methodology to estimate the resilience of COELCHA's distribution system, considering the integration of renewable energy sources. To this end, three case studies are analyzed that illustrate how photovoltaic generation can improve the stability and load capacity of electrical systems. The first case study presents the development of software for controlling electrical demand in industrial systems, demonstrating that the inclusion of solar panels reduces maximum demand by 27% and increases the load factor by 32,5%. The second case describes the design of an autonomous photovoltaic power plant, which reduces dependence on the electrical grid and increases energy autonomy. The third case evaluates the impact of a photovoltaic power plant on the Matala-Lubango-Namibe power system, showing an increase in load capacity of 31,1 MW and an 11% improvement in voltage stability. Based on these cases, a three-phase methodology (definition, analysis, and implementation) is proposed to estimate the resilience of COELCHA's system against extreme climate events. The results demonstrate that the integration of renewable energies, along with analysis and simulation tools, is essential for designing more resilient and sustainable electrical systems.

Introducción

Uno de los avances más notorio de la sociedad actual es el desarrollo de la tecnología, con el consiguiente aumento de la demanda de la energía eléctrica, en sus diferentes formas, estableciendo una progresiva complejidad de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) en cuanto a la generación, transmisión, subtransmisión y distribución de la energía y que, por

tanto, se replanteen mecanismos para disminuir las pérdidas de energía eléctrica y de aumentar la confiabilidad para de esta forma garantizar la continuidad del suministro de energía eléctrica y tener sistemas eléctricos más eficientes [1].

En ese sentido, la electricidad es un servicio público, que está disponible todo el tiempo, en la mayoría de los lugares y que presenta una amplia gama de aplicaciones [2]. Como esta no puede ser almacenada a gran escala, es generada en el mismo momento y en la misma cantidad que es consumida y tiene que ser transmitida instantáneamente desde la generación hasta los consumidores a través de líneas de transmisión.

Producto de estas características especiales, el sistema eléctrico de potencia tiene que estar diseñado para suplir la demanda máxima esperada. También, dependiendo del tipo de plantas generadoras que se encuentren en operación en los distintos momentos del día, la eficiencia de la producción y el costo del combustible quemado en las plantas térmicas puede cambiar significativamente[2].

Además, las pérdidas de energía eléctrica son comunes e inherentes de las empresas eléctricas y se tornan en un problema muchas veces grave cuando éstas rebasan ciertos límites lógicos y preestablecidos. Éstas aumentan el consumo de la generación de la electricidad total, por tanto, se requiere generar más, con la consiguiente pérdida de recursos energéticos. Las pérdidas de energía es uno de los indicadores de eficiencia de cualquier sistema eléctrico [2].

Por ejemplo, en la referencia [3] se enfatiza que en España estas pérdidas representan el 8,9 % aproximadamente de la energía de la red, en el Reino Unido, las pérdidas son de 7,92 %, en Alemania 6,74 %, en Francia un 5,40 %, en Austria un 6,29 %, en Estados Unidos un 6,29% y un 5,06 % en Australia.

En su conjunto, el índice de pérdidas de electricidad en Chile del año 2020 a junio de 2021 fue de 10,06% [4]. Estas pérdidas eléctricas, varían según la configuración de la red, determinada por la ubicación y producción de los generadores, la localización y demanda de los clientes [5].

En correspondencia, los autores de [6], [7] aseguran que es importante clasificar las causas más comunes que ocasionan que los sistemas eléctricos sean ineficientes, esencialmente se asocian en cinco (5) grupos:

- **Diseño deficiente:** debido a una concepción errónea del punto de vista del diseño, los materiales, el proceso de fabricación, el equipo y/o los sistemas conducen al despilfarro de energía eléctrica, por ejemplo, la utilización de bombillas ineficientes o su empleo de forma incorrecta antes los principios del uso racional de la energía;
- **Operación ineficiente:** incluso cuando los sistemas de energía eléctrica están bien diseñados, puede ser operado irresponsablemente, por ejemplo, mantener una habitación sin actividad iluminada innecesariamente, empleo de tecnología obsoleta;
- **Mantenimiento inadecuado:** una parte de las pérdidas eléctricas podrían minimizarse a través de procedimientos adecuados de mantenimiento correctivo y preventivo, que incluye el correcto ajuste y control de los sistemas, de manera que mantengan, en la medida de lo posible el desempeño de las condiciones originales;
- **Operación de las cargas en los horarios de máxima demanda:** cuando todas las cargas operan en los horarios donde el costo del kWh es mayor se ocasionan pérdidas en la generación de energía;
- **Eventos externos:** en particular aquellos de índole climática como huracanes, tormentas, inundaciones, incendios forestales, terremotos, olas de calor y nevadas, ejercen una influencia considerable sobre la calidad del servicio de distribución eléctrica. La creciente frecuencia de estos fenómenos, atribuida al cambio climático, se convierte en un aspecto

fundamental para la regulación y los incentivos económicos en el ámbito de la distribución eléctrica. Es esencial que las metas de calidad y los indicadores de desempeño reflejen las particularidades de cada región, teniendo en cuenta su vulnerabilidad a riesgos climáticos, y que se compense adecuadamente las inversiones destinadas a mejorar la capacidad de recuperación ante situaciones adversas.

En este sentido, es de vital importancia, ante la situación económica actual de cualquier país, reducir los costos asociados al consumo de energía eléctrica y las inversiones en equipos eléctricos utilizados en instalaciones industriales y de servicios. Además, esta necesidad se ve potenciada por el impacto ambiental de las tecnologías energéticas dominantes [8].

Los análisis demuestran que, si se quieren lograr altas perspectivas de crecimiento y desarrollo, se debe imponer una gran atención a la reducción de pérdidas de energía y mejora de la eficiencia energética en todos los sectores socioeconómicos y para todos los actores energéticos. En este contexto, es absolutamente fundamental promover y acompañar programas gubernamentales para evaluar acciones y estimar los resultados de forma consistente.

Por otra parte, la frecuencia de los desastres naturales está en aumento, y el cambio climático tiene el potencial de afectar negativamente a los SEP de diversas maneras. Esto ha acelerado la necesidad de investigar cómo operarlos en condiciones distintas a las tradicionales, considerando el contexto del cambio climático y sus consecuencias, que pueden provocar afectaciones negativas en su infraestructura y operación.

Por lo tanto, debido al impacto crítico que representan los eventos climáticos en el equipamiento de los SEP, surge la necesidad de realizar investigaciones que evalúen el daño y la severidad de dichos eventos, así como la forma en que estos se recuperan después de una perturbación.

En este sentido, los SEP han sufrido severos daños como consecuencia del aumento del número de eventos climáticos extremos en los últimos 30 años. En los Estados Unidos, por ejemplo, el paso de los huracanes ha dejado entre 8 millones de clientes sin suministro eléctrico por varias semanas. También, en otros países con niveles sísmicos similares a los de Chile, como lo son Japón y Nueva Zelanda, han experimentado similar afectación, donde los mayores daños se observaron en las áreas de distribución del sector eléctrico [9].

En el contexto chileno, desastres como nevadas y terremotos han producido prolongados cortes de suministro eléctrico, siendo nuevamente el área de distribución la más afectada. Estos aspectos han demostrado la necesidad e importancia de desarrollar investigaciones y acciones relacionadas a la resiliencia de los SEP. Estos desafíos exigen que los sistemas eléctricos no solo sean robustos, sino también adaptables y capaces de recuperarse rápidamente de cualquier perturbación [9].

Ahora bien, para hacer frente a este tipo de eventos disruptivos, es necesario realizar análisis de vulnerabilidad para implementar soluciones adecuadas sobre la base de tomas de decisiones y la identificación de los puntos más vulnerables del sistema [10] cyber attacks, physical attacks. Ya que en el instante en que se producen estos eventos disruptivos se generan daños en el SEP que se ven reflejados en pérdidas del suministro de energía con un tiempo de recuperación indeterminado.

Es preciso mencionar que se entiende por vulnerabilidad en este contexto como la incapacidad del SEP de soportar interrupciones antes de recuperar su estado normal de operación. En consecuencia, los operadores de red pueden implementar diferentes tipos de medidas para mitigar estos daños, en los cuales se tiene la utilización de microrredes, la reconfiguración del sistema, recursos energéticos distribuidos como baterías, estaciones de cargas, vehículos eléctricos, generación distribuida, acomodos de cargas en los sistemas eléctricos industriales y emplazamientos de fuentes renovables de energías como la solar y la eólica.

Estos tienen como objetivo principal la recuperación de la mayor cantidad de carga y la minimización de los costos de operación de la red. Por ende, es necesario contar con métricas que evalúen la resiliencia del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) tras un evento disruptivo o perturbación, frente a las medidas tomadas por el operador de la red. Esto permitirá determinar el porcentaje de componentes del sistema eléctrico que permanecen en servicio y los costos de operación asociados. La Figura 1 presenta la territorialidad de la Cooperativa de Consumo de Energía Eléctrica Charrúa (COELCHA). La extensión de las líneas alcanza un total de 151 km considerando un rango de tensión que va desde los 13,2 kV hasta los 0,4 kV. El Cuadro 1 resume las longitudes de las líneas separadas por nivel de voltaje.

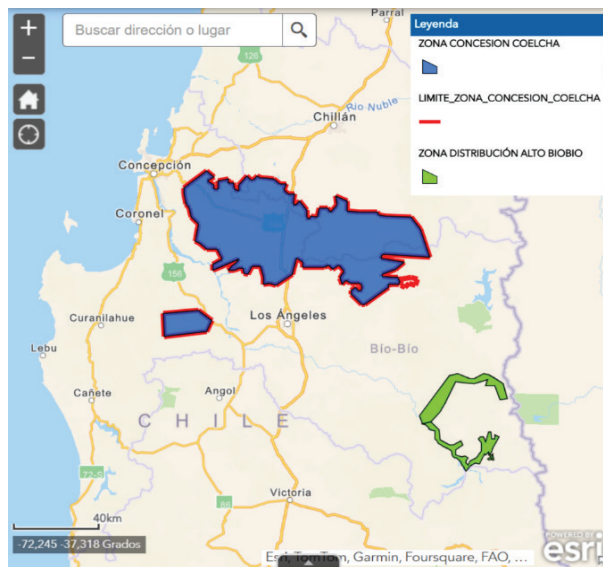


Figura 1. Territorialidad de COELCHA.

Cuadro 1. Resumen de las longitudes de las líneas del sistema de distribución de COELCHA.

Tipo de red	Longitud de las líneas [km]
Redes media tensión trifásica 13,2 kV	40
Redes media tensión bifásica 13,2 kV	20
Redes media tensión monofásica 7,62 kV	18
Redes baja tensión monofásica 0,231 kV	66
Redes baja tensión bifásica 0,231 kV	0
Redes baja tensión trifásica 0,4 kV	7

En la concesión de COELCHA se han identificado 32 proyectos de Energías Renovables No Convencionales (ERNC), con una potencia combinada cercana a 1,34 GW, lo que evidencia un alto potencial de generación distribuida en la zona. Los proyectos solares fotovoltaicos concentran la mayor parte de esta capacidad, con 22 iniciativas que suman aproximadamente 1,08 GW, incluyendo plantas en operación (por ejemplo, Cortijo y Moya, de 9 MW cada una),

en construcción (La Quinta y Pequén, también de 9 MW) y en proceso de calificación (como Pillancó, con 208 MW, y Monte Águila, con 240 MW). Aunque menos numerosos, los proyectos eólicos aportan capacidades relevantes, destacando Peñasco Ventoso (486 MW) y Dañicalqui (95,2 MW), junto con iniciativas de biomasa (Laja, 52 MW) y pequeñas centrales hidroeléctricas (Itata, 19,43 MW). En conjunto, muestra un escenario favorable para incorporar generación renovable en puntos estratégicos de la red de COELCHA, lo que abre la posibilidad de diseñar escenarios de simulación y estrategias de integración orientadas a mejorar su resiliencia y sostenibilidad ante eventos climáticos extremos.

Sumado a lo anterior, a lo largo de los últimos 14 años, COELCHA ha visto un total de 12108 interrupciones del suministro eléctrico. Las causas van desde actos vandálicos, caída de árboles, choques de vehículos, averías, sobrecargas, entre otros. Del total, 2110 están relacionadas con incendios, condiciones ambientales y eventos catastróficos, representando un 17,4% de las causas de interrupciones. Esto muestra que el sistema de distribución no está exento de pérdida de suministro eléctrico producto de eventos relacionados con el medio ambiente, y, por lo tanto, es de interés seguir evaluando el impacto de estos fenómenos en la resiliencia sistémica.

El Cuadro 2 muestra las causas de las interrupciones, el número de interrupciones anuales y totales registradas por cada distribuidora entre el 9 de octubre del 2010 y el 3 de junio de 2024 de la empresa COELCHA.

Cuadro 2. Causa de interrupción y su respectiva cantidad en empresa COELCHA entre el 9 de octubre de 2010 y el 3 de junio de 2024.

Causa de la interrupción	Cantidad	Causa de la interrupción	Cantidad
Actos vandálicos	1172	Externas	540
Animales	277	Fallas en los trabajos de la empresa	284
Árboles	1975	Incendio	216
Avería	469	Instalaciones de clientes	3
Choque de vehículos	620	Orden de autoridad	21
Condiciones atmosféricas	1665	Otros	2077
Desconexión programada	184	Sin determinar	1998
Eventos catastróficos	229	Sobrecarga	378

En correspondencia con lo anteriormente planteado, este artículo propone una metodología para estimar la resiliencia de sistemas eléctricos de distribución ante eventos climáticos extremos, aplicada al caso de la red de COELCHA e incorporando la integración de fuentes renovables de energía.

El objetivo general es formular y estructurar dicha metodología de manera que permita, en etapas posteriores, cuantificar el impacto potencial de la generación renovable sobre la resiliencia del sistema de distribución de COELCHA a partir de datos reales de operación.

Materiales y métodos

La investigación se basa en una metodología mixta, que combina enfoques cualitativos y cuantitativos para analizar y proponer soluciones que mejoren la resiliencia del sistema de distribución de COELCHA mediante la integración de energías renovables, en la que se utilizaron:

Métodos de nivel teórico:

- **Histórico - lógico:** para conocer los referentes teóricos – prácticos sobre el desarrollo de la integración de las fuentes de energía renovables en los sistemas eléctricos de distribución, el estudio y conceptualización de la resiliencia en los sistemas eléctricos, así como los antecedentes históricos de las interrupciones del servicio eléctrico en el sistema de distribución de COEICHA.
- **Analítico – sintético:** para analizar las posiciones teóricas acerca del estudio de la resiliencia en los sistemas eléctricos de distribución y su optimización a partir de las fuentes renovables de energía, para de esta forma conceptualizarla y establecer las características generales y particulares de la propuesta para el sistema de distribución de COELCHA
- **Inductivo – deductivo:** permite analizar los factores que influyen en la resiliencia de los sistemas eléctricos de distribución y determinar cómo la integración de energías renovables, específicamente la energía solar fotovoltaica, puede mejorar dicha resiliencia mediante la metodología propuesta.
- **Sistémico-estructural-funcional:** permite analizar el sistema eléctrico de COELCHA como un conjunto interconectado de componentes que cumplen funciones específicas para garantizar un suministro eléctrico resiliente. Desde una perspectiva **sistémica**, se estudia cómo la integración de energías renovables, como la solar fotovoltaica, afecta al sistema en su conjunto, mejorando su capacidad para anticipar, resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de eventos disruptivos. El análisis **estructural** identifica los componentes críticos del sistema (líneas de distribución, subestaciones, cargas, etc.) y cómo la incorporación de fuentes renovables modifica su organización, liberando carga de las líneas principales y redistribuyendo la generación. Finalmente, el enfoque **funcional** examina las contribuciones específicas de las energías renovables, como la estabilización del voltaje, el aumento de la capacidad de carga y la reducción de la dependencia de la red, funciones que fortalecen la resiliencia del sistema. Este enfoque integral sustenta la propuesta metodológica para estimar la resiliencia del sistema de COELCHA, permitiendo evaluar cómo la integración de energías renovables optimiza su estructura y funciones para enfrentar eventos climáticos extremos

Métodos del nivel empírico:

- **Estudio de casos:** permite analizar, desde un contexto real, cómo la integración de energías renovables, específicamente la solar fotovoltaica, mejora la resiliencia del sistema eléctrico de COELCHA. A través de tres estudios de caso concretos (el software de control de demanda en Scilab, la central fotovoltaica en Angola y el sistema eléctrico Matala-Lubango-Namibe), se recopilan y analizan datos reales que demuestran cómo la generación fotovoltaica reduce la demanda máxima, aumenta la capacidad de carga y estabiliza el voltaje. A través de la observación y el análisis de casos concretos, se identifican patrones, tendencias, relaciones causales que contribuyen al conocimiento científico, así como validar la hipótesis de que las energías renovables fortalecen la resiliencia de los sistemas eléctricos de distribución para proporcionar evidencia empírica en la realización de la propuesta metodológica al sistema de COELCHA para estimar su resiliencia frente a eventos climáticos extremos.

Resultados y discusión

Resiliencia en el contexto eléctrico

La resiliencia en los sistemas eléctricos se ha convertido en un imperativo en el contexto actual de transformación energética y creciente incertidumbre para garantizar un suministro eléctrico confiable y sostenible. Se debe destacar que en este contexto la expresión “creciente incertidumbre” se refiere a la variedad de factores y condiciones cambiantes que pueden afectar la operación y la estabilidad de los sistemas eléctricos de potencia [11]. Resilient network investments is becoming increasingly important. This task, however, needs, in addition to widely accepted investment options focused on installing new infrastructure, explicit recognition of investment propositions to harden existing infrastructure such as substations. Hardening networks is fundamentally challenging to incorporate in optimization problems since it affects outage probabilities. Therefore, we propose an optimization approach to determine optimal portfolios of resilient network investments, considering endogenous probabilities that change with hardening investment options. This decision-dependent-probability model finds the optimal network enhancements in a cost-benefit fashion, minimizing investment plus operational costs, including demand curtailments. The proposed model also considers distributed energy resources (DER).

Esta incertidumbre puede surgir de diversas fuentes, incluyendo, cambio climático, variabilidad de las fuentes de renovable de energía, variación de la demanda, ciberseguridad, políticas y regulaciones y desarrollo tecnológico.

De manera general, la resiliencia se refiere a la capacidad de los SEP para anticipar, resistir, adaptarse y recuperarse de perturbaciones para garantizar así un suministro de energía confiable y continuo. En ese sentido las organizaciones internacionales como IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) y CIGRE (*Conseil International des Grands Réseaux Électriques*), la definen como:

- Según el IEEE, la resiliencia de un sistema eléctrico se puede definir como: *“la capacidad de un sistema para prepararse para, responder a, y recuperarse de eventos adversos, minimizando el impacto en la operación y el servicio”*. Esto implica no solo la capacidad de resistir fallos, sino también la habilidad de adaptarse a nuevas condiciones y aprender de las experiencias pasadas.
- CIGRE define la resiliencia en los sistemas eléctricos como *“la capacidad de un sistema de energía para resistir y recuperarse de perturbaciones, asegurando la continuidad del suministro eléctrico y la estabilidad del sistema”*. Esta definición enfatiza la importancia de la continuidad del servicio y la estabilidad operativa, incluso en situaciones de crisis.

A partir de estas definiciones y de las investigaciones de [12], [13], [14], [15], [16] la resiliencia en sistemas eléctricos puede entenderse como:

“La capacidad de una red eléctrica para anticipar, resistir, absorber, responder, adaptarse y recuperarse de un evento disruptivo, sean estos desastres naturales, fallos técnicos o ciberataques para lograr la preservación, restauración y mejoramiento de sus estructuras, funciones básicas, identidad y continuidad del suministro eléctrico con las menores interrupciones posibles.”

Análisis de casos de estudio

Con el objetivo de desarrollar la propuesta metodológica para estimar la resiliencia en el sistema de distribución de COELCHA, se aborda el análisis de tres estudios de caso que ilustran cómo la integración de fuentes renovables de energía, en particular la solar fotovoltaica, mejora la resiliencia en los SEP.

En primer lugar, se examina la implementación de un software desarrollado en Scilab para optimizar el acomodo de cargas en sistemas industriales, que considera la incorporación de paneles solares [1]. Este caso demuestra cómo la generación distribuida reduce la demanda máxima y mejora la eficiencia energética pues la inclusión de paneles solares redujo la demanda máxima en un 27% y aumentó el factor de carga en un 32,5%.

El segundo caso de estudio corresponde al diseño de una central fotovoltaica autónoma en el Centro de Salud 5 de Abril II, ubicado en el Municipio de Namibe, Angola, que demuestra cómo se reduce la dependencia de la red eléctrica y aumenta la autonomía energética en instalaciones críticas. Se observó una reducción de la dependencia de la red eléctrica y un aumento en la autonomía energética del centro de salud [17].

Por último, se analiza el impacto de una central fotovoltaica integrada al sistema eléctrico de potencia MatalaLubangoNamibe, configurado como un sistema radial cuyo envío se origina en la Central Hídrica de Matala. El estudio se realiza mediante simulaciones en el software PSAT, considerando escenarios con y sin la central fotovoltaica. Los resultados muestran que la generación fotovoltaica contribuye a estabilizar el perfil de tensión, especialmente en nodos críticos como Namibe 63 kV y el centro de salud asociado, donde el voltaje se eleva de 0,80 p.u. a 0,91 p.u., equivalente a un incremento aproximado del 11%. Esta mejora favorece el funcionamiento seguro de los equipos y la calidad del suministro. Además, el análisis de flujo de carga continuado indica un aumento significativo de la capacidad de carga del sistema, permitiendo un incremento de 31,1 MW en la demanda máxima admisible antes de alcanzar la condición crítica de cargabilidad. Esto habilita la incorporación de nuevos usuarios y cargas sin comprometer la estabilidad, lo cual es especialmente relevante en contextos de crecimiento de demanda. Las curvas de estabilidad de tensión muestran, asimismo, una menor caída de tensión en el nodo de carga previo al punto de máxima cargabilidad (0,1 p.u. con la central frente a 0,2 p.u. sin ella), reduciendo el riesgo de colapsos de voltaje y reforzando la capacidad del sistema para responder a perturbaciones.

En conjunto, estos tres estudios de caso proporcionan elementos complementarios que pueden transferirse al sistema de distribución de COELCHA:

- El caso del software en Scilab entrega criterios para evaluar la reducción de demanda máxima y la mejora del factor de carga en alimentadores específicos al incorporar generación fotovoltaica distribuida, métricas directamente utilizables en escenarios de simulación futuros en COELCHA.
- El caso de la central fotovoltaica autónoma en un centro de salud muestra cómo la generación local puede incrementar la autonomía de cargas críticas, lo que resulta especialmente relevante para definir, en la red de COELCHA, nodos prioritarios (como instalaciones de salud, agua potable o telecomunicaciones) donde la resiliencia debe maximizarse.
- Finalmente, el estudio del sistema MatalaLubangoNamibe aporta una referencia clara sobre el impacto de una central fotovoltaica en la capacidad de carga y la estabilidad de tensión de una red radial, lo que sirve de base para plantear, en COELCHA, escenarios de simulación con diferentes niveles de penetración fotovoltaica y ubicaciones de generación, evaluando indicadores como perfiles de tensión, cargabilidad y porcentaje de carga servida ante eventos climáticos extremos. De esta forma, los casos externos

no solo ilustran beneficios generales de la generación fotovoltaica, sino que orientan el diseño de los escenarios y métricas que se utilizarán posteriormente en la metodología propuesta para COELCHA

Propuesta metodológica para estimar la resiliencia del sistema de distribución de COELCHA frente a eventos climáticos extremos, considerando la integración de fuentes renovables de energía.

A partir de la sistematización realizada del concepto de resiliencia en los sistemas eléctricos de potencia y de cómo las fuentes renovables de energía ayudan a mejorarla a partir del estudio de casos presentado se puede proponer la metodología siguiente para ser aplicada al sistema de distribución de COELCHA:

1. Fase de definición:

Definición del alcance: determinar la topología del SEP, concretamente del SEP de COELCHA, así como la posible capacidad para instalar fuentes renovables de energía, específicamente la solar fotovoltaica.

Identificación de amenazas: Determinar los eventos y perturbaciones que pueden afectar al SEP de COELCHA (climáticos, ciberataques, fallos de componentes, etc.), considerando su probabilidad de ocurrencia e impacto potencial.

Definición de métricas de resiliencia: Seleccionar indicadores cuantitativos y cualitativos para evaluar la resiliencia del SEP de COELCHA en sus diferentes dimensiones (anticipación, resistencia, absorción, adaptación, recuperación). Específicamente en la propuesta: tiempo de recuperación, porcentaje de carga servida, costos de la energía no suministrada.

2. Fase de Análisis:

Modelado del SEP: Modelar el sistema eléctrico que incluya las fuentes renovables de energía y permita simular su comportamiento ante diferentes perturbaciones. Se pueden usar herramientas de software especializadas para el análisis de sistemas de potencia, como por ejemplo DIgSILENT o PSAT.

Simulación de escenarios: Simular diferentes escenarios de perturbaciones, considerando la variabilidad de las fuentes renovables y la respuesta del sistema.

Evaluación de la resiliencia: Calcular las métricas de resiliencia definidas en la fase anterior para cada escenario simulado.

Análisis de sensibilidad: Evaluar la influencia en la resiliencia del SEP de COELCHA, como la penetración de renovables, la ubicación de las fuentes, la capacidad de almacenamiento.

3. Fase de implementación y recomendaciones:

Identificación de estrategias de mejora: Proponer medidas para mejorar la resiliencia del SEP a partir del análisis anterior, como por ejemplo la optimización de la operación, el refuerzo de la red, la implementación de sistemas de control avanzados, la diversificación de fuentes, etc.

Evaluación de estrategias: Analizar el impacto de las estrategias propuestas en la resiliencia del SEP, utilizando el modelo del sistema y las métricas definidas.

Desarrollo de un plan de acción: Definir las acciones concretas para implementar las estrategias de mejora, incluyendo cronogramas, recursos necesarios y responsables.

En la Figura 2 se muestra un mapa conceptual de la metodología propuesta. Es importante señalar que a partir del estudio realizado se pudiera inferir que con la propuesta se pueda estimar la resiliencia en el sistema de distribución de COELCHA y validar mediante la simulación y estudios rigurosos la hipótesis plantada al comienzo de este trabajo y esta pueda ser generalizada a otros sistemas de distribución.

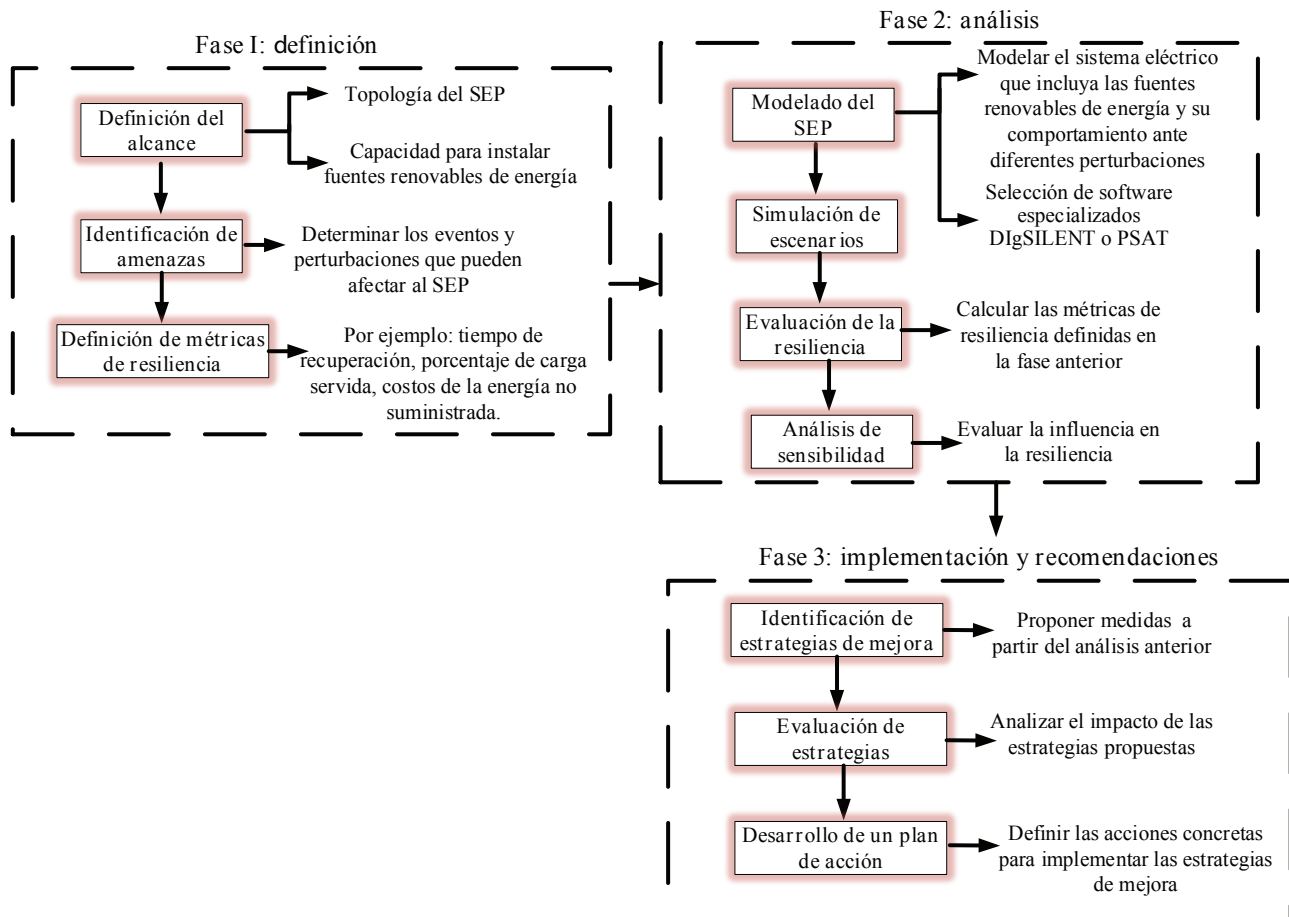


Figura 2. Mapa conceptual de la propuesta para estimar la resiliencia en el sistema de distribución de COELCHA.

Conclusiones

- La resiliencia en sistemas eléctricos es un concepto multidimensional que abarca la anticipación, resistencia, absorción, adaptación y recuperación frente a perturbaciones. No se trata solo de resistir, sino también de prever, responder, adaptarse y recuperarse de manera eficiente. El análisis de la resiliencia es fundamental en el contexto energético actual, debido a que el cambio climático y las crecientes amenazas a la ciberseguridad hacen que la capacidad de los sistemas eléctricos para afrontar perturbaciones sea más importante que nunca.
- La integración de fuentes renovables de energía, como la solar, juega un papel importante en la mejora de la resiliencia de los sistemas eléctricos. Los estudios de caso demuestran que la generación fotovoltaica puede ayudar a:
- Reducir la dependencia de la red eléctrica pública.
- Aumentar la autonomía energética de instalaciones críticas, como centros de salud.

- Mitigar las fluctuaciones de voltaje y mejorar la calidad del suministro eléctrico.
- Incrementar la capacidad de carga del sistema.
- Mejorar la estabilidad del voltaje y reducir el riesgo de colapsos.
- El desarrollo de herramientas de software facilita la integración de fuentes renovables de energía y la optimización del consumo energético. Estas herramientas permiten a los ingenieros realizar análisis de acomodo de cargas, evaluar el impacto de la inclusión de paneles solares y optimizar la operación de la red.
- La integración de fuentes renovables de energía, junto con el desarrollo de herramientas de análisis y la adaptación a nuevas condiciones, son elementos fundamentales para diseñar sistemas eléctricos más resilientes y sostenibles. Los estudios de caso demuestran los beneficios de la generación fotovoltaica en la mejora de la resiliencia de los sistemas eléctricos, tanto en instalaciones industriales como en sistemas eléctricos de potencia.
- La metodología propuesta tiene como objetivo mejorar la resiliencia del sistema eléctrico de COELCHA. Su validación requiere la realización de estudios con datos reales del sistema, lo que permitirá evaluar su eficacia en la práctica.

Referencias

- [1] M. Pérez, J. Ramos, J. A. Rodríguez, y C. Pérez, «Software for Electric Demand Control from Scilab», Revista Politécnica, vol. 53, n.o 1, pp. 7-20, feb. 2024, doi: 10.33333/rp.vol53n1.01.
- [2] M. Pérez Martínez, D. García del Sol, y E. Díaz Alfonso, Importancia del acomodo de carga en la industria: Un estudio de caso. 2020. Accedido: 17 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://goo.su/BTZ5S0>
- [3] J. F. García y H. A. Duarte, «Estudios de pérdidas técnicas en las redes eléctricas de distribución», Trabajo de fin de grado para optar por el título de ingeniería eléctrica, Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2017. Accedido: 17 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/27368/TFG_Jon_Fernandez_Garcia.pdf
- [4] Compañía General de Electricidad, «Análisis razonado compañía general de electricidad s.a. por el período terminado el 30 de junio de 2021», CGE, Chile, Resumen 30 de junio de 2021, 2021. Accedido: 17 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.cge.cl/wp-content/uploads/2021/07/Analisis-razonado-CGE-06-2021.pdf>
- [5] M. M. Pérez, F. A. Santos, y Campa O. J. Barroso, «Reconfiguración de redes para reducir pérdidas en circuitos de distribución. Un caso de estudio», Pedagogía profesional, vol. 21, n.o 4, pp. 1-17, 2023, Accedido: 17 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <http://revistas.ucpejv.edu.cu/index.php/rPProf/article/view/2430>
- [6] L. A. H. Nogueira, «Uso racional: a fonte energética oculta», Estudos Avançados, vol. 21, n.o 59, pp. 91-105, abr. 2007, Accedido: 17 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.usp.br/eav/article/view/10208>
- [7] D. M. Ramírez, E. A. Lagunas, y L. J. G. D. Ángel, «Disposición al ahorro de energía eléctrica en los hogares de México», Estudios Demográficos y Urbanos, vol. 36, n.o 2, pp. 533-561, may 2021, doi: 10.24201/edu.v36i2.2002.
- [8] D. Borges Vasconcellos, P. Puch González, y G. Frías González, «Control de demanda eléctrica aplicando algoritmos genéticos», Ingeniare. Rev. chil. ing., vol. 25, n.o 3, pp. 389-398, sep. 2017, doi: 10.4067/S0718-33052017000300389.
- [9] F. E. B. Leiva, A. N. Espinosa, F. F. Garrido, y L. E. F. Bazán, «Efectos en los niveles de resiliencia en sistemas de distribución a través de ruteos de cuadrillas de restauración», Máster en Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, Chile, 2018. Accedido: 17 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/xmlui/handle/2250/169231>
- [10] S. E. Ramirez Espitia, «Resiliencia en sistemas eléctricos de distribución.», Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Ingeniería., Bogotá, Colombia, 2023. Accedido: 17 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11349/31740>

- [11] D. Alvarado, R. Moreno, A. Street, M. Panteli, P. Mancarella, y G. Strbac, «Co-Optimizing Substation Hardening and Transmission Expansion Against Earthquakes: A Decision-Dependent Probability Approach», IEEE Transactions on Power Systems, vol. 38, n.o 3, pp. 2058-2070, may 2023, doi: 10.1109/TPWRS.2022.3180363.
- [12] Z. Bie, Y. Lin, G. Li, y F. Li, «Battling the Extreme: A Study on the Power System Resilience», Proceedings of the IEEE, vol. 105, n.o 7, pp. 1253-1266, jul. 2017, doi: 10.1109/JPROC.2017.2679040.
- [13] J. Jasiūnas, P. D. Lund, y J. Mikkola, «Energy system resilience – A review», Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 150, p. 111476, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111476.
- [14] L. Xu et al., «Resilience of renewable power systems under climate risks», Nature Reviews Electrical Engineering, vol. 1, n.o 1, pp. 53-66, ene. 2024, doi: 10.1038/s44287-023-00003-8.
- [15] J. A. L. Vilaplana, «Modernización de las redes de distribución eléctrica en España. Evaluación de los beneficios de la digitalización en el contexto del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia». Accedido: 18 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://documentos.fedea.net/pubs/eee/2023/eee2023-21.pdf>
- [16] L. A. Cárdenas Durán, «Resiliencia y vulnerabilidad de sistemas eléctricos», en Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI 2021, Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería - ACOFI, sep. 2021, pp. 1-11. doi: 10.26507/ponencia.1692.
- [17] P. Martínez y R. Domínguez, «Instalación de una Central Fotovoltaica en un Centro de Salud», Pedagogía profesional, vol. 17, n.o 1, pp. 1-15, 2019, Accedido: 17 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <http://revistas.ucpejv.edu.cu/index.php/rPProf/article/view/749>

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.

Identificación y perfilado taxonómico de la comunidad bacteriana en aguas miel de café

Identification and taxonomic profiling of the bacterial community in coffee wastewater

Victoria Yong-Tencio¹, María Celeste Bonilla-Picado²

Fecha de recepción: 22 de octubre, 2025

Fecha de aprobación: 11 de febrero, 2026

Yong-Tencio, V; Bonilla-Picado, M.C. Identificación y perfilado taxonómico de la comunidad bacteriana en aguas miel de café . *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 N° 3. Julio-Setiembre, 2026. Pág. 104-114.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i3.8266>



- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 yongvic@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-0773-0455>
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica
 celestebonillamc@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0009-0002-5261-0938>

Palabras clave

Metataxonomía 16s; economía circular; microbioma; biotecnología; diversidad microbiana.

Resumen

La miel de café, subproducto del proceso húmedo de beneficiado del grano, contiene altos niveles de materia orgánica que, al ser desechada sin tratamiento, contribuye a la contaminación de cuerpos de agua y deterioro ambiental. Sin embargo, este residuo alberga comunidades bacterianas con potencial biotecnológico aún poco estudiado. El objetivo de esta investigación fue determinar la diversidad de comunidades bacterianas presentes en la miel de café y evaluar su potencial para aplicaciones en un modelo de economía circular. Se analizaron cuatro muestras de miel de café mediante secuenciación del gen 16S rRNA (regiones V3–V4) en plataforma Illumina MiSeq. El procesamiento bioinformático incluyó control de calidad, obtención de ASVs en QIIME2 y clasificación taxonómica con la base de datos SILVA. El análisis de diversidad alfa (índices Observed, Chao1, Shannon y Simpson) reveló una comunidad rica y variable, dominada por filos como *Proteobacteria*, *Acidobacteriota*, *Actinobacteriota* y *Chloroflexi*. Estos grupos incluyen taxones con capacidades para biorremediación, degradación de compuestos orgánicos, producción de enzimas termoestables y metabolitos bioactivos. Los resultados sugieren que la miel de café, más que un desecho contaminante, puede ser una fuente valiosa para aplicaciones industriales sostenibles, ofreciendo oportunidades para innovaciones que beneficien al sector cafetalero y al ambiente.

Keywords

16S Metataxonomics; circular economy; microbiome; biotechnology; microbial diversity.

Abstract

Coffee wastewater, a by-product generated during the wet processing of coffee beans, contains high levels of organic matter that, when discharged without treatment, contributes to water pollution and environmental degradation. However, this residue harbors bacterial communities with biotechnological potential that remain largely unexplored. The objective of this study was to determine the diversity of bacterial communities present in coffee wastewater and assess their potential for applications within a circular economy model. Four coffee wastewater samples were analyzed through 16S rRNA gene sequencing (V3–V4 regions) using the Illumina MiSeq platform. Bioinformatic processing included quality control, generation of ASVs using QIIME2, and taxonomic classification based on the SILVA database. Alpha diversity analysis (Observed, Chao1, Shannon, and Simpson indices) revealed a rich and variable community dominated by phyla such as *Proteobacteria*, *Acidobacteriota*, *Actinobacteriota*, and *Chloroflexi*. These groups include taxa with capabilities for bioremediation, degradation of organic compounds, production of thermostable enzymes, and bioactive metabolites. The results suggest that coffee wastewater, rather than being solely an environmental pollutant, represents a valuable resource for sustainable industrial applications, offering opportunities for innovations that can benefit the coffee sector and contribute to environmental sustainability.

Introducción

La miel de café es un subproducto generado en el proceso húmedo de beneficiado del grano de café, caracterizado por su alto contenido de compuestos orgánicos como celulosa, hemicelulosa, pectina, sacarosa, monosacáridos, lípidos, proteínas, polifenoles y vitaminas [1].

Tradicionalmente, este residuo se desecha en cuerpos de agua sin tratamiento, lo que provoca eutrofización y deterioro de la calidad del agua, afectando tanto a los ecosistemas como a la salud humana [2,3,4].

Los residuos agrícolas, incluyendo la miel de café, albergan comunidades bacterianas complejas que participan en la descomposición de materia orgánica y la producción de metabolitos de interés biotecnológico, como ácidos orgánicos, enzimas y otros compuestos bioactivos [5]. En residuos de café, la microbiota estuvo dominada por *Bacillus coagulans* y bacterias lácticas (*Lactobacillus*, *Leuconostoc*), que producen ácido láctico y acético bajo condiciones anaerobias. Estos metabolitos pueden usarse para fabricar biopolímeros (PLA, PHAs) o como conservantes y acidulantes naturales en alimentos [6].

A pesar de estos hallazgos, la miel de café permanece poco estudiada en cuanto a su microbiota bacteriana. Hasta el momento no se dispone de estudios que describan de manera detallada la diversidad de especies presentes, ni que analicen el potencial de estos microorganismos para ser aprovechados en procesos de biotransformación o biorremediación dentro de un modelo de economía circular. Dado que el enfoque utilizado es la metataxonómica 16S, las inferencias funcionales obtenidas son únicamente potenciales y requieren ser validadas mediante aislamientos, ensayos enzimáticos o aproximaciones de metagenómica shotgun.

La aplicación de secuenciación masiva del gen 16S rRNA en plataformas como Illumina MiSeq, junto con rigurosos análisis bioinformáticos posibilita un perfilamiento taxonómico de alta resolución, capaz de detectar tanto los taxones dominantes como aquellas especies raras de elevado interés biotecnológico [7].

Se espera que este proyecto amplíe el conocimiento sobre la microbiota de la miel de café y abra vías para aplicaciones industriales y agrícolas que conviertan este residuo en un recurso valioso. Al perfilar sus comunidades bacterianas, se podrán desarrollar tecnologías más limpias y sostenibles, beneficiando a cafetaleros y ecosistemas locales. Además, contribuye a los ODS de Producción y Consumo Responsable (12), Vida Submarina (14) y Vida de Ecosistemas Terrestres (15), promoviendo una economía circular innovadora [8]. Por tanto, el objetivo de la investigación es determinar la diversidad de las comunidades bacterianas en la miel de café con miras a su potencial en futuras aplicaciones dentro del contexto de la economía circular.

Materiales y métodos

Se procesaron 30 ml de tres muestra de miel de café mediante centrifugación a 10 000 rpm durante 10 min a 24 °C. El sobrenadante resultante se filtró al vacío usando filtros de nitrato de celulosa de 0,2 µm, y el material retenido se empleó para la extracción de ADN con el kit PureLink Genomic DNA Kit.

Para evaluar la calidad e integridad del ADN, se preparó un gel de agarosa al 1,5 % con tampón de carga 6× TriTrack DNA Loading Dye y marcador Gene Ruler 1 kb DNA Ladder, y se realizó electroforesis a 70 V durante 50 min. A continuación, la concentración de ADN de las cuatro muestras se cuantificó mediante espectrofotometría Nanodrop.

El ADN extraído se sometió a secuenciación de nueva generación del gen 16S rRNA (regiones V3–V4) utilizando los cebadores universales Bakt_341F (5'-CCTACGGGNGGCWGCAG-3') y Bakt_805R (5'-GACTACHVGGGTATCTAATCC-3'). La secuenciación, con lecturas de 2 × 300 pb, se llevó a cabo en la plataforma Illumina MiSeq. El análisis de las comunidades bacterianas presentes en muestras de miel de café se llevó a cabo mediante un enfoque bioinformático basado en la secuenciación del gen 16S rRNA por medio de QIIME2. En primer lugar, el control de calidad de las secuencias crudas se realizó utilizando FastQC. Tras la verificación de la calidad, se procedió con el análisis metataxonómico en QIIME2. Se utiliza los parámetros:

truncLenF/R = <212>/<212>, maxEE = <2>/<0>, truncQ = 2, remoción de quimeras 'consensus', la corrección de errores y la obtención de Amplicon Sequence Variants (ASVs). Posteriormente, se asignó la clasificación taxonómica utilizando la base de datos SILVA (versión 138.2) como referencia [9].

Una vez obtenida la tabla de ASVs con sus asignaciones taxonómicas, se exportaron los resultados para su análisis en R mediante el paquete microeco. Este paquete permite explorar la estructura de la comunidad microbiana, realizar análisis de diversidad alfa y visualizar los resultados taxonómicos mediante gráficos. Se aplicaron filtros para eliminar taxones poco abundantes y se agruparon las secuencias por niveles taxonómicos relevantes (por ejemplo, filo o género) según los objetivos del análisis. A partir de este objeto, se visualizaron las familias y géneros bacterianos más abundantes y se calcularon índices de diversidad alfa (Observed, Chao1, Shannon y Simpson) para comparar la riqueza y equidad entre las muestras [10].

Finalmente, se llevó a cabo una revisión exhaustiva de la literatura en bases de datos científicas como PubMed, Scopus y Google Scholar, con el fin de identificar estudios que describan las capacidades metabólicas de las bacterias identificadas, analizando la información recopilada para determinar su potencial en la producción de metabolitos útiles en aplicaciones industriales o agrícolas.

Resultados

La cuantificación del ADN mediante el NanoDrop para las cuatro muestras de la miel de café mostró las concentraciones y calidad detalladas en el cuadro 1.

Cuadro 1. Concentración y Calidad del ADN correspondiente a las cuatro muestras en estudio de la miel de café.

Muestra	Concentración	Calidad (A260/A280)
1	18.3 ng/μL	0.95
2	18.9 ng/μL	0.89
3	18 ng/μL	0.90
4	16.5 ng/μL	0.86

A partir del análisis metagenómico se obtuvieron 735441 lecturas crudas (media $\pm$ DE por muestra: 183 860 $\pm$ 29 823). Tras el procesamiento con DADA2, 28.92%, 29.89%, 29.22% y 16.15% de las lecturas fueron retenidas para la muestra 1, 2, 3 y 4 respectivamente. Lo anterior resultó en la identificación de 5710 ASVs. Por su parte, la rarefacción se realizó a 27096 lecturas por muestra (Good's Coverage <0.99%).

A continuación, se presentan los resultados del análisis de diversidad y composición de comunidades bacterianas presentes en cuatro muestras de miel de café. Este análisis se enfocó en evaluar la riqueza y equitatividad de las comunidades microbianas así como la composición relativa de taxones a nivel de filo, familia y género.

Los índices Chao1 y Observed Features, mostraron que la muestra M3 presentó la mayor cantidad de taxones, seguido por la muestra M1, M2 y M4. En cuanto al índice de Shannon, se observan valores relativamente altos y similares en la muestra M1, M2 y M3, mientras que la muestra M4 presentó la diversidad más baja, lo que puede indicar dominancia de ciertos taxones. Por su parte, el índice de Simpson reveló una alta uniformidad en la muestra M2 seguido de la muestra M1, mientras que las muestras M3 y M4 mostraron valores más bajos, sugiriendo la dominancia de algunos taxones en la comunidad microbiana. Lo anterior

reafirma la tendencia observada en el índice de Shannon. Asimismo, a partir de este análisis se determinó que no existen diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$) entre las cuatro muestras de miel de café para ninguno de los índices analizados (Figura 1).

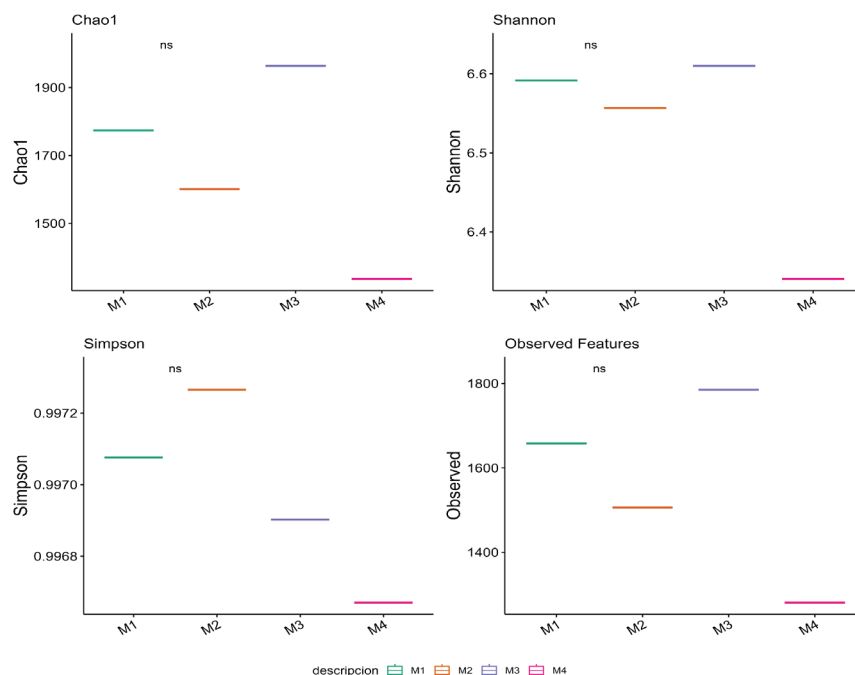


Figura 1. Diversidad alfa de las comunidades microbianas presentes en muestras de miel de café.

La clasificación taxonómica con respecto al filo reveló una gran diversidad de distintos grupos. De manera general los grupos más presentes en las cuatro muestras fueron *Proteobacteria*, *Acidobacteriota*, *Actinobacteriota* y *Chloroflexi* fluctuando su abundancia entre las distintas muestras. Para la muestra 1 y 3 los dos grupos que más predominaron fueron *Proteobacteria* y *Actinobacteriota*. Mientras que para la muestra 2 y 4 los grupos más abundantes fueron *Proteobacteria* y *Acidobacteriota* (Figura 2).

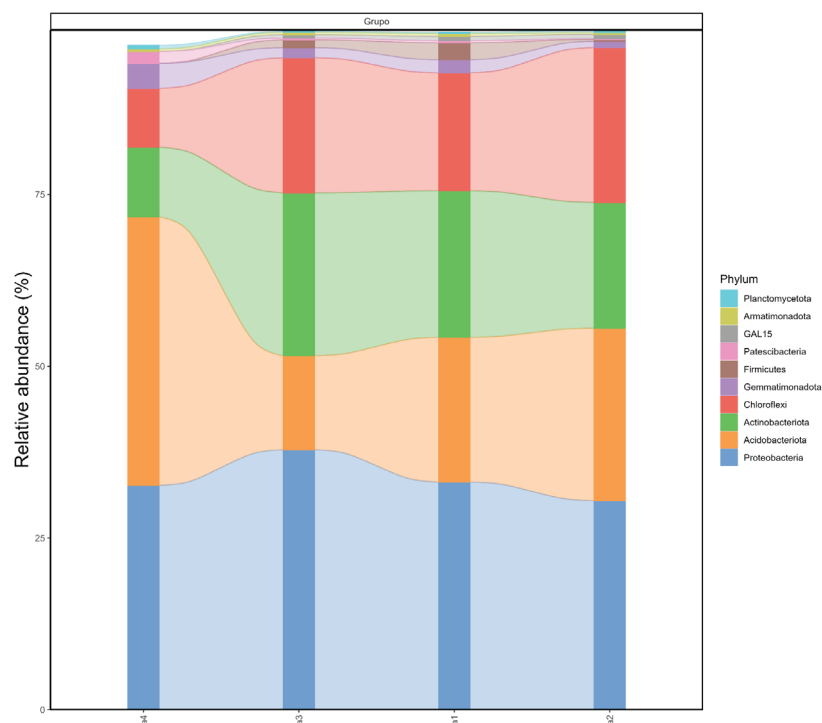


Figura 2. Composición taxonómica a nivel de filo para cuatro muestras de miel de café.

Con respecto a la composición taxonómica a nivel de familia se identificó una diversidad amplia de bacterias en las muestras analizadas. *Xanthobacteraceae* fue el grupo más abundante para la muestra 1, 2 y 3; otros grupos con mayor abundancia fueron MB-A2-108, *Ktdonobacteraceae* para la muestra 1 y 2 respectivamente. Por su parte la muestra 3 presentó abundancias balanceadas entre distintos grupos como *Ktdonobacteraceae*, MB-A2-108 e IMCC26256. En cuanto a la muestra 4, se identificó en gran cantidad un conjunto denominado *Subgrupo 5* así como el grupo *Xanthobacteraceae* y *Solibacteraceae* en abundancias cercanas (Figura 3).

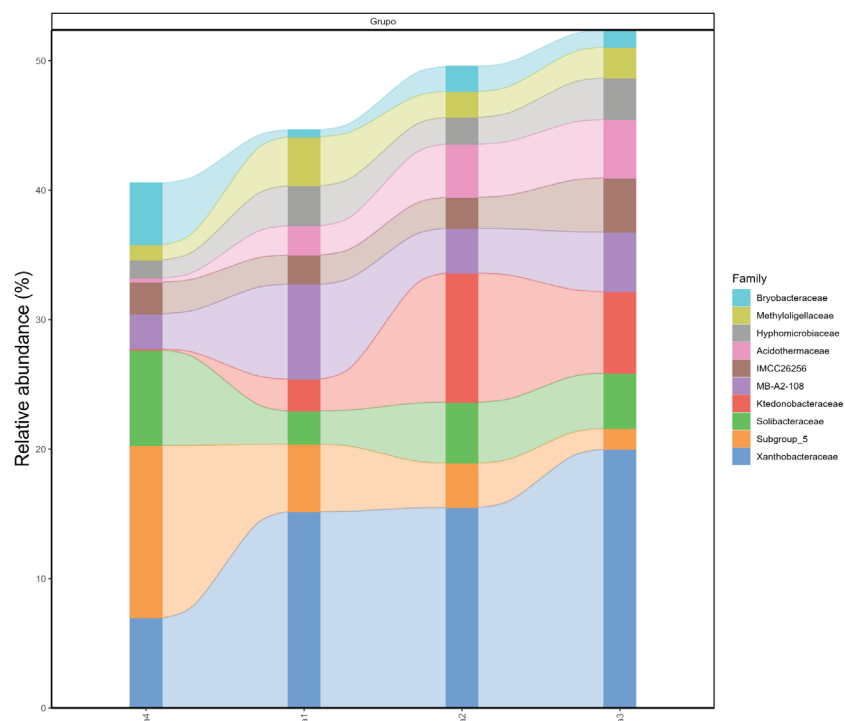


Figura 3. Composición taxonómica a nivel de familia para cuatro muestras de miel de café.

A nivel de género los taxones dominantes variaron entre las muestras. En la muestra 1 predominó *MB-A2-108* acompañado de una abundancia equilibrada entre distintos grupos como *Pedomicrobium*, *Acidothermus*, *IMCC26256*, *HSB_OF53-F07*, *Candidatus Solibacter* y el *Subgrupo 5*. Por su parte, la muestra 2 presentó como género predominante a *HSB_OF53-F07* y *Candidatus Solibacter*. Asimismo, en la muestra 3 se observa un perfil balanceado de abundancia entre distintos grupos como *HSB_OF53-F07*, *Candidatus Solibacter*, *MB-A2-108*, *Acidothermus* e *IMCC26256*. En cuanto a la muestra 4, *Candidatus Solibacter* y el conjunto denominado *Subgrupo 5* predominaron en abundancia (Figura 4).

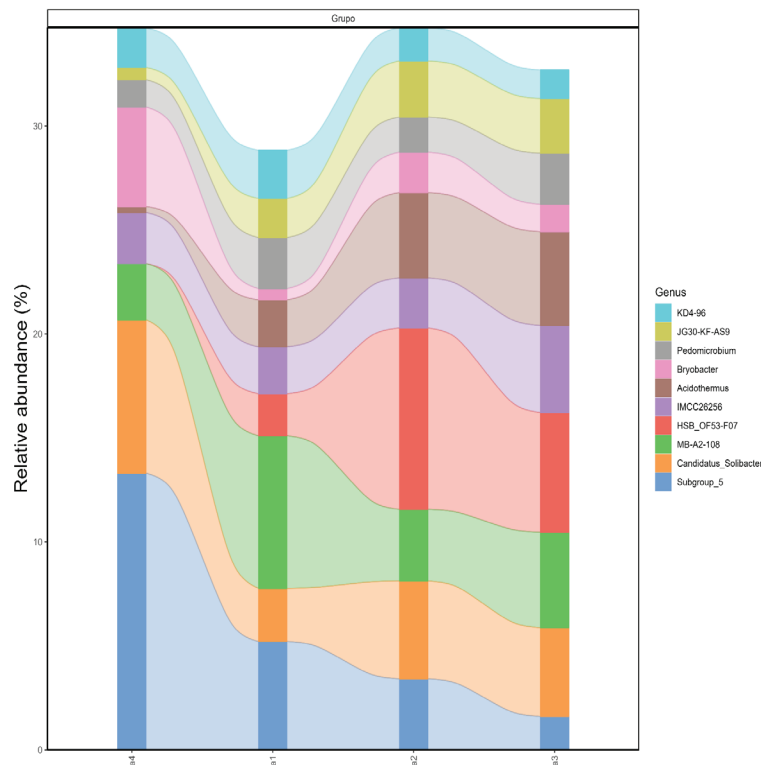


Figura 4. Composición taxonómica a nivel de género para cuatro muestras de miel de café.

Discusión

El análisis taxonómico de las comunidades bacterianas presentes en la miel de café permitió identificar grupos microbianos con funciones metabólicas relevantes. Esta caracterización no solo permite entender la estructura microbiana del producto, sino que también ofrece una oportunidad para explorar aplicaciones biotecnológicas de los taxones detectados, considerando tanto su rol ecológico como su potencial para procesos industriales o ambientales. Sin embargo, resulta importante destacar que al tratarse de un enfoque de análisis 16S RNA, los resultados no permiten una asignación funcional concluyente ni alcanzar una resolución a nivel de cepa. Por lo tanto, las asociaciones biotecnológicas descritas a continuación deben de ser consideradas como hipótesis de trabajo sujetas a verificación en estudios posteriores.

Dentro del filo de *Proteobacteria*, se identificaron distintas familias como *Hyphomicrobiaceae* que contiene al género *Pedomicrobium*, bacterias Gram-negativas que colonizan ambientes acuáticos, suelos, superficies minerales y relacionadas con el metabolismo de nitrógeno. Este género se destaca por oxidar Mn (II) y participar en su reciclaje y utilización en sinergia con otros microorganismos. Asimismo, se reporta su papel en la eliminación de iones metálicos, degradación de materia orgánica del suelo e inhibición de crecimiento de bacterias patógenas. A partir de ello, es posible reconocer el potencial biotecnológico en aplicaciones ambientales como la biorremediación de aguas contaminadas con metales pesados o suelos degradados e incluso como un agente de biocontrol [11]. Por otro lado, para la familia *Xanthobacteraceae*, estudios destacan la capacidad de este grupo de degradar compuestos orgánicos aromáticos policíclicos como naftaleno, benzo(a)pireno, fluoreno, antraceno y fenantreno. Por lo que la posiciona como una vía interesante para la biorremediación de ambientes contaminados [12].

Acidobacteriota es un filo en el cual se encuentra la familia *Bruobacteraceae*. Dentro de ella se identifica al género *Bryobacter* que se destaca por ser un grupo de bacterias quimiorganotróficas aeróbicas que participan en el ciclo biogeoquímico del carbono por medio del uso de polisacáridos y ácidos orgánicos. Esta versatilidad metabólica sugiere un potencial en aplicaciones de tratamiento de residuos lignocelulósicos o biofertilización. Asimismo, *Candidatus Solibacter* pertenece a la familia *Solibacteraceae*, y es capaz de oxidar el amonio en ambientes con bajo contenido de nutrientes y oxígeno. De modo que, es una gran opción para su uso en bioconversión de residuos agrícolas [13]. Por otro lado, en literatura más antigua el Subgrupo 5 se reporta en suelos ricos en materia orgánica, nutrientes y menor acidez [14]. Sin embargo, se carece de estudios recientes que provean una caracterización funcional o producción de metabolitos conocidos a nivel específico de este grupo.

Acidotherrmus, perteneciente a la familia *Acidotherrmaceae* y al filo *Actinobacteriota*, se destaca por ser tolerante a ambientes ácidos prosperando en suelos con pH bajos [15]. Este género presenta especies capaces de producir enzimas termoestables como la celulosa GuxA (GH/6/GH12), que es eficiente en la hidrólisis de biomasa vegetal en condiciones ácidas y altas temperaturas. Esta característica convierte a este conjunto de bacterias en candidatas interesantes para biorrefinerías y producción de combustibles [16]. Asimismo, *MB-A2-108* miembro del filo *Actinobacteriota*, se reporta en ambientes con baja disponibilidad de nutrientes. Este grupo destaca por su capacidad de tolerancia a condiciones adversas, resaltando la oportunidad de explorar su uso como parte de consorcios microbianos para la rehabilitación de ambientes degradados [17].

Otro grupo perteneciente al filo *Actinobacteriota* es *IMCC26256*, en el cual se han reportado clusters biosintéticos de metabolitos secundarios de terpenos conteniendo genes como escualano sintasa, licopeno ciclasa y poliprenil sintetasa, lo que sugiere que la bacteria podría sintetizar pigmentos derivados de terpenos. El segundo cluster identificado incluía una acil-CoA deshidrogenasa relacionada con la enzima CaiA, la cual se asocia con la producción de antibióticos tipo sacáridos. Lo anterior abre paso al descubrimiento de producción de compuestos bioactivos para aplicaciones farmacéuticas, cosméticas y agrícolas [18].

Por su parte, la familia *Ktedonobacteraceae* perteneciente al filo *Chloroflexi*, contiene bacterias heterótrofas comúnmente aisladas de suelos. Estas bacterias han demostrado una gran capacidad para sobrevivir con niveles sub atmosféricos de hidrógeno y monóxido de carbono como fuentes de energía. Esta habilidad se asocia a genes que codifican hidrogenasas y deshidrogenasas clave en la oxidación de estos gases. Estas características metabólicas abren paso a la posibilidad de aplicar estas bacterias en procesos de tratamiento de gases industriales o syngas, ofreciendo una alternativa para la reducción de emisiones contaminantes o la valorización de residuos gaseosos [19].

Para *HSB_OF53-F07* no se lograron encontrar estudios centrados en las características y potenciales biotecnológicos concretos. Lo anterior abre paso a la necesidad de investigaciones metagenómicas funcionales o aislamientos experimentales para conocer más a profundidad el potencial biotecnológico que este grupo de bacterias puede poseer.

Más allá de la descripción de taxones específicos, se observaron diferencias notables en la composición microbiana entre las distintas muestras analizadas. Estas variaciones son consistentes con distintos estudios que resaltan la complejidad microbiana en productos agrícolas, influenciada por condiciones específicas como el origen geográfico, prácticas de recolección o almacenamiento [20]. Esto sugiere una vía pertinente en investigaciones futuras para tener un mayor entendimiento del efecto de distintas variables en la microbiota de la miel de café.

Si bien los hallazgos de este estudio aportan información relevante, resulta importante señalar algunas limitaciones inherentes en este ensayo. En primer lugar, el tamaño de muestra resulta muy reducido y considerando que no se realizaron réplicas por condición, esto restringe la solidez estadística de los resultados. Asimismo, la carencia de covariables físicoquímicas relevantes como el pH, DQO/DBO, conductividad y °Brix limita la comprensión del entorno microbiano. Por otro lado, los resultados obtenidos de la relación $A_{260}/A_{280} < 1.0$ sugiere posibles impurezas en las extracciones de ADN, mientras que en los resultados también se evidenció la escasez de controles negativos. Finalmente, las inferencias funcionales obtenidas a partir de este análisis deben de considerarse únicamente como aproximaciones y no confirmaciones experimentales.

Conclusiones y/o recomendaciones

El perfilado de la comunidad bacteriana en la miel de café reveló una diversidad considerable de taxones pertenecientes a filos dominantes como *Proteobacteria*, *Acidobacteriota*, *Actinobacteriota* y *Chloroflexi*, con variaciones en abundancia según la muestra. Estos grupos incluyen géneros y familias con potencial biotecnológico para la biorremediación (eliminación de metales pesados y degradación de compuestos aromáticos), bioconversión de residuos agrícolas, producción de enzimas termoestables y compuestos bioactivos de interés en las industrias alimentaria, agrícola, energética y farmacéutica.

Los resultados confirman que la miel de café, más allá de ser un subproducto contaminante, puede constituir una fuente valiosa de recursos microbianos para procesos sostenibles dentro de un modelo de economía circular, beneficiando a productores y reduciendo impactos ambientales. Se recomienda profundizar los estudios mediante análisis metagenómicos y el aislamiento de cepas clave para evaluar su potencial en biorremediación, producción de biopolímeros y biocombustibles. Además, se sugiere establecer colaboraciones con la industria cafetalera para desarrollar aplicaciones sostenibles que valoricen la miel de café dentro de un modelo de economía circular.

Referencias

- [1] E. M. Ijanu, M. A. Kamaruddin, and F. A. Norashiddin, "Coffee processing wastewater treatment: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative," *Appl Water Sci*, vol. 10, no. 1, pp. 1–11, Jan. 2020, doi: 10.1007/S13201-019-1091-9/FIGURES/2.
- [2] J. C. M. J. Cancho, J. G. J. Morales, E. V. Santos, J. E. G. Collao, and J. O. Dilas-Jiménez, "Limpieza del agua miel proveniente del beneficiado húmedo del café mediante polímeros naturales orgánicos," *Alpha Centauri*, vol. 3, no. 3, pp. 02–10, Jul. 2022, doi: 10.47422/AC.V3I3.84.
- [3] N. S. M. Said, S. R. S. Abdullah, N. 'Izzati Ismail, H. A. Hasan, and A. R. Othman, "Integrating treatment processes of coffee processing mill effluent for reclamation of secondary resources," *J Clean Prod*, vol. 386, p. 135837, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.135837.
- [4] Y. A. Alemayehu, S. L. Asfaw, and T. A. Tirfie, "Management options for coffee processing wastewater. A review," *J Mater Cycles Waste Manag*, vol. 22, no. 2, pp. 454–469, Mar. 2020, doi: 10.1007/S10163-019-00953-Y/METRICS.
- [5] B. Duong, P. Marraccini, J. L. Maeght, P. Vaast, M. Lebrun, and R. Duponnois, "Coffee Microbiota and Its Potential Use in Sustainable Crop Management. A Review," *Front Sustain Food Syst*, vol. 4, p. 607935, Dec. 2020, doi: 10.3389/FSUFS.2020.607935/XML/NLM.
- [6] C. Hermansen, Q. K. Chong, S. Ho, F. Natali, M. Weingarten, and E. C. Peterson, "Microbiome Evolution of Brewer's Spent Grain and Spent Coffee Ground Solid Sidestreams Under Industrial Storage Conditions," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, no. 21, p. 9759, Nov. 2024, doi: 10.3390/APP14219759/S1.
- [7] I. Abellan-Schneyder *et al.*, "Primer, Pipelines, Parameters: Issues in 16S rRNA Gene Sequencing," *mSphere*, vol. 6, no. 1, Feb. 2021, doi: 10.1128/MSPHERE.01202-20/SUPPL_FILE/MSPHERE.01202-20-ST005.PDF.
- [8] K. Tsigkou *et al.*, "Coffee processing waste: Unlocking opportunities for sustainable development," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 210, p. 115263, Mar. 2025, doi: 10.1016/J.RSER.2024.115263.

- [9] E. Bolyen, JR. Rideout, MR. Dillon, NA. Bokulich, CC. Abnet, GA Al-Ghalith, *et al.*, "Reproducible, interactive, scalable and extensible microbiome data science using QIIME 2," *Nature Biotechnology*, vol. 37, pp. 852–857, Jul.2019, doi: 10.1038/s41587-019-0209-9.
- [10] C. Liu, Y. Cui, X. Li y M. Yao, "microeco: An R package for data mining in microbial community ecology," *FEMS Microbiology Ecology*, vol. 97, no. 2, Feb.2021, doi: 10.1093/femsec/fiaa255.
- [11] T. Zhang, S. Wang, S. Rana, Wang, Y., Z. Liu, Q. Cai, *et al.*, "Analysis of Leaf and Soil Nutrients, Microorganisms and Metabolome in the Growth Period of *Idesia polycarpa* Maxim," *Microorganisms*, vol. 12, no. 4, p. 746, Apr.2024, doi: 10.3390/microorganisms12040746.
- [12] M. Zhou, Z. Liu y B. Hu, "Impact of arsenic and PAHs compound contamination on microorganisms in coking sites: From a community to individual perspective," *Environmental Pollution*, vol. 360, p. 124628, Nov.2024, doi: 10.1016/j.envpol.2024.124628.
- [13] Z. Zou, K. Yuan, L. Ming, Z. Li, Y. Yang, R. Cheng, *et al.*, "Changes in Alpine Soil Bacterial Communities With Altitude and Slopes at Mount Shergyla, Tibetan Plateau: Diversity, Structure, and Influencing Factors," *Frontiers in Microbiology*, vol. 12, p. 839499, May.2022, doi: 10.3389/fmicb.2022.839499.
- [14] A. Navarrete, A. Venturini, K. Meyer, A. Klein, J. Tiedje, N. Bohannan, *et al.*, "Differential Response of Acidobacteria Subgroups to Forest-to-Pasture Conversion and Their Biogeographic Patterns in the Western Brazilian Amazon", *Frontiers in Microbiology*, vol.6, Dec.2015, doi: 10.3389/fmicb.2015.01443
- [15] A. Khan, Y. Wei, M. Adhan, I. Ali y M. Zhang, "Dynamics of rhizosphere bacterial communities and soil physio-chemical properties in response to consecutive ratooning of sugarcane," *Frontiers in Microbiology*, vol. 14, p. 1197246, Jul.2023, doi: 10.3389/fmicb.2023.1197246.
- [16] N. Hengge, S. Mallinson, P. Pason, V. Lunin, M. Alahuhta, D. Chung, M. Himmel, J. Westpheling y Y. Bumble, "Characterization of the Biomass Degrading Enzyme GuxA from *Acidothermus cellulolyticus*," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 23, no. 11, p. 6070, May.2022, doi: 10.3390/ijms23116070.
- [17] W. Qin, J. Zhao, Q. Gao, S. Song, S. Wang y B. Zhang, "Bacterial Community Shifts in Casing Soil Before and After the Cultivation of *Oudemansiella raphanipes*," *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, vol. 22, pp. 4116-4126, Oct.2022, doi: 10.1007/s42729-022-01011-7.
- [18] V. Waschulin, C. Borsetto, R. James, K. Newsham, S. Donadio, C. Corre y E. Wellington, "Biosynthetic potential of uncultured Antarctic soil bacteria revealed through long-read metagenomic sequencing," *The ISME Journal*, vol. 16, pp. 101-111, Jul.2021, doi: 10.1038/s41396-021-01052-3.
- [19] A. Freches y J. Fradinho, "The biotechnological potential of the Chloroflexota phylum," *American Society of Microbiology*, vol. 90, no. 6, May.2024, doi: 10.1128/aem.01756-23.
- [20] A. E. Peñuela-Martínez, A. V. Velasquez-Emiliani y C. A. Angel, "Microbial Diversity Using a Metataxonomic Approach, Associated with Coffee Fermentation Processes in the Department of Quindío, Colombia," *Fermentation*, vol. 9, no. 4, p. 343, Mar.2023, doi: 10.3390/fermentation9040343

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.

Caracterización del transporte turbulento de partículas y optimización del calentamiento del plasma y la regulación de la corriente eléctrica en las bobinas del Stellarator SCR-1

Characterization of turbulent transport of particles and optimization of plasma heating and operation current control in the coils of the SCR-1 Stellarator

Ricardo Solano-Piedra¹, Luis Alonso Araya-Solano², Ana María Murillo-Morgan³, José Esteban Pérez-Hidalgo⁴, Iván Vargas-Blanco⁵, José Andrés Borloz-Chinchilla⁶, Robert David Cerdas-Bermúdez⁷, Manuel Antonio Bojorge-Araya⁸, Julián David Sánchez-Castro⁹, David Fabián Díaz-Sánchez¹⁰, Kendy Raquel Arias-Ortiz¹¹

Fecha de recepción: 28 de octubre, 2025
Fecha de aprobación: 21 de febrero, 2026

Caracterización del transporte turbulento de partículas y optimización del calentamiento del plasma y la regulación de la corriente eléctrica en las bobinas del Stellarator SCR-1. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 N° 3. Julio-Setiembre, 2026. Pág. 115-131.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i3.8275>

- 1 Plasma Laboratory for Fusion Energy and Applications. School of Physics, Costa Rica Institute of Technology, Costa Rica. ✉ risolano@itcr.ac.cr  <https://orcid.org/0000-0003-3092-8654>
- 2 Plasma Laboratory for Fusion Energy and Applications. School of Physics, Costa Rica Institute of Technology, Costa Rica. ✉ luaraya@itcr.ac.cr  <https://orcid.org/0000-0002-7941-821X>
- 3 Plasma Laboratory for Fusion Energy and Applications. School of Mechatronics Engineering, Costa Rica Institute of Technology, Costa Rica. ✉ amurillo@itcr.ac.cr  <https://orcid.org/0009-0000-5805-4122>
- 4 Plasma Laboratory for Fusion Energy and Applications. School of Physics, Costa Rica Institute of Technology, Costa Rica. ✉ jose.perez@itcr.ac.cr  <https://orcid.org/0009-0000-5805-4122>
- 5 Plasma Laboratory for Fusion Energy and Applications. School of Physics, Costa Rica Institute of Technology, Costa Rica. ✉ ivargas@itcr.ac.cr  <https://orcid.org/0000-0001-9568-1598>
- 6 Plasma Laboratory for Fusion Energy and Applications, Costa Rica Institute of Technology, Costa Rica. ✉ andres.borloz@estudiantec.cr  <https://orcid.org/0009-0004-9357-3621>
- 7 Plasma Laboratory for Fusion Energy and Applications, Costa Rica Institute of Technology, Costa Rica. ✉ robertcerdas@estudiantec.cr  <https://orcid.org/0009-0001-4360-2904>
- 8 Plasma Laboratory for Fusion Energy and Applications, Costa Rica Institute of Technology, Costa Rica. ✉ mbojorge@estudiantec.cr  <https://orcid.org/0009-0004-6071-5945>
- 9 Plasma Laboratory for Fusion Energy and Applications, Costa Rica Institute of Technology, Costa Rica. ✉ jsanchezitcr@proton.me  <https://orcid.org/0009-0006-4787-4225>
- 10 Plasma Laboratory for Fusion Energy and Applications, Costa Rica Institute of Technology, Costa Rica. ✉ fadiroz123@estudiantec.cr  <https://orcid.org/0009-0001-6101-5009>
- 11 Plasma Laboratory for Fusion Energy and Applications, Costa Rica Institute of Technology, Costa Rica. ✉ kendyarias@estudiantec.cr  <https://orcid.org/0009-0001-0359-8699>



Keywords

Stellarator; ECRH; Turbulent transport; electrode biasing; Buck DC-DC converter; Vlasov antenna.

Abstract

The SCR-1 stellarator, operational since June 2016, has emerged as a pioneer in Latin America in the field of modular stellarator devices, developed by the Costa Rica Institute of Technology. This device has been the subject of continuous characterization and optimization efforts, with a focus on significant improvements in turbulence, coil feeding and wave propagation within the SCR-1 stellarator. This work presents a first study of turbulence, examining behavior at the plasma edge and its interaction with external electric fields, as well as the importance of electrode polarization. In addition, the design of the DC-DC Buck converter for the SCR-1 current coil control system is addressed, along with the proposal of a Vlasov antenna to optimize energy deposition in the plasma. Results indicate the significant influence of electrodes on plasma behavior. A power converter was designed to ensure an efficient and safe electrical supply and simulated by PLECS. The buck converter was deemed crucial for precise and stable current regulation in the coils. Electronic components were sized to handle the required current and voltage specifications. Finally, a modified Vlasov antenna was designed, which demonstrated in COMSOL multiphysics simulations that the new configuration improved the distribution of electromagnetic waves in the SCR-1 vacuum vessel.

Palabras clave

Stellarator; ECRH; Transporte turbulento; polarización de electrodos; convertidor Buck DC- DC; antena Vlasov.

Resumen

El stellarator SCR-1, operativo desde junio de 2016, ha surgido como un pionero en América Latina en el campo de los dispositivos stellarator modulares, desarrollado en el Instituto Tecnológico de Costa Rica. Este dispositivo ha sido objeto de continuos esfuerzos de caracterización y optimización, con un enfoque en mejoras significativas en turbulencia, alimentación de bobinas y propagación de ondas dentro del stellarator. Este trabajo presenta un primer estudio sobre la turbulencia, examinando su comportamiento en el borde del plasma y su interacción con campos eléctricos externos, así como la importancia de la polarización de los electrodos. Además, se aborda el diseño de un convertidor Buck DC-DC para el sistema de control de corriente de las bobinas del SCR-1, junto con la propuesta de una antena tipo Vlasov para optimizar la deposición de energía en el plasma. Los resultados indican una influencia significativa de los electrodos en el comportamiento del plasma. Se diseñó un convertidor de potencia para garantizar un suministro eléctrico eficiente y seguro, el cual fue simulado en PLECS. El convertidor Buck se consideró crucial para la regulación precisa y estable de la corriente en las bobinas. Los componentes electrónicos fueron dimensionados para manejar las especificaciones requeridas de corriente y voltaje. Finalmente, se diseñó una antena Vlasov modificada, la cual demostró mediante simulaciones en COMSOL Multiphysics que la nueva configuración mejoró la distribución de las ondas electromagnéticas dentro de la cámara de vacío del SCR-1.

Introduction

Operational since June 2016, the SCR-1 Stellarator, a groundbreaking device in Latin America, was designed, built, and operational at the Costa Rica Institute of Technology. Initially, the project focused on overcoming the engineering challenges associated with developing a compact magnetic confinement device. The SCR-1 is characterized by a two-field period modular design, a major radius of 247.7 mm and an aspect ratio of 6.2, with a low-shear magnetic configuration. Its vacuum vessel is made from 6061 - T6 aluminum and has 12 modular coils, each with 6 turns, carrying 725 A per turn, resulting in a toroidal field current of 4.35 kA turn per coil. These coils are powered by a 120 V battery bank, and plasma is generated providing 2 kW at 2.45 GHz, corresponding to the second harmonic ($B = 43.8$ mT). The plasma pulses last between 4s to 10s, with a minor radius of 39.95 mm, a plasma volume of 0.0078 m³, an average electron density of 5×10^{15} m⁻³, and an electron temperature of 6 eV to 14 eV [1]. In this new phase of applied development for the SCR-1 stellarator, efforts are focused on further characterizing and optimizing the magnetic confinement device and the plasma it produces.

This research aims to delve deeper into the behavior of turbulence and transport at the edge of the confined plasma, as well as analyze the interaction of externally generated radial electric fields with these turbulent modes. Therefore, the research hypothesis is that the implementation of a radial electric field through external biasing can induce a sheared poloidal flow, thereby suppressing edge turbulence and improving particle confinement. To test this, the study defines the following general objective: to characterize particle transport and turbulence in the SCR-1 through the optimization of plasma heating and the precise regulation of electrical current in the modular coils. The specific objectives of the study are: i) determine particle transport and turbulence levels in the SCR-1 plasma; ii) establish the nature of turbulence and its control through external electric fields; iii) develop a power conversion system to regulate coil current with automated safety and cooling features; and, iv) implement a modified Vlasov antenna to optimize energy deposition in the plasma.

In the periphery of fusion devices, a significant challenge arises due to the increased loss of particles and energy. The efficiency of stellarators is considerably reduced as these enhanced edge losses degrade the confinement conditions. At the edge, magnetic field lines spread out, and the plasma vigorously interacts with neutral particles, directly impacting its particle and energy balance. Investigating the plasma edge is essential for understanding the overall plasma behavior and improving the performance of fusion devices. Both the edge and the Scrape-Off Layer (SOL) typically exhibit turbulent structures and electrostatic fluctuations. These phenomena dominate particle and energy losses, significantly limiting the overall confinement conditions [2].

In this context, various edge studies conducted on devices with different parameters aim to comprehensively understand the physical processes generating edge turbulence and the constraints they impose on plasma confinement. Losses in Tokamak devices are not continuous but occur intermittently due to the radial convection of turbulent structures known as filaments or “blobs” [3]. These fluctuations exhibit intermittent behavior with short lifetimes, allowing them to appear and disappear at the plasma edge within microseconds. The formation and movement of these blob filaments result in electrostatic fluctuations in various plasma parameters. This includes the plasma electron density, $\tilde{n}_e(t)$, and the radial velocity of the charged particles in the plasma, $\tilde{v}_r(t)$. The tilde denotes the fluctuations of a given quantity over time, expressed as:

$$\tilde{n}_e(t) = n_e(t) - \langle n_e \rangle \quad (1)$$

where $\langle n_e \rangle$ is the time-averaged value. In this study, the ion saturation current ($\tilde{I}_s$) is used as a proxy for electron density ($\tilde{n}_e$). This is justified because $\tilde{I}_s$ is measured when the probe potential is sufficiently negative to repel all electrons, making the collected current proportional to the local plasma density.

The turbulent radial flux (Γ_r) is derived from the correlation between fluctuations in density ($\tilde{n}_e$) and radial velocity ($\tilde{v}_r$), which can be expressed through experimental proxies. Anomalous levels of net radial transport arise from the correlated fluctuations in plasma density and radial velocity, given by:

$$\Gamma_r \simeq \langle \tilde{n}_e \tilde{v}_r \rangle \propto \frac{\langle \tilde{I}_s \tilde{E}_\theta \rangle}{B} \quad (2)$$

$$\tilde{E}_\theta = -\frac{\Delta \tilde{V}_f}{d} \quad (3)$$

$$v_r^{eff} = \frac{\langle \tilde{I}_s \tilde{E}_\theta \rangle}{I_s B} \quad (4)$$

$$v_\theta^{ph} = \frac{\tilde{E}_r}{B} \quad (5)$$

where Γ_r is the turbulent radial flux, $\tilde{E}_\theta$ is the poloidal electric field, v_r^{eff} is the radial effective velocity, v_θ^{ph} is the poloidal phase velocity, I_s is the ion saturation current, B is the magnitude of the magnetic field, $\Delta \tilde{V}_f$ is the floating potential difference, d is the distance between the electrode with the external electric field and the reference electrode, and $\tilde{E}_r$ is the radial electric field [4]. A radial electric field has the potential to cause notable changes in particle trajectories. It initiates a poloidal drift along the flux surface, influencing the particle's poloidal velocity in such a way that both components counterbalance each other. As a result, particles maintain a fixed poloidal position and exhibit behavior akin to particles following helical paths. This phenomenon also leads to a decrease in ion saturation current and the radial velocity of charged particles [5].

Achieving higher beta values in confined plasma requires precise control of the current supplied to the coils. This necessitates a regulated power supply for the external coil system that generates the magnetic field. The choice of converter depends on the primary power source: DC (battery bank) or AC (three-phase). The Buck Converter is a popular choice due to its simplicity and cost-effectiveness. However, employing this converter for high-power scenarios with currents exceeding 800 A poses a significant challenge. Careful consideration is required when activating MOSFET power elements to prevent component damage. When employing a battery bank as the primary power source, a protection system is crucial. This system should include a manually and remotely disconnectable magnetothermal circuit breaker and an arc protection chamber for the contacts. Circuit breakers can withstand short-circuit current overloads, as the magnetic element activates the protective circuit without delay. A high-power contactor with remote activation will serve as the connection/disconnection medium. Contactors are electrical switches designed for high-power circuits, capable of handling substantial current intensities [6].

The electron cyclotron resonance heating system for the SCR-1 stellarator includes a microwave isolator to protect the magnetron and a directional coupler that records measurements of reflected power and transmitted power during the discharge. The radiation is then directed to a triple stub tuner, which is responsible for coupling the radiation to the plasma by selecting the minimum possible reflection coefficient. Finally, a waveguide with a quartz window, having a surface flatness of half the wavelength, is used to minimize the impedance of the electromagnetic waves [7]. Designing an optimal internal antenna (within the vacuum vessel) that adheres to the dimensional and design constraints is crucial. The antenna design involves a waveguide cut at a specific angle. This antenna will be installed within the vacuum vessel, requiring meticulous consideration of several constraints. Notably, the end of the antenna facing the plasma must avoid contact to prevent damage, necessitating precise dimension calculations. Studies have considered these factors, as noted in [8].

Furthermore, the limited space between the SCR-1 vacuum vessel wall and the plasma boundary presents a significant challenge, calling for a thorough analysis of the constraints that will define the feasible configurations of the antenna; a similar situation happens for TJ-K stellarator [9]. Therefore, Vlasov antennas are a good choice. Vlasov antennas are made up of a cylindrical waveguide with a cutoff, which allows them to radiate energy in cylindrical symmetry modes with circular guide waves, without requiring an additional mode converter. The Vlasov antenna presents versatility when making modifications, these can be varying the cut angle for a simple antenna, making a different crosscut or adding a reflector to the antenna, in the same way, it is important to consider its handling so that it does not have sharp edges that could damage the equipment or be dangerous when handling it [10, 11].

Materials and methods

Experimental Turbulence Measurement

For plasma turbulence measurements, an electrode was necessary to generate an external electric field. The electrical circuit design for the electrode aimed to meet specific requirements, including frequency variation between 100 Hz and 2000 Hz, variable voltage amplitude around 100 V, and the generation of sinusoidal waveform oscillating between 0 V and negative values. To address the complexity of precise frequency oscillation and amplitude adjustments, a function generator was utilized. While this device enabled waveform generation within the required frequency range, it had limitations in amplitude values. To overcome this limitation, a transformer amplified the output signal, ensuring it met the desired voltage amplitude. An offset was applied to ensure waveform oscillation between negative values.

The experimental setup of the Langmuir probe placed in the SCR-1 stellarator at the Plasma Laboratory for Fusion Energy and Applications is depicted in Figure 1. The outputs of the Langmuir probe tips were connected to the electrode circuit and data collection tips, such that one tip acted as the electrode while another performed data collection. The power supply and required frequencies for the electrode circuit were obtained from the depicted power sources and frequency generator.

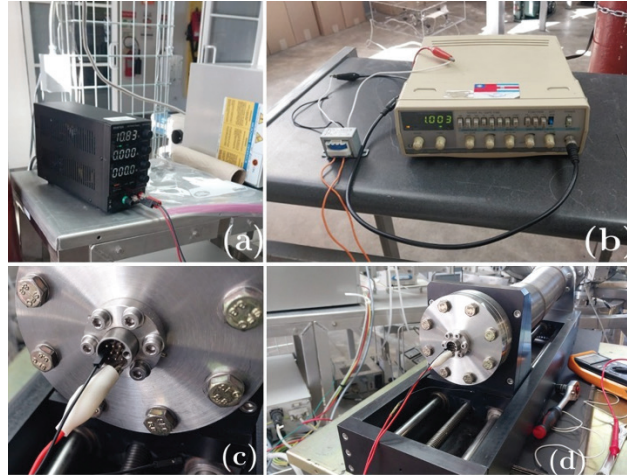


Figure 1. Experimental setup of Langmuir probe in the SCR-1 stellarator: (a) voltage source, (b) signal generator, (c) connections to the Langmuir probe, and (d) panoramic view of connections to the Langmuir probe.

To measure ion saturation current and floating potential, Langmuir probe current-voltage curves were obtained with a sampling frequency of 1500 samples/s. The voltage sweep ranged from -80 V to 10 V. The positioning of the Langmuir probe tip was determined using the BS-SOLCTRA magnetic field code [12]. Measurements were conducted at three radial positions: $R = 0.2905$ m, $R = 0.3070$ m and $R = 0.3151$ m, while maintaining a constant vertical position of $z = -0.0125$ m as shown in Figure 2. SCR-1 plasma discharges were conducted in three modes: without the electrode, with the electrode at -60 V, and with the electrode at -120 V. The data analysis is available in the PlasmaTEC-ITCR repository on GitLab. The turbulence important parameters Γ_r , $\tilde{E}_\theta$, v_r^{eff} and v_θ^{ph} , equations (2) to (5), were then calculated based on the processed data.

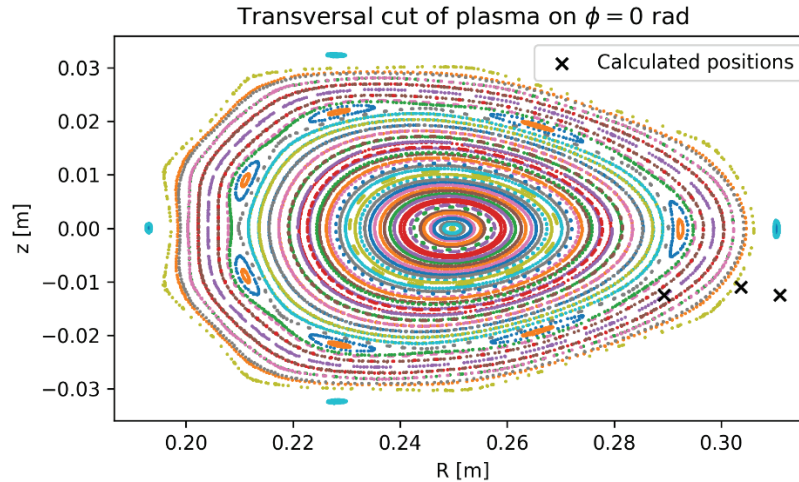


Figure 2. Magnetic flux surfaces for 0° toroidal position and calculated positions for Langmuir probe measurements.

Data was acquired using a National Instruments PXIe-8135 module with a sampling frequency of 1500 samples/s and a voltage sweep from -80 V to 10 V. Processing was performed via Jupyter Notebooks (Python) which employs a machine learning regression model to determine I_s , and identifies the floating potential $\Delta\tilde{V}_f$ where net current is zero. Noise was filtered, and the Grubbs' Test was applied with a significance level of $\alpha = 0.01$ to detect outliers.

Control coils current for the SCR-1 stellarator

The power system was modeled for 12 modular coils in series with a measured resistance of 0.08Ω and an inductance of $3.9 \mu\text{H}$. The Buck converter was designed with a 20 % duty cycle ($D = 0.20$) to step down a 293 V rectified input to a stable 58 V output. A PI Controller was integrated with an SG3525 PWM controller and a HAT 800-S Hall sensor to maintain a constant 725 A current per turn, regardless of load fluctuations caused by coil heating.

The control coils current system for the SCR-1 stellarator was designed to receive its main power supply from the electrical grid, which then reaches a three-phase transformer. This transformer will provide the necessary power for the SCR-1, but only after passing through the AC/DC conversion stage. Once rectified, the DC-DC conversion process adjusts the values to meet system requirements. Figure 3 shows the key stages for the system's power supply demand.

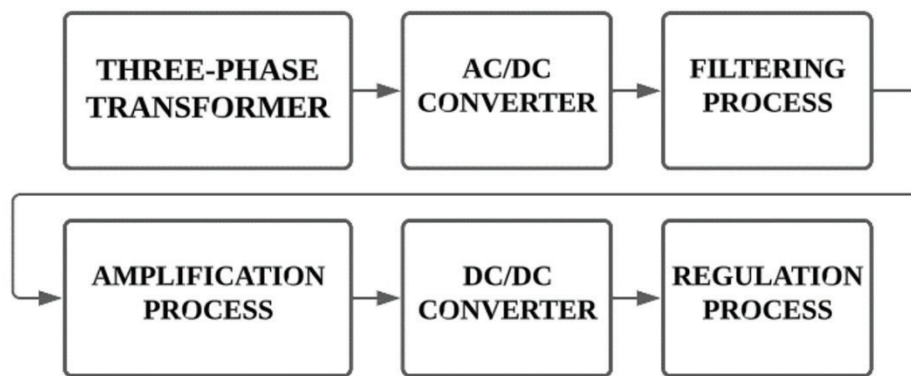


Figure 3. System power supply design diagram.

The SCR-1 coils, which are series connected, have a measured resistance of 0.08Ω and an inductance of $3.9 \mu\text{H}$, all of which comprise essential data for the design of the Buck converter. It is important to note that the temperature variation of the coils, ranging from 20°C to 70°C after 8.0 s of operation, is considered to ensure system stability, although its impact on electrical resistance is negligible, as stated by [14]. For this design, the process began with the rectification stage of the signal using an AC-DC converter. Power diodes and industrial-type capacitors were considered due to the high magnitude of current required by the SCR-1 stellarator during its operation. The proposed circuit is shown in Figure 4.

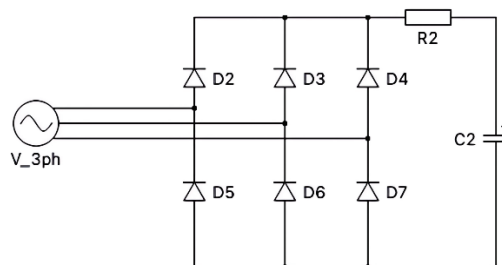


Figure 4. Proposed AC-DC converter circuit diagram.

For the simulation of the AC-DC converter circuit, PLECS software was employed, selected for its utility in engineering for designing and simulating power systems. PLECS is recognized for its speed, integration with Simulink, extensive component library, thermal modeling capabilities, and ease of use. The filter capacitor shown as C2 in Figure 4 was chosen considering the voltage

and current it must withstand and the availability of components on the market, without omitting the fact that the rectifier ripple should be minimal, and for this work, a 3% ripple was considered appropriate. Considering the high current magnitude in the SCR-1, as well as a voltage of $120 \text{ V}_{\text{RMS}}$ from the three-phase transformer, the following commercial electronic components were chosen for the implementation of the electrical circuit:

- Capacitor: MAL250034153E3 from manufacturer Vishay Beyschlag/Draloric/BC Components. This is an aluminum electrolytic capacitor with screw terminals, with a capacitance of $15\,000 \mu\text{F}$ and a voltage rating of 420 VDC . Twelve capacitors must be used in parallel to achieve the capacitance of $180\,000 \mu\text{F}$.
- Rectifier Diodes: VS-SD400C04C from manufacturer Vishay Semiconductors. This is a rectifier diode with a direct current capacity of 800 A , a reverse voltage of 400 V , and a forward voltage of 1.86 V .

The inclusion of resistor $R2$ in Figure 4 is specifically intended to mitigate numerical errors during the simulation's initial stages. However, once the circuit is implemented, $R2$ becomes superfluous and serves no practical function. To maintain a continuous current in SCR-1's coils, employing a buck converter was deemed suitable. The output voltage was set to 58V tailored to meet the precise specifications of the stellarator. The Buck converter was sized with a safety margin due to the experimental nature of the equipment. The diagram of the proposed circuit is shown in Figure 5.

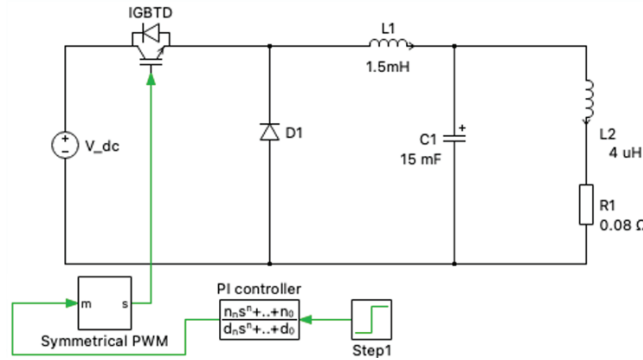


Figure 5. PWM and Buck converter circuit.

The Pulse Width Modulation (PWM) necessary for controlling the Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) referred to as IGBTD in Figure 5, was simulated using a frequency generator represented as Symmetrical PWM within the same figure. Components $R1$ and $L2$ correspond to known values for the SCR-1 coils. The remaining components were sized according to general equations for a Buck converter circuit [15], considering component availability in the market Duty cycle D was calculated as a ratio between the output and input voltage of the rectifier, resulting in $D = 0.2$.

Inductor $L1$ was selected through the following criteria. The coil is chosen based on market availability while ensuring it supports continuous conduction mode [15]. Choosing an inductance of 1.5 mH , the ripple current is calculated to validate it remains within a safe and acceptable range for the stellarator operation. Considering known values of V_0 , V_1 , and D , and estimating a switching frequency f of 2 kHz , the ripple current is:

$$\Delta I_L = \frac{(V_I - V_O)D}{Lf} \quad (6)$$

$$\Delta I_L = 15.67 \text{ A}$$

The obtained ripple current corresponds to approximately 2% of the circuit current, deemed acceptable for the application. The frequency value was set at 2 kHz to minimize switching losses; however, the frequency was also constrained by the values of capacitance and inductance of the filter, as choosing a lower frequency would result in higher component stresses, complicating commercial component selection. The output capacitor $C1$ was selected considering the following. For design standardization, the same capacitor used in the current rectifier circuit was chosen. The output ripple voltage is:

$$V_o = \frac{\Delta I_L}{8fC} \quad (7)$$

$$V_o = 65.4 \text{ mV}$$

Finally, the following commercial electronic components were chosen for circuit implementation:

- Power supply of 293 V VDC: corresponds to the current rectifier circuit output.
- IGBT (IGBT_D): FZ1200R17HE4PHPSA1 from Infineon Technologies, with a maximum collector-emitter voltage of 1700 V and a continuous collector current of 1200 A.
- Diode ($D1$): VS-SD400C04C from Vishay Semiconductors, a rectifier diode with a direct current rating of 800 A, reverse voltage of 400 V, and forward voltage of 1.86 V.
- Capacitor ($C1$): MAL250034153E3 from Vishay Beyschlag/Draloric/BC Components, the same model used in the current rectifier circuit.
- Inductor ($L1$): DB2-154 from Gowanda Electronics, capable of handling currents up to 960 A and an inductance of 1.5 mH.
- To design a control system ensuring the PWM delivers a 58 V output in the Buck converter regardless of load variations, a feedback controller based on a PI controller in combination with the commercial PWM controller SG3525 from Texas Instruments was implemented. In the Buck converter, the PI controller adjusts the PWM duty cycle to maintain a constant output current. If the output current falls below the 725 A reference, a positive error increases the PWM duty cycle, thereby increasing the output current. Conversely, if the output current exceeds the reference, a negative error reduces the PWM duty cycle to decrease the output current. The transfer function for the Buck converter circuit is shown in the equation:

$$\frac{I_L(s)}{DV_{dc}(s)} = \frac{1}{L_1 L_2 C_1 s^3 + R_1 L_2 C_1 s^2 + (L_1 + L_2)s + R_1} \quad (8)$$

Vlasov antenna for the ECRH system

The COMSOL Multiphysics simulations utilized specific physical and geometric parameters to model wave propagation and heating within the SCR-1. The system was configured with a 2000 W power input at a frequency of 2.45 GHz provided by an Alter TMA2050 magnetron, operating in the TE₁₀ mode. The simulation environment integrated multiple physics modules, including Electromagnetic Waves (frequency domain), Laminar Flow, Magnetic and Electric Fields (stationary), and a Plasma module using hydrogen gas and conductivity coupling. Geometric parameters were established for a Vlasov antenna located at the 330° toroidal port, ensuring its diameter was slightly smaller than the port and its length was sufficient to avoid contact with the plasma. The model employed an extra-fine mesh for the vacuum chamber and coils, while a fine mesh was applied to the external areas to balance precision and convergence. Finally,

a parametric sweep was used to vary the antenna's cut angle α , specifically analyzing a 45° modified cut and an 81.4° bevel-cut to optimize electromagnetic wave deposition. Simulations were conducted in both frequency and stationary domains.

The design of the Vlasov antenna was developed using the COMSOL Multiphysics simulation program, where the following parameters were established for its development:

- Propagation mode of the wave incident on the SCR-1.
- Antenna diameter: it must allow the antenna to enter the port, being close enough to the diameter of the port to be considered as a single entity in the simulations.
- Length of the antenna inside the stellarator vacuum vessel: this dimension should ensure that the antenna inside the vacuum vessel does not touch the SCR-1 plasma.
- The cutting of the Vlasov antenna.
- The physics involved: it is described by electromagnetic waves, electric and magnetic fields, laminar flow, and plasma magnetic flux surfaces.

The Transverse Electric (TE) mode was chosen based on the design considerations for the ECR heating system, which favored the propagation of electromagnetic waves in the ordinary mode, as detailed in [16]. Consequently, the TE_{10} mode was utilized. Antenna diameter calculations were conducted using measurements taken by SOLIDWORKS software at the SCR-1 port in the toroidal direction of 330° , illustrated in Figure 6a, with the resulting measurements shown in Figure 6b. To determine the antenna's spatial allocation inside the SCR-1 vacuum vessel, the plasma model is overlaid, as depicted in Figure 7a. Subsequently, the available distance for the antenna inside the vacuum vessel, ensuring it does not contact the plasma, was measured, illustrated in Figure 7b.

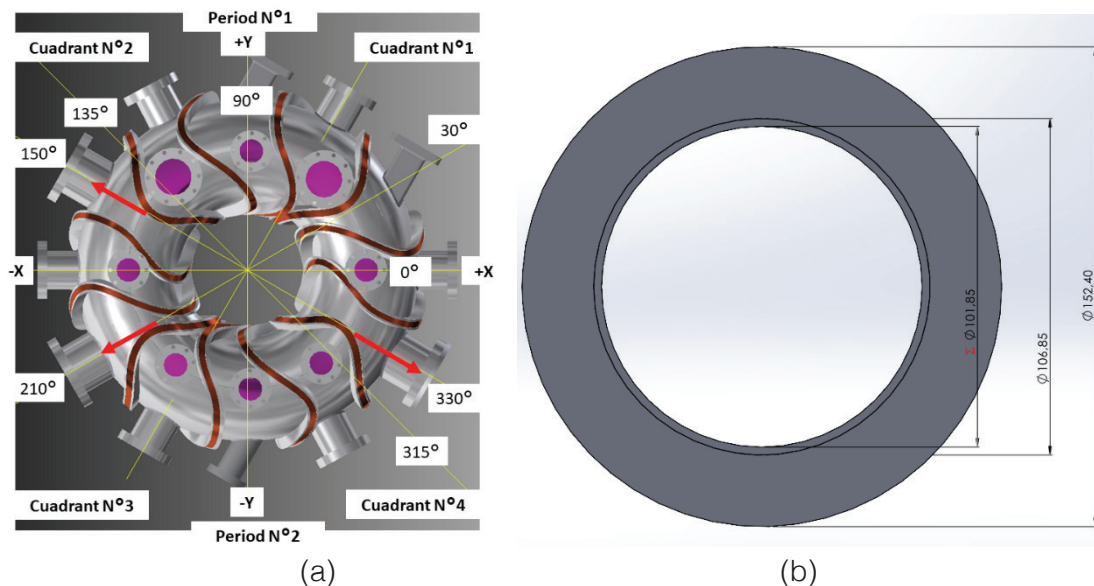


Figure 6. (a) Top view of the Stellarator vacuum vessel with its ports.
(b) Rear view of the SCR-1 330° port in millimeters.

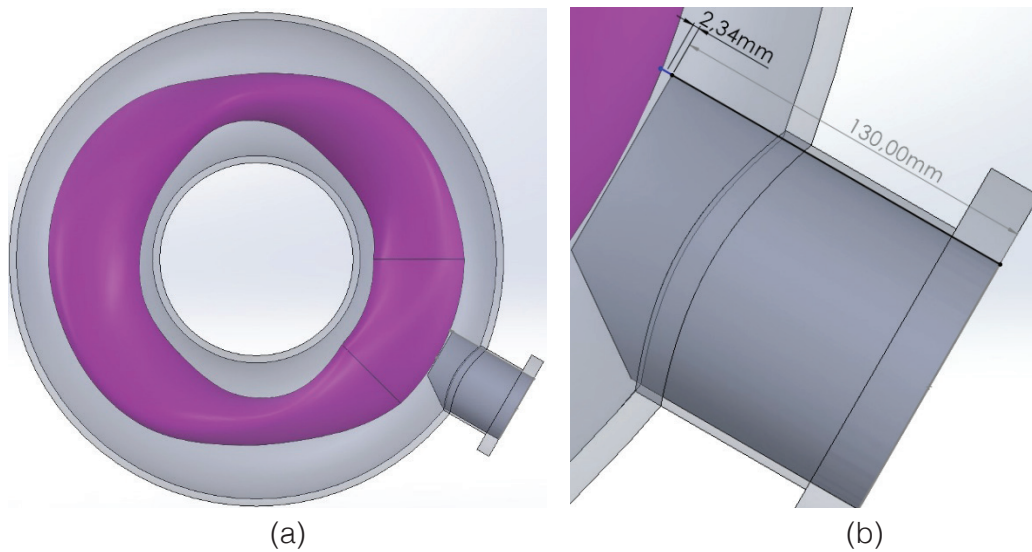


Figure 7. (a) Top view of the Stellarator vacuum vessel with the plasma overlaid. (b) Desirable distance (millimeters) of the antenna without touching the plasma.

After completing the antenna measurements, a model was constructed and parameterized to vary the α angle in the simulation depicted in Figure 8. This involved using a parametric sweep with different cutting angles.

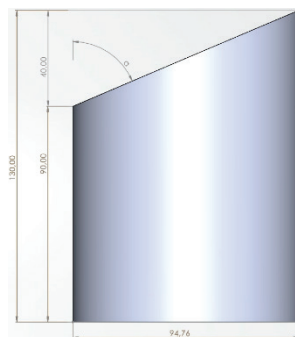


Figure 8. Proposed design of the dimensions (millimeters) of the Vlasov antenna.

Results

Plasma turbulence in the SCR-1 Stellarator

Significant observations were made regarding the impact of electrode introduction on plasma behavior in the SCR-1 stellarator. The changes in ion saturation current were consistent with expectations [5]; specifically, negative polarization led to a reduction in this current near the Last Closed Magnetic Surface (LCMS) and SOL, suggesting a lower electron density, as shown in Figure 9a. Although the radial variation was not mapped, preventing the determination of the SOL width, the flux values provided a reliable indicator for identifying where to continue mapping the region's width.

The radial velocity at $R = 0.2905$ m, as shown in Figure 9b, decreased markedly upon electrode introduction. A similar reduction was noted at $R = 0.3070$ m, a position closer to the last magnetic flux surface. Moreover, the poloidal velocity and electric field, illustrated in Figures 9c and 9d,

exhibited a similar trend both with and without the influence of the electrode. However, during the critical phases of plasma discharge, between 1.5 s and 2.5 s, higher average values were observed, indicating maximum confinement during this period.

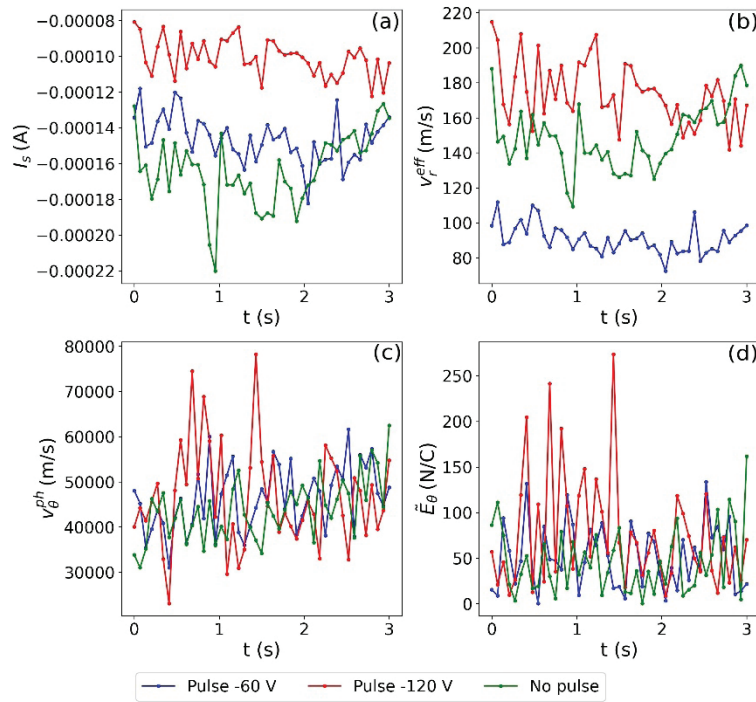


Figure 9. (a) Saturation ion current, (b) radial effective velocity, (c) poloidal velocity and (d) poloidal electric field in function of time for the radial position $R = 0.2905$ m.

The inclusion of the electrode resulted in a significant decrease in radial particle flux near the plasma, the generated electric potential enhanced the effective radial velocity of charged particles. Table 1 emphasizes a stronger radial flux near the edge compared to other locations where the magnetic field lines are closed and far from the confinement area. Furthermore, the electrode potential at - 120 V was observed to reduce radial flux, although less significantly than at - 60 V. Similar conclusions to those of our results were presented in [13].

Table 1. Radial particle flux as a function of electrode voltage and radial position.

Radial position r (m)	Electrode voltage V (V)	Radial flux Γ_r (a. u.)
0.2905	- 120	0.017
	- 60	0.013
	0	0.024
0.3070	- 120	0.039
	- 60	0.021
	0	0.045
0.3151	- 120	0.015
	- 60	0.016
	0	0.014

Control coils current for the SCR-1 stellarator

To measure the output current in the Buck circuit, it is proposed to use a Hall sensor HAT 800-S from LEM USA Inc, capable of measuring currents up to 800 A with an analog voltage output of ± 4 V Figure 10 illustrates the proposed power circuit for the SCR-1 coils, developed using the PLECS simulation software.

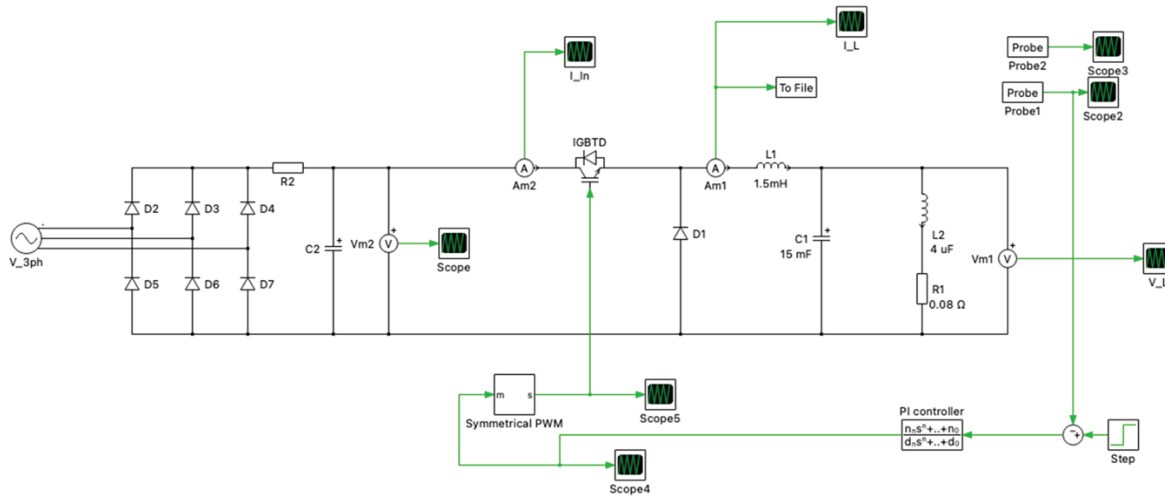


Figure 10. Power circuit for the SCR-1 coils obtained in the software PLECS.

Figure 11 shows different measurements at certain points of the circuit presented in Figure 10. Figure 11a shows the rectified wave at the output of the rectifier current circuit, measured at the voltmeter $Vm2$. Likewise, in Figure 11b the current at the output of the Buck circuit is observed; this is the current that flows through the coils of the SCR-1; this current is measured at the amperemeter $Am1$. Finally, Figure 11c also presents a graph of the voltage measured in the SCR-1 coils over time.

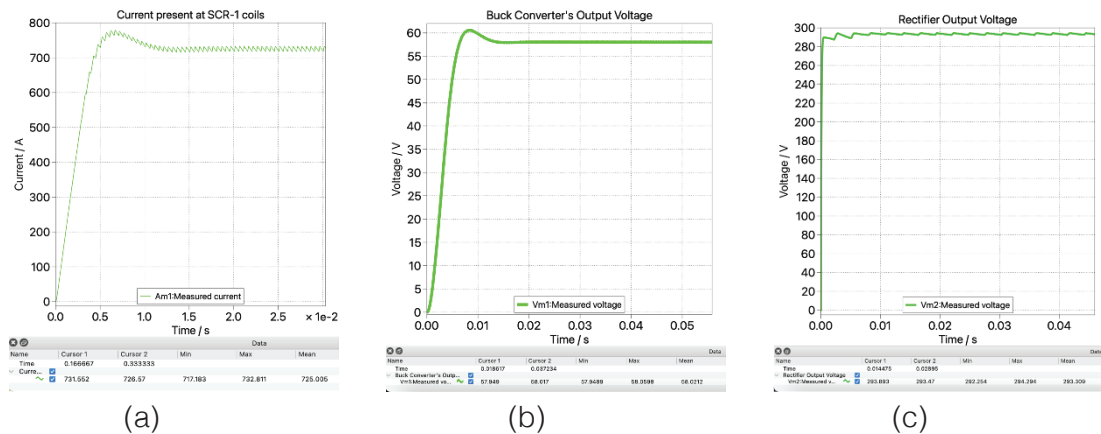


Figure 11. Rectified signals and measurements for: (a) Output voltage of the rectifier circuit, (b) current measured at the SCR-1 coils and (c) voltage measured at the SCR-1 coils.

Vlasov antenna for the ECRH system

To simulate the electric field generated by the coils shown in Figure 12a, Figure 12b was generated using the line drawing technique.

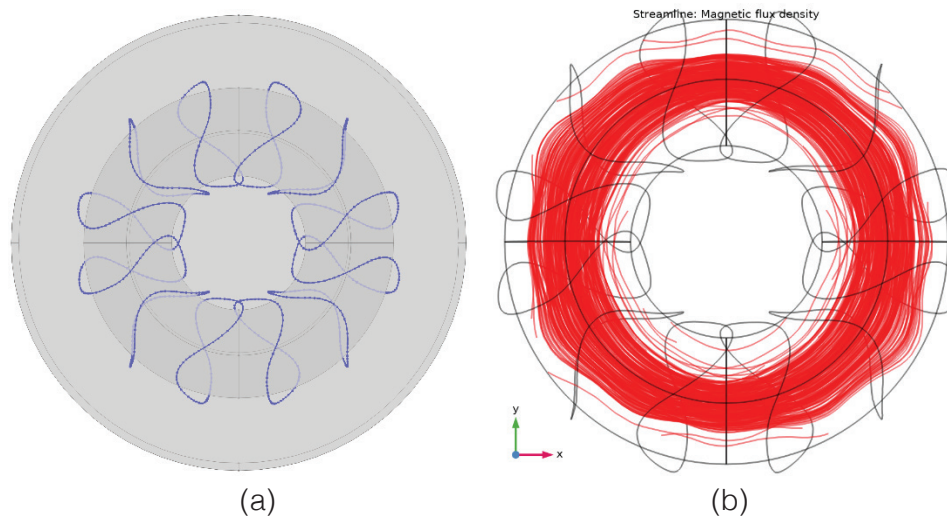


Figure 12. (a) SCR-1 plasma containment field coils. (b) Magnetic flux density lines of the plasma containment system.

In the heating system, electromagnetic waves were utilized to determine the electric field magnitude. This visualization enabled observation of the path of electromagnetic waves within the SCR-1 vacuum vessel, illustrated in Figure 13, for different configurations.

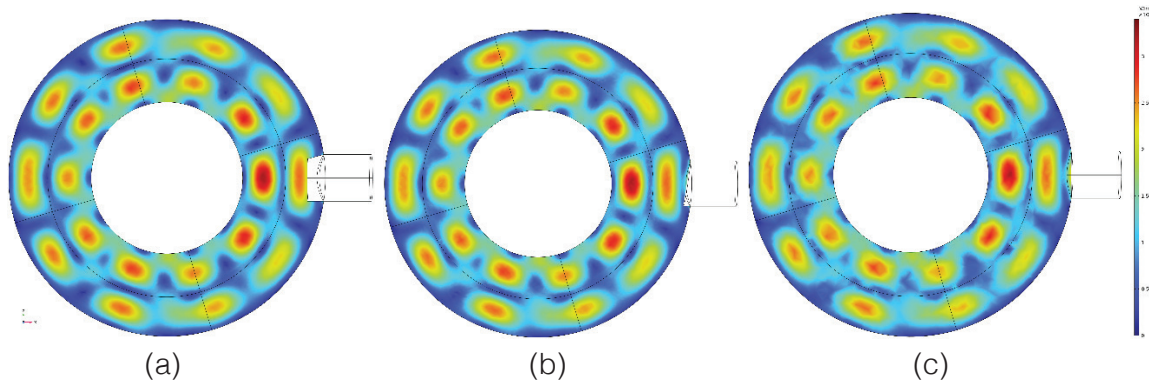


Figure 13. Magnitude of the electric field inside the SCR-1 vacuum vessel for (a) modified cut, (b) bevel-cut, (c) without the antenna.

In the laminar flow module describing the gas injected into the SCR-1 vacuum vessel, the inlet port where the gas is injected and the outlet port corresponding to the vacuum pump were defined. This resulted in the pressure surface shown in Figure 14.

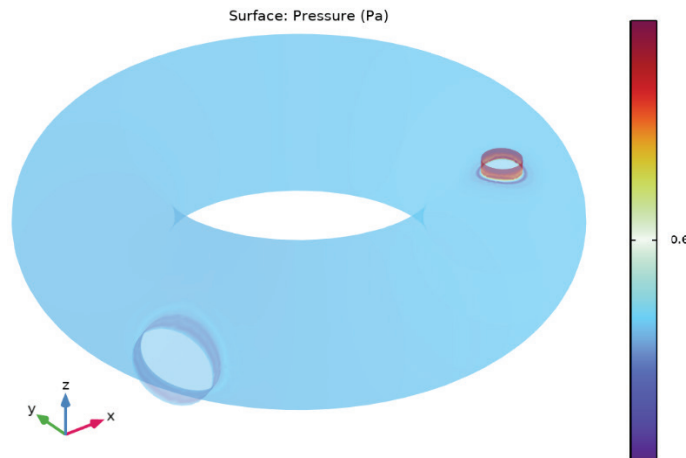


Figure 14. Pressure surface of laminar flow of the gas injected into the SCR-1 vacuum vessel.

Discussion and conclusions

In general, turbulence flow modes (common to all stellarator topologies) cannot be ruled out such as Electron Temperature Gradient modes, Ion Temperature Gradient modes, Trapped Electron Modes and drift waves, all of them affected by the action of the electrode with positive results and mitigated to a lesser or greater extent with the action of the induced shear flux. The effective use of a function generator and transformer in the electrode circuit design highlights the importance of precise control over frequency and amplitude in experimental plasma physics. Circuit simulation confirmed the successful implementation of these requirements, with observed signal characteristics aligning with design specifications. It was demonstrated that the implementation of an electrode in the SCR-1 stellarator effectively modulates plasma turbulence and behavior, particularly near the LCMS regions and SOL. These findings are consistent with those reported by [4], who highlighted that turbulence propagation is predominantly active near the SOL region. The electrode-induced electric field significantly reduced ion saturation current and altered electron density, providing valuable insights into turbulence dynamics. The decrease in radial velocity and particle flux near the LCMS upon electrode introduction underscores the electrode's impact on plasma confinement and turbulence suppression, as shown in Figure 9. These findings are consistent with previous studies, confirming that external electric fields can influence plasma characteristics and enhance confinement, as reported by [3].

Using the *PLECS* software, the proposed design for the circuits of the stellarator SCR-1 coils current control system was successfully verified, as shown in Figures 11a, 11b, and 11c. Regarding the full-wave rectifier, an AC input with an RMS voltage of 120 V was applied. The diode rectifier operated as expected, converting the AC signal into a pulsating DC signal. Figure 11a demonstrated how the capacitor smoothed the rectifier output, significantly reducing voltage ripple and improving signal stability. Proper filtering is essential to minimize fluctuations in the output voltage of the Buck converter. The voltage ripple of the rectifier circuit, as shown in Figure 11a, is approximately 1.5 V, equivalent to 0.5% of the input voltage. For the Buck converter circuit, Figure 11b shows that the average stabilized current is 725.012 A, with a ripple of 15.642 A, corresponding to 2.16% of the inductor current. Both values are suitable for the intended application. Additionally, in the same figure, the stabilization time of the circuit is approximately 0.02 s, which is acceptable for the stellarator application, where the discharge cycle is 8 s. Figure 11c displays the voltage value set to achieve the coil operating current, which also stabilizes within a very short period (0.02 s).

Using COMSOL Multiphysics software, a comprehensive simulation of SCR-1 was developed, integrating modules such as the electromagnetic wave module for the heating system and the laminar flow module for gas injection. By comparing the three cases depicted in Figure 13, a parametric sweep revealed that the modified cut case 45° improved the maximum electric field magnitude by up to 8%, while the bevel-cut case improved it by 9% with an angle of 81.4° , compared to the scenario without an antenna. This adjustment facilitated a more even spatial distribution. The reduction in wave reflection through the same port in the bevel-cut configuration contributed to these outcomes. Considering the geometry of the SCR-1 vacuum vessel, the optimized angle ensures a more uniform wave deposition within the SCR-1 vacuum vessel. The successful implementation of the 3D model of the SCR-1, including the parameterized Vlasov antenna with adjustable cutting angles, enabled the visualization of electromagnetic wave deposition within the SCR-1 by examining the electric field magnitude across different antenna configurations.

Future work should explore the effects of different electrode potentials and configurations to further understand their influence on plasma behavior. Additionally, extending the mapping of radial variations and SOL width will provide a more comprehensive understanding of turbulence dynamics and confinement in stellarator plasmas, contributing to the broader understanding of plasma turbulence control and offering practical insights for optimizing plasma confinement in fusion devices. Suitable cooling systems such as large heat sinks, fans, or liquid cooling should be designed and implemented to effectively manage thermal energy dissipation. Before the implementation of the power circuit and its respective control, lower power tests should be conducted using lower voltage batteries, gradually increasing to ensure safe operation. To enhance cost-effectiveness, designing several buck converters in parallel connection rather than a single unit can reduce the current requirements for each converter and lower costs. Utilizing thick copper traces and ground planes will accommodate high currents in the circuit PCB design. Future work will also involve testing additional antenna designs to analyze their behavior with the heating system once the plasma module is fully implemented, optimizing the interaction between the antenna and the SCR-1 plasma.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the financial support provided by the *Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE)* of the Costa Rica Institute of Technology (Tecnológico de Costa Rica) under Research Project No. 5401-1450-1801.

References

- [1] F. Coto-Vílchez *et al.*, "Progress on the small modular stellarator SCR-1: new diagnostics and heating scenarios", *Journal Of Plasma Physics*, vol. 86, n.º 4, Jul. 2020, doi: 10.1017/s0022377820000677.
- [2] O. E. Garcia, R. Kube, A. Theodorsen, and H. L. Pécseli, "Stochastic modelling of intermittent fluctuations in the scrape-off layer: Correlations, distributions, level crossings, and moment estimation", *Physics Of Plasmas*, vol. 23, n.º 5, May 2016, doi: 10.1063/1.4951016.
- [3] N. Bisai and A. Sen, "Theory of plasma blob formation and its numerical and experimental validations", *Reviews Of Modern Plasma Physics*, vol. 7, n.º 1, Jun. 2023, doi: 10.1007/s41614-023-00124-5.
- [4] G. Grenfell *et al.*, "Measurement and control of turbulence spreading in the scrape-off layer of TJ-II stellarator," *Nuclear Fusion*, vol. 59, no. 1, p. 016018, Nov. 2018, doi: 10.1088/1741-4326/aaf034.
- [5] M. Ramisch, F. Greiner, N. Mahdizadeh, K. Rahbarnia, and U. Stroth, Observation of large-scale coherent structures under strong ExB shear in the torsatron TJ-K, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, vol. 49, no. 6, pp. 777–789, Apr. 2007, doi: 10.1088/0741-3335/49/6/006.
- [6] J. Bergman, "Surface-mountable dual-polarized antenna arrays for 100 GHz," Masterthesis, *Dept. of Electronics and Nanotechnology*, Aalto University, Finland, Mar. 21, 2022. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-202203272551>

- [7] R. Solano-Piedra, "Simulación de escenarios de calentamiento por microondas para conocer las condiciones de la propagación de ondas de Bernstein electrónicas en el plasma del stellarator SCR-1". Master's thesis, *Universidad de Costa Rica*, Sistema de Estudios de Posgrado, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica.
- [8] F. Fanale *et al.*, "Progress on the conceptual design of the antennas for the DTT ECRH system," *Fusion Engineering and Design*, vol. 192, p. 113797, May 2023, doi: 10.1016/j.fusengdes.2023.113797.
- [9] A. Köhn *et al.*, "Schemes of microwave heating of overdense plasmas in the stellarator TJ-K," *Plasma Physics and Controlled Fusion*, vol. 55, no. 1, p. 014010, Dec. 2012, doi: 10.1088/0741-3335/55/1/014010.
- [10] H. Zhou and X. Yang, "Design of Novel VLASOV-type Antennas for High Power Microwaves (HPM)," *2007 IEEE 34th International Conference on Plasma Science (ICOPS)*, p. 912, Jun. 2007, doi: 10.1109/ppps.2007.4346218.
- [11] H. M. E. Misilmani, M. Al-Husseini, and K. Y. Kabalan, "Improved Vlasov Antenna with Curved Cuts and Optimized Reflector Position and Shape," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2015, pp. 1–12, Jan. 2015, doi: 10.1155/2015/193630.
- [12] D. Jiménez, L. Campos-Duarte, R. Solano-Piedra, L. A. Araya-Solano, E. Meneses, and I. Vargas, BS-SOLCTRA: Towards a parallel magnetic plasma confinement simulation framework for modular stellarator devices, in *Proc. High Performance Computing: 6th Latin American Conf. (CARLA 2019)*, Turrialba, Costa Rica, Sept. 25–27, 2019, *Revised Selected Papers*, vol. 6, pp. 33–48, 2020.
- [13] J. Boedo *et al.*, "Enhanced particle confinement and turbulence reduction due to E B shear in the TEXTOR tokamak," *Nuclear Fusion*, vol. 40, no. 7, pp. 1397–1410, Jul. 2000, doi: 10.1088/0029-5515/40/7/309.
- [14] J. Mora, I. Vargas, and J. Asenjo, Diseño de un regulador de corriente eléctrica para las bobinas modulares del Stellarator SCR-1, *Revista Tecnología En Marcha*, vol. 30, no. 5, p. 21, Dec. 2017, doi: 10.18845/tm.v30i5.3220.
- [15] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. 2003.
- [16] H. Trimino, "Design of an ech system for a small modular stellarator," *2011 Abstracts IEEE International Conference on Plasma Science*, p. 1, Jun. 2011, doi: 10.1109/plasma.2011.5993156.

Statement on the Use of Artificial Intelligence (AI)

The AI tool *Google NotebookLM* was used to support the organization of literature, the synthesis of reference documents, and the enhancement of the manuscript's writing clarity. All generated or suggested content was reviewed and validated by the authors prior to its incorporation into the article.

Modeling and optimization of operational parameters in pneumatic seeders to enhance corn (*Zea mays*) germination in humid tropical conditions in Costa Rica

Modelado y optimización de parámetros operativos en sembradoras neumáticas para el cultivo de maíz (*Zea mays*) en el trópico húmedo de Costa Rica

Gregory Guevara-Rodríguez¹, Ronald Fernández-Mesén²,
Esteban Brenes-Romero³, Veonn Calzano-Caines⁴

Fecha de recepción: 3 de noviembre, 2025

Fecha de aprobación: 6 de marzo, 2026

Guevara-Rodríguez, G; Fernández-Mesén, R; Brenes-Romero, E; Calzano-Caines, V. Modeling and optimization of operational parameters in pneumatic seeders to enhance corn (*Zea mays*) germination in humid tropical conditions in Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 N° 3. Julio-Setiembre, 2026. Pág. 132-147.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i3.8298>



- 1 Universidad EARTH. Costa Rica.
 gguevara@earth.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-9056-9847>
- 2 Universidad EARTH. Costa Rica.
 rfernandez@earth.ac.cr
 <https://orcid.org/0009-0009-3068-5251>
- 3 Universidad EARTH. Costa Rica.
 esbrenes@earth.ac.cr
 <https://orcid.org/0009-0000-6785-6485>
- 4 Universidad EARTH. Costa Rica.
 vcainnes@earth.ac.cr
 <https://orcid.org/0009-0008-0376-7051>

Keywords

Corn (*Zea mays*), pneumatic seeder, emergence uniformity, planting speed, calibration, precision agriculture.

Abstract

This study presents the modeling and optimization of pneumatic seeder calibration parameters to improve corn (*Zea mays*) germination under humid tropical conditions in clay-rich soils of Costa Rica. A factorial experimental design was implemented to evaluate the influence of seed quality, seeding velocity, soil texture, moisture content, and vacuum pressure on seed placement accuracy, germination rate, and plant population density. Results indicate that high soil moisture enhances plant establishment, while moderate water stress promotes increased plant height, revealing a trade-off between density and vigor. Vacuum pressure emerged as the most critical operational factor, significantly improving seed placement and germination uniformity. Excessive seeding speeds negatively affected emergence consistency. The effect of clay content was significant only when interacting with mechanical and environmental variables. A predictive model was developed and validated, integrating moisture, vacuum pressure, and velocity to accurately estimate plant population under varying field conditions. These findings provide actionable insights for precision calibration of pneumatic seeders, contributing to improved crop establishment and productivity in tropical agricultural systems with challenging soil textures.

Palabras clave

Maíz (*Zea mays*), sembradora neumática, uniformidad de emergencia, velocidad de siembra, calibración, agricultura de precisión.

Resumen

Este estudio se enfocó en la optimización de la calibración de una sembradora neumática para el cultivo de maíz (*Zea mays*) en condiciones del trópico húmedo de Costa Rica, específicamente en suelos con alto contenido de arcilla. Se evaluaron los efectos de la calidad de la semilla, velocidad de siembra, textura del suelo, humedad y presión de vacío de la sembradora sobre la germinación y la población de plantas. Los resultados mostraron que la humedad elevada favorece el establecimiento de plantas, mientras que niveles moderados de estrés hídrico promueven mayor altura, evidenciando un compromiso entre densidad y vigor. La presión de vacío fue el parámetro operativo más determinante, mejorando la colocación y germinación de las semillas, mientras que velocidades excesivas redujeron la uniformidad en el establecimiento. El contenido de arcilla mostró efectos significativos solo en interacción con factores mecánicos y ambientales. Se desarrolló un modelo predictivo que integra humedad, presión y velocidad, el cual permite estimar con precisión la población de plantas bajo distintas condiciones operativas y edáficas. Los hallazgos ofrecen directrices prácticas para mejorar la eficiencia de siembra, la uniformidad de emergencia y la productividad en sistemas agrícolas del trópico húmedo.

Introduction

Plant population in corn (*Zea mays*) cultivation is a key determinant of resource use efficiency and final yield, as it regulates intraspecific competition and the distribution of water and nutrients. Uniform germination enables synchronized emergence and homogeneous crop establishment, whereas uneven emergence results in weaker, less competitive plants, negatively impacting productivity[1].

Globally, corn production faces challenges such as climate change, rainfall variability, and increased pest pressure, all of which directly affect emergence uniformity and final plant population[2], [3], [4]. These challenges emphasize the need to improve planting practices to ensure efficient crop establishment.

Seed quality is one of the primary factors influencing emergence. High-vigor seeds germinate rapidly and uniformly, leading to consistent plant stands. Laboratory germination and vigor tests, complemented by field emergence evaluations, help differentiate between normal plants (3–4 leaves, average height of 16.9 ± 2.9 cm) and abnormal plants, demonstrating a strong correlation between lab and field performance [5].

Pneumatic seeder calibration is also critical. Parameters such as seeding speed, vacuum pressure, and seed metering mechanisms affect seed placement accuracy. Excessive speeds or improper calibration can cause mechanical damage, inconsistent depth, and irregular spacing, potentially reducing yield [6], [7], [8]. Vacuum pressure and orifice size are key to minimizing skips and improving uniformity[9].

Soil conditions further influence emergence. Clay and clay-loam soils retain more water than sandy soils, promoting seed water uptake[10]. but compaction and low hydraulic conductivity can restrict germination [11], [12].

Despite global advances in precision agriculture, this study addresses the calibration of pneumatic seeders under humid tropical conditions in Costa Rica, focusing on optimizing vacuum pressure and planting speed to improve corn emergence and plant population.

Methodology

This study evaluated the interactive effects of soil moisture, pneumatic seeder vacuum pressure, and seeding speed on early corn development and crop establishment. The performance of a pneumatic seeder was compared to that of a mechanical seeder under varying soil moisture conditions. Field trials were combined with precise mechanical calibration and digital data analysis to assess seed placement accuracy, emergence rate, and stand uniformity.

The experiment was conducted at the Centro de Cosecha farm (Figure 1), located on the EARTH University campus in Las Mercedes, Guácimo, Limón, Costa Rica. All experimental blocks were established on clayey soils, with minimal variation in their physical and chemical properties.

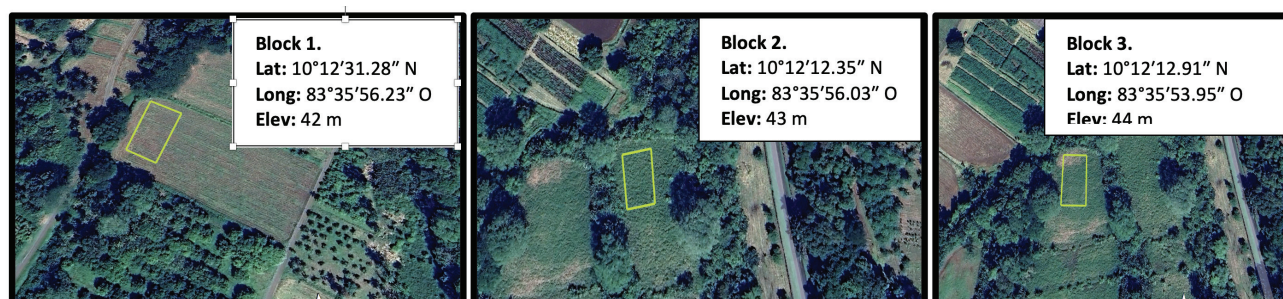


Figure 1. Layout of Experimental Block 1,2 and 3, used for the calibration study at EARTH University.

Equipment

Two seeding systems were evaluated Figure 2: a pneumatic seeder and a mechanical seeder (control). The pneumatic model, Jumil Excellence 04 Double Lines, uses an air suction system to meter and deliver seeds with high precision. Its adjustable vacuum pressure directly affects seed pick-up, release, and placement accuracy—key factors for uniform emergence and optimal stand density[13]. Vacuum pressure was manually set at three levels (−3, 0, +3), and seeding speed varied across 4, 6, and 9 km/h. Seed depth and target population remained constant across treatments.

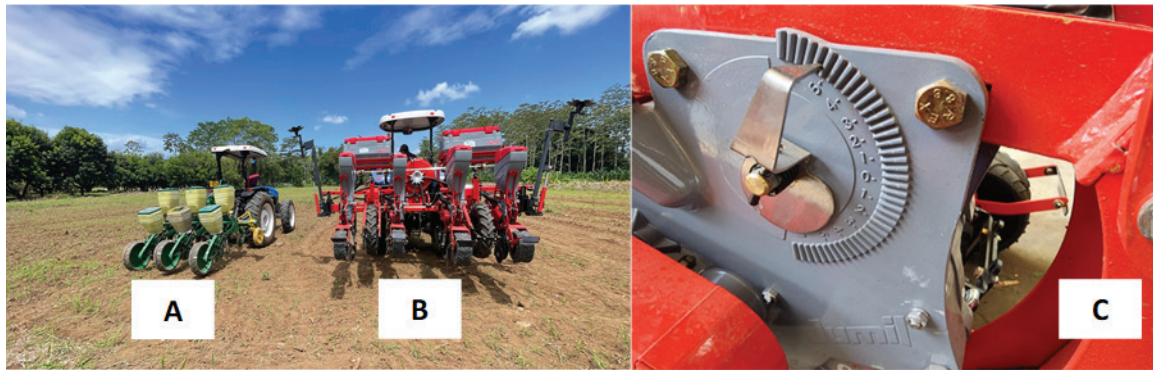


Figure 2. Seeding equipment. (A) shows the mechanical seeder (control) used in the study; (B) shows the pneumatic seeder used in the experiment. (C) Pressure adjustments on the pneumatic seeder, showing the control mechanism used to regulate vacuum pressure during planting.

The mechanical seeder (Tatu T231) operates without suction [14] . relying on a rotating plate or chain to drop seeds into furrows. This gravity-based system is less precise under variable soil moisture conditions. Both seeders were operated at identical row spacing and target population, with matched seeding speeds. This comparative setup allowed the study to assess how pneumatic vacuum pressure interacts with planting speed and soil moisture, in contrast to the mechanical system's fixed metering. The evaluation focused on improvements in seed placement, emergence uniformity, and stand establishment attributable to pneumatic technology.

Prior to planting, the experimental field got a mechanical tillage to establish optimal conditions for the subsequent crop beds. This preparatory step involved two sequential passes with a tractor-mounted implement. Specifically, a 20-inch disc plow was utilized for primary tillage, to ensure precision in the methodology. The dual-pass regimen was essential for achieving the necessary soil pulverization, aeration, and structural homogeneity required to promote root development and efficient water infiltration within the final planting medium, thereby guaranteeing suitable soil conditions for the successful establishment of the target population.

Experimental Design

The corn hybrid HR960 [15] was selected due to its adaptation to humid tropical environments and its dual-purpose use for grain and silage. It is suitable for cultivation from sea level up to 1600 m a.s.l.

To evaluate the influence of seeder calibration and soil conditions on early corn development, a split-block factorial design was implemented across three experimental blocks, each comprising clay-rich soils with slight differences in moisture content and texture (percentages of clay, silt, and sand). Twelve plots measuring 15 m × 5 m were distributed across the blocks. The

experimental factors included three levels of vacuum pressure applied to a pneumatic seeder (P1: -3, P2: 0, P3: +3), a mechanical seeder control (C1), and three seeding velocities (V1: 4 km/h, V2: 6 km/h, V3: 9 km/h), as shown in Table 1.

Table 1. Experimental Seeding Treatments: Seeder Type, Pressure, Speed, and Humidity.

Seeder Type	Vacuum Pressure	Seeding Speed (km/h)	Humidity Condition
Pneumatic	-3	4, 6, 9	High / Low
Pneumatic	0	4, 6, 9	High / Low
Pneumatic	+3	4, 6, 9	High / Low
Mechanical	Control	4, 6, 9	High / Low

Each treatment combination was applied once per block and replicated across two distinct soil moisture cycles to capture variability in field conditions. The schematic layout Figure 3 facilitated comparative analysis of seeder calibration effects under varying edaphic moisture regimes. This configuration enabled precise evaluation of seed placement accuracy, emergence rate, and stand uniformity.

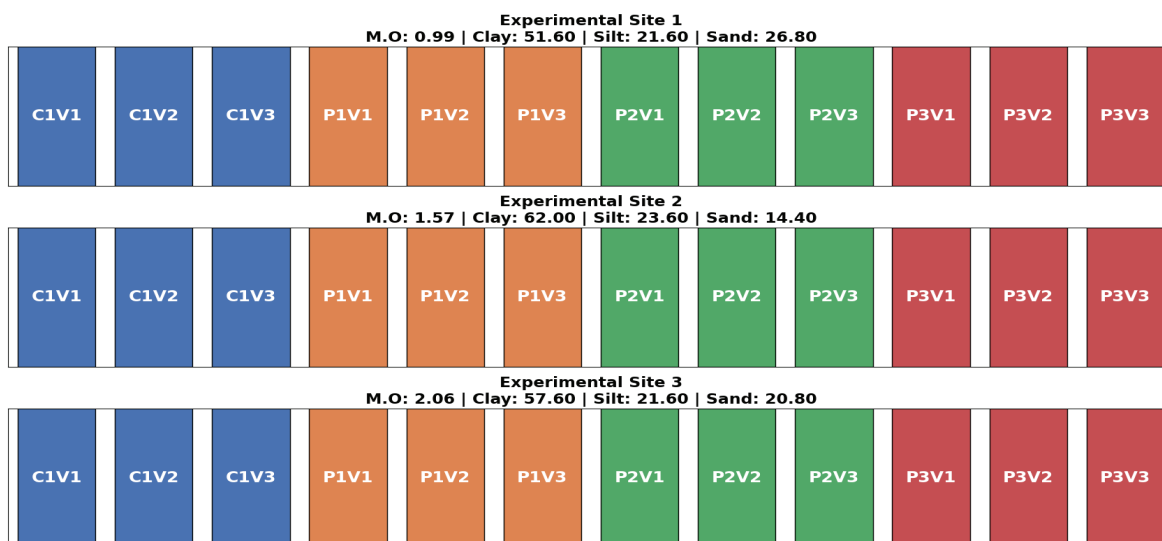


Figure 3. Distribution of experimental blocks for the split-block design, showing treatments in relation to vacuum pressure, seeding velocity, and soil characteristics.

Soil volumetric water content (% VWC) was measured using a TDR 350 time-domain reflectometry probe at five points per block and averaged per cycle. Two moisture cycles were defined: low humidity (22.39% VWC) following dry conditions, and high humidity (37.39% VWC) following rainfall events.

Field Data Collection

To determine the actual plant population, three square subplots, 2 m × 2 m, were established within each plot of treatment. The number of emerged plants was counted eight days after planting. These subplot dimensions were chosen to balance representativeness and feasibility of measurements.

Plant height and stem diameter were measured 15 days after planting. Plant height was recorded from the base of the plant to the base of the newest emerging leaf using a measuring tape, and stem diameter was measured 5 cm above the soil surface using a caliper. All measurements were conducted at the same time of day and with the same instruments to minimize environmental or observational variability.

Statistical Analysis Methods

Data management and visualization were performed using Python [16], with libraries such as pandas[17], [18] for data management and Matplotlib [19], [20] and Seaborn[20] for creating the graphs. A one-way ANOVA was conducted to identify statistically significant differences among treatments, followed by Tukey's Honest Significant Difference (HSD) post hoc test to determine which treatments differed [21].

Principal Component Analysis (PCA)

For multivariate analysis, the variables population, seeding speed, vacuum pressure, block, and soil moisture were selected. First, a data matrix was constructed excluding missing values to ensure consistency. Variables were then standardized using the zscore method via *StandardScaler* from the scikit-learn library. This standardization ensured that variables with larger magnitudes or different units did not dominate the analysis[22].

A PCA was applied to reduce data dimensionality and identify patterns of variation[23]. The first two principal components, which explained a substantial portion of the total variance, were calculated. Results were stored in a new data frame, including categorical variables such as treatment, humidity, and block for easier interpretation. The explained variance of each component was calculated to assess its contribution to representing the original data.

Multiple Linear Regression

A multiple linear regression model was constructed to evaluate the effect of soil moisture, pneumatic seeder vacuum pressure, and seeding speed on the final plant population. Predictor variables included humidity, pressure, and velocity, and the response variable was population. The model was fitted using `LinearRegression()` from scikit-learn, and predictions were obtained with `predict()` [21], [24].

$$Population = \beta_0 + \beta_1 \cdot humidity + \beta_2 \cdot pressure + \beta_3 \cdot velocity \quad (1)$$

Where:

- Population: represents the number of established plants per plot or treatment.
- β_0 : the intercept or constant term of the model, indicating the expected population value when all independent variables are zero.
- $\beta_1, \beta_2, \beta_3$: regression coefficients that measure the individual effect of each independent variable on the population.
- humidity: soil moisture level at the time of planting or during plant establishment.
- pressure: vacuum pressure used in the pneumatic seeder during calibration.

- velocity: forward speed of the seeder during planting.

Model performance was evaluated using the coefficient of determination (R^2) and the Mean Absolute Error (MAE). The relative importance of each predictor was estimated from the absolute values of the regression coefficients. For more robust comparisons, standardized coefficients or permutation importance may also be used.

The primary quantitative metrics employed were:

Root Mean Squared Error (RMSE): measures the average magnitude of prediction errors [25].

$$RMSE = \sqrt{\sum \frac{(y_i - \bar{y}_i)^2}{n}} \quad (2)$$

Mean Absolute Error (MAE): the average absolute difference between predicted and actual values[25].

$$MAE = \sum \frac{|y_i - \bar{y}_i|}{n} \quad (3)$$

Coefficient of Determination (R^2): the proportion of variance in the observed data explained by the model[26].

$$R^2 = \frac{\sum (y_i - p_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (4)$$

Where:

y_i = observed values of the target variable

p_i = predicted values from the model

$\bar{y}_i$ = mean of observed values

n = number of observations

Lower RMSE and MAE values indicate better model accuracy, while an R^2 value closer to 1 indicates a better fit, signifying that the model effectively captures the relationship between the predictor variables and final plant population.

Results

This section presents empirical results for corn plant diameter and height, These parameters were evaluated across various experimental treatments and two distinct humidity levels (Low: 22.39 %VWC; High: 37.39 %VWC) within three independent experimental blocks (B1, B2, B3). Data visualization was primarily achieved through box plots. Interestingly, plant diameter (Figure 5) exhibited contrasting responses across blocks.

In Block B1, high humidity generally promoted larger diameters, indicating a clear positive effect of moisture availability on stem thickening. In contrast, Blocks B2 and B3 showed smaller diameters overall and were less responsive to changes in humidity, suggesting that local soil or microenvironmental conditions moderated the effect. Despite these block-level differences, consistent treatment patterns were observed. Notably, P2V2 and P3V2 produced greater diameters under high humidity in all blocks, underscoring the advantage of increased soil

moisture for radial growth. For most other treatments, however, the differences among humidity levels were either minor or irregular, reinforcing that optimal combinations of pressure and planting speed are required to achieve uniform benefits across environments. In contrast to diameter, plant height was consistently greater under low humidity across all blocks (Figure 5).

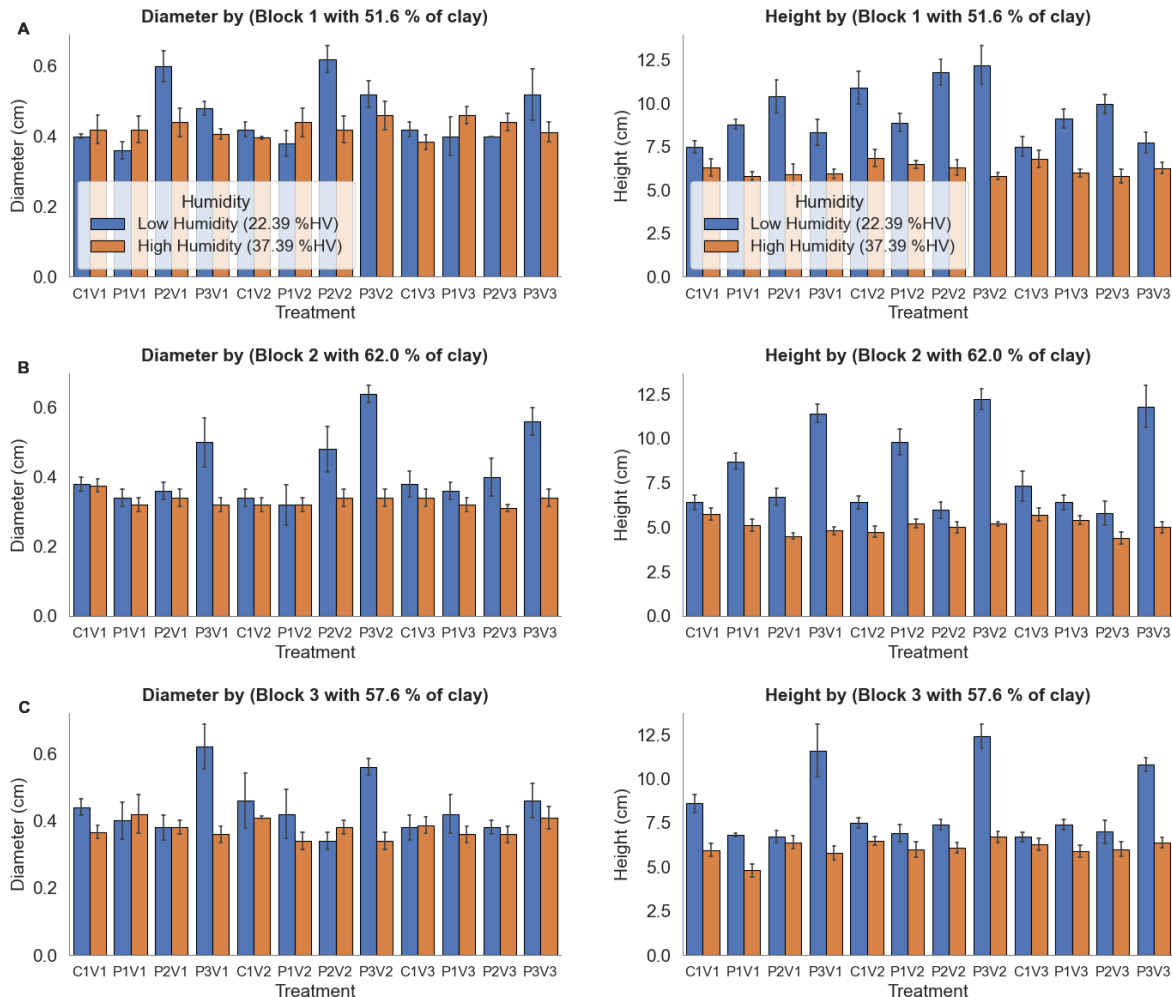


Figure 5.(A) Maize stem diameter (cm) and height (cm) under different treatment and humidity conditions across blocks 1, 2, and 3 (B1-B2-B3). (B) Maize plant height (cm) under different treatment and humidity conditions across blocks (B1-B2-B3).

This indicates a physiological trade-off, where conditions that favor elongation do not necessarily promote radial thickening. While the overall pattern was uniform, the extent of height increased varied slightly by block, with Block B1 producing the tallest plants for several treatments. Among treatments, P3V2 displayed the most reliable performance, achieving greater height under low humidity in every block. These results highlight that plant growth strategies shifted with water availability: low humidity promoted vertical elongation, whereas high humidity supported radial development.

The highest establishment (87 750 plants/ha) occurred under high vacuum pressure and high velocity, while another peak (84 062 plants/ha) was observed at normal vacuum pressure with medium velocity. Notably, population did not increase linearly with velocity, as high vacuum pressure combined with medium velocity produced the lowest overall population (65 750 plants/

ha). This highlights a non-linear relationship in which optimal establishment depends on the precise combination of seeder parameters rather than on individual factors alone. When isolating the effect of humidity (Figure 7A), a clear pattern emerged.

High humidity consistently led to greater population densities across treatments, underscoring the vital role of soil moisture in seed establishment. The difference between high and low humidity conditions was significant, with higher overall averages under increased moisture. This robust relationship highlights humidity as a critical factor influencing population density and, by extension, successful plant establishment, and growth. In contrast, the analysis of block effect (Figure 7B) showed overlapping error bars.

Figura 1. Efectos principales de los factores en la población

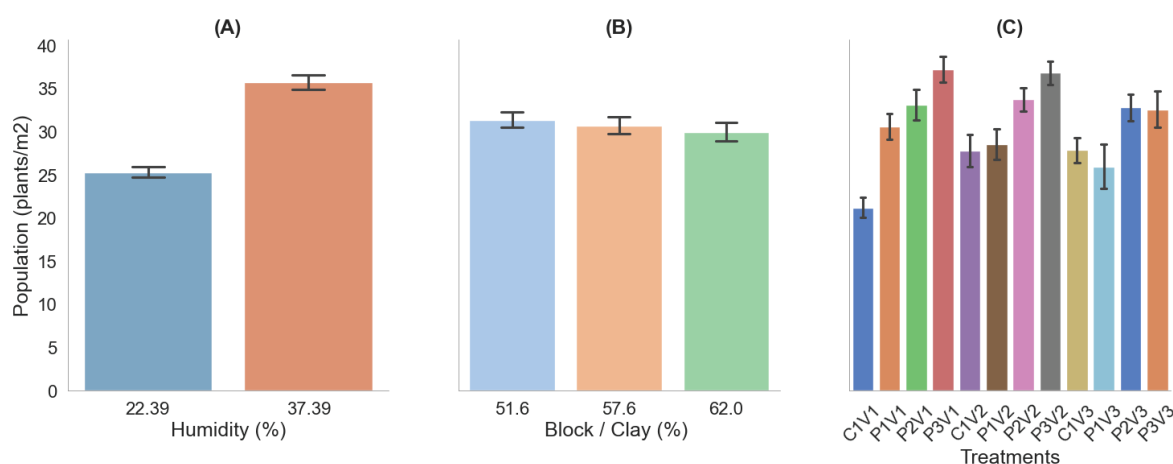


Figure 7. (A) The effect of low soil humidity (22.39 %) and high soil humidity (37.39 %) levels on maize population density (plants per 4 m²). (B) The effect of block differences on maize population density (plants per 4 m²). (C) The effect of different seeder pressure and planting speed treatments on the population density of maize (plants per 4 m²).

Indicating no statistically significant differences in population among B1, B2, and B3. This suggests that, unlike diameter and height, block conditions had little influence on plant population. The overlap of error bars, which represent confidence intervals or standard deviations, implies that any observed variation in mean population across blocks is likely attributable to random chance rather than a true block effect. Treatment effects (Figure 7C) revealed the correlation between each variable on the population.

Increasing vacuum pressure (from P1 to P3) consistently promoted higher populations compared to the control (C), regardless of velocity. The control remained lowest across all conditions, likely due to insufficient suction causing seed loss and irregular spacing. Populations rose steadily with vacuum pressure, reaching their highest values under P3, a trend that held across blocks and humidity levels. Velocity exerted a weaker and less consistent influence, with reductions in population mainly appearing at higher speeds, but its effect was clearly secondary to vacuum pressure. These results emphasize that adequate vacuum pressure is essential for uniform seed pickup and stand establishment, making it the primary driver of plant population. Principal Component Analysis (Figure 8) further clarified the dynamics influencing population establishment.

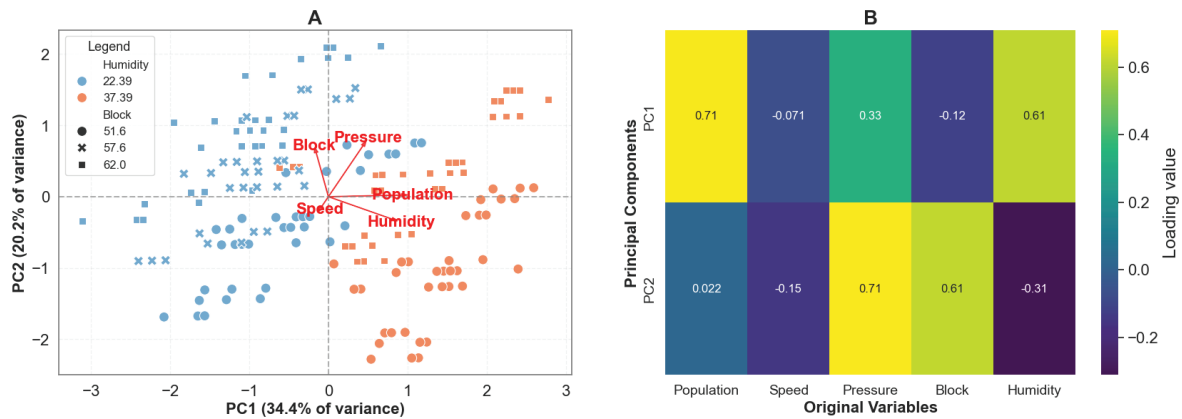


Figure 8. PCA results. (A) shows the biplots for the variables in PC1 and PC2; (B) shows the heat map for the main population predictor variables.

The first component (PC1), which explained 34.4 % of the total variance, was dominated by vacuum pressure and humidity. These variables had the longest vectors and were closely aligned, indicating they are the primary drivers of variance and are strongly positively correlated high vacuum pressure tends to coincide with high humidity. This confirms their significant role in determining population outcomes.

The second component (PC2) explained 20 % of the variance and was primarily associated with block differences. However, this variation did not translate into a statistically significant effect on population, reinforcing earlier results showing negligible block influence. Speed had minimal impact on either component, contributing little to the overall model variance.

Sample clustering revealed distinct groupings by block. Samples from blocks B2 and B3 clustered in regions associated with high vacuum pressure and humidity, while samples from B1 grouped in regions of lower vacuum pressure and humidity. Although block explained a portion of the variance, it was not a primary driver of population differences. Overall, the PCA highlights that population and humidity are the main factors explaining the variation in the data, with vacuum pressure playing a central and consistent role.

Calibration Equation

Building on the population results, a linear regression model was developed to predict population as a function of humidity, pressure, and velocity: The model achieved an R^2 of 0.73 and a MAE of 3.30 plants/ha, demonstrating strong predictive performance overall (Figure 9A).

A positive relationship was observed between measured and predicted populations, with most estimates closely matching observed values, indicating that the model effectively captures the general data trend. However, greater dispersion occurred at lower population values, suggesting reduced accuracy in that range. These results indicate good overall predictive capability, with some limitations in scenarios involving smaller populations. The analysis of variable importance (Figure 9B) reinforces the findings from the previous analysis.

$$\text{Population} = 12.43 + 0.805 \cdot \text{humidity} + 1.194 \cdot \text{pressure} - 0.654 \cdot \text{velocity} \quad (5)$$

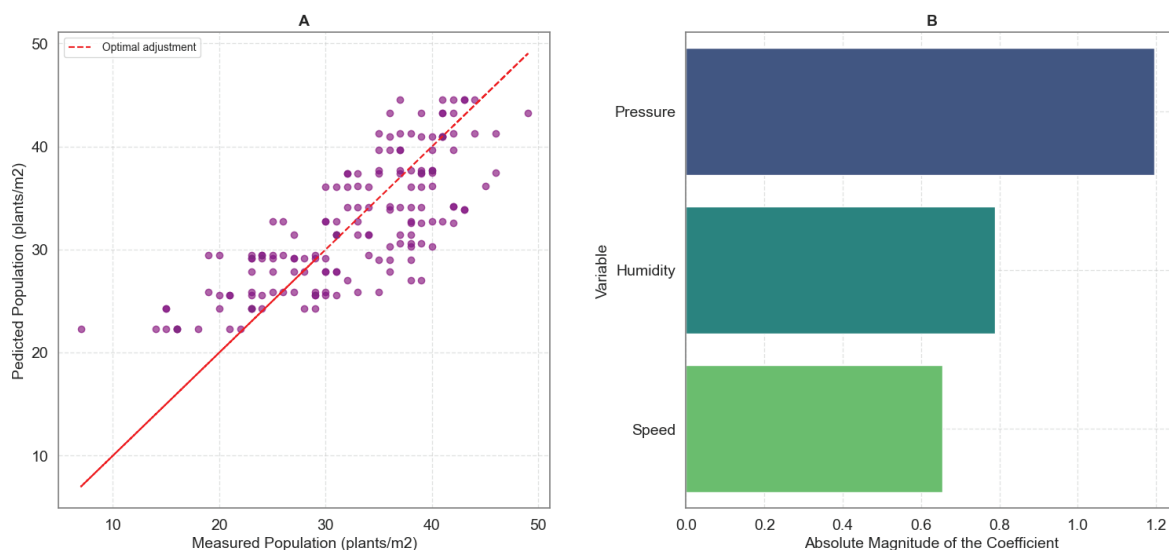


Figure 9. (A) Comparison of Predicted and Measured Population Values from the Linear Regression Model. (B) Relative Importance of Predictor Variables in the Linear Regression Model for Population Estimation.

Vacuum Pressure emerged as the most influential factor, followed by humidity, while velocity had a negative effect and block effects were minimal. Vacuum Pressure had the highest impact ($\beta = 1.1944$), indicating that higher pressure improves population by enhancing seed placement precision. Humidity also contributed positively ($\beta = 0.8049$), highlighting the importance of adequate soil moisture for seed emergence and establishment. In contrast, seeding speed showed a negative effect ($\beta = -0.6545$), suggesting that higher speeds reduce population, likely due to less uniform seed distribution. The block effect was minimal and negative ($\beta = -0.1247$), confirming that variability between plots had little influence compared to the other factors.

Discussion

The analysis of morphological traits and plant population revealed complex interactions among humidity and planting treatments. These factors influenced stem diameter, plant height, and stand population differently, showing that crop establishment is shaped by a combination of environmental conditions and mechanical seeder settings. To explore these relationships more systematically, a Principal Component Analysis (PCA) was conducted to identify the main drivers of variance and complement morphological observations. The following sections describe how these traits respond to both environmental and mechanical factors, with particular emphasis on the role of vacuum pressure in pneumatic seeding.

Stem diameter increased under high-humidity conditions, particularly in treatment P3V2. This aligns with [27], who reported that greater water availability promotes cell expansion and tissue thickening, improving stem rigidity. Similarly, [28] found that adequate moisture reduces lodging risk by encouraging thicker stems. In this study, the combination of higher vacuum pressure (level 3) and moderate speed (V2) likely enhanced seed–soil contact, facilitating uniform germination and early root development. Mechanically, higher vacuum pressure reduces failures in seed suction and release, improving planting precision and enhancing water and nutrient uptake for seedlings[29]. These results demonstrate that vacuum pressure not only affects early seedling growth but also supports the development of structurally stronger plants, especially under favorable humidity conditions.

While stem diameter increased with humidity, plant height exhibited an opposite trend, responding more strongly to low-humidity conditions. Height was greater under moderate water stress, reflecting a physiological adaptation to optimize light capture and reduce competition [30]. In this study, treatment P3V2 under low humidity nearly doubled plant height compared to the same treatment under high humidity, suggesting that an increased auxin-to-gibberellin ratio under stress favors elongation over radial growth [31]. Under low humidity, plants likely activated elongation mechanisms to enhance light interception, a typical drought-avoidance response. Vacuum pressure also indirectly contributed to this pattern by ensuring uniform seed placement, which allowed seedlings to emerge and develop under consistent initial conditions [29]. Thus, mechanical precision interacts with environmental stress to shape plant architecture differently for height and diameter.

Plant population was generally higher under high-humidity conditions, particularly in treatment P3V2, where median values exceeded 40 plants per plot [31] similarly reported that greater water availability during germination improves emergence rate and seedling uniformity. Beyond environmental effects, vacuum pressure played a critical role in determining population uniformity and seeding depth. Adequate suction ensures that each seed adheres to the metering plate until the precise release moment, minimizing skips and multiple seed drops [32]. Higher vacuum stabilizes seed retention for irregular or lightweight seeds, improving within-row spacing and overall stand uniformity [33].

Several studies support these findings. [32] emphasized that vacuum level is a key determinant of seed distribution uniformity, while [34] demonstrated that both vacuum magnitude and metering disc geometry control the stability of seed pickup and release. Insufficient vacuum can cause premature detachment and reduced population uniformity, whereas excessive vacuum can lead to multiple seeds adhering to the same orifice, decreasing singulation efficiency [35] [36]. In addition, vacuum pressure affects seeding depth consistency, reducing variability in emergence timing and promoting synchronous seedling establishment [37] [38]. Synchronous emergence supports early vigor and competitive ability, ultimately enhancing plant growth [31].

At higher planting speeds, the significance of vacuum pressure increases further. Elevated vacuum compensates for inertial forces acting on seeds, maintaining singulation and placement accuracy [36], [39]. Thus, vacuum pressure acts as the central control parameter that harmonizes seed spacing, emergence uniformity, and final population across environmental gradients. Higher stand uniformity reduces intraspecific competition and supports more balanced nutrient uptake, contributing to stronger early growth and yield potential.

To integrate these morphological and mechanical findings, a Principal Component Analysis (PCA) was conducted to simplify the dataset while retaining the most meaningful variance patterns related to maize growth and seeding performance. The first principal component (PC1) explained 34.4 % of the total variance and was primarily influenced by vacuum pressure and humidity, while the second component (PC2) accounted for 20 % resulting in a cumulative explained variance of 54.4 %. Although no universal threshold exists, retaining components explaining over 50 % of the variance ensures interpretability and minimizes information loss [40], [41], [42].

PC1 represented a mechanical–environmental axis, where high vacuum pressure and humidity promoted uniform establishment, while PC2 captured morphological variability linked to plant height and stem thickness. The predominance of PC1 confirms that vacuum pressure and humidity are the main drivers of plant establishment, connecting mechanical seeder calibration with morphological performance. Similar findings have been reported by [29], who demonstrated

that variations in pneumatic pressure significantly affect seed spacing and plant distribution, and by [32], who emphasized that optimal vacuum levels ensure accurate seed singulation and consistent seed depth.

Furthermore, the association between these factors and morphological traits supports prior research showing that adequate soil moisture enhances germination and seedling uniformity [31], while excessive speed or improper vacuum calibration can lead to erratic plant spacing [29], [35]. PCA visualization thus provides an integrative understanding of how both environmental and operational parameters interact to shape maize establishment dynamics.

When interpreted alongside the observed effects on stem diameter, plant height, and final population, the PCA results underscore the synergistic role of environmental (humidity, temperature, and soil texture) and mechanical (vacuum pressure and speed) variables in defining precision planting outcomes [43], [44]. Optimizing these factors ensures uniform seed distribution, synchronized emergence, and stable early crop development, which are essential for improving maize yield potential [33], [36].

Conclusion

This study demonstrates that maize morphology and population dynamics are strongly shaped by both humidity and vacuum pressure, with their interaction playing a decisive role in determining growth outcomes. Humidity proved to be a critical environmental factor: high-humidity conditions consistently supported greater population establishment, particularly under the P3 treatment, while lower humidity favored taller plants. This reflects a physiological trade-off between elongation and establishment, where abundant moisture promotes higher plant density, and moderate moisture stress encourages axial growth.

Among the mechanical factors evaluated, vacuum pressure had the most significant impact. Higher vacuum pressure enhanced seed placement accuracy and emergence, resulting in more uniform stands and greater plant density compared to the control. Seeder speed, within the tested range, did not significantly affect the measured variables. Block effects were minimal, with no statistically significant differences in population, though Block B1 showed slight advantages, likely linked to soil structure or microenvironmental variation. Principal component analysis confirmed that vacuum pressure and humidity were the primary drivers of variation, with speed and block effects playing secondary roles. The predictive model developed performed well, showing strong agreement between predicted and observed population values in medium and high emergence scenarios, though accuracy decreased in low-establishment cases.

Overall, this work achieved its main objective of identifying optimal calibration parameters for a pneumatic seeder in clayey soils. The specific objectives were met by clearly demonstrating the effects of vacuum pressure and humidity on germination, plant morphology, and stand establishment; evaluating their interaction and confirming their influence on seed placement, emergence uniformity, and stand density; and creating a validated predictive model integrating environmental and mechanical factors to guide seeder calibration.

These findings contribute valuable knowledge for precision agriculture, providing practical guidance for adjusting pneumatic seeder settings according to soil moisture and vacuum pressure. Such insights can improve maize establishment and uniformity in humid, clay-rich soils, supporting more efficient, profitable, and sustainable farming systems.

Deeply grateful for the unwavering support of the Academic Unit of Agricultural Engineering of EARTH. Their collaborative spirit and assistance were vital from the initial, meticulous preparation of the land to the firsthand support in planting the seeds for the experiments. Also, thank you to EARTH University for their generous contribution in providing access to two of their seeders, which were essential for conducting the research with precision and efficiency.

References

- [1] J. Dufour, "Effects of Plant Spacing Variability and Non-Uniform Emergence on Corn Yield," LSU, 2021. Accessed: Oct. 19, 2025. [Online]. Available: <https://www.proquest.com/openview/63d62347869df6cb9fec0ca147196b4c/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>
- [2] M. Maymon *et al.*, "Characterization of *Fusarium* population associated with wilt of jojoba in Israel," *Plant Pathol*, vol. 70, no. 4, pp. 793–803, May 2021, doi: 10.1111/ppa.13345.
- [3] L. Schneider, T. Müller, and R. Becker, "The effect of climate change on invasive crop pests across regions.," *Agric Syst*, vol. 196, no. 103–112, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103112>.
- [4] Q. Wei *et al.*, "Future Range Shifts in Major Maize Insect Pests Suggest Their Increasing Impacts on Global Maize Production," *Insects*, vol. 16, no. 6, p. 568, May 2025, doi: 10.3390/insects16060568.
- [5] V. Vasile, A. Tîrziu, E. Nicolae, M. Ciucă, and C. P. Cornea, "SSR Markers are Useful Tools in Wheat Varietal Purity and Genetic Diversity Assessment," *Seed Science and Technology*, vol. 51, no. 2, pp. 145–156, Aug. 2023, doi: 10.15258/sst.2023.51.2.01.
- [6] Y. Wang, Y.-J. Shen, S. Yu, X. Zhang, and D. Xiao, "Climate extremes are critical to maize yield and will be severer in North China," *Clim Risk Manag*, vol. 48, p. 100710, 2025, doi: 10.1016/j.crm.2025.100710.
- [7] C. Wang, H. Yang, J. He, K. Kang, and H. Li, "THE INFLUENCE OF SEED VARIETY AND HIGH SEEDING SPEED ON PNEUMATIC PRECISION SEED METERING," *Engenharia Agrícola*, vol. 43, no. 3, 2023, doi: 10.1590/1809-4430-eng.agric.v43n3e20220183/2023.
- [8] J. W. Cortez, M. Anghinoni, and S. N. S. Arcoverde, "SEED METERING MECHANISMS AND TRACTOR-SEEDER FORWARD SPEED ON CORN AGRONOMIC COMPONENTS," *Engenharia Agrícola*, vol. 40, no. 1, pp. 61–68, Feb. 2020, doi: 10.1590/1809-4430-eng.agric.v40n1p61-68/2020.
- [9] J. C. C. Madaloz *et al.*, "Distribution of corn plants in a pneumatic system with different vacuum pressure adjustments and seed sieves," *Aust J Crop Sci*, no. 14(10):2020, pp. 1568–1574, Oct. 2020, doi: 10.21475/ajcs.20.14.10.p2316.
- [10] K. Romaneckas *et al.*, "How to Analyze, Detect and Adjust Variable Seedbed Depth in Site-Specific Sowing Systems: A Case Study," *Agronomy*, vol. 12, no. 5, p. 1092, Apr. 2022, doi: 10.3390/agronomy12051092.
- [11] P. B. Obour and C. M. Ugarte, "A meta-analysis of the impact of traffic-induced compaction on soil physical properties and grain yield," *Soil Tillage Res*, vol. 211, p. 105019, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.still.2021.105019.
- [12] X. Shi, T. Qin, D. Yan, F. Tian, and H. Wang, "A meta-analysis on effects of root development on soil hydraulic properties," *Geoderma*, vol. 403, p. 115363, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.geoderma.2021.115363.
- [13] Agroenlace, "Sembradora Abonadora excellence 4 líneas dobles." Accessed: Oct. 20, 2025. [Online]. Available: <https://agroenlace.co/producto/sembradora-abonadora-excellence-4-lineas-dobles/>
- [14] T. Marchesan, "Row crop planter." Accessed: Oct. 20, 2025. [Online]. Available: <https://en.marchesan.com.br/product/detail/STP2-Row-Crop-Planter/en-US>
- [15] Disagro, "HR-960." Accessed: Oct. 20, 2025. [Online]. Available: <https://www.disagro.co.cr/product/hr-960/>
- [16] G. Van Rossum and F. L. Drake, *Python 3 Reference Manual*. Scotts Valley, CA: CreateSpace, 2009.
- [17] T. pandas development team, "pandas-dev/pandas: Pandas," Feb. 2020, *Zenodo*. doi: 10.5281/zenodo.3509134.
- [18] R. Snehkunj, K. Vachiyatwala, and C. Author, "Data Analysis Using Pandas Library of Python," *Acta Scientific COMPUTER SCIENCES*, vol. 4, no. 3, 2022.
- [19] J. D. Hunter, "Matplotlib: A 2D graphics environment," *Comput Sci Eng*, vol. 9, no. 3, pp. 90–95, 2007, doi: 10.1109/MCSE.2007.55.
- [20] M. L. Waskom, "seaborn: statistical data visualization," *J Open Source Softw*, vol. 6, no. 60, p. 3021, 2021, doi: 10.21105/joss.03021.
- [21] Darren Jones, "Python Statistics Fundamentals: How to Describe Your Data," *Real Python*, 2023.

- [22] Scikit-learn, "Principal component analysis (PCA)," 2025, Accessed: Oct. 20, 2025. [Online]. Available: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.decomposition.PCA.html>
- [23] I. T. Jolliffe and J. Cadima, "Principal component analysis: a review and recent developments," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 374, no. 2065, p. 20150202, Apr. 2016, doi: 10.1098/rsta.2015.0202.
- [24] F. Pedregosa *et al.*, "Scikit-learn: Machine Learning in {P}ython," *Journal of Machine Learning Research*, vol. 12, pp. 2825–2830, 2011, [Online]. Available: <https://scikit-learn.org/stable/index.html>
- [25] M. W. Liemohn, A. D. Shane, A. R. Azari, A. K. Petersen, B. M. Swiger, and A. Mukhopadhyay, "RMSE is not enough: Guidelines to robust data-model comparisons for magnetospheric physics," *J Atmos Sol Terr Phys*, vol. 218, 2021, doi: 10.1016/j.jastp.2021.105624.
- [26] D. Chicco, M. J. Warrens, and G. Jurman, "The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation," *PeerJ Comput Sci*, vol. 7, 2021, doi: 10.7717/PEERJ-CS.623.
- [27] R. Wulansari, B. Farhana, and N. Fajrina, "Field Emergence Test in Relation to Laboratory Seed Quality Tests of Sweet Corn Seed," *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 1160, no. 1, p. 012017, Apr. 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1160/1/012017.
- [28] N. Shrestha, J. Zhang, and H. Zhang, "Identifying key factors influencing maize stalk lodging. Plant Phenomics," vol. 7, no. 100073, 2025, Accessed: Oct. 21, 2025. [Online]. Available: 10.1016/j.aiaa.2025.01.007
- [29] I. Petrović, F. Vučajnk, S. Trdan, R. Bernik, and M. Vidrih, "The Influence of Planting Speed of a Maize Vacuum Planter on Plant Spacing Variability and Ear Parameters," *Agronomy*, vol. 15, no. 2, p. 462, Feb. 2025, doi: 10.3390/agronomy15020462.
- [30] D. B. Lobell, G. L. Hammer, G. McLean, C. Messina, M. J. Roberts, and W. Schlenker, "Maize yield under a changing climate: The hidden role of vapor pressure deficit," *arXiv Preprint*, 2019, Accessed: Oct. 21, 2025. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1910.03129>
- [31] H. Khaeim, Z. Kende, M. Jolánkai, G. P. Kovács, C. Gyuricza, and Á. Tarnawa, "Impact of Temperature and Water on Seed Germination and Seedling Growth of Maize (*Zea mays* L.)," *Agronomy*, vol. 12, no. 2, p. 397, Feb. 2022, doi: 10.3390/agronomy12020397.
- [32] D. Karayel, O. Güngör, and E. Šarauskis, "Estimation of Optimum Vacuum Pressure of Air-Suction Seed-Metering Device of Precision Seeders Using Artificial Neural Network Models," *Agronomy*, vol. 12, no. 7, p. 1600, Jul. 2022, doi: 10.3390/agronomy12071600.
- [33] A. Bozdoğan, B. Demir, and B. Kayisoglu, "Seeding uniformity for vacuum precision seeders," *Sci Agric*, vol. 65, no. 6, pp. 631–637, 2008, Accessed: Oct. 26, 2025. [Online]. Available: <https://www.scielo.br/j/sa/a/ZpsNfMtP4YnVKMQNZ3H7hQg/?format=pdf&lang=en>
- [34] A. Yazgi, "Measurement of seed spacing uniformity performance of a precision metering unit. Measurement," vol. 54, pp. 123–130, 2014, Accessed: Oct. 26, 2025. [Online]. Available: 10.1016/j.measurement.2014.06.026
- [35] M. Haddadi, S. Karimi, and S. Mahapatra, "Optimization of performance parameters for a pneumatic vacuum disc type planter," *SSRN Electronic Journal*, 2025, Accessed: Oct. 26, 2025. [Online]. Available: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4273465
- [36] S. Mahapatra, R. Singh, and P. Kumar, "Optimization of operational parameters for pneumatic air-suction planters," *Sci Rep*, vol. 15(1), 2025, Accessed: Oct. 26, 2025. [Online]. Available: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-98448-4>
- [37] A. Ozmerzi, D. Karayel, and M. Topakci, "Effect of sowing depth on precision seeder uniformity," *Power Machinery*, pp. 257–263, 2002.
- [38] Michigan State University Extension, "Stand uniformity: Planter tips that can impact seed placement and plan-ting depth," 2023.
- [39] GroundCover, "Precision planting study yields encouraging results," *Grains Research and Development Corporation*, 2024, Accessed: Oct. 26, 2025. [Online]. Available: <https://groundcover.grdc.com.au/innovation/precision-agriculture-and-machinery/precision-planting-study-yields-encouraging-results>
- [40] H. Abdi and L. J. Williams, "Principal component analysis," *WIREs Computational Statistics*, vol. 2, no. 4, pp. 433–459, Jul. 2010, doi: 10.1002/wics.101.
- [41] I. T. Jolliffe and J. Cadima, "Principal component analysis: a review and recent developments," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 374, no. 2065, p. 20150202, Apr. 2016, doi: 10.1098/rsta.2015.0202.

- [42] F. Pedregosa *et al.*, "Scikit-learn: Machine learning in Python," *Journal of Machine Learning Research*, vol. 12, no. 2825–2830, 2011, Accessed: Oct. 20, 2025. [Online]. Available: <https://jmlr.org/papers/v12/pedregosa11a.html>
- [43] S. Stewart, N. Kitchen, M. Yost, L. S. Conway, and P. Carter, "Planting depth and within-field soil variability impacts on corn stand establishment and yield," *Agrosystems, Geosciences & Environment*, vol. 4, no. 3, Jan. 2021, doi: 10.1002/agg2.20186.
- [44] J. C. Vargas, "Evaluación de velocidad siembra de maíz forrajero con sembradora neumática en el distrito de Vitor, provincia y departamento de Arequipa ," Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, 2020. Accessed: Oct. 26, 2025. [Online]. Available: <https://45.231.83.156/handle/20.500.12996/4595>

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Para la revisión gramatical y ortográfica de este artículo, empleamos la herramienta de IA *Perplexity, Claude*. 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.

Influencia del contenido aire en la calidad del concreto determinado mediante pruebas de ensayos ultrasónicos

Influence of air content on concrete quality determined by ultrasonic testing

Luis Carlos Calvo-Navarro¹

Fecha de recepción: 17 de agosto, 2025

Fecha de aprobación: 19 de enero, 2026

Calvo-Navarro, L.C. Influencia del contenido aire en la calidad del concreto determinado mediante pruebas de ensayos ultrasónicos. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 N° 3. Julio-Setiembre, 2026. Pág. 148-163.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i3.8062>



¹ Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción. Escuela de Ingeniería en Construcción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 lccalvo@itcr.ac.cr

 <https://orcid.org/0009-0005-6793-0741>

Palabras clave

Concreto; contenido de aire; control de calidad; onda ultrasónica; pulso ultrasónico; tiempo de curado; velocidad ultrasónica.

Resumen

La prueba de medición de velocidad del pulso ultrasónico es un ejemplo de ensayo no destructivo (END) que se ejecuta en elementos de concreto, y que permite determinar la calidad de este, basándose en la magnitud de la velocidad del pulso ultrasónico obtenida de la prueba. Los END, permiten realizar inspecciones en sitio, no invasivas, con resultados en tiempo real y con facilidad de ejecución, incluso durante el proceso constructivo. La física de este ensayo se basa en el envío de pulsos a frecuencias ultrasónicas que son susceptibles a la densidad del material evaluado, al contenido de aire en su interior (vacíos) y a los agrietamientos o discontinuidades existentes. Esta capacidad, es de gran utilidad al evaluar concreto hidráulico, ya que, de manera generalizada, se evita que las estructuras de concreto tengan vacíos, grietas o poca densidad, ya que cualquiera de estas condiciones disminuye las capacidades estructurales deseables en el concreto. La presente investigación, determina la influencia que tiene el contenido de aire atrapado dentro del concreto, en el tránsito de ondas ultrasónicas a través de este, y la disminución de velocidad ultrasónica debido al aumento de una cuantía mínima de aire dentro de la mezcla de concreto.

Keywords

Concrete; air content; quality control; ultrasonic wave; ultrasonic pulse; curing time; ultrasonic speed.

Abstract

The ultrasonic pulse velocity measurement test is an example of non-destructive testing (NDT), which is performed on concrete elements, and allows to establish the quality of the concrete, based on the magnitude of the ultrasonic pulse velocity obtained from the test. NDT allows on-site, non-invasive inspections, with real time results and ease of execution, even during the construction process. The physics of this test is based on sending pulses at ultrasonic frequencies that are susceptible to the density of the material being evaluated, the air content in its interior (voids) and the existing cracks or discontinuities. This capability is very useful when evaluating hydraulic concrete, since, in a generalized way, it avoids that concrete structures have voids, cracks or low density, since any of these conditions diminishes the desirable structural capabilities of concrete. The present investigation determines the influence that the content of air trapped inside the concrete has on the transit of ultrasonic waves through it, and the decrease of ultrasonic velocity due to the increase of a minimum amount of air inside the concrete mixture.

Introducción

El ensayo ultrasónico es un método de prueba no invasiva que permite analizar la uniformidad interna de un material, en este caso, del concreto; mediante la disposición de un transductor que emite un pulso ultrasónico que atraviesa el medio y otro transductor que recibe la señal y determina el tiempo de vuelo y la velocidad de la onda ultrasónica. La utilidad de este ensayo en el control de calidad del concreto procede de la sensibilidad de la onda ultrasónica a la presencia de aire en el medio analizado. Esto se debe a que la frecuencia de trabajo

de los pulsos ultrasónicos no se transmite a través de las partículas gaseosas, debido a la separación de éstas, y el aire atrapado en cualquier elemento de concreto no aporta ninguna ventaja estructural, por lo cual, el ensayo ultrasónico se convierte en una excelente forma de determinar la calidad del concreto. De manera general, la velocidad ultrasónica es alta en concretos con buena densidad y bajos contenidos de vacíos o discontinuidades, mientras que, la velocidad ultrasónica es baja cuanto menor densidad y mayor nivel de porosidad, vacíos o agrietamientos estén presentes el concreto analizado. Existen al menos tres procesos que pueden modificar el contenido de aire dentro del concreto endurecido: el diseño de la mezcla, la colocación del concreto y el curado correcto. El diseño de la mezcla del concreto determina si existe aire incluido o no dentro de la mezcla, y el contenido de aire depende en particular de los agregados utilizados para la producción de concreto y de su tamaño máximo nominal. El proceso de colocación implica factores de trabajabilidad, vibrado y segregación que, de no ejecutarse apropiadamente, promueven los vacíos o la mala densificación de la estructura colada. El proceso de curado implica factores químicos de endurecimiento y aumentos de temperatura por calor de hidratación del cemento hidráulico utilizado en el concreto, que, si no se controlan, dejarán vacíos por evaporación del agua utilizada para la mezcla. Los detrimentos en las actividades de diseño, colocación y curado del concreto dispondrán de una menor o mayor presencia de aire dentro del concreto endurecido y, por ende, de un resultado menor o mayor de velocidad ultrasónica.

Marco teórico

Estándares

El ensayo ultrasónico se ejecuta según estándares internacionales reconocidos. La norma ASTM C597-22 *Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete*, de la *ASTM International*, indica que, la prueba ultrasónica sirve para la “determinación de la velocidad de propagación de pulsos de ondas de tensión ultrasónicas longitudinales a través del concreto” [1]. La norma EN 12504-4:2021 Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos, indica que; el método de prueba determina “la velocidad de propagación de impulsos de ondas longitudinales ultrasónicas o de ondas transversales ultrasónicas en el hormigón endurecido” [2].

Metodología ultrasónica

La colocación de los sensores piezométricos se puede realizar utilizando tres métodos distintos: directo, semidirecto e indirecto, como se muestra en la Figura 1. El método directo y semidirecto permiten obtener información de las ondas ultrasónicas que atraviesan la matriz del concreto, mientras que el método indirecto solo obtiene información de las ondas más superficiales liberadas por el sensor.

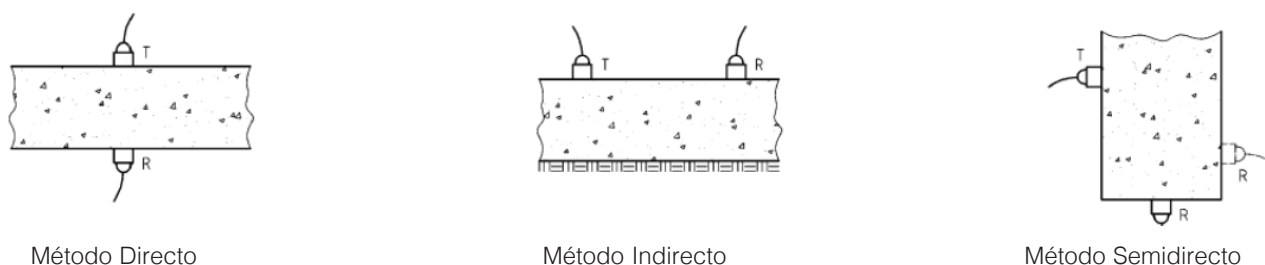


Figura 1. Métodos de inspección ultrasónica en concreto. Fuente, [3]

Se conoce bien la teoría de la transmisión directa, en la cual la trayectoria de las ondas es recta entre los dos transductores y con una mayor energía. Este metodología provee resultados muy fiables y precisos. Al comparar las velocidades de transmisión de los diferentes métodos ultrasónicos, la posición relativa de los transductores en el método directo se beneficia de la utilidad de las ondas longitudinales o de compresión, que, de manera general, son la más deseables para este ensayo no destructivo [4].

El método directo ofrece la manera más eficiente de controlar el tiempo de vuelo de los pulsos ultrasónicos, debido a que presenta una mayor sensibilidad y una ruta de viaje mejor definida [5].

La metodología indirecta se emplea en situaciones donde únicamente es accesible una cara del elemento de concreto, así como en la evaluación de la profundidad de fisuras superficiales. La disposición de los transductores en esta metodología presenta una menor sensibilidad que las metodologías directas y semidirectas. Para una misma longitud de trayectoria, la amplitud de la señal registrada en el transductor receptor representa solo una fracción reducida (aproximadamente entre el 2% y el 3%) en comparación con la obtenida mediante transmisión directa. Además, las mediciones de velocidad ultrasónica obtenidas bajo esta configuración están condicionadas por las propiedades del concreto cercano a la superficie, donde puede haber diferencias en composición y características a las del interior del elemento, limitando la representatividad de los resultados. [6]

En términos generales, la velocidad de pulso determinada mediante transmisión indirecta resulta inferior a la correspondiente a la transmisión directa en un mismo elemento, con diferencias que pueden oscilar entre el 5% y el 20%, dependiendo principalmente de la calidad del concreto analizado. Por esta razón, se recomienda la realización de mediciones in situ que permitan cuantificar dicha discrepancia y adicionalmente, es conveniente efectuar múltiples mediciones variando la separación entre transductores para establecer una velocidad ultrasónica promedio más certera. [6]

Las consideraciones de ejecución ultrasónica mencionadas en los apartados anteriores son las que determinan que la se utilizara el método directo para el presente estudio, dado que sus resultados se obtienen a partir de una metodología con mayor sensibilidad, trayectorias de viaje del pulso ultrasónico bien definidas y la disposición de dos caras opuestas planas dentro de las probetas cilíndricas utilizadas para la investigación. La Figura 2 muestra el esquema de ejecución del ensayo ultrasónico en una probeta cilíndrica que se utilizará tanto para la determinación de velocidad ultrasónica como para la resistencia a la compresión.

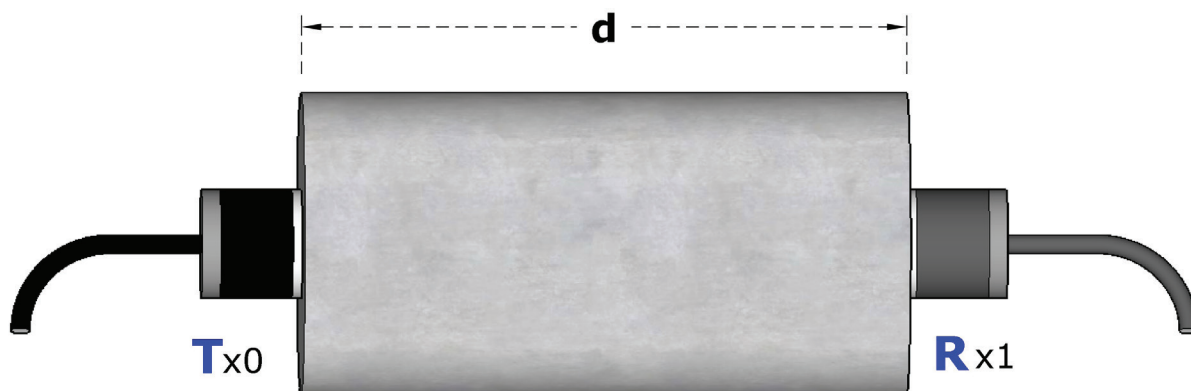


Figura 2. Esquema de la prueba por metodología directa en probetas cilíndricas.

Velocidad ultrasónica

La propagación de ondas ultrasónicas a través de un medio se relaciona con las propiedades elásticas del material y su densidad, siempre y cuando el medio sea elástico, isotrópico e ilimitado. La relación de dichas características se muestra en la siguiente ecuación: [3]

$$V = \sqrt{\frac{E (1 - \mu)}{\rho (1 + \mu)(1 - 2\mu)}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

V = Velocidad de propagación de ondas.

E = Módulo de Elasticidad.

μ = Coeficiente dinámico de Poisson. [1]

ρ = Densidad del material.

El concreto, no se apega a la hipótesis de un material elástico, isotrópico e ilimitado, si no, a un material heterogéneo con múltiples características físicas, debido a la variabilidad de los materiales que lo conforman, tales como: cemento, agregados, agua, aire e incluso aditivos. Por tanto, otra manera de determinar la velocidad del pulso ultrasónico a través de un medio implica magnitudes que se pueden obtener al utilizar el equipo ultrasónico: la distancia entre los transductores y el tiempo que dura la onda ultrasónica en viajar dentro del medio. Por consiguiente, la ecuación que rige la obtención de la velocidad ultrasónica aún en medios heterogéneos como el concreto se obtiene la siguiente forma:

$$V = \frac{d}{t} \quad (\text{Ecuación 2})$$

V = Velocidad de pulso ultrasónico (m/s).

d = Distancia entre los transductores (m). [1]

t = Tiempo de vuelo de la onda ultrasónica (s).

El resultado de la prueba ultrasónica se utiliza para la clasificar la calidad del concreto según la velocidad ultrasónica admitida por el concreto. Para la clasificación se utiliza la escala de Maholtra & Carino (2004), que se muestra en el cuadro 1.

Cuadro 1. Clasificación de calidad del concreto. Fuente, [7].

Clasificación de calidad	Velocidad de onda ultrasónica (m/s)
Excelente	> 4575
Buena	3660 – 4575
Regular	3050 – 3660
Pobre	2135 – 3050
Muy Pobre	< 2135

Contenido de aire dentro de la mezcla de concreto

El diseño de mezcla de concreto se elaboró mediante las recomendaciones de la “Práctica estándar para seleccionar proporciones para concreto normal, pesado y masivo” ACI 211.1-91 [8]. Se utilizaron tres configuraciones de tamaño máximo nominal (TMN) de agregado grueso, para verificar la afectación en la velocidad ultrasónica atribuible al porcentaje de aire atrapado en la mezcla debido a la iteración de TMN en el concreto. La tabla A1.5.3.3 de la ACI 211.1-91 indica que existe un aumento en el contenido de aire atrapado dentro de la mezcla conforme se disminuye el TMN [7]. La Tabla 2 muestra el extracto de la tabla A1.5.3.3 de la ACI 211.1-91 que indica los contenidos de agua y aire aproximados para considerar en el diseño de mezcla de concreto, pero sin aire incorporado de manera adicional. Estos valores de aire atrapado corresponden exclusivamente a los aportados por el tipo de agregado grueso utilizado. Los TMN utilizados para el análisis experimental fueron de 12,5, 19 y 25 mm y las consideraciones de agua y aire para diseño de mezcla se señalan en el cuadro 2.

Cuadro 2. Contenidos de agua y aire aproximados para concretos sin aire incorporado [8].

Revenimiento (mm)	Agua (kg/m ³ de concreto de los tamaños máximos nominales de agregado indicados)							
	9,5	12,5	19	25	37,5	50	75	150
25 a 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 a 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 a 175	243	228	216	202	190	178	160	---
Cantidad aproximada de aire atrapado (%)	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2

Influencia del contenido de aire en la velocidad ultrasónica

Si se considera que la velocidad ultrasónica depende de propiedades elásticas y la densidad del medio en el cual se propagan las ondas (Ecuación 1), la señal ultrasónica demora menos tiempo cuando se transmite a través de sólidos y líquidos, sin embargo, cuando pasa de un medio sólido a uno gaseoso, se genera una dispersión de la onda, causando un incremento en el tiempo que le toma viajar del emisor del equipo al receptor, afectando el resultado de velocidad ultrasónica [9]. Esta particularidad genera que, distintos porcentajes de aire atrapado en la mezcla por iteraciones de TMN, sean susceptibles a la detección por parte del ensayo ultrasónico.

En el caso del concreto hidráulico, cuando una onda ultrasónica se propaga a través de este y se encuentra una interfaz entre el material y el aire, la transmisión de energía a través de esta frontera es prácticamente nula. En consecuencia, la presencia de cavidades llenas de aire ubicadas directamente entre los transductores puede interrumpir el paso del pulso ultrasónico. En estas condiciones, la primera señal que alcanza al receptor corresponde a un pulso que se ha desviado alrededor del contorno de la cavidad, lo que provoca un incremento en el tiempo de tránsito en comparación con un concreto homogéneo, denso y sin vacíos. [6]

Marco metodológico

Tipo de investigación

El presente trabajo define sus conclusiones a través de resultados cuantitativos, los cuales se obtienen a partir de métodos de investigación experimentales normalizados. El tipo de investigación según su propósito se puede clasificar como básica o pura, ya que se pretende aumentar el conocimiento sobre un fenómeno conocido, en este caso el aumento de contenido de aire en la mezcla de concreto ocasionado por la disminución del TMN del agregado grueso, observado a través de los resultados de velocidad ultrasónica en el concreto. La investigación también incluye una arista correlacional, ya que se pretende observar la relación entre variables que afectan directamente el resultado de velocidad ultrasónica, que en este caso son: la edad que tiene el concreto al momento de la medición y el contenido de aire dentro de la mezcla. [10].

Población y muestreo

La población analizada es el concreto de 210 kg/cm², el cual es el parámetro mínimo de resistencia a compresión definido por el Código Sísmico de Costa Rica 2010 (CSCR) en su sección 8.1.2 [11]; además, dicha resistencia es considerada f'_c , por lo cual, la edad de 28 días determina el período máximo en el cual se ejecutarán mediciones del desarrollo de resistencia y su consecuente análisis del desarrollo de velocidad de onda ultrasónica. La cantidad de especímenes es sugerida por la guía ACI 214, que, a su vez, cita a la guía ACI 318 indicando que, la cantidad mínima de especímenes necesarios para la evaluación de resistencia es de dos cilindros por edad, si estos son de la misma batida [12] [13]. La norma ASTM C39 indica que se pueden utilizar dos cilindros para edades inferiores a la de diseño y tres cilindros para la edad de diseño [14].

La elaboración del concreto y el muestreo respectivo, se ejecutó en las instalaciones del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO), adscrito a la Escuela de Ingeniería en Construcción del Tecnológico de Costa Rica. El CIVCO se encuentra acreditado bajo las normas ISO/IEC 17025:2017 e ISO/IEC 17020:2012, por lo cual, su sistema de gestión de calidad sigue procedimientos normalizados para la ejecución de las labores, demostrando competencia técnica en la elaboración de muestreos y ajustando sus ensayos a criterios de precisión e incertidumbre. Los criterios anteriores determinaron la obtención de tres probetas por cada edad de ensayo, de manera que a nivel estadístico un promedio de datos se obtenga de entre tres resultados, donde cada ítem equivale a un 33,3% de la muestra, y que, en caso de un valor atípico (*outlier*), la cantidad de ítems remanentes todavía evoquen una mayoría porcentual. Se evaluaron probetas cilíndricas a 1, 3, 7, 10, 14, 21 y 28 días de edad. Solamente las evaluaciones de 1 día de edad se hicieron con dos probetas, debido a la alta variabilidad que se puede esperar en sus resultados debido a las condiciones de curado inicial dentro de los moldes, las cuales se ajustan a las condiciones ambientales de las instalaciones. Las edades restantes, tienen un proceso de curado con temperatura y humedad relativa controlada dentro de una cámara húmeda.

Limitaciones de la investigación

El concreto es un material sujeto a una variedad de consideraciones de diseño, muy en particular la resistencia objetivo que se plantea al inicio de cualquier proyecto constructivo. La medición ultrasónica a través del concreto podría requerir una amplitud de resistencias de diseño bastante grande para generalizar conclusiones de una investigación, pero factores de orden temporal limitaron la cantidad de diseños de mezcla posibles a ejecutar para la consecución

de una cantidad de resultados finales estadísticamente aceptables. La utilización de diseños de mezcla de varias resistencias $f'c$ hubiera requerido de un tiempo mayor de evaluación, tanto de la compresión como de la velocidad ultrasónica, por lo cual, la investigación se limitó al parámetro mínimo de resistencia a la compresión descrito en el CSCR, el cual es de $f'c$ 210 kg/cm².

Es importante destacar que la respuesta ultrasónica ante cambios en la resistencia de diseño podría no ser tan representativa cuando se está estudiando la influencia del aire dentro de la mezcla de concreto. Para esta consideración, la variabilidad en el contenido de aire aportado por las iteraciones de TMN se convierte en una variable de mayor peso al momento de considerar la población y muestreo requeridos en la investigación.

Diseño de mezcla de concreto

Siguiendo las consideraciones para el diseño de mezcla aportados por la guía ACI 211.1-91 [8], se ejecutaron ensayos de caracterización de los agregados requeridos para las batidas de concreto y así realizar el proporcionamiento de mezcla adecuado para la fabricación de concretos de 210 kg/cm². El cuadro 3 muestra los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización efectuados.

Cuadro 3. Caracterización de agregados para diseño de mezcla de concreto.

Agregado		Grueso			Fino	Estándar
		25 mm	19 mm	12 mm	Arena	
Número de tamaño		56	67	7		ASTM C33/C33M-23
Peso unitario suelto	kg/m ³	1493	1457	1435	1365	ASTM C29/C29M-17a
Peso unitario compactado	kg/m ³	1635	1619	1617	1490	
Gravedad específica bruta		2,647	2,633	2,579	2,420	ASTM C127-15 ASTM C128-22
Gravedad específica sss		2,691	2,686	2,649	2,607	
Gravedad específica aparente		2,769	2,781	2,773	2,975	
Absorción	%	1,67	2,01	2,72	7,71	ASTM C117-17
Lavado malla N°200	%	0,20	2,00	0,60	3,40	
Módulo de finura					3,21	ASTM C136/C136M-19

Una vez que se tienen las propiedades de los agregados, podemos proporcionar el concreto, determinando revenimientos a utilizar, resistencias requeridas ($f'cr$), relación agua cemento (A/C) y muy en particular, el contenido de aire atrapado en la mezcla según cada TMN utilizado. El cuadro 4 muestra las proporciones de los diseños de mezcla utilizados para la fase experimental.

Cuadro 4. Diseños de mezcla de concreto según su TMN.

Tamaño Máximo Nominal		12 mm	19 mm	25 mm
Revenimiento	mm	150 - 175		
Agua	litros	228	216	202
Contenido de aire atrapado (ACI 211.1-91)	%	2,5	2	1,5
f'c	kg/cm ²	210		
f'cr	kg/cm ²	281		
Relación A/C		0,59		
Contenido de Cemento	kg	395	375	355
Agua corregida por humedad y absorción de agregados	litros	263	241	224
Agregado grueso				
Volumen	litros	308	365	413
Peso seco	kg	815	925	1016
Volumen bruto	m ³	0,316	0,351	0,384
Agregado fino				
Volumen	litros	298	265	243
Peso seco	kg	699	599	529
Volumen bruto	m ³	0,29	0,63	0,656
Concreto				
Peso unitario teórico	kg/m ³	2137	2116	2102

Resultados

Una vez realizadas las batidas de concreto, se realizaron los ensayos en concreto fresco, sobre todo, para la determinación real del peso unitario y del contenido de aire atrapado dentro de la mezcla. El cuadro 5 muestra los resultados de los ensayos en concreto fresco efectuados.

Cuadro 5. Resultados de ensayos en concreto fresco.

TMN		25 mm	19 mm	12 mm	Estándar
Revenimiento	mm	150	115	120	ASTM C143/ C143M – 20
Temperatura	°C	24,4	24,5	24,8	ASTM C1064/ C1064M – 17
Peso Unitario	kg/m ³	2296	2253	2208	ASTM C138/ C138M – 23
Contenido de Aire	%	0,9	1,5	1,8	

Posteriormente se ejecutaron los ensayos de velocidad ultrasónica y resistencia a la compresión. Estos resultados se utilizan para observar su desarrollo a través del tiempo de curado del concreto, hasta alcanzar la edad de 28 días. El cuadro 6 y la Figura 3 muestran los resultados de compresión.

Cuadro 6. Resultados promedio de resistencia a la compresión.

TMN		25 mm	19 mm	12 mm	Promedio
1 día	kg/ cm ²	32,4	33,5	28,1	31,3
3 días		74,8	82,2	79,0	78,6
7 días		123	129	129	127
10 días		151	155	149	152
14 días		161	175	171	169
21 días		180	199	196	192
28 días		217	220	223	220

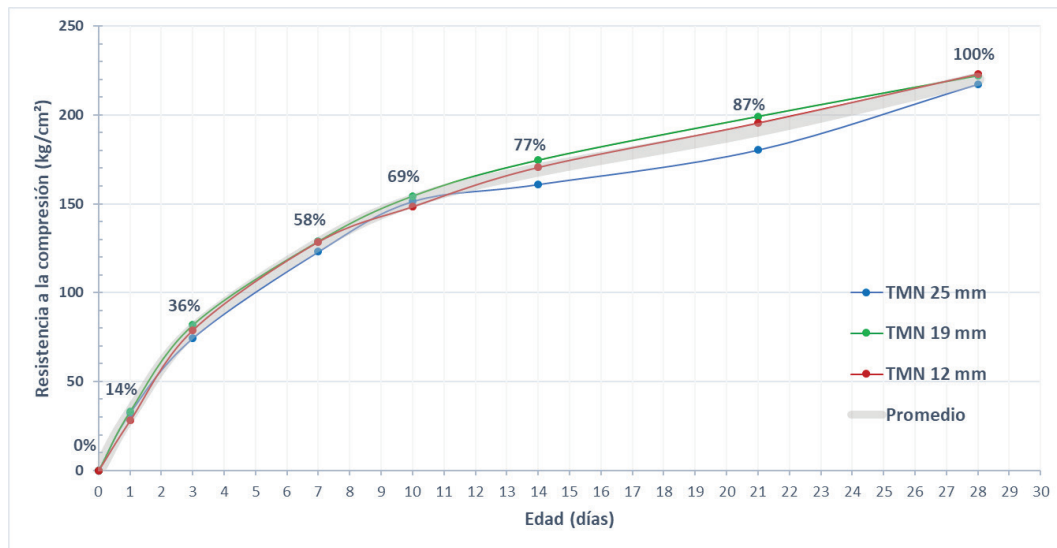


Figura 3. Desarrollo de resistencia a la compresión en los concretos analizados.

En el caso de la velocidad ultrasónica, los tres concretos demuestran una diferencia entre los valores de velocidad obtenidos, pero la curva de desarrollo presenta la misma característica evolutiva a través del tiempo para cualquiera de los concretos analizados. Los tres concretos alcanzan la clasificación de Bueno, según los criterios de Maholtra & Carino. [6], ya que a partir de los 3660 m/s, el concreto ingresa a esta clasificación. Los resultados de velocidad ultrasónica se presentan en el cuadro 7 y la Figura 4.

Cuadro 7. Resultados promedio de velocidad ultrasónica .

TMN	25 mm		19 mm		12 mm	
Edad	Datos	Velocidad ultrasónica (m/s)	Datos	Velocidad ultrasónica (m/s)	Datos	Velocidad ultrasónica (m/s)
1 día	16	2548	25	2448	23	2819
3 días	28	3641	28	3396	26	3347
7 días	29	3831	28	3674	37	3574
10 días	61	3929	26	3784	63	3603
14 días	27	4095	39	3863	35	3703
21 días	42	4176	41	3913	86	3739
28 días	27	4231	54	3963	69	3808

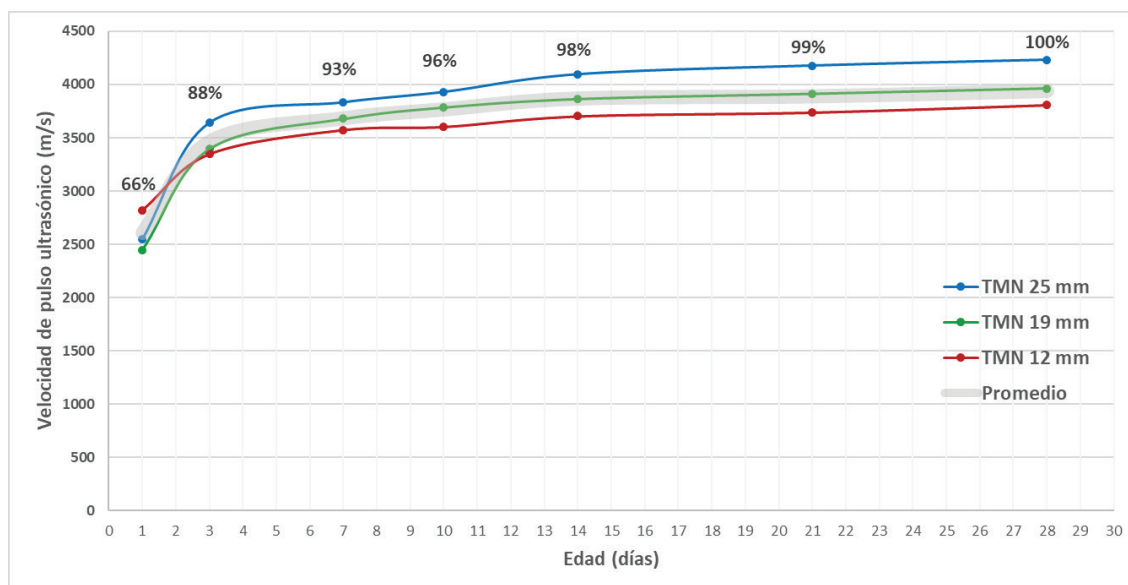


Figura 4. Desarrollo de velocidad ultrasónica en los concretos analizados

Tomando en consideración las curvas de desarrollo de resistencia a la compresión y de velocidad ultrasónica, podemos tabular los porcentajes de ganancia de cada ensayo ejecutado. El cuadro 8 y la Figura 5 muestran este comparativo.

Cuadro 8. Porcentajes de disminución de velocidad ultrasónica entre TMN.

Edad	Concreto con TMN de 25mm a 19 mm	Concreto con TMN de 19 mm a 12 mm	Concreto con TMN de 25 mm a 12 mm
3 días	6,7%	1,4%	8,1%
7 días	4,1%	2,7%	6,7%
10 días	3,7%	4,8%	8,3%
14 días	5,7%	4,1%	9,6%
21 días	6,3%	4,4%	10,5%
28 días	6,3%	3,9%	10,8%
Promedio	5,5%	3,6%	8,9%
Desviación Estándar	1,3%	1,3%	1,4%

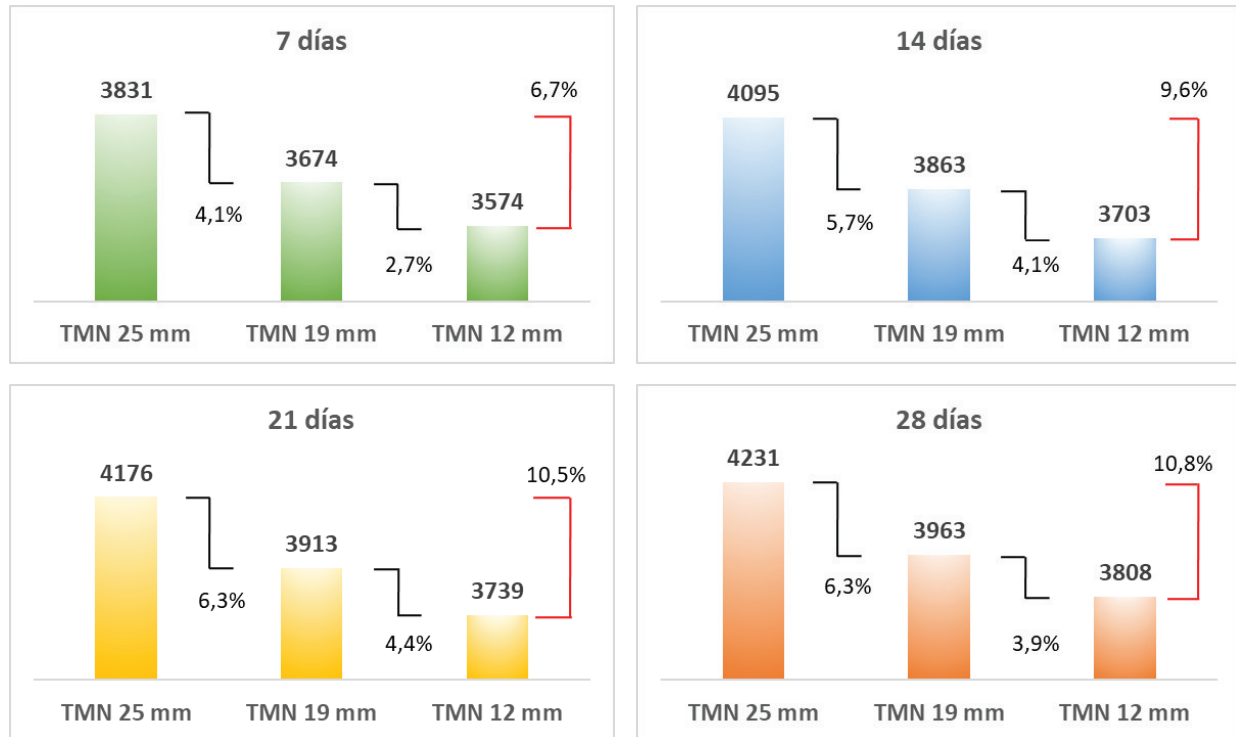


Figura 5. Porcentajes de disminución de velocidad ultrasónica en edades de 7, 14, 21 y 28 días.

Utilizando los resultados promedio finales, podemos determinar tendencias en la población analizada, y realizar un modelo de regresión lineal múltiple para determinar el efecto causado por las variables, y en este caso, el porcentaje de aire presente en la mezcla (ver cuadro 9).

Cuadro 9. Tendencias obtenidas en propiedades de los concretos analizados.

TMN	25 mm	19 mm	12 mm	Tendencia
Contenido Aire (%)	0,9	1,5	1,8	Sube
Densidad concreto (kg/m³)	2296	2253	2208	Baja
Velocidad ultrasónica (m/s)	4231	3963	3808	Baja

La ejecución del modelo de regresión lineal involucra los datos del porcentaje de contenido de aire, la velocidad ultrasónica obtenida y la edad de ejecución de la prueba; los resultados se muestran en el cuadro10.

Cuadro 10. Ejecución de regresión lineal múltiple.

Resumen Estadístico	Coeficiente de correlación múltiple		0,93868897
	Coeficiente de determinación R ²		0,88113699
	R ² ajustado		0,86528859
	Error típico		88,6535139
	Observaciones		18

ANOVA		Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
	Regresión	2	873936,496	436968,248	55,5978468	1,1557E-07
	Residuos	15	117891,683	7859,44552		
	Total	17	991828,179			

Coeficientes		Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
	Intercepción	4073,827	87,824645	46,385923	1,289E-17	3886,63	4261,02
	Edad	19,41410	2,4659296	7,8729329	1,0482E-06	14,16	24,67
	% Aire	-391,7725	55,846464	-7,015171	4,173E-06	-510,81	-272,74

La ecuación resultante del modelo de regresión lineal se describe a continuación:

$$Y = 4074 + (19,4 \cdot X_1) - (391,8 \cdot X_2) \quad (\text{Ecuación 3})$$

Y = Velocidad de pulso ultrasónico (m/s).

X₁ = Edad de curado del concreto (días).

X₂ = Contenido de aire de la mezcla (%).

Discusión

Los ensayos ejecutados confirman que los cambios en el TMN del agregado grueso utilizado en el concreto modifican el porcentaje de contenido de aire atrapado en la mezcla, tal y como indica la tabla A1.5.3.3 de la ACI 211.1-91. Se destaca que, los porcentajes de aire obtenidos en la fase experimental son menores a los considerados en los parámetros de diseño. Esto se atribuye al correcto proceso de mezclado, moldeo normalizado de las probetas, un correcto curado de los especímenes y la corrección de agua ejecutada al momento de la batida, considerando humedad y absorción de los agregados, limitando así el desarrollo de vacíos dentro de las probetas por aspectos de ejecución. La tendencia teórica si se plasma en los resultados experimentales, donde, conforme disminuye el TMN del agregado grueso en el concreto, aumenta el porcentaje de contenido de aire atrapado en la mezcla.

Por su parte, la evaluación ultrasónica, destaca que el resultado de velocidad ultrasónica disminuye cuanto más contenido de aire se encuentra dentro de mezcla, debido a la susceptibilidad del pulso ultrasónico a difractarse ante la presencia de vacíos dentro de la matriz del material analizado. La disminución de la magnitud de velocidad ultrasónica no

tiene relación alguna con cambio en la resistencia a la compresión, ya que los tres concretos mantienen curvas de desarrollo de resistencia muy equiparables y que cumplen con la resistencia de diseño pautada.

La única variable que aporta aire a la mezcla es el cambio en el TMN, la ejecución de las batidas de concreto y el curado de las probetas se realizó según estándares internacionales que rigen dichos procedimientos. Esto demuestra la sensibilidad del ensayo ultrasónico a la presencia de aire dentro del concreto, aún en la conformación de tres concretos con el mismo $f'c$ y sin variaciones destacables en su resistencia a la compresión.

Los resultados y metodología sugieren que, una comparación entre una diversa cantidad de concretos, con fabricantes diferentes, menos rigor en los procesos de mezclado y un curado con ciertas deficiencias puede generar resultados aún más diferentes, y que, si demuestren un detrimento en la resistencia a la compresión, ocasionada por disminución en la densificación del concreto o el aumento de variables que introducirían aire a la mezcla de concreto. En cualquier caso, el ensayo ultrasónico se presenta como un equipo confiable para la detección de la calidad del concreto a pesar de cambios pequeños de contenido de aire dentro del material.

Conclusiones

Se logra determinar que la disminución en el TMN de agregado grueso del concreto también disminuye la velocidad ultrasónica del concreto, aunque el desarrollo de resistencia a la compresión sea similar entre los tres concretos. En la edad de 28 días, la velocidad disminuye un 6,3 % entre el concreto con agregado de 25 mm y el de 19 mm, y un 3,9 % adicional entre el concreto con agregado de 19 mm y el de 12 mm; una disminución total de 10,8 % en la velocidad ultrasónica. Esta disminución no significó un detrimento en el rango de clasificación de calidad, ya que todos los concretos se mantienen en la clasificación de Bueno según la escala de Maholtra & Carino.

El modelo de regresión lineal múltiple ejecutado y la revisión iterativa de resultados, nos demuestra que el porcentaje de contenido de aire afecta el resultado en gran medida, ya que, un aumento de un 1,0 % en el contenido de aire, disminuye hasta un 10 % la velocidad ultrasónica por metodología directa. Esto quiere decir que, si le aplicamos un 1,0 % adicional de aire, por cualquier factor, a los concretos con TMN de 19 mm y 12 mm, la disminución en la velocidad ultrasónica será suficiente para rebajar la clasificación de calidad obtenida, pasando de Bueno a Cuestionable, y, por lo tanto, el desarrollo de resistencia a la compresión puede ponerse en duda dentro del concreto en obra.

La versatilidad de la prueba ultrasónica permite detectar estos parámetros de calidad en sitio y tomar decisiones tempranas para la corrección de algún detrimento de calidad, pero basado en un ensayo no destructivo que puede ejecutarse durante el proceso constructivo y dentro de los 28 días de desarrollo de resistencia del concreto hidráulico.

Recomendaciones

Los procesos de elaboración de concreto en nuestro país se encuentran bastante estandarizados, y en ocasiones, existe un exceso de confianza en el diseño, elaboración y colocación del concreto. Los diseños de concreto se sustituyen por relaciones proporcionales conocidas, pero que no son comprobadas mediante control de calidad que verifique el correcto desarrollo de resistencia, la corrección de agua de la mezcla según el aporte de los agregados, o incluso, la correcta dosificación de materiales, que garantice eficiencia de los recursos. Así mismo, se delegan responsabilidades del profesional de la construcción en personal técnico que, por su experiencia, se hacen responsables de procesos de elaboración, colocación y curado de

concreto que no siempre son los correctos. Se recomienda el uso de mecanismos de control de calidad ordinarios como los muestreos de concreto y la elaboración de especímenes cilíndricos para la obtención de resistencia a la compresión, o al menos, optar por los ensayos no destructivos como el ultrasonido en el concreto, por medio del cual, se puede determinar la calidad del concreto en sitio y durante el procesos constructivo, con resultados en tiempo real que pueden determinar conclusiones estadísticamente confiables.

Esta investigación utilizó parámetros de diseño de la guía ACI 211.1-91, sobre todo en la incorporación del porcentaje de aire atrapado en la mezcla. La ejecución de las mezclas, y la revisión de este parámetro con el ensayo respectivo (ASTM C231), nos demostró que, aunque se cumplió la tendencia teórica y esperada, los porcentajes de contenido de aire fueron menores a los diseñados. Esto sugiere que se pueden obtener concretos incluso mejores a los diseñados con buenas prácticas de elaboración del concreto, por lo que se recomienda la dosificación e hidratación ordenada de los componentes de la mezcla, la corrección de agua en la mezcla, según la humedad y absorción de los agregados utilizados, un tiempo de mezclado adecuado, control de la temperatura ambiental y del concreto al momento de colar, para evitar microfisuramientos, expansiones o contracciones inesperadas, y un correcto curado del concreto, que en muchas ocasiones no se ejecuta durante los 28 días de desarrollo de resistencia.

Trabajo futuro

- El ensayo ultrasónico también admite el método indirecto de inspección y algunos elementos de concretos como losas y muros pueden solamente revisarse bajo este método. Se puede promover la investigación de la influencia del aire en el resultado de velocidad ultrasónica obtenida, pero desde la evaluación ultrasónica indirecta.
- Investigar otras resistencias de diseño (f'_c) para el concreto puede brindar un mayor alcance de los comportamientos y tendencias del ensayo ultrasónico. Este trabajo se limitó a la resistencia de 210 kg/cm², dado que es el más común en obra convencional.

Agradecimientos

Se agradece a la Escuela de Ingeniería en Construcción por el soporte brindado para la ejecución de esta investigación, así como al Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción por el aporte del equipamiento ultrasónico, instalaciones del laboratorio y tiempo de ejecución.

Referencias

- [1] ASTM International, «Designation C597 – 22 Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete,» 2022.
- [2] Asociación Española de Normalización, «EN 12504-4:2021 Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos,» Madrid, 2022.
- [3] A. Domato Jayo, «Ultrasonidos: principios generales y alcance,» International Atomic Energy Agency (IAEA), 2022.
- [4] J.-L. Henry y A. Aguado De Cea, «Optimización del control de la resistencia del hormigón de la obra de la depuradora del Besós mediante ultrasonidos,» Barcelona, 2003, pp. 28-61.
- [5] O. Carrasco y A. Freitas, «Evaluación de la influencia del acero de refuerzo en la aplicación del ensayo de velocidad de pulso ultrasónico en elementos de concreto armado,» Caracas, 2014.
- [6] International Atomic Energy Agency, «Guidebook on non-destructive testing of concrete structures,» Vienna, 2002.
- [7] V. M. Maholtra y N. Carino, Nondestructive Testing of concrete, Florida: CRC Press, 2004.

- [8] American Concrete Institute, «Standar Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweighth, and Mass Concrete (ACI 211.1-91),» 2002.
- [9] L. A. Quintero Ortiz, R. A. Cruz Hernández y D. Y. Peña Santos, «Efecto del contenido de agua sobre la resistencia y la velocidad de pulso ultrasónico del concreto,» *Tecnura. Tecnología y Cultura Afirmando el Conocimiento*, vol. 18, n° 42, pp. 103-113, 2014.
- [10] O. Narváez Trejo y L. Villegas Salas, «Introducción a la investigación:,» Universidad Veracruzana, 2014.
- [11] Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica, Código Sísmico de Costa Rica, Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2010.
- [12] American Concrete Institute, «Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete (ACI 214R-11),» United States, 2011.
- [13] American Concrete Institute, «Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318SUS-14) y Comentario (ACI 318SUSR-14),» United States, 2015.
- [14] ASTM International, «Designation C39/C39M – 24 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens,» 2024.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Utilizamos la herramienta de inteligencia artificial *DeepL* para traducir partes de este artículo del inglés al español. La herramienta nos ayudó a agilizar el proceso de traducción, pero realizamos una revisión exhaustiva para asegurar la calidad y precisión de las traducciones.