Universidad Rafael Urdaneta

Revista Tecnocientífica URU

No. 29 Julio - Diciembre 2025
ISSN: 2343 - 6360 / Depósito legal: ppi 201402ZU4464
Maracaibo - Venezuela

Universidad Rafael Urdaneta

Avenida 2 “El Milagro”, entrada autónoma de la Universidad Rafael Urdaneta, luego de la Biblioteca del Estado. Maracaibo, Venezuela. Teléf. (58) (261) - 2000887, Fax (58)(261) 2000868.

Web: https://uru.edu

Universidad Rafael Urdaneta FONDO EDITORIAL

REVISTA TECNOCIENTÍFICA URU

Revista Tecnocientífica URU.

ISSN: 2343 - 6360 / Depósito legal: ppi 201402ZU4464

Web Tecnocientífica URU: https://revistas.fondoeditorial.uru.edu/index.php/tecnocientificauru/index

Web de Revista Arbitradas URU: https://revistas.fondoeditorial.uru.edu/

Teléfono: (58) (261) - 2000892.

Correo Electrónico: tecnocientifica@uru.edu

2025 © Autores

De esta edición: Universidad Rafael Urdaneta, Fondo Editorial.

La **Revista Tecnocientífica URU** es una publicación científica arbitrada de edición semestral, adscrita a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Rafael Urdaneta (URU), concebida como un instrumento de divulgación para artículos originales e inéditos en español e inglés. Su enfoque abarca las ingenierías, la arquitectura y las ciencias aplicadas, garantizando el rigor metodológico y la visibilidad global mediante registros ISSN (2343-6360).

Bajo una política de ciencia libre y gratuita, la revista no percibe cobros por el procesamiento ni la publicación de artículos. Toda la correspondencia y el envío de manuscritos deben dirigirse a la Dra. Laugeny Díaz, editora jefa, mediante el correo tecnocientifica@uru.edu (alternativo: publicaciones@uru.edu) o en la sede del Fondo Editorial de la Universidad Rafael Urdaneta, Maracaibo, Venezuela.

Todos los contenidos de esta revista están bajo una licencia CC BY-SA 4.0. Puedes compartir, adaptar y distribuir nuestros artículos, siempre y cuando cites a los autores y a la **Revista Tecnocientífica URU**. Descubre más sobre esta licencia aquí: https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.es

Revista Tecnocientífica URU

ISSN: 2343 - 6360 / Depósito legal: ppi 201402ZU4464

Periodicidad: Semestral

Editora Jefa

Díaz Borrego, Laugeny Chiquinquirá; Doctora; Universidad Rafael Urdaneta / Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela;
https://orcid.org/0000-0002-8263-081X | laugeny.diaz.8396@uru.edu

Comité Editorial

Andrade Ruiz, Charity Elizabeth; Doctora; Universidad del Zulia (Facultad Experimental de Ciencias), Maracaibo, Venezuela; https://orcid.org/0000-0001-5609-2010; ceandrade@fec.luz.edu.ve

Díaz, Altamira; Doctora; Universidad del Zulia (Facultad de Ingeniería), Maracaibo, Venezuela; https://orcid.org/0000-0001-7013-5267; adiaz@fing.luz.edu.ve

Fermín Sánchez, José Rafael; Doctor; Universidad Rafael Urdaneta, Maracaibo, Venezuela; https://orcid.org/0000-0003-4334-4826; jose.fermin.80961@uru.edu

García, Cezar; Doctor; Universidad Rafael Urdaneta, Maracaibo, Venezuela; https://orcid.org/0000-0003-2401-8355; cgarcia@uru.edu

Gutiérrez González, Edixon Cristóbal; Doctor; Universidad del Zulia (Facultad de Ingeniería), Maracaibo, Venezuela; https://orcid.org/0000-0002-9468-3644; egutierr12@gmail.com

Marín Leal, Julio César; Doctor; Universidad del Zulia (Facultad de Ingeniería), Maracaibo, Venezuela; https://orcid.org/0000-0003-2770-5978 julio.marin2789@gmail.com

Pérez Arevalo, María de Lourdes; Doctora; Universidad Rafael Urdaneta, Maracaibo, Venezuela; https://orcid.org/0009-0005-5200-7620 perezarevalo841@gmail.com

Sarmiento, Alexi Ramón; Doctor; Universidad Rafael Urdaneta, Maracaibo, Venezuela; https://orcid.org/0009-0000-3297-6989; alexi.sarmiento80419@uru.edu

Soto Arrieta, Laura R.; Doctora; Universidad del Zulia (Facultad Experimental de Ciencias), Maracaibo, Venezuela; https://orcid.org/0000-0002-4250-5088 laura.sotoarrieta@gmail.com

Vera Bonilla, Alexandra Lisbeth; Doctora; Universidad del Zulia (Facultad de Agronomía), Maracaibo, Venezuela; https://orcid.org/0000-0002-0875-2965; avera@fa.luz.edu.ve

Comité de Asesores

Aiello, Cateryna; Doctora; Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela; https://orcid.org/0000-0002-3061-1115; caiellomazzarri@gmail.com

Añez, Liz; Doctora; Universidad del Zulia / Universidad Rafael Urdaneta (Escuela de Ingeniería Industrial), Maracaibo, Venezuela; https://orcid.org/0009-0003-5381-5828; liz.anez.204284@uru.edu

Caldera, Yaxcelys; Doctora; Universidad del Zulia (Facultad de Ingeniería, Núcleo Costa Oriental del Lago), Cabimas, Venezuela; https://orcid.org/0000-0002-4862-9313; yaxcelysc@gmail.com

Chirinos, Juan; Doctor; Universidad Autónoma de Chile (Instituto de Ciencias Aplicadas, Facultad de Ingeniería), Talca/ Santiago, Chile; https://orcid.org/0000-0002-1547-4036; juan.chirinos@uautonoma.cl

González, Angel; Doctor; Universidad Rafael Urdaneta (Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química), Maracaibo, Venezuela; https://orcid.org/0000-0001-5648-919X; angel.gonzalez.80898@uru.edu

Landinez Tellez, David Arsenio; Doctor; Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia; https://orcid.org/0000-0001-6606-825X; dalandinezt@unal.edu.co

Mármol, Zulay; Doctora; Universidad del Zulia (Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química), Maracaibo, Venezuela; https://orcid.org/0009-0008-3338-8159; zulaymarmol@gmail.com

Morales, Ever; Doctor; Escuela Superior Politécnica Agropecuaria Manabí, Calceta, Ecuador ; https://orcid.org/0000-0001-9006-4996; edmorales@espam.edu.ec

Primera Ferrer, Juan; Doctor; Universidad Tecnológica de Manabí (Facultad de Ingeniería Agronómica), Portoviejo, Ecuador; https://orcid.org/0000-0002-8475-7320; juan.primera@utm.edu.ec

Urdaneta, Oscar; Magíster; Universidad Rafael Urdaneta (Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química), Maracaibo, Venezuela; https://orcid.org/0009-0005-1625-929X; secretario@uru.edu

Vera, Antonio; Doctor; Universidad del Zulia (Facultad de Humanidades, Escuela de Biología), Maracaibo, Venezuela; https://orcid.org/0000-0002-8298-9750; ajvera68@gmail.com

Zárraga, Jeannette; Doctora; Universidad Autónoma de Chile (Instituto de Ciencias Aplicadas, Facultad de Ingeniería), Talca/ Santiago, Chile; https://orcid.org/0000-0001-7118-0350; jeannette.zarraga@uautonoma.cl

Comité de Técnico

Hosglas Sanchez, Esp. Coordinadora Editorial
Cezar Garcia, Dr., Revisor de las Traducciones

Liliana Gonzalez, Lcda., Asistente Editorial
Mibsay Contreras, Diseño y Maquetación
Yanin Dávila, Portada

M. A. en Des. Econ. Alfredo León, Rector
MgS. Ramón Rincón, Vicerrector Académico
MgS. Oscar Urdaneta, Secretario

Dr. Cezar García
Decano de la Facultad de Ingeniería

MSc. Gustavo Arteaga
Decano de la Facultad de Ciencias Agropecuarias

Ing. Gilberto Araujo
Director de la Escuela de Ingeniería de Computación
Director de la Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones

Ing. Carlos Espinoza
Director de la Escuela de Ingeniería Civil

Ing. Gereli Gutierrez
Director de la Escuela de Ingeniería Eléctrica

Ing. Ángel González
Director de la Escuela de Ingeniería Química

Ing. Fernando Inciarte
Director de la Escuela de Ingeniería Industrial

Ing. Maria Gabriela Valbuena
Directora de la Escuela de Ingeniería Mecánica

Arq. María Medina
Directora de la Escuela de Arquitectura

Revista Tecnocientífica URU
Universidad Rafael Urdaneta
No. 29 Julio - Diciembre 2025
Depósito Legal: PPI 201402ZU4464
ISSN: 2343-6360
CC BY-SA 4.0

Contenido

Nota Editotrial
Ciencias y Tecnologías Cuánticas *9*

Artículos
Caracterización de un fertilizante elaborado con *Lemna* sp. mediante biodigestión anaerobia.
Characterization of a fertilizer made with Lemna sp. through anaerobic biodigestion.
B.V. Almarza-Colmenares, L.D. Oñatez-Rincón y L.C. Díaz-Borrego. *11*

Prevalencia bacteriana en la Unidad de Cuidados Intensivos de un Hospital Universitario (Falcón, Venezuela): Un problema de salud emergente.
Bacterial Prevalence in the Intensive Care Unit of a University Hospital (Falcón, Venezuela): An Emerging Health Problem.
R.A. Silva-Alvarado, A.E. Pérez-Briceño y R.J. Naveda. *25*

Adecuación del tratamiento químico de aguas residuales de una empresa productora de Hipoclorito de Sodio.
Adequacy of the chemical treatment of wastewater from a Sodium Hypochlorite producing company.
P.I. González-Arias, Y.C. Valencia-Meza, A.L. Vera-Bonilla, Ch.E. Andrade-Ruiz y J.G. Delgado-González. *33*

Diseño de un Centro de Salud Mental basado en criterios de Psicología Ambiental.
Design of a Mental Health Center Based on Environmental Psychology Criteria.
V.S. Calles-Palumbo, C.I. Villalobos-Molero y L.A. Badell-Gutierrez. *45*

Diseño de un sistema de mantenimiento preventivo para los equipos de una línea de extrusión de polietileno en una empresa de tuberías plásticas.
Design of a Preventive Maintenance System for Polyethylene Extrusion Line Equipment in a Plastic Piping Company.
R.V. Molina-Márquez. *57*

Estabilización de suelo por métodos de mezcla aplicados a suelos areno–arcillosos ubicados en el Sector Cañada Honda, Estado Zulia.
Soil stabilization by mixing methods applied to sandy clay soils located in the Cañada Honda Sector, Zulia State.
I.V. Martínez-García y M.A. García-Román. *65*

Evaluación de la construcción de transformadores de distribución tipo poste usando hexafluoruro de azufre como dieléctrico-refrigerante, y conductores de aleación bimetálica en sus devanados, mediante elementos finitos.
Evaluation of the construction of pole-mounted distribution transformer using sulfur hexafluoride as a dielectric-coolant and bimetallic alloy conductor in their windings, using the finite element method.
Á.E. Machuca-Hernández J.R. Espina-Alvarado y G.D. Cano-Valles. *77*

Manual práctico para el uso de paneles de madera contra laminada (CLT) en la economía circular de la construcción venezolana.

Practical manual for the use of cross-laminated timber (CLT) panels in the circular economy of Venezuelan construction.

R.B. Coronado-Durán y M.V. Herrera-Boscán. *93*

Caracterización fisicoquímica y microbiológica del queso semiduro fortificado con *Spirulina (Arthrospira platensis).*

Physicochemical and microbiological characterization of semi-firm cheese fortified with *Spirulina (Arthrospira platensis).*

R. A. Murgas-Arambulo, R.A. Briñez-Castro y L.R. Soto-Arrieta. *103*

Revista Tecnocientífica URU
Universidad Rafael Urdaneta
No. 29 Julio - Diciembre 2025
Depósito Legal: PPI 201402ZU4464
ISSN: 2343-6360
CC BY-SA 4.0

Nota Editorial

Ciencias y Tecnologías Cuánticas

Reconociendo la importancia de la ciencia cuántica y la necesidad de una mayor concienciación y difusión sobre su impacto pasado, presente y futuro, sociedades científicas de diversos paises decidieron apoyar la iniciativa de la UNESCO para conmemorar los 100 años de la creación de la teoría de la mecánica cuántica con un año internacional declarado por la ONU.

Es por esto, que la UNESCO ha declarado el 2025 como el año de las Ciencias y Tecnologías Cuánticas, en conmemoración de los trabajos de W. Heisenberg y E. Schrodinger, que fundan las bases fundamentales de la teoría cuántica formal.

Según la proclamación de un año dedicado a esta ciencia, se realizarán actividades académicas a todos los niveles destinadas a aumentar la concienciación pública sobre la importancia de la ciencia cuántica y sus aplicaciones. Reconociendo que esta rama de la ciencia creó un hito en la historia de la ciencia contemporánea, la ONU ha destacado que la cooperación global en la ciencia y la tecnología cuánticas son objetivos fundamentales para desarrollo sostenible, particularmente en áreas como la energía, las telecomunicaciones, nuevos materiales y la salud.

Es así, como en reconocimiento de la importancia de esta ciencia y de sus avances tecnológicos, la Universidad Rafael Urdaneta, en su aniversario 52, se une a la conmemoración del Año Internacional de la Ciencia y Tecnologías Cuánticas, a través de conferencias enmarcadas dentro de las II Jornadas de Ingeniería. Se discutieron los aspectos fundamentales de esta ciencia y de las tecnologías asociadas, aplicaciones y posibles inserciones dentro de un pensum de Ingeniería. Así se dio un panorama global a la comunidad universitaria relacionada con el tema.

Cabe destacar que cuando se habla de ciencias cuánticas, no solamente nos referimos estrictamente a áreas de física pura, sino también a las ciencias químicas, medicina, electrónica, energías renovables, entre otras. Las ciencias y las tecnologías cuánticas tienen tanto que ver con nuestra vida diaria, que es posible seguramente, en estos momentos tenemos un dispositivo cuántico en nuestras manos o en nuestro bolsillo, por ejemplo, el teléfono celular, o un computador de nueva generación, así como otros equipos que usamos día a día.

La mecánica cuántica, ciencia cuántica por excelencia, está teniendo, y tendrá, un impacto definitivo en las economías de las grandes potencias. Es la base fundamental del futuro cercano: computación cuántica, inteligencia artificial y robótica. Entonces, esta es la oportunidad para afrontar el desafío del desarrollo científico y tecnológico de nuestra región.

Dr. José Fermin

Miembro del Comité Editorial

Revista Tecnocientífica URU
Universidad Rafael Urdaneta
No. 29 Julio - Diciembre 2025
Depósito Legal: PPI 201402ZU4464
ISSN: 2343-6360
CC BY-SA 4.0

Caracterización de un fertilizante elaborado con *Lemna* sp. mediante biodigestión anaerobia[1]

Characterization of a fertilizer made with Lemna sp. through anaerobic biodigestion

Bárbara del V. Almarza-Colmenares
Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química. Maracaibo, Venezuela.
https://orcid.org/0009-0009-9656-994X | Correo electrónico: barbaraalmarza11@gmail.com

Lys D. Oñatez-Rincón
Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química. Maracaibo, Venezuela.
https://orcid.org/0009-0000-0973-0964 | Correo electrónico: lysdaniella11@gmail.com

Laugeny C. Díaz-Borrego
Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química. Maracaibo, Venezuela.
Universidad del Zulia, Facultad Experimental de Ciencias, Departamento de Biología, Laboratorio de Microorganismos Fotosintéticos. Maracaibo, Venezuela.
https://orcid.org/0000-0002-8263-081X | Correo electrónico: laugenydiaz221172@gmail.com

Recibido:22-11-2025 Admitido: 01-12-2025 Aprobado:04-12-2025
DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.20085067

Resumen
El objetivo de esta investigación consistió en la caracterización de un fertilizante elaborado con *Lemna* sp. mediante biodigestión anaerobia. La investigación fue del tipo explicativa y analítica con un diseño experimental y cuantitativo en la que se llevó a cabo la construcción de nueve biodigestores que emplearon dos tratamientos y un control, por triplicado. Los tratamientos consistieron en: T1: 50% *Lemna* sp., 25% estiércol, 25% melaza y T2: 25% *Lemna* sp., 37,5% estiércol, 37,5% melaza, y el control 50% estiércol, 50% melaza. Se midieron parámetros como: volumen, pH, conductividad eléctrica (CE), nitrógeno (NT), fósforo (P), carbono orgánico (CO) y materia orgánica (MO); y luego se comparó con un producto comercial elaborado con humus de lombriz, mediante un análisis de varianza. Como resultado, se obtuvo que los tratamientos tuvieron un comportamiento similar entre sí en cuanto a los parámetros analizados, con pH bajo (4,34±0,02 en T1 y 4,49±0,01 en T2) y elevada conductividad eléctrica (11,80±0,29 dS/m en T1 y 9,53±0,49 dS/m en T2) que afectaron al resto de los parámetros y la calidad del fertilizante; mientras que, el control y el fertilizante comercial fueron similares en cuanto al CO (12,04%±0,16 y 12,75%±0,05) y la MO (20,74%±0,16 y 21,97%±0,12), respectivamente. Se concluye que los biodigestores construidos son una alternativa económica para la producción de fertilizantes, destacando la importancia de considerar los componentes y proporciones de las materias primas y de la aireación luego de la biodigestión anaerobia, para optimizar la calidad del fertilizante. Además, la incorporación de aditivos en los fertilizantes producidos es necesaria, para mejorar las características del producto final.
Palabras clave: Biodigestión anaerobia, *Lemna,* biofertilizante, caracterización fisicoquímica, aprovechamiento de biomasa.

Abstract
The objective of this research was to characterize a fertilizer made with Lemna sp. by anaerobic biodigestion. The research was of the explanatory and analytical type with an experimental and quantitative design in which the construction of nine biodigesters was carried out that used two treatments and a control, in triplicate. The treatments consisted of: T1: 50% Lemna sp., 25% manure, 25% molasses and T2: 25% Lemna sp., 37.5% manure, 37.5% molasses, and the control 50% manure, 50% molasses. Parameters such as volume, pH, electrical conductivity (EC), nitrogen (TN), phosphorus (P), organic carbon (CO)

[1]Artículo adaptado de la ponencia presentada en la II Jornada de Ingeniería de la Universidad Rafael Urdaneta, 2025.

and organic matter (OM) were measured; and then it was compared with a commercial product made with worm humus, through an analysis of variance. As a result, it was obtained that the treatments had a similar behavior among themselves in terms of the parameters analyzed, with low pH (4.34 ± 0.02 in T1 and 4.49 ± 0.01 in T2) and high electrical conductivity (11.80 ± 0.29 dS/m in T1 and 9.53 ± 0.49 dS/m in T2) that affected the rest of the parameters and the quality of the fertilizer; while the control and the commercial fertilizer were similar in terms of CO (12.04% ± 0.16 and 12.75% ± 0.05) and OM (20.74% ± 0.16 and 21.97% ± 0.12), respectively. It is concluded that the constructed biodigesters are an economic alternative for the production of fertilizers, highlighting the importance of considering the components and proportions of the raw materials and the aeration after anaerobic biodigestion to optimize the quality of the fertilizer. Furthermore, the incorporation of additives into the fertilizers produced is necessary to improve the characteristics of the final product.
Keywords: *Anaerobic digestion, Lemna, biofertilizer, physicochemical characterization, biomass processing.*

Introducción

La creciente preocupación por la sostenibilidad ambiental y las prácticas agrícolas responsables han renovado el interés en los fertilizantes orgánicos. El uso de recursos naturales como *Lemna* sp. surge como una alternativa viable para la producción de fertilizantes. Esta investigación se enfoca en la caracterización de un fertilizante de *Lemna* sp. mediante biodigestión anaerobia, la cual, se erige como una solución efectiva, transformando la materia orgánica en fertilizantes ricos en nutrientes, al tiempo que se minimizan los impactos ambientales asociados con el uso de fertilizantes químicos, especialmente en el Lago de Maracaibo, siendo este afectado por la eutrofización debido a exceso de nutrientes como fósforo y nitrógeno.

Por esta misma razón, Cartagena [1] en el año 2018 en su trabajo de investigación realizó un análisis de factibilidad para la obtención de un biofertilizante producido a través de la especie *Eichhornia crassipes* procedente de la laguna del Limoconcha, describiendo una propuesta de control del crecimiento de *Eichhornia crassipes*, por medio de la elaboración de un biofertilizante orgánico a partir de la macrófita, mediante la biodigestión anaerobia.

El presente estudio propone construir biodigestores anaerobios para obtener fertilizante con *Lemna* sp., utilizando estiércol y melaza para la elaboración de las unidades experimentales. Similarmente, Jaramillo [2] en el año 2011 desarrolló y puso en funcionamiento un biodigestor con una tecnología apropiada, que requirió de una baja inversión de capital, con materiales adquiridos en la región, sin complejidad técnica.

Por lo anteriormente expuesto, en esta investigación se persigue como objetivo caracterizar un fertilizante orgánico basado en la planta acuática *Lemna* sp. obtenida de la región zuliana, así como también construir un biodigestor anaerobio para la obtención de los fertilizantes, analizar el fertilizante obtenido fisicoquímica y sensorialmente y compararlo con un fertilizante comercial.

Materiales y Métodos

Se realizó una investigación de tipo explicativa y analítica, con un nivel aprehensivo y un diseño experimental y cuantitativo, dando lugar a la caracterización de un fertilizante elaborado con *Lemna* sp. mediante biodigestión anaerobia a partir de la planta acuática, melaza y estiércol.

Fase I. Construcción de biodigestores anaerobios adecuados para la obtención de un fertilizante

Para el desarrollo de la presente fase, se realizaron una serie de actividades:

Selección de materiales

Se siguió el procedimiento recomendado por Cartagena [1], con el objetivo de seleccionar los materiales adecuados para la construcción de los biodigestores. En la Tabla 1, se listan los materiales utilizados en la construcción de los biodigestores, indicando cantidad y tipo de insumo.

Tabla 1. Materiales seleccionados

Material	Figura	Característica
Bidón de plástico		Capacidad de 20 L. Uno por Biodigestor
Manguera transparente de ½”		0,80 metros por biodigestor
Válvulas de ½”		Uno por biodigestor
Fitting de ½”		Uno por biodigestor
Abrazaderas de metal de ½”		Uno por biodigestor
Silicón transparente		Marca TOTAL
Botella de plástico de 1 L		Uno por biodigestor
Cinta plástica para embalar		Marca Morropac®

Diseño de biodigestores

Se procedió al diseño de los biodigestores, basado en un biodigestor tipo "batch", también conocido como reactor discontinuo. Los reactores discontinuos se operan llenando el reactor con los reactivos al inicio (lote), luego ocurre la reacción en un tiempo determinado en condiciones controladas, y al finalizar, se retira parte o la totalidad del contenido del reactor. La agitación puede o no ser parte de la operación de un reactor discontinuo. Según lo establecido por Laurel [3], las ventajas de un reactor discontinuo incluyen: facilidad de operación, ausencia de mezcla mecánica y alta eficiencia de eliminación de un contaminante individual.

En esta etapa, se llevó a cabo el diseño del biodigestor utilizando el programa AutoCAD, el cual se centró en que cada parte del biodigestor estuviera integrada de manera eficiente para maximizar la producción de biogás y la calidad del digestato. Cada componente fue diseñado teniendo en cuenta aspectos como, la resistencia estructural, la facilidad de mantenimiento y la eficiencia en la recolección del biogás.

Construcción de biodigestores

Luego de la obtención de los materiales y la elaboración del plano del diseño, se procedió a la construcción de los biodigestores, siguiendo lo señalado por los autores Guerra y Páez [4] y contando con la guía de un Ingeniero Mecánico.

Fase II. Análisis fisicoquímico y sensorial de los fertilizantes obtenidos basados en *Lemna* sp. en los diferentes tratamientos

Para esta fase, se llevó a cabo la preparación de los fertilizantes mediante el proceso de biodigestión anaerobia. Para lo cual, se trabajó con dos tratamientos y un control, con el objetivo de evaluar el efecto de diferentes proporciones de la *Lemna* sp. y otros aditivos en la calidad fisicoquímica y sensorial de los fertilizantes.

Selección de materias primas

Esta selección partió del análisis de varios materiales conocidos por su efectividad en la elaboración de fertilizantes, destacando entre ellos la melaza y el estiércol bovino. La melaza es rica en elementos que favorecen el desarrollo de una gran variedad de microorganismos, su composición llega a variar dependiendo del manejo a nivel industrial y agrícola según lo señalado por Agüero [5]. Por su lado, López [6] plantea que, el estiércol que se genera en las unidades de producción de leche, se puede utilizar para mejorar las propiedades del suelo, además de aportar cantidades considerables de nitrógeno (N) y otros nutrimentos esenciales para los cultivos. La materia prima principal *Lemna* sp., también conocida como lenteja de agua, fue recolectada de un jagüey ubicado en Bachaquero, municipio Valmore Rodríguez, estado Zulia.

Lavado de la *Lemna* sp.

Dado que la *Lemna* sp. presentó una considerable cantidad de residuos como ramas, petróleo, animales muertos y otros materiales indeseables, fue necesario realizar un proceso de limpieza exhaustivo. Se llevó a cabo un procedimiento en varias etapas para la separación de la *Lemna* sp. que flotaba en la superficie, empleando un colador para recolectar cuidadosamente la planta, asegurando que solo se extrajera la parte limpia y deseada.

Homogeneización del material

Para este proceso, en primer lugar, se introdujo la *Lemna* sp. recolectada en una licuadora marca Oster Classic modelo GS-4655, utilizando una relación de 80 mL de agua por cada 100 gramos de *Lemna* sp., y se procesó la mezcla hasta alcanzar la consistencia deseada, lo que facilitó la integración de la planta en el proceso de biodigestión anaerobia. En segundo lugar, se realizó la dilución y homogeneización del estiércol, mediante una relación de 6,5 litros de agua por cada 8 kg de estiércol.

Preparación de tratamientos y control

Se llevó a cabo un total de tres tratamientos, de los cuales dos incluyeron melaza, estiércol y *Lemna* sp. a diferentes proporciones; mientras que, el que no contuvo *Lemna* sp. sirvió como control. Este diseño permitió evaluar la influencia de *Lemna* sp. en los tratamientos, comparando su efectividad en la calidad del fertilizante, tal como lo establecido por Bonetta *et al.,* [7] en su estudio sobre elaboración de fertilizantes, en el cual dos de los tratamientos incluyeron la adición de residuos de plantas; mientras que, el tercer tratamiento se utilizó como control, sin la adición de estos residuos.

Los tratamientos se realizaron por triplicado. Montgomery [8] establece que la realización de los tratamientos por triplicado es fundamental para garantizar la repetibilidad y la validez estadística de los resultados obtenidos, porque permite reducir la variabilidad de los datos y proporciona una estimación más precisa de la media y la variación de los resultados.

A continuación, se presentan las proporciones de los reactivos utilizados en cada uno de los tratamientos y el control (Tabla 2):

Tabla 2. Proporciones de reactivos en tratamientos y control

	Control		**Trat 1**			**Trat 2**		
	Melaza	Estiércol	*Lemna* sp.	Melaza	Estiércol	*Lemna* sp.	Melaza	Estiércol
	50%	50%	50%	25%	25%	25%	37,5%	37,5%
R1	3 L	3 L	3 L	1,5 L	1,5 L	1,5 L	2,25 L	2,25 L
R2	3 L	3 L	3 L	1,5 L	1,5 L	1,5 L	2,25 L	2,25 L
R3	3 L	3 L	3 L	1,5 L	1,5 L	1,5 L	2,25 L	2,25 L

R1: repetición 1, R2: repetición 2, R3: repetición 3.

Monitoreo diario del pH

El pH debe ser monitoreado para evaluar su comportamiento a lo largo del tiempo durante la biodigestión. Cruz *et al.,* [9] indican que un pH cercano a 5 es indicativo de un ambiente favorable para la actividad de los microorganismos anaerobios. La digestión anaerobia descompone la materia orgánica sin oxígeno, generando ácidos orgánicos que tienden a disminuir el pH. Por lo que, durante el proceso de biodigestión anaerobia, se monitoreó el pH por 13 días para evaluar su estabilidad en los tratamientos. Siguiendo lo planteado por García *et al.,* [10], la decisión de interrumpir el proceso de biodigestión se tomó cuando se obtuvieron al menos dos repeticiones del pH en un rango cercano a 5, un indicador de equilibrio y adecuada descomposición de los sustratos.

En los primeros ocho días, se utilizaron tiras medidoras de pH marca Tasomed para las mediciones. A partir del noveno día, se empleó un pH-metro marca Thermo Scientific, modelo VSTR40A2 Orion para obtener mediciones cuantitativas precisas. Una vez alcanzado el pH deseado, se procedió a destapar el biodigestor para permitir la entrada de oxígeno, fomentando la actividad de microorganismos aerobios que descomponen los ácidos orgánicos acumulados. Al respecto, se ha establecido que la liberación de iones OH^- ayuda a incrementar el pH y mejora las características químicas y biológicas del biofertilizante [11].

Envasado de los fertilizantes

Una vez finalizado el proceso de digestión anaerobia, se tamizaron los fertilizantes con una malla de 1 mm para separar la fracción líquida rica en nutrientes, de la fracción sólida, siguiendo las indicaciones de López *et al.,* [12] quien menciona que, la separación de la fracción líquida del estiércol fermentado es fundamental para obtener un fertilizante líquido concentrado. De esta forma, la fracción líquida se envasó en

recipientes de plástico de 1 litro previamente desinfectados, según las recomendaciones de la ISO Standard 11607-1:2019/Amd 1:2023 [13]. Para la desinfección de los envases se siguió el protocolo de González *et al.,* [14], empleando jabón y agua caliente, seguido por enjuague con agua limpia y desinfección con alcohol al 70%.

Análisis fisicoquímicos

Se evaluaron parámetros clave para caracterizar la calidad de los fertilizantes obtenidos tras la digestión anaerobia, tanto en los tratamientos como en el control.

Conductividad eléctrica

En primer lugar, se calibró el conductímetro marca: Lutron, modelo: PCD-431, y luego se procedió a la preparación de la muestra para medir la conductividad eléctrica, registrando la lectura correspondiente.

pH

Se calibró el pH-metro de mesa, modelo PHS 3C y se procedió a la preparación de la muestra para llevar a cabo la medición con el pH-metro, registrando el valor del pH.

Nitrógeno total

El nitrógeno total se estimó de acuerdo al método de Kjeldahl [15]. Para ello, se pesó la muestra para llevar a cabo la digestión a 600 °C. Se enfrió y adicionó agua destilada para proceder con la destilación en el equipo de destilación automática Marca Tanaka, modelo AD-7. Se tituló con HCl y se calculó el contenido de nitrógeno presente en la muestra.

Carbono orgánico

La estimación del carbono orgánico se realizó mediante el método de Walkley-Black. El método consistió en la oxidación de la materia orgánica a 120 °C con una mezcla de dicromato de potasio y ácido sulfúrico, y la titulación del excedente se realizó con sulfato ferrosol, según lo establecido por Carreira y Mous [16].

Se pesó 1,0 g de muestra de suelo y se colocó en un Erlenmeyer de 500 mL, se agregaron 10 mL de dicromato de potasio 1N y se mezcló suavemente. Luego se adicionó 20 mL de ácido sulfúrico concentrado, se mezcló por un minuto y se dejó reposar 30 minutos, se agregó 200 mL de agua destilada, 10 mL de ácido fosfórico al 85%, 0,2 g de NaF y 30 gotas de indicador fenantrolina. Se tituló con solución de sulfato ferroso 0,5 N hasta obtener el viraje de azul verdoso a café rojizo, según lo indicado por Nelson y Sommers [17].

Materia orgánica

El primer paso en la conversión de materia orgánica es la cuantificación del carbono orgánico, y se utilizan métodos como la oxidación húmeda o la digestión ácida para determinar el contenido de carbono orgánico [18]. Heaton *et al.,* [19] establecen que el factor de Van Bemmelen que es 0,58, se utiliza para convertir el contenido de carbono orgánico a materia orgánica, indicando que el carbono orgánico representa aproximadamente el 58% de la materia orgánica total.

Fósforo asimilable

La extracción del fósforo asimilable en las muestras se realizó con una solución de bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$, 0,5 M). Se agitó la mezcla durante 30 minutos y se filtró. Para cuantificar, se mezcló 1 mL de solución diluida, 2 mL de ácido bórico y 3 mL de reactivos (ácido sulfúrico, molibdato de amonio, ácido ascórbico, tartrato antimónico de potasio y agua destilada). Pasada una hora, se midió la absorbancia en un espectrofotómetro marca Genesys 20 Thermo Scientific a 882 nm, según la metodología establecida por Kuo [20].

Evaluación sensorial

Se realizó una evaluación sensorial del color, en la que se colocó una muestra del fertilizante en una superficie plana y se observó bajo la luz natural o artificial. Al mismo tiempo, se hizo una evaluación de la consistencia, según lo establecido por Baker *et al.,* [21] anotando si la misma era granular, en polvo, pastosa o líquida.

Fase III: Comparación de los fertilizantes obtenidos basados en *Lemna* sp. en los diferentes tratamientos con un fertilizante comercial, mediante análisis fisicoquímicos y sensorial.

Se hizo una comparación desde el punto de vista fisicoquímico y sensorial de los fertilizantes producidos, con el fertilizante líquido comercial marca Lumbricola a base de humus de lombriz, obtenido de la empresa Sumiateca, (Suministro y Asistencia Técnica Agropecuaria C.A), mediante el contraste de características obtenidas en los análisis practicados: pH, nitrógeno total, carbono orgánico, fósforo asimilable, color, olor, consistencia, determinados mediante los procedimientos descritos con anterioridad.

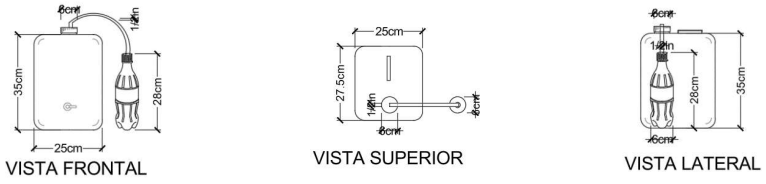
Adicionalmente, se realizó un análisis estadístico (ANOVA y Test de Tukey) para determinar diferencias significativas entre los distintos tratamientos, el control y el fertilizante comercial, empleando el paquete de análisis estadístico SAS® (SAS Institute, Inc., 1989) y el programa Python Versión 3.13.

Resultados y Discusión

En esta etapa se detallan los resultados obtenidos, evidenciando el cumplimiento de los objetivos mediante el diseño seleccionado para la investigación, los instrumentos de recolección pertinentes y las fases de la investigación.

Construcción de biodigestores anaerobios adecuados para la obtención de los fertilizantes

Se construyeron nueve biodigestores cada uno con el mismo diseño, siguiendo el diseño obtenido con la herramienta AutoCAD, tal como se muestra en la siguiente figura (Figura 1):



Leyenda: La figura corresponde a imágenes de las vistas frontal, lateral y superior del diseño de los biodigestores construidos.

Figura 1. Diseño de biodigestor por AutoCAD

El biodigestor construido cuenta con un bidón de material PVC de 20 L como tanque de almacenamiento, una entrada de material para el fertilizante, una manguera transparente de ½" por donde se conduce el biogás a una cámara de almacenamiento (botella de plástico de 1 L) y una válvula en la parte de abajo donde se realiza la toma de muestra, para medir el pH del digestato. Este digestor fue más eficiente que el biodigestor tubular obtenido por Gómez [22], en el que se usó una bolsa plástica negra de 10 m de largo y 2,5 de ancho como tanque de almacenamiento, requiriendo de varias pruebas y remplazos, debido a que el material no tenía la elasticidad requerida y llegaba a romperse con facilidad.

Para la elaboración de los biodigestores se detallan a continuación, los costos de los materiales utilizados para la construcción de los mismos (Tabla 3):

Tabla 3. Costo de materiales y accesorios

Ítem	Descripción	Unidad comercial	Cantidad por biodigestor	Cantidad total	Costo unitario ($)	Costo total ($)
1	Bidón de 20 L	Unidad	1	9	3	27
2	Manguera transparente de ½ “	Metro	0,80	7,2	1	7,2
3	Válvulas de ½ “	Unidad	1	9	0,5	4,5
4	Fitting de ½ “	Unidad	1	9	0,5	4,5
5	Abrazaderas de metal de ½ “	Unidad	1	9	0,5	4,5
6	Silicón transparente	Unidad	1	1	5	5
7	Botella de 1 L	Litro	1	9	0,80	7,2
8	Cinta plástica para embalar	Unidad	1	1	4	4
Total ($)						**63,9 ≃ 64**
Costo total por Litro de fertilizante ($)						**0,35**

El costo por litro de fertilizante fue de $ 0,35, lo cual coincide con lo estimado por Guerra y Páez [4], quienes obtuvieron por un biodigestor de capacidad de 500 L un costo unitario de $ 186,50; siendo el costo por litro de fertilizante de $ 0,37. Es importante mencionar, que los biodigestores comercializados en el país alcanzan un valor de alrededor de $ 800, según la información proporcionada por Resinca [23], por lo que la construcción de los biodigestores en este trabajo representó un valor por litro de fertilizante obtenido, dos veces menor al biodigestor comercial.

Análisis fisicoquímicos y sensoriales de los fertilizantes obtenidos basados en *Lemna* sp. en los diferentes tratamientos

A continuación, se presentan los resultados de los parámetros fisicoquímicos y sensoriales practicados a los fertilizantes producidos en los diferentes tratamientos.

Medición de volumen del fertilizante

El volumen de fertilizante obtenido para cada tratamiento y control se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 4. Volumen obtenido de fertilizante

Volumen obtenido (L)		
Muestra	**Composición**	**Resultado**
Control	50% Estiércol 50% Melaza	80,02
Trat. 1	50% *Lemna* sp. 25% Estiércol 25% Melaza	8,60,05
Trat. 2	25% *Lemna* sp. 37,5% Estiércol 37,5% Melaza	8,60,10

Leyenda: Trat. 1: Tratamiento 1, Trat. 2: Tratamiento 2.

No se encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre el volumen obtenido del Trat. 1 y el Trat. 2. dado que ambos tratamientos presentaron una media de 8,6 L; pero si se obtuvieron diferencias significativas ($p < 0,05$) en el volumen obtenido del control con los volúmenes de los tratamientos, lo que indica que la adición de la *Lemna* sp. aumentó significativamente el volumen en comparación con el control, debido a que se ha reportado que la biomasa fresca de la planta tiene entre 92 y 95% de humedad [9].

Análisis fisicoquímicos y sensoriales

Se llevaron a cabo una serie de análisis que permitieron evaluar las propiedades de los fertilizantes producidos en los diferentes tratamientos y control (Tabla 5).

Tabla 5. Resultado de análisis fisicoquímicos y sensoriales

Análisis	Control (50% estiércol y 50% melaza)	Trat. 1 (50% *Lemna* sp., 25% estiércol y 25% melaza)	Trat. 2 (25%, *Lemna* sp., 37.5% estiércol y 37.5% melaza)
pH	4,580,01	4,340,02	4,490,01
CE. (dS/m)	7,730,29	11,800,29	9,530,49
Nitrógeno total % (p/v)	13,170,28	5,260,05	8,970,08
Fósforo asimilable % (p/v)	No detectable	No detectable	No detectable
Carbono orgánico % (p/v)	12,040,16	6,010,31	7,750,40
Materia orgánica % (p/v)	20,740,16	10,360,31	13,360,40
Color	Marrón oscuro	Marrón claro	Marrón claro
Olor	Dulce	Agridulce/ fermentado	Agridulce/ Fermentado
Consistencia	Líquido	Líquido	Líquido

Los valores de pH registrados en los dos tratamientos y el control (4,58; 4,34 y 4,49, respectivamente) revelan un ambiente predominantemente ácido en el digestato final. Esta tendencia, fue más evidente en los tratamientos con mayor carga de *Lemna* sp. (Trat. 1 y Trat. 2) porque este sustrato, al ser fácilmente biodegradable, promueve una actividad acelerada de las bacterias acidogénicas. Este fenómeno sugiere que la generación de ácidos fue más rápida que su transformación, lo que causó el descenso del pH. Asimismo, este nivel de acidez indicó que el proceso requirió de una fase posterior de estabilización para neutralizar el producto antes de su uso, evitando posibles efectos de inhibición microbiana o fitotoxicidad en el suelo. Este comportamiento coincide con lo expuesto por Tognetti *et al.,* [24], quienes en sus investigaciones sobre residuos orgánicos enfatizan que la calidad y madurez del fertilizante mejoran significativamente al implementar una fase de maduración posterior. Por esta razón, se sugiere que, para futuras aplicaciones, el fertilizante pase por una fase aerobia (aireación) posterior a la biodigestión, lo cual permitirá incrementar el pH de forma natural, reducir la inhibición microbiana causada por la acidez y garantizar un producto más equilibrado para los cultivos.

Los valores obtenidos para la conductividad eléctrica en los tratamientos y el control, acusaron un valor mínimo de 7,73 dS/m para el control y máximo de 11,80 dS/m para el Trat. 2, los cuales fueron notablemente altos en comparación con lo reportado por Rhoades [25], quien menciona que los valores de conductividad eléctrica en suelos agrícolas, oscilan entre 0 y 3 dS/m. Estos valores altos de conductividad eléctrica pueden

deberse a una concentración elevada de sales en las soluciones, lo que está estrechamente relacionado con la acidez y el pH de los fertilizantes, tal como lo señalan Ndegwa y Thompson [26].

Con relación al análisis de nitrógeno total, se pudo evidenciar el aumento en el contenido de nitrógeno al añadir más cantidad de estiércol al fertilizante orgánico, el cual presenta una alta concentración de compuestos nitrogenados. López [27] indica que el estiércol es considerado un fertilizante orgánico por excelencia, debido a su alto contenido en nitrógeno y de materia orgánica.

Ahora bien, en referencia al fósforo asimilable, no se logró su detección en las muestras de fertilizante, a pesar de que la acidez del medio (pH bajo) debió facilitar la liberación de este nutriente desde la estructura vegetal de la *Lemna* sp. hacia el medio líquido. Este fenómeno se puede atribuir a los altos valores de conductividad eléctrica registrados, lo que indica una elevada presencia de sales que pueden comprometer la disponibilidad del fósforo. Los resultados permiten suponer que el fósforo se vuelve menos disponible a medida que el pH disminuye y la conductividad eléctrica aumenta, lo que resalta la importancia de mantener un pH adecuado para la disponibilidad de este nutriente. En este contexto, el pH de 4 a 4,58 observado en los tratamientos analizados, puede haber llevado a la precipitación del fósforo, impidiendo su detección en las muestras estudiadas. De acuerdo con Barrow [28], en ambientes con alta concentración de cationes, el fósforo tiende a formar compuestos insolubles que limitan su asimilabilidad. Este comportamiento también se explica por lo expuesto por Jilimane [29], quien señala que un pH extremo y un desequilibrio salino afectan la estabilidad de los nutrientes; por lo tanto, la ausencia de fósforo asimilable sugiere la necesidad de una fase de estabilización posterior, que permita liberar este nutriente y mejorar la eficiencia del fertilizante antes de su aplicación al suelo.

Los resultados obtenidos para el carbono orgánico y materia orgánica en los diferentes tratamientos muestran una clara disminución en comparación con el control, con diferencias significativas ($p < 0,05$), lo que sugiere que la inclusión de *Lemna* sp. en los tratamientos pudo haber afectado negativamente la concentración de carbono orgánico. La *Lemna* sp., aunque es un recurso valioso por su capacidad de absorción de nutrientes y su potencial para mejorar la calidad del agua, pudo haber competido con otros componentes orgánicos en el proceso de digestión anaerobia, reduciendo así la cantidad de carbono orgánico disponible [30]. Se podría considerar la adición de materiales ricos en carbono a los fertilizantes obtenidos, como residuos de cultivos, compost o estiércol bien descompuesto, dado que estas enmiendas no solo incrementarían el carbono orgánico, sino que también mejorarían la actividad microbiana necesaria para la mineralización de los nutrientes en el suelo [31].

Los resultados de las evaluaciones sensoriales de los fertilizantes obtenidos de los tratamientos y el control, muestran variaciones significativas en color y olor, lo que puede atribuirse a la composición de cada mezcla y a los procesos de fermentación y descomposición que ocurren durante la biodigestión (Tabla 6).

El control, compuesto en partes iguales de estiércol y melaza, presentó un color marrón oscuro, que es típico de las mezclas ricas en materia orgánica; mientras que, el olor dulce indicó la presencia de azúcares solubles en la melaza, que pueden promover la actividad microbiana, generando un ambiente propicio para la descomposición aeróbica. Además, la consistencia líquida es esperada debido a la alta proporción de melaza, que actúa como un líquido portador en el proceso de biodigestión.

Por su parte, los fertilizantes de los Trat. 1 y Trat. 2, resultaron en fertilizantes de color marrón claro, lo que sugiere una menor concentración de sólidos en comparación con el control. El olor puede ser indicativo de una fermentación anaeróbica más pronunciada, posiblemente debido a la proporción de *Lemna* sp., que puede liberar compuestos volátiles durante su descomposición. La comparación de los resultados sensoriales entre los tratamientos sugiere que la inclusión de *Lemna* sp. afecta el perfil sensorial de los mismos. De tal forma que, el cambio en el color y el olor, junto con la consistencia líquida, refleja la interacción entre los componentes orgánicos y el proceso de biodigestión.

Comparación de los fertilizantes obtenidos basados en Lemna sp. en los diferentes tratamientos con un fertilizante comercial

La Tabla 6 muestra la comparación de los resultados fisicoquímicos y sensoriales obtenidos en las muestras de fertilizantes producidos en el presente trabajo con en el fertilizante comercial.

Tabla 6. Análisis fisicoquímicos y sensoriales de los fertilizantes

Análisis	Control (50% estiércol, 50% melaza)	Trat 1. (50% *Lemna* sp., 25% estiércol, 25% melaza)	Trat 2. (25% *Lemna* sp., 37.5% estiércol, 37.5% melaza)	Fertilizante comercial
pH	4,580,01	4,340,02	4,490,01	6,800,08
CE. (dS/m)	7,730,29	11,800,29	9,530,49	2,400,08
Nitrógeno total % (p/v)	13,170,28	5,260,05	8,970,08	2,130,10
Fósforo asimilable % (p/v)	No detectable	No detectable	No detectable	1,310,03
Carbono orgánico % (p/v)	12,040,16	6,010,31	7,750,40	12,750,05
Materia orgánica % (p/v)	20,740,16	10,360,31	13,360,40	21,970,12
Color	Marrón oscuro	Marrón claro	Marrón claro	Marrón oscuro
Olor	Dulce	Agridulce/ Fermentado	Agridulce/ Fermentado	Terroso
Consistencia	Líquido	Líquido	Líquido	Líquido

Se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre el control, los tratamientos y el fertilizante comercial, en el pH, el cual acusó un valor de 6,80±0,08 en el fertilizante comercial y que se encuentra en el rango aceptable por la literatura para los fertilizantes en general [9]. Por otro lado, la conductividad eléctrica, presentó diferencias significativas ($p < 0,05$) entre el control, los tratamientos y el fertilizante comercial, el cual exhibió un valor de 2,400,08 dS/m, valor aceptable de acuerdo a lo reportado en otros trabajos [25] .

El nitrógeno total presentó diferencias significativas ($p < 0,05$) entre el control, los tratamientos y el producto comercial; sin embargo, se pudo evidenciar que el valor más cercano al obtenido por el fertilizante comercial fue el del Trat. 1, teniendo como resultado 5,26%±0,05, el cual se contrasta con el valor obtenido por Jilimane [29] de 4,47% empleando *Lemna minor* como material de compostaje.

El fósforo asimilable no se detectó en ninguna unidad experimental; mientras que, el fertilizante comercial dispuso de 1,31%±0,03 de fósforo asimilable, valor dentro del rango aceptable para suelos (entre 0,5 a 1%), lo cual se debe a que el fraccionamiento de la materia orgánica y la aireación producida por las lombrices en el humus favorecen la mineralización del fósforo, según lo descrito por Tognetti [24].

Se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) en el carbono orgánico entre todos los tratamientos y el fertilizante comercial (12,75±0,05%); sin embargo, no hubo diferencia significativa ($p > 0,05$) entre el control y el producto comercial. Lo mismo ocurrió con el porcentaje de materia orgánica, el cual se relaciona directamente con el carbono orgánico, siendo el valor para el fertilizante comercial de 21,97±0,12%. Tal comportamiento puede deberse a que el producto comercial proviene del humus de lombriz, el cual es el producto resultante del proceso de transformación digestiva de la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*). Labastidas *et al.,* [32] plantean que, en este tipo de fertilizantes, la elevada carga enzimática hace que este producto sea de mayor calidad que cualquier otro abono orgánico.

Por último, se realizó una comparación de los parámetros sensoriales de los fertilizantes control, Trat. 1, Trat. 2 y el producto comercial, teniendo como resultado que el control presentó características similares al producto comercial. Ambos tratamientos, mostraron un tono marrón claro y emitieron un olor agridulce/ fermentado; mientras que, el fertilizante comercial exhibió un color marrón oscuro similar al control, pero con un olor terroso, característico del humus de lombriz, según lo señalado por Vermiduero [33].

En general, las variaciones significativas de los parámetros analizados de los fertilizantes orgánicos producidos, se deben a la composición de los materiales utilizados, que incluyen *Lemna* sp., estiércol y melaza en diferentes proporciones. González y Pérez [34] expone que la calidad y el valor nutricional de estos fertilizantes están estrechamente relacionados con los insumos seleccionados, subrayando la importancia de elegir adecuadamente las materias primas.

Adicionalmente, el manejo de los biodigestores es crucial para la eficiencia en la producción de fertilizantes orgánicos. La gestión del pH durante la biodigestión anaerobia es un factor determinante, como se pudo apreciar en este estudio, un bajo pH afectó negativamente los parámetros analizados, lo que indica que el control de este parámetro debe ser prioritario. La fase de aireación posterior a la biodigestión anaerobia, también es crítica, ya que ayuda a restaurar el equilibrio del pH y promueve un ambiente propicio para la actividad microbiana fundamentalmente mineralizadora de nutrientes. Finalmente, la incorporación de aditivos en los fertilizantes puede mejorar las características del producto final, actuando como reguladores del pH y aumentando la solubilidad de los nutrientes, lo que es especialmente relevante para la producción de fertilizantes a partir de mezclas orgánicas.

Conclusiones

El diseño de los biodigestores resultó ser una solución eficiente y económica para producir fertilizantes, ya que asegura condiciones herméticas que favorecen la biodigestión anaerobia.

La inclusión de *Lemna* sp. en los tratamientos generó un mayor volumen líquido de fertilizantes en comparación con el control; este hecho es evidencia de una actividad microbiana más intensa en la fase acidogénica. Sin embargo, los análisis fisicoquímicos revelaron que los tratamientos presentaron valores nutricionales inferiores al control. Lo anterior demuestra que la actividad se concentró en la fase acidogénica y no logró una mineralización completa de los nutrientes. Este fenómeno ocurre porque, aunque la producción de ácidos sea elevada, si el pH no se recupera, se inhibe la fase metanogénica y se limita la calidad final del producto.

Además, se halló una relación significativa entre el pH y la conductividad eléctrica con la calidad de los fertilizantes, lo que subraya la importancia de la aireación para preservar condiciones adecuadas y favorecer la presencia de fósforo y nitrógeno. Aunque el fertilizante control mostró mejores características en cuanto a carbono orgánico y materia orgánica, la *Lemna* sp. es un insumo valioso. Bajo un manejo técnico de los biodigestores, posee el potencial de producir fertilizantes orgánicos con una calidad comparable a la de los productos comerciales..

Referencias bibliográficas

[1] E. P. Cartagena Beltran, “Análisis de factibilidad para la obtención de un biofertilizante producido a través de la especie Eichornia crassipes procedente de la laguna del Limoncocha”, Trabajo de maestría en gestión ambiental, Universidad SEK, 2018. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/2864

[2] E. Jaramillo Calderon, “Propuesta de diseño de un biodigestor casero”, Tesis de grado, Instituto Politécnico Nacional, México, D.F., 2011 [En línea]. Disponible en: https://es.scribd.com/document/458694461/Propuesta-de-diseno-de-un-biodigestor-casero

[3] T. Laurel, “Ventajas de los reactores discontinuos en el tratamiento de contaminantes,” *Journal of Environmental Engineering and Technology*, vol. 12, no. 4, pp. 175–182, 2001.

[4] S. Guerra y I. Páez, *Diseño y construcción de un biodigestor doméstico para producir biogás,* Trabajo de grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador 2022 [En línea]. Disponible en: https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15.000/23503

[5] J. Agüero, "La melaza y su impacto en el desarrollo de microorganismos en la agricultura," *Revista de Biotecnología y Agricultura,* vol. 15, no. 3, pp. 45–58, 2009.

[6] M. A. López, "Uso del estiércol en la producción agrícola: Beneficios para el suelo y los cultivos" *Revista de Ciencias Agrarias,* vol. 15, no. 1, pp. 45–52, 2014.

[7] S. Bonetta y M. López, "Responses of tomato plants to different rates of humic-based fertilizer and NPK fertilization," *Journal of Agricultural Science,* vol. 6, no. 2, pp. 123–135, 2014.

[8] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments,* 8th ed., Wiley, 2013 [En línea], Disponible en: https://faculty.ksu.edu.sa/sites/default/files/douglas_c._montgomery-design_and_analysis_of_experiments-wiley_2012_edition_8.pdf

[9] J. Cruz, t al. "Efectos de la biomasa de *Lemna* en el proceso de compostaje" *Revista de Ciencias Ambientales,* vol. 12, no. 3, pp. 45–58, 2018.

[10] M. García, Et al. "Influencia del pH en la digestión anaerobia: Indicadores de estabilidad en el proceso" *Revista de Tecnología Ambiental,* vol. 15, no. 3, pp. 78–92, 2020.

[11] M. Bedassa, "Soil acid Management using Biochar: Review", *Int. J. Agric. Sc. Food Technol.*, vol. 6, no. 2, pp. 211-217, 2020. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.17352/2455-815X.000076

[12] P. López and A. Martínez, "Evaluación de la eficiencia de *Lemna* sp. en la producción de biogás y su efecto en la calidad del digestato" *Journal of Environmental Management,* vol. 250, pp. 109–115, 2020.

[13] *Packaging for terminally sterilized medical devices — Part 1: Requirements for materials, sterile barrier systems and packaging systems — Amendment 1*, ISO Standard 11607-1:2019/Amd 1:2023, 2023.

[14] R. González, *Efectividad de métodos de limpieza en envases plásticos,* 2023.

[15] J. Bremmer, "Método Kjeldahl para la determinación de nitrógeno en muestras orgánicas e inorgánicas" *Revista de Química Analítica,* vol. 22, no. 3, pp. 150–158, 1996.

[16] D. Carreira y C. Mous, *Carbono orgánico (Método de Walkley & Black)*, INTA Castelar, 2020.

[17] D. W. Nelson and L. E. Sommers, *Total carbon, organic carbon, and organic matter.* Methods of Soil Analysis: Chemical Methods, Soil Science Society of America,1996. [En línea]. Disponible en: https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssabookser5.3.c34

[18] M. Ruiz Dager, C. E. Carrillo de Cori, F. Sosa, L. M. Aular, R. Mora, L. Castillo, B. Ortega, E. Castillo, E. Ramírez, J. Rodríguez, M. León, C. Silva, M. R. Tovar, A. Martínez, A. M. Reverón y F. Gámez. "Comparación de métodos para analizar materia orgánica en materiales" en *Memorias del XXII Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo,* Caracas, Venezuela, pp. 20-25. 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/327402988_COMPARACION_DE_METODOS_PARA_ANALIZAR_MATERIA_ORGANICA_EN_MATERIALES_ORGANICOS

[19] L. Heaton, M. A. Fullen, y R. Bhattacharyya, "Critical Analysis of the van Bemmelen Conversion Factor used to Convert Soil Organic Matter Data to Soil Organic Carbon Data: Comparative Analyses in a UK Loamy Sand Soil," *Espaço Aberto,* vol. 6, no. 1, pp. 35–44, 2016, [En línea] https://n9.cl/0iqv6w

[20] S. Kuo, "Extraction of available phosphorus from soils by sodium bicarbonate" *Methods of Soil Analysis,* Soil Science Society of America, pp. 869–874, 1996.

[21] A. V. Barker y H. A. Mills, "Essential plant nutrients: Functions and management," en *Handbook of Plant Nutrition*, Boca Raton, FL, EE. UU.: CRC Press, 2018, pp. 1–30.

[22] S. Gómez, *Diseño, construcción y puesta a punto de un biodigestor tubular*, Trabajo de grado, Departamento de CC e Ing. Materiales e Ing. Química, Carazo, Nicaragua, 2012.

[23] Mercado Libre, *Biodigestor 1500L Resinca.* [En línea]. Disponible en: https://articulo.mercadolibre.com.ve

[24] C. Tognetti, F. Mazzarino, and Laos, "Improving the quality of municipal organic waste compost," *Bioresource Technology*, vol. 98, pp. 1067–1076, 2007. [En línea]. Disponible en: https://n9.cl/exqgr

[25] J. D. Rhoades, "Electrical conductivity in soils: Measurement and interpretation," *Journal of Soil Science*, vol. 161, no. 3, pp. 123–134, 1996.

[26] P. M. Ndegwa y S. A. Thompson, "Integración del compostaje y vermicompostaje para la gestión de residuos orgánicos," *Gestión de Residuos,* vol. 21, no. 3, pp. 217–227, 2001.

[27] M. A. López, "Uso del estiércol en la producción agrícola: Beneficios para el suelo y los cultivos," *Revista de Ciencias Agrarias,* vol. 15, no. 1, pp. 45–52, 2014.

[28] N. J. Barrow, "Interacciones entre el fosfato y otros iones en el suelo: Implicaciones para la disponibilidad," *Revista de Ciencia del Suelo*, vol. 81, no. 2, pp. 251–261, 2017.

[29] K. Jilimane, "Nitrogen and phosphorus release in soil and fertiliser value of lemna minor biomass relative to chicken litter compost", Tesis de maestría, School of Agricultural, University of KwaZulu-Natal, 2019 [En línea]. Disponible en: https://researchspace.ukzn.ac.za/items/d55eeb38-2616-42c7-a7aa-a3da1b24961c

[30] J. García and A. Martínez, "Evaluación de fertilizantes líquidos orgánicos: contenido de carbono y su efecto en la fertilidad del suelo" *Revista de Ciencias Agrarias,* vol. 45, no. 2, pp. 123–135, 2018.

[31] A. López and S. Martínez, "Fertilizantes: Tipos y aplicaciones en la agricultura moderna," *Revista de Ciencias Agrarias*, vol. 15, no. 2, pp. 45–60, 2021.

[32] M. Labastidas and D. R. Díaz Cuellar, "El humus de lombriz o vermicompost," *Boletín divulgativo*, Universidad de los Andes, 2007 [En línea]. Disponible en: http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/18594

[33] Vermiduero, "10 datos importantes sobre el humus de lombriz*"* 2024 [En línea]. Disponible en: https://n9.cl/z8vrwb

[34] R. González y S. Pérez, "Impacto de la materia orgánica en la calidad de los fertilizantes producidos por digestión anaerobia," *Agricultural Sciences*, vol. 14, no. 3, pp. 145–158, 2022.

Revista Tecnocientífica URU
Universidad Rafael Urdaneta
No. 29 Julio - Diciembre 2025
Depósito Legal: PPI 201402ZU4464
ISSN: 2343-6360
CC BY-SA 4.0

Prevalencia bacteriana en la Unidad de Cuidados Intensivos de un Hospital Universitario (Falcón, Venezuela): Un problema de salud emergente

Bacterial Prevalence in the Intensive Care Unit of a University Hospital (Falcón, Venezuela): An Emerging Health Problem

Ricardo A. Silva-Alvarado
Universidad del Zulia. Facultad Experimental de Ciencias. Maracaibo-Venezuela.
https://orcid.org//0000-0003-0178-6490 | Correo electrónico: ricar757@gmail.com

Aleivi E. Pérez-Briceño
Universidad del Zulia. Facultad Experimental de Ciencias. Maracaibo-Venezuela.
https://orcid.org.//0000-0003-2615-8917 | Correo electrónico: aleiviciencias@gmail.com

Ricardo J. Naveda
Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda (UNEFM).
https://orcid.org//0009-0001-3489-3623 | Correo electrónico: rnaveda23@gmail.com
Recibido:02-11-2025 Admitido: 17-11-2020 Aprobado:15-12-2025
DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.20085985

Resumen
Las bacterias prevalentes en espacios hospitalarios, constituyen una importante causa de daños en los centros sanitarios de todo el mundo y a menudo son consecuencia de procedimientos invasivos, uso de dispositivos, inmunosupresión o la hospitalización prolongada del paciente. El objetivo de esta investigación se basó en determinar bacterias prevalentes en la Unidad de Cuidados Intensivos del Hospital Universitario de Coro, Falcón. Venezuela. Para la cuantificación de carga bacteriana, se siguió la técnica gravimétrica, y las bacterias fueron identificadas mediante pruebas bioquímicas convencionales. Se obtuvo una concentración promedio de 16,63 UFC/m^3, lo cual excede los valores permitidos dentro de la UCI. Las bacterias prevalentes fueron *Pseudomonas aeruginosa* (31,25%), seguido de *Staphylococcus aureus* y *Staphylococcus epidermidis* (18,75% en cada uno de los casos respectivamente), *Klebsiella pneumoniae* y *Serratia marcescens* (12,50% en cada uno de los casos) y finalmente *Acinetobacter baumannii* (6,25%). Se recomienda el monitoreo constante de la biota en UCI para establecer medidas de saneamiento y control frente a la persistencia de bacterias dentro de estos espacios, para evitar su propagación y por ende la colonización en los pacientes hospitalizados.
Palabras clave: Infección hospitalaria, unidad de cuidados intensivos, contaminación del aire interior, monitoreo ambiental, bacterias gramnegativas.

Abstract
Bacteria prevalent in hospital settings are a significant cause of harm in healthcare facilities worldwide and are often a consequence of invasive procedures, device use, immunosuppression, or prolonged hospitalization. The objective of this research was to determine the prevalent bacteria in the Intensive Care Unit of the University Hospital of Coro, Falcón, Venezuela. The gravimetric technique was used to quantify the bacterial load, and the bacteria were identified using conventional biochemical tests. An average concentration of 16.63 CFU/m³ was obtained, which exceeds the permitted levels within the ICU. The most prevalent bacteria were Pseudomonas aeruginosa (31.25%), followed by Staphylococcus aureus and Staphylococcus epidermidis (18.75% each), Klebsiella pneumoniae and Serratia marcescens (12.50% each), and finally Acinetobacter baumannii (6.25%). Constant monitoring of the bacterial microbiota in

the ICU is recommended to establish sanitation and control measures to address the persistence of bacteria within these spaces, prevent their spread, and consequently, colonization of hospitalized patients.
Keywords: *Cross Infection, Intensive Care Unit, Indoor Air Pollution, Environmental Monitoring, Gram-Negative Bacteria.*

Introducción

Las unidades de cuidados intensivos (UCI) constituyen un entorno crítico para el manejo de infecciones presentadas en el paciente, sumado a la resistencia que han venido teniendo a los antibióticos, así como la multirresistencia natural, permitiendo que la microbiología clínica desempeñe un rol importante en la diagnosis [1]. Muchos de los pacientes se ven afectados por estas infecciones cada año, los cuales se presentan en todas las escalas hospitalarias a nivel mundial, incrementado los costos médicos y la prolongación de estadía del paciente en el ámbito hospitalario, además de presentar riesgos para la salud del mismo paciente, familiares y personal asistencial [2]. El ambiente hospitalario constituye un reservorio y una fuente de infección importante, ya que existen varias áreas que rodean al paciente tales como: el aire, agua sanitaria que entra en contacto con el propio paciente, con el personal y con los dispositivos médicos, comida, superficies, instrumentos que contactan con piel y mucosas permitiendo así la llegada de microorganismos bacterianos una vez que el paciente ingresa al espacio con una pernota superior a las 48 horas [3].

Las Infecciones Adquiridas en un Hospital (IAH) más comunes son las infecciones del sitio quirúrgico, infección asociada a catéter central, infección de trato urinario por catéter urinario, neumonía asociada a ventilación, neumonía adquirida en el hospital, entre otras; considerándose la UCI como una de los espacios de mayor seguridad para el paciente, ya que el mismo puede presentar ciertas condiciones asociadas a una mayor susceptibilidad para la adquisición de procesos infecciosos intrahospitalarios, siendo las bacterias de mayor prevalencia *Staphylococcus aureus*, *Enterococcus*, *Escherichia coli*, estafilococos coagulasa negativo, *Klebsiella* y *Pseudomonas aeruginosa* [4].

Esta investigación, se planteó como objetivo, determinar las bacterias prevalentes en la Unidad de Cuidados Intensivos (UCI) en un Hospital Universitario de Falcón-Venezuela.

Materiales y Métodos

La investigación fue de tipo exploratoria y de corte transversal, el diseño de la investigación fue de campo y el diseño experimental que se siguió fue cuasi-experimental. La población estuvo representada por la totalidad de las cepas bacterianas aisladas en el espacio de UCI del Hospital Universitario de Falcón-Venezuela, considerando como criterio de inclusión las muestras tomadas de la UCI y que el espacio tuviera en un periodo mayor a siete días sin limpieza profunda; y como criterio de exclusión aquellos que no cumplan con el criterio de inclusión.

Toma de las muestras

Para la toma de muestras, es necesario comprender que la UCI se encuentra conformada por Ala A (inactiva), Ala B, aislamiento, área de cocina, cuarto de enfermería, cuarto de médicos residentes, oficina del Jefe Médico, cuarto de limpieza, cuarto de estantes de almacenamiento de medicamentos y sala de espera, conformado por nueve espacios que se consideraron necesarios para su evaluación. Posterior a ello, se siguió el método gravimétrico de sedimentación [5], el cual consistió en colocar a 1,5 m (nivel respiratorio) triplicados de placas con agar infusión cerebro corazón (HiMedia, India), las cuales se dejaron por un lapso de 10 minutos. Posterior a la toma de muestras, las mismas se trasladaron al Laboratorio Integral de Apoyo Docente Santa Ana (LIADSA) del área de Ciencias de la salud de la UNEMF, en donde se incubaron a 35 ± 2ºC por un lapso de 48 h en una incubadora marca LW Scientific, EEUU.

Cuantificación de Unidades Formadoras de Colonias (UFC)

Posterior a la incubación, se realizó el conteo de colonias bacterianas y se estimó el número de unidades formadoras de colonia por m^3 de aire (UFC/m^3), con la ecuación descrita por Omeliansky, $N = 5xAx104/(BxT)^{-1}$

donde: N = concentración media de unidades formadoras de colonias por m^3 de aire interior muestreado; A = número de colonias obtenidas por placas Petri; B = superficie o área de la placa (cm^2); T = tiempo de exposición [5, 6].

Identificación bacteriana

Luego de la cuantificación, se seleccionaron las colonias en relación a la morfometría bacteriana, y se realizaron pruebas bioquímicas convencionales tomadas en consideración para *Pseudomonas* spp., *Staphylococcus* spp., *Streptococcus* spp., *Enterococcus* spp., enterobacterias, las cuales fueron dependientes de los aislamientos [7].

Resultados y Discusión

Se obtuvo variabilidad de los resultados en cada una de las salas que conforman la UCI (Tabla 1).

Tabla 1. Concentración bacteriana en cada una de las salas de la UCI del Hospital Universitario de Santa Ana de Coro, Falcón-Venezuela

Área	Concentración bacteriana UFC/m^3 (Primer muestreo)
Ala A	45,45
Pasillo Ala A	15,75
Cuarto Residentes	9,90
cuarto enfermería	22,00
Ala B	11,38
Ala B aislamiento	6,30
Área cocina	9,45
Sala de espera	9,00
Oficina medica	20,70

UFC = Unidades Formadoras de Colonias, m^3 = metros cúbicos.

Se hizo un análisis descriptivo general de la carga bacteriana y se obtuvo un valor promedio de 16,63 UFC/m^3, existiendo una gran diferencia entre la Media (16,63) y la Mediana (11,38) y la alta Desviación Estándar (12,33), lo cual indica que la distribución es sesgada y que existe una alta variabilidad en la concentración bacteriana entre las diferentes áreas. El valor máximo (45,45 UFC/m^3) es un valor atípico (outlier) y representa un área significativamente más contaminada, ya que es una zona inactiva, a diferencia del ala B (operativa) con cuatro camas, una zona de enfermería y de médicos, que se encuentra en un nivel más bajo y cuando ambas zonas se comparan con el área de aislamiento, se observa que el valor se encuentra por debajo de 10 UFC/m^3 (Tabla 2).

Tabla 2. Análisis de distribución de la variable cuantitativa "Concentración bacteriana UFC/m^3" en toda la UCI.

Métrica	Concentración bacteriana (UFC/m^3)
Media	16,3
Mediana	11,38
Desviación Estándar (DE)	12,33
Valor Mínimo	6,30
Valor Máximo	45,45
Rango	39,15

UFC = Unidades Formadoras de Colonias, m^3 = metros cúbicos.

R.A. Silva-Alvarado, A.E. Pérez-Briceño y R.J. Naveda. CC BY-SA 4.0
Revista Tecnocientífica URU, No. 29 Julio - Diciembre 2025 (25 - 32)

Actualmente, no existe una normativa referente a la concentración fúngico-bacteriana dentro de los espacios hospitalarios; no obstante, se tiene un valor que se toma a consideración para quirófanos y sitios críticos que datan de un valor promedio ≤ 10 UFC/m^3 [8]. En relación a los datos obtenidos, el valor se encuentra fuera de los límites establecidos, el cual es necesario conocer de forma constante en cada hospital, de manera que se tenga un control en cuanto a las bacterias prevalentes dentro del espacio.

Actualmente, son pocos los trabajos realizados sobre la carga bacteriana en ambientes hospitalarios y la mayoría se aboca a la detección de bacterias en materiales inertes [9, 10]. En el trabajo realizado por Ochoa en el 2021 [11], se detectó la presencia de bacterias en espacios hospitalarios, pero no se realizó cuantificación bacteriana en las salas respectivas. Por su parte, en otro trabajo reportaron concentraciones de bacterias y hongos con variaciones de 44 a 75 UFC/m^3 y de 8 a 22 UFC/m^3, respectivamente, donde las salas de trabajo de parto y recuperación y urgencias presentaron el primer y segundo aire más contaminado de todas las salas del hospital evaluado [11]; lo cual difiere con esta investigación, ya que el valor fue más elevado debido a que se tomaron otras áreas dentro del entorno hospitalario.

En cuanto a las especies bacterianas presentes en cada uno de los espacios evaluados en la UCI, se obtuvo una mayor diversidad de especies en la oficina médica (Figura 1), reportando de esta forma *Pseudomonas aeruginosa* (31,25%), seguido de *Staphylococcus aureus* y *Staphylococcus epidermidis* (18,75% en cada uno de los casos respectivamente), *Klebsiella pneumoniae* y *Serratia marcescens* (12,50% en cada uno de los casos) y finalmente, *Acinetobacter baumannii* (6,25%).

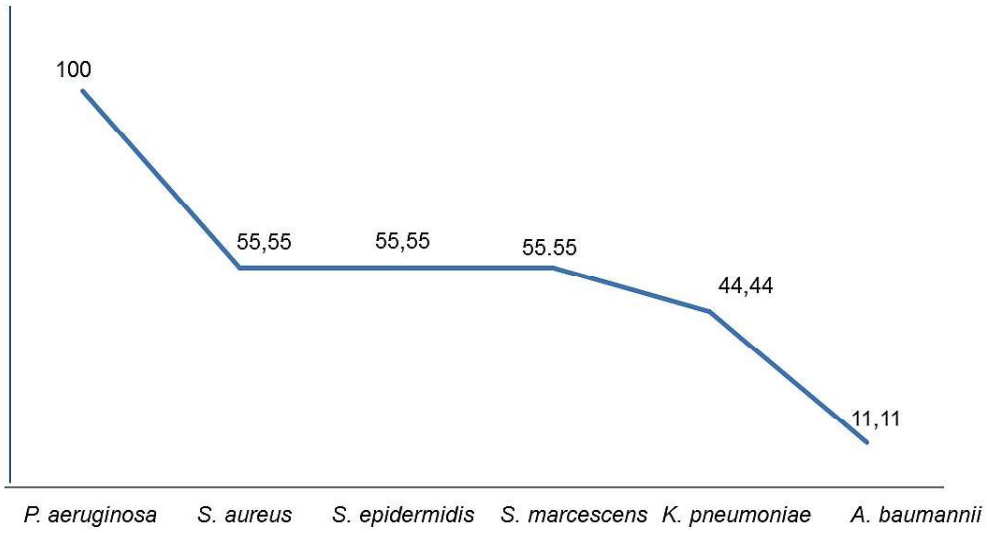


Figura 1. Prevalencia de los agentes bacterianos por espacios evaluados

El análisis estadístico de las frecuencias relativas indica un problema significativo de contaminación por *Pseudomonas aeruginosa* en las diferentes áreas de la UCI, con picos de 100% en el Cuarto de residentes y el Ala B de aislamiento. Esto es una preocupación importante, dado que *P. aeruginosa*, es un microorganismo implicado en infecciones intrahospitalarias con altas tasas de morbimortalidad, y con capacidad de crecimiento en ambientes adversos, sumado a los múltiples mecanismos de resistencia; además, se han descrito factores que favorecen la aparición de aislados clínicos, y los mismos se relacionan con el tiempo de estancia, el aislamiento en una muestra respiratoria, el aislamiento previo del mismo microorganismo y el uso de medicamentos con actividad contra *Pseudomonas*. En el trabajo realizado por Villa *et al.,* en el año 2013, se evidenció en un lapso de cuatro años la prevalencia de este agente bacteriano en hospitalización y UCI, asimismo estos autores encontraron otros agentes bacterianos tales como *Escherichia coli* (23%, n: 47.132 aislados), *Staphylococcus aureus* (10,4%, n: 21.225 aislados), *S. epidermidis* (8,25%, n: 16.781 aislados) y *Klebsiella pneumoniae* (7,3%, n: 14.955 aislados) [12]. En este trabajo, se obtuvo un comportamiento similar, ya que en el área evaluada (UCI) predominó *P. aeruginosa*.

Por su parte, *S. aureus*, es un microorganismo que al igual que *P. aeruginosa*, prevalece en el área hospitalaria [13], y constituye de esta forma una importante causa de infecciones, las cuales pueden incrementar el índice de mortalidad [14]; no obstante, esta bacteria no solo puede encontrarse a nivel hospitalario sino también a nivel ambiental, además de ocasionar procesos de infección alimentaria, lo que en cierto modo hace que su patogenicidad sea diversa [13]. En países desarrollados, se ha evidenciado el incremento de aparición de *S. aureus* en los ambientes hospitalarios, tal es el caso reportado por Mason *et al.*, en el año 2024, quienes encontraron un aumento de incidencia de este microorganismo en los pacientes hospitalizados con bacteriemia [15].

S. epidermidis también estuvo presente en el 55,55% de los espacios evaluados en UCI, pero estos no correspondieron a los mismos sitios donde se reportó *S. aureus*. Esta bacteria es la especie de estafilococo más prevalente en piel y constituye aproximadamente el 90% de los estafilococos recuperados de las fosas nasales anteriores en ausencia de *S. aureus.* También puede aislarse en grandes cantidades de la piel, del perineo y de las axilas, y en menor cantidad de la cabeza y las extremidades; de hecho, *S. epidermidis* carece de los potentes factores de virulencia de *S. aureus*, pero tiene la capacidad de producir biopelículas mejorando grandemente la supervivencia de esta bacteria y facilitando la infección de las superficies de muchos materiales protésicos [16]. Matarrese *et al.*, en el año 2021, durante el período 2018-2020, estudiaron la colonización bacteriana en pacientes ingresados en UCI en un hospital Alemán de Buenos Aires, y reportaron que *Staphylococcus epidermidis* fue la bacteria más frecuentemente aislada (40%), señalando que es importante conocer la biota presente en cada espacio dentro de las instancias hospitalarias [17].

S. marcescens aislada en cinco de las nueve salas estudiadas, es un microorganismo que al igual que *A. baumannii,* está en ascenso con respecto al aislamiento e incidencia dentro del entorno hospitalario, estos microorganismos se consideran multirresistentes naturales, lo cual agudiza el tratamiento y control del paciente colonizado, en el cual se ven seriamente afectados tanto la población pediátrica como los pacientes inmunosuprimidos [18]. Por su parte, *K. pneumoniae*, se registró en esta investigación en un 44,44% dentro de la UCI, lo que representa en cierto modo un problema emergente, ya que esta bacteria se considera un importante patógeno oportunista, causante de infecciones graves tanto en entornos comunitarios como sanitarios, especialmente en unidades de cuidados intensivos (UCI), donde las cepas multirresistentes (MDR), como *K. pneumoniae* resistente a carbapenémicos (CRKP), se consideran un desafío terapéutico bastante relevante. Otra de las bacterias, encontradas en la UCI correspondió a *S. marcescens* (55,55%) y *A. baumanni* (11,11%); no obstante, estos dos últimos agentes bacterianos, han venido presentándose con una incidencia acelerada dentro de los hospitales, y más aún en la UCI.

En una investigación, realizada por Aiesh *et al.*, en el 2023, reportaron que la incidencia de infecciones nosocomiales, sospechosas o confirmadas, en la UCIN fue del 26,9% (95 de 352 pacientes ingresados). La neumonía (36,8%), seguida de las infecciones de piel y tejidos blandos (35,8%) fueron de las causas más comunes. Así mismo, los microorganismos causales más comunes aparecieron, en el siguiente orden: *Pseudomonas aeruginosa* (26,3%), *Acinetobacter baumannii* (25,3%), *Escherichia coli* (23,2%) y *Klebsiella pneumoniae* (15,8%). La estancia hospitalaria promedio de los pacientes con infecciones nosocomiales en la UCIN fue de 18,5 días [18]. Estos resultados difieren con esta investigación, ya que el segundo agente encontrado, fue el menos prevalente, asimismo no se encontró *E. coli.* En otro trabajo realizado por Jin Shi *et al.*, en el 2020, se aislaron de la UCI a partir de cultivos de 160 muestras, 407 bacterias de 38 especies; de éstas, 109 (26,8%) fueron gramnegativas y 298 (73,2%) grampositivas. Las bacterias más comunes fueron estafilococos coagulasa negativos (SNC) (222 cepas, 54,5%), *Acinetobacter baumannii* (48 cepas, 11,8%), *Pseudomonas aeruginosa* (33 cepas, 8,1%) y *Enterococcus faecium* (24 cepas, 5,9%) [19], lo cual difiere con esta investigación, ya que se registró a ECN y *A. baumanni* como las bacterias de mayor prevalencia, mientras que en este estudio *A. baumannii* fue la de menor incidencia, pero coincidiendo con el resto de los aislamientos bacterianos.

El ambiente hospitalario constituye un reservorio y una fuente de infección para el paciente ingresado, ya que varias áreas que rodean al paciente, representan riesgos por los microorganismos bacterianos patógenos

y oportunistas, los cuales en ocasiones son de origen comunitario y presentan resistencias a múltiples drogas de carácter terapéutico [20].

Conclusión

La carga bacteriana promedio reportada en la UCI del Hospital Universitario de Falcón, Venezuela, de 16,63 UFC/m^3, excede los valores permitidos dentro de la UCI, evidenciando una alta contaminación del ambiente hospitalario. Adicionalmente, las bacterias aisladas de estos espacios como: *Pseudomonas aeruginosa* (31,25%), *Staphylococcus aureus* y *Staphylococcus epidermidis* (18,75%), *Klebsiella pneumoniae* y *Serratia marcescens* (12,50%) y *Acinetobacter baumannii* (6,25%), pueden comprometer la salud de los pacientes y del personal que labora en el hospital; por lo que, se recomienda el monitoreo constante de estos microorganismos para establecer medidas de saneamiento y control que eviten la propagación y colonización de pacientes hospitalizados.

Referencias bibliográficas

[1] M. Calvo, S. Stefani., G. Migliorisi. "Bacterial Infections in Intensive Care Units: Epidemiological and Microbiological Aspects". *Antibiotics*, no 13, vol 238, pp. 1-15. 2024. [En línea]. Disponible en: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10967584/pdf/antibiotics-13-00238.pdf

[2] J. Perez., C. Abad., M. Parra., D. Matute. "Infección nosocomial". Cuenca Ecuador. Editorial Pierto Madero. 2024. Capitulo III, pp. 37-47. [En línea]. Disponible en: https://puertomaderoeditorial.com.ar/index.php/pmea/catalog/download/35/116/202?inline=1

[3] L. López-Cerero. "Papel del ambiente hospitalario y los equipamientos en la transmisión de las infecciones nosocomiales". *Enferm Infecc Microbiol Clin,* no. 32, vol 7, pp. 459-464. 2014. [En línea]. Disponible en: file:///C:/Users/Administrador/Downloads/S0213005X13003108%20(1).pdf

[4] F. Zurita-Alvarado., M. Hernández-Lojano., J. Romero-Carvajal., J. Salazar-Bueñaño., R. Álvarez-Morillo., G. Galarza-Carrión. "Microorganismos y factores relacionados a las infecciones adquiridas en un hospital docente durante los años 2014 a 2018: un estudio retrospectivo". *Revista Médica Vozandes,* no. 2, vol 33, pp. 35-43. 2022. [En línea]. Disponible en: https://revistamedicavozandes.com/wp-content/uploads/2023/01/02_AO4.pdf

[5] S. Borrego-Alonso., M. García-Miniet. "Comportamiento de la concentración microbiana aérea en la Fototeca del Archivo Nacional de Cuba". *Revista CENIC Ciencias Biológicas*, no 2, Vol. 42, pp. 61-67. 2011. [En línea]. Disponible en: https://www.redalyc.org/pdf/1812/181222256001.pdf

[6] M. González-Escudero., A. Chavez-Chamorro., J. Aranque-Rangel., F. Andueza-Leal. "Calidad bacteriológica del aire en ambientes académicos administrativos de la Universidad Central del Ecuador". *Rev Fac Farm*, no. 65, vol 2, pp. 82-92. 2023. [En línea]. Disponible en: http://www.saber.ula.ve/bitstream/handle/123456789/50138/articulo4.pdf?sequence=5

[7] A. Fernández., C. García., J. Sáez., S. Valdezate. Métodos de identificación bacteriana en el laboratorio de microbiología. SEIMC. 2010. 52pp. [En línea]. Disponible en: https://seimc.org/wp-content/uploads/2025/06/seimc-procedimientomicrobiologia37.pdf

[8] J. Lucena-Tarifa., A. López-Figueras., M. Simón-Sacristán., G. Cáceres-Bermejo., B. Santa-Alfredo., M. Guerra-Sánchez., M. Salinas-Granell. "Calidad microbiológica del aire en zonas hospitalarias de riesgo durante los trabajos de acondicionamiento del Hospital Central de la Defensa «Gómez Ulla» - CSVE". *Sanid. mil,* no. 80, vol. 3. pp. 108-113, 2024. [En línea]. Disponible en: https://scielo.isciii.es/pdf/sm/v80n3/1887-8571-sm-80-03-108.pdf

[9] Sociedad Andaluza de Medicina Preventiva y Salud Pública. Protocolo para la monitorización de la bioseguridad ambiental y la calidad microbiológica del aire en las salas de ambiente controlado en centros

sanitarios. SAMPSP 2019. [En línea]. Disponible en:file:///C:/Users/Administrador/Downloads/NORMAS%20REVISTA%20TECNOCIENT%C3%8DFICA%20URU%202025.pdf

[10] M. Janczarek., A. Ślosarczyk., I. Klapiszewska., J. Riha. Airborne bioaerosols in healthcare facilities – Transmission routes and mitigation strategies. A review. *Journal of Building Engineeringno.* 97. 2024. [En línea]. Disponible: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235271022402583X

[11] P. Ochoa. "Revisión de la carga microbiana en áreas hospitalarias. Universidad Central del Ecuador Facultad de Ciencias Químicas Química Farmacéutica". Trabajo de Titulación modalidad Artículo Profesional de Alto Nivel presentado como requisito previo a la obtención del Título de Química Farmacéutica. Quito, Ecuador. 51pp. 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.dspace.uce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/016074dd-4572-4f3b-bb5c-7edc62c6846f/content

[12] L. Villa., J. Cortés., A. Leal., A. Meneses., M. Meléndez. "*Pseudomonas aeruginosa* resistente a antimicrobianos en hospitales colombianos". *Rev Chilena Infectol.* No. 30, vol. 6, pp. 605-610. 2013. [En línea]. Disponible en: https://www.scielo.cl/pdf/rci/v30n6/art05.pdf

[13] J. Estrada-Cherres., A. Ulloa-Castro. "Origen Hospitalario de Cepas de *Staphylococcus aureus* Resistentes a Meticilina". *Dom. Cien,* no. 8, vol. 2, pp. 1519-1529. 2022. [En línea]. Disponible en: file:///C:/Users/Administrador/Downloads/Dialnet-OrigenHospitalarioDeCepasDeStaphylococcusAureusRes-8638011.pdf

[14] Y. Leiva., J. Cespedes., C. Herrera., Y. Chaviano. "Factores de mal pronóstico en pacientes infectados por *Staphylococcus aureus* que ingresan en las salas de cuidados intensivos". *Acta Médica del Centro,* no. 14, vol. 3, pp. 313-319. 2020. [En línea]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/pdf/amdc/v14n3/2709-7927-amdc-14-03-313.pdf

[15] E. Mason., O. Nsonwu., J. Elmes., D. Chudasama., C. Pearson., L. Hasan., R. Hope., S. Gerve. "Increased rates of hospital-onset *Staphylococcus aureus* bacteraemia in National Health Service acute trusts in England between June 2020 and March 2021: a national surveillance review". *Journal of Hospital Infection,* no. 143, pp. 33e37. 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.journalofhospitalinfection.com/action/showPdf?pii=S0195-6701%2823%2900345-6

[16] V. Siciliano., R. Passerotto., M. Chiuchiarelli., G. Leanza., V. Ojetti. "Difficult-to-Treat Pathogens: A Review on the Management of Multidrug-Resistant Staphylococcus epidermidis". *Life,* no. 13, pp. 1126. 2023. [En línea]. Disponible en: file:///C:/Users/Administrador/Downloads/life-13-01126%20(1).pdf

[17] A. Matarrese., D. Ivulich., C. Germán., F. Alaniz., J. Ruiz., J. Osatnik. "Análisis epidemiológico de bacteriemias asociadas a catéter en una terapia intensiva médico-quirúrgica". Medicina, no. 81, vol. 2, pp. 159-165. 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.scielo.org.ar/pdf/medba/v81n2/1669-9106-medba-81-02-159.pdf

[18]. G. Qiaozhi., X. Zhao., M. Jingxiang., Y, Zhou., F. Gao., W. Huang., L. Sun., S. Zhu., L. Lijuan., S. Huimin., Jia, W., H. Zhang., D. Zhao. "Serratia marcescens outbreak in a neonatal intensive care unit associated with contaminated handwashing sinks". *Indian Journal of Medical Microbiology,* no. 52, pp. 100741. 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0255085724002160

[19] B. Aiesh., R. Qashou., G. Shemmessian., M. Swaileh., S. Abutaha., S. Sabateen., S. Barqawi., A. AbuTaha., A Zyoud. "Nosocomial infections in the surgical intensive care unit: an observational retrospective study from a large tertiary hospital in Palestine". Aiesh *et al.* BMC *Infectious Diseases,* no. 23, pp. 686. 2023. [En línea]. Disponible en: file:///C:/Users/Administrador/Downloads/s12879-023-08677-z.pdf

[20] H. Jin Shi., J. Kim., N. Kim., J. Lee., J. Eom. "Environmental Culture of Bacteria at the Intensive Care Unit of a Tertiary Hospital in Korea: A Consideration for Improving Medical Environmental Safety and Healthcare-associated Infection". *Bacterial Culture of Real ICU Environment,* no. 25, vol. 2, pp. 105-114, 2020. [En línea]. Disponible en: file:///C:/Users/Administrador/Downloads/KJICP025-02-06.pdf

Revista Tecnocientífica URU
Universidad Rafael Urdaneta
No. 29 Julio - Diciembre 2025
Depósito Legal: PPI 201402ZU4464
ISSN: 2343-6360
CC BY-SA 4.0

Adecuación del tratamiento químico de aguas residuales de una empresa productora de Hipoclorito de Sodio[1]

Adequacy of the chemical treatment of wastewater from a Sodium Hypochlorite producing company

Paola I. González Arias
Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química, Maracaibo, Venezuela.
https://orcid.org/0009-0006-9129-6020 | Correo electrónico: paolaisabel.gonzalez@gmail.com

Yenibel C. Valencia Meza
Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química, Maracaibo, Venezuela.
https://orcid.org/0009-0000-4741-5607 | Correo electrónico: valenciayenibel@gmail.com |

Alexandra L. Vera Bonilla
Universidad del Zulia, Facultad de Agronomía, Departamento de Química, Maracaibo, Venezuela.
https://www.orcid.org/0000-0002-0875-2965 | Correo electrónico: avera@fa.luz.edu.ve

Charity E. Andrade Ruiz
Universidad del Zulia, Facultad Experimental de Ciencias, Departamento de Química, Maracaibo, Venezuela.
https://www.orcid.org/0000-0001-5609-2010 | Correo electrónico: ceandrade@fec.luz.edu.ve

José G. Delgado González
Universidad del Zulia, Facultad de Agronomía, Departamento de Química, Maracaibo, Venezuela.
https://www.orcid.org/0009-0005-1275-535X | Correo electrónico: delgadogjg621@gmail.com

Recibido: 20-11-2025 Admitido: 01-12-2025 Aprobado:04-12-2025
DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.20086097

Resumen
El presente trabajo de investigación surgió ante la necesidad de evaluar métodos de adecuación del pH en efluentes industriales altamente alcalinos generados por una planta de hipoclorito de sodio. Estas aguas residuales, con un elevado contenido de hidróxido de sodio, requieren control del pH. El objetivo fue evaluar un tratamiento químico para adecuar el efluente y cumplir con los estándares de disposición final. La metodología incluyó la caracterización fisicoquímica del efluente y la evaluación de la eficiencia de ácidos orgánicos (acético y cítrico) y dióxido de carbono como agentes neutralizantes, en comparación con un tratamiento de referencia basado en la utilización de ácido sulfúrico. Para tratar un litro de efluente, se utilizó un volumen promedio de 3,30 mL de ácido acético, 5,83 mL de ácido cítrico y 17,33 L de dióxido de carbono. El ácido sulfúrico se utilizó en una dosis de 1,60 mL, contrastando así con un agente inorgánico. Los tratamientos aplicados lograron adecuar el pH del efluente al rango de 7,0 a 7,5, cumpliendo con los Artículos 10 y 15 del Decreto No. 883. El análisis mostró que, tras la neutralización, solo la concentración de sólidos totales superó los límites normativos, recomendando un tratamiento adicional de sedimentación y floculación. Los resultados indicaron que la inyección de dióxido de carbono es la alternativa más eficaz y sostenible. Se considera que su implementación es responsable desde una perspectiva técnico-ambiental para la gestión de estas aguas residuales.
Palabras clave: Aguas residuales industriales, hipoclorito de sodio, tratamiento químico, neutralización, control del pH.

[1]Artículo adaptado de la ponencia presentada en la II Jornada de Ingeniería de la Universidad Rafael Urdaneta, 2025.

CC BY-SA 4.0
Revista Tecnocientífica URU, No. 29 Julio - Diciembre 2025 (33 - 44)

Abstract
This study addresses the need to evaluate pH-adjustment strategies for highly alkaline industrial effluents generated by a sodium hypochlorite production plant. These wastewaters, characterized by elevated sodium hydroxide concentrations, require effective pH control prior to discharge. The objective was to assess a chemical treatment capable of conditioning the effluent to meet regulatory standards for final disposal. The methodology involved physicochemical characterization of the effluent and the evaluation of organic acids (acetic and citric) and carbon dioxide as neutralizing agents, compared with a reference treatment using sulfuric acid. To treat one liter of effluent, average doses of 3,30 mL of acetic acid, 5,83 mL of citric acid, and 17,33 L of carbon dioxide were required; sulfuric acid was applied at 1,60 mL per liter as the inorganic benchmark. All treatments successfully adjusted the pH to the target range of 7,0–7,5, in compliance with Articles 10 and 15 of Decree No. 883. Post-neutralization analysis indicated that only total solids exceeded regulatory limits, suggesting the need for an additional sedimentation and flocculation step. Overall, results identify carbon dioxide injection as the most effective and sustainable alternative, supporting its implementation as a technically sound and environmentally responsible approach for managing these alkaline effluents.
Keywords: *Industrial wastewater, sodium hypochlorite, chemical treatment, neutralization, pH control.*

Introducción

La producción de hipoclorito de sodio es fundamental para la elaboración de productos de limpieza y desinfección, esenciales para la salud pública y la higiene. Este compuesto se obtiene a partir de la reacción entre una solución de hidróxido de sodio y gas cloro. Una empresa productora de hipoclorito de sodio ubicada en la ciudad de Maracaibo lleva a cabo este proceso y enfrenta el reto de tratar adecuadamente las aguas residuales generadas durante la producción.

Actualmente, la empresa productora de hipoclorito de sodio, cuenta con un sistema de ocho sedimentadores que reducen algunos contaminantes, como sólidos suspendidos y flotantes, cumpliendo parcialmente con el Decreto No. 883 [1]. A pesar de estos avances, persisten dificultades en el control del pH, lo que evidencia la necesidad de fortalecer el sistema de tratamiento para garantizar el cumplimiento de los estándares ambientales y asegurar una adecuada disposición o reutilización del efluente.

Este estudio se desarrolla con el objetivo de evaluar métodos para ajustar el pH del efluente generado en la producción de hipoclorito de sodio, un proceso que produce aguas residuales con hidróxido de sodio, sólidos totales, cloro, cloruros y otros compuestos que requieren un control preciso del pH para evitar impactos ambientales y asegurar la sostenibilidad del proceso [2].

En este contexto, se propone evaluar la incorporación de un tratamiento químico basado en ácidos orgánicos y dióxido de carbono como agentes neutralizantes del efluente de una planta productora de hipoclorito de sodio.

Materiales y Métodos

Fase 1: Caracterización de manera fisicoquímica las aguas residuales de una empresa productora de hipoclorito de sodio

Para caracterizar el efluente generado en la producción de hipoclorito de sodio, se seleccionó un punto de muestreo representativo y se recolectó la muestra siguiendo la norma COVENIN 2709:2002 [3]. Los análisis fisicoquímicos se realizaron conforme al *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (SMWW) [4] y a las normativas COVENIN [3], evaluando los parámetros establecidos en el Artículo 15 del Decreto No. 883 [1]. Los resultados obtenidos se compararon con los límites establecidos en los Artículos 10 y 15 del mismo decreto [1], lo que permitió definir las tecnologías de tratamiento a implementar en la siguiente fase del estudio.

Fase 2: Efecto de ácidos orgánicos y dióxido de carbono en la neutralización del efluente de la producción de hipoclorito de sodio

CC BY-SA 4.0
Revista Tecnocientífica URU, No. 29 Julio - Diciembre 2025 (33 - 44)

Se seleccionaron como agentes neutralizantes dos ácidos orgánicos (acético y cítrico), debido a su baja peligrosidad, y dióxido de carbono por su capacidad de reaccionar con medios fuertemente alcalinos. El ácido sulfúrico se incluyó únicamente como referencia, ya que su uso no es viable por el riesgo potencial de generar cloro gaseoso. Se recolectaron muestras de efluente en dos fechas del proceso y se realizaron análisis fisicoquímicos del agua cruda y tratada.

Los tratamientos se realizaron a escala de laboratorio, utilizando 1 L de muestra y un rango objetivo de pH entre 7 y 7,5. Para los ácidos acético, cítrico y sulfúrico, la dosificación se efectuó con agitación continua, registrando el volumen empleado y el pH final. En el caso del dióxido de carbono, se aplicó un sistema de inyección con un cilindro de dióxido de carbono y regulador de presión. El consumo de dióxido de carbono se estimó mediante desplazamiento de agua, midiendo el tiempo necesario para desplazar 2 L y calculando el caudal a partir de la siguiente fórmula:

$$Q\,(L/s) = \frac{V\,(L)}{t\,(s)} \tag{1}$$

Asimismo, se llevaron a cabo pruebas preliminares con una solución de hidróxido de sodio 0,1 M para verificar la eficiencia de la neutralización. Se inyectó dióxido de carbono durante un minuto a la solución de hidróxido de sodio. Luego, se compararon los volúmenes de ácido sulfúrico requeridos para titular las muestras tratadas y no tratadas. Con la diferencia en volúmenes, se calcularon los miliequivalentes de hidróxido de sodio neutralizados, y así el porcentaje de dióxido de carbono que reaccionó:

$$\%\,CO_2 = \left(\frac{meq\ NaOH_{neutralizado}}{meq\ NaOH_{total}} \right) * 100 \tag{2}$$

Para calcular la masa de dióxido de carbono empleada durante las pruebas experimentales de neutralización, se utilizó la ley de los gases ideales:

$$PV = nRT \tag{3}$$

Al calcular el número de moles, se multiplica por el peso molecular del dióxido de carbono para hallar su masa.

$$M_{CO_2} = n_{CO_2} * PM_{CO_2} \tag{4}$$

Luego de las pruebas preliminares del sistema de inyección, el dióxido de carbono se aplicó al efluente registrando continuamente el pH hasta alcanzar la neutralización. Cada tratamiento se realizó por triplicado para garantizar la confiabilidad de los resultados. Posteriormente, el efluente tratado fue caracterizado para evaluar la eficiencia de los métodos. Finalmente, los datos se analizaron mediante ANOVA y la prueba *post hoc* de Tukey ($p \leq 0,05$) para identificar diferencias significativas entre los tratamientos.

Fase 3: Comparación de los resultados obtenidos de los tratamientos aplicados para la selección del más adecuado cumpliendo con el Decreto N.° 883 para su disposición final

Se realizó un análisis comparativo para determinar cuál método de neutralización ofrece mayor eficiencia, en base a los resultados obtenidos en el análisis fisicoquímico de las muestras tratadas con los diferentes métodos, lo que permitió seleccionar el tratamiento más adecuado para la correcta disposición final del efluente.

CC BY-SA 4.0

Resultados

Caracterización fisicoquímica de las aguas residuales de una empresa productora de hipoclorito de sodio

Este estudio determinó los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales generadas por la empresa productora de hipoclorito de sodio, de acuerdo con los Artículos 10 y 15 del Decreto No. 883 [1]. A continuación, se presenta una tabla con los resultados obtenidos, destacando los parámetros que exceden los límites permitidos por la normativa (Tabla 1).

Tabla 1. Resultados de los parámetros fuera del rango permitido en el Decreto N° 883 del efluente analizado

Parámetro	Valor obtenido	Valor de referencia Art. 15	Valor de referencia Art. 10
pH	11,86	6-9	6-9
Cloruros (mg/L)	1055,81	N.E.	1000
Espuma (mm)	4,0	N.E.	Ausente
Sólidos flotantes	Presencia	Ausentes	Ausentes
Sólidos sedimentables (mL/L)	16,0	N.E.	1,0
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	592	400	80
Sólidos totales (mg/L)	6259	1600	N.E.

El efluente presentó un pH básico de 11,86, superando los límites establecidos en los Artículos 10 y 15 del Decreto N.° 883 [1]. Esta alcalinidad se debe principalmente a la presencia de hidróxido de sodio. Durante este proceso, el cloro gaseoso reacciona con el hidróxido de sodio para poder formar el hipoclorito de sodio, por lo tanto, pueden quedar residuos de hidróxido de sodio, lo que eleva el pH. Además, el hipoclorito de sodio formado también contribuye a la basicidad del efluente. El pH del efluente se compara con el resultado reportado por Romero, Rodríguez y Masó [5], quienes encontraron un pH promedio de 10,5 en aguas residuales de una industria textil cubana, atribuible al uso de diversas sustancias químicas alcalinas en su proceso productivo.

El efluente presentó una concentración elevada de cloro residual libre (843 mg/L), atribuida al exceso de cloro utilizado en la producción de hipoclorito de sodio para asegurar la conversión completa y evitar subproductos como cloratos y cloruros. Según Breytus, Kruzic y Prabakar [6], factores como concentración, temperatura y tiempo de almacenamiento influyen en la formación de clorato, por lo que su control contribuye a su reducción. Además, el arrastre de cloro no consumido también explica su alta presencia. Aunque el Decreto N.° 883 [1] no establece límites para este parámetro, el pH elevado favorece la estabilidad del ión hipoclorito, lo que justifica su persistencia. Este comportamiento concuerda con lo reportado por Tran et al. [7] en procesos con compuestos clorados y con Gual [8], quien señala que en aguas con baja materia orgánica el cloro se mantiene más estable, reflejándose en la baja DQO del efluente (22,0 mg/L) y en un cloro residual prácticamente sin consumirse.

Otro parámetro que presentó valores elevados fueron los cloruros, con una concentración de 1055,81 mg/L, superando el límite establecido en el Decreto N.° 883, Artículo 10 [1]. Este resultado se asocia a la formación de cloruro de sodio como subproducto de la producción de hipoclorito de sodio y al uso de salmuera en la regeneración de resinas iónicas del suavizador, que aporta soluciones con alto contenido de cloruros al efluente. Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Ayala [9], quien relaciona concentraciones elevadas de cloruros con el uso de sales y la regeneración de resinas en procesos industriales.

Por último, el efluente presentó sólidos flotantes y concentraciones elevadas de sólidos suspendidos totales (592 mg/L), sólidos totales (6259 mg/L) y sólidos sedimentables (16 mg/L), todos por encima de los

CC BY-SA 4.0
Revista Tecnocientífica URU, No. 29 Julio - Diciembre 2025 (33 - 44)

límites establecidos en los Artículos 10 y 15 del Decreto N.° 883 [1]. La presencia de estos sólidos se relaciona con las distintas etapas del proceso industrial: los sólidos flotantes, de baja densidad, se mantienen en la superficie; los suspendidos, formados por partículas finas no disueltas, generan turbidez; y los sedimentables, como sales o residuos de lavado, se depositan al disminuir la turbulencia.

La reducción de sólidos requiere sedimentación y filtración para cumplir los estándares de calidad. Para ello, la empresa emplea un sistema de sedimentación primaria cuya eficiencia se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados fisicoquímicos del efluente antes y después de la sedimentación primaria

Parámetro	Agua residual cruda	Agua residual tratada	Valor de referencia Art. 15	Valor de referencia Art. 10
pH	11,86	11,64	6-9	6-9
Conductividad (mS/cm)	15,15	9,62	N.E.	N.E.
Salinidad (g/L)	7,17	4,96	N.E.	N.E.
Sólidos disueltos totales (mg/L)	8161	5812	N.E.	N.E.
Cloro residual (mg/L)	843,00	575,71	N.E.	N.E.
Cloruros (mg/L)	1055,81	837,36	N.E.	1000
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	592	48	400	80
Sólidos totales (mg/L)	6259	5230	1600	N.E.
Sólidos flotantes	Presentes	Ausentes	Ausentes	Ausentes

El sistema de sedimentación reduce sólidos suspendidos y flotantes, mejorando la calidad del efluente. No obstante, el pH permanece fuera del rango normativo, los sólidos totales superan los límites y el cloro residual sigue elevado, lo que podría generar impactos ambientales en su descarga.

Efecto de ácidos orgánicos y dióxido de carbono en la neutralización del efluente de la producción de hipoclorito de sodio

A continuación, se muestra la dosificación de los agentes neutralizantes aplicados en cada prueba para alcanzar el rango de pH deseado, el cual fue de 7 - 7,5, cumpliendo así con el límite establecido en el Decreto No. 883, Artículo 10 y 15 [1] el cual comprende un rango de 6 - 9 para el pH (Tabla 3).

CC BY-SA 4.0

Tabla 3. Dosificación de agentes neutralizantes al efluente

Agente neutralizante	pH inicial	pH final	Volumen dosificado
Ácido acético glacial	11,98 ± 0,01	7,30 ± 0,20	3,30 ± 0,08 mL
Ácido cítrico	11,98 ± 0,01	7,17 ± 0,12	5,83 ± 0,09 mL
Dióxido de carbono	12,24 ± 0,02	7,31 ± 0,15	17,33 ± 4,49 L
Ácido sulfúrico	12,24 ± 0,02	7,08 ± 0,09	1,60 ± 0,06 mL

El tratamiento del efluente con ácido acético glacial logró reducir el pH de 11,98 a 7,30 ± 0,20 con un volumen promedio de 3,30 ± 0,08 mL, mostrando alta eficacia, estabilidad y cumplimiento con el Decreto N.° 883 [1]. En comparación, Gadient [10] utilizó vinagre (5 % de ácido acético) y requirió mayores volúmenes para alcanzar reducciones similares de pH, debido a la menor concentración de ácido acético, pero logrando, aun así, la neutralización del agua. Por su parte, el ácido cítrico permitió estabilizar el pH en 7,17 ± 0,12 con una dosis promedio de 5,83 ± 0,09 mL, también dentro del rango permitido y con baja variabilidad entre pruebas. En contraste, Sánchez, Gómez y Hernández [11] usaron una mezcla de ácidos orgánicos más fuertes para neutralizar 1000 L de agua, lo que explica las diferencias en volumen requerido pese a utilizar compuestos del mismo tipo.

El tratamiento con dióxido de carbono redujo el pH del efluente de 12,24 ± 0,02 a 7,31 ± 0,15 mediante una inyección controlada a 0,038 L/s. El volumen promedio dosificado fue de 17,33 L y, pese a ligeras variaciones, la baja desviación estándar del pH final confirma un proceso eficiente y consistente, siempre dentro de los límites establecidos. Estos resultados son consistentes con los reportados por Gastañadui *et al*., [12], quienes emplearon dióxido de carbono para neutralizar efluentes alcalinos generados por lodos de alta densidad, logrando reducir el pH de 10–10,5 a 6,5–7,5 mediante una inyección continua del gas.

Finalmente, el tratamiento con ácido sulfúrico demostró ser eficiente y estable, utilizando un volumen promedio de 1,60 ± 0,06 mL con baja desviación estándar, lo que indica una dosificación precisa. El pH se redujo de 12,24 ± 0,02 a 7,08 ± 0,09, alcanzando niveles cercanos a la neutralidad y superando el desempeño de los demás métodos evaluados. Estos resultados son consistentes con lo reportado por AbdAl-Hussein [13], quien observó una rápida disminución del pH hacia valores óptimos para la coagulación (pH 6,4), favoreciendo la clarificación.

A continuación, la Tabla 4 presenta los análisis fisicoquímicos del efluente tratado con ácido acético (1), ácido cítrico (2), dióxido de carbono (3) y ácido sulfúrico (4), junto con los valores de referencia del Decreto No. 883, Artículos 10 y 15 [1].

CC BY-SA 4.0
Revista Tecnocientífica URU, No. 29 Julio - Diciembre 2025 (33 - 44)

Tabla 4. Características fisicoquímicas del efluente tratado mediante los diversos métodos de neutralización

Parámetros	Inicial			Valor de ref. Art.15	Valor de ref. Art.10
		1	2		
pH	**12,15±0,21**	7,30±0,20	7,17±0,12	6-9	6-9
Salinidad (g/L)	8820,00±1,53	4793,00±0,12	4,59±0,26	N.E.	N.E.
Conductividad (mS/cm)	15,88±2,69	8,37±0,12	8,13±0,15	N.E.	N.E.
Sólidos Totales Disueltos (g/L)	8253,33±1,15	5562,00±193,88	5462,67±203,13	N.E.	N.E.
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	**113,00±61,00**	**80,00±17,78**	45,33±3,519	400	**80**
Sólidos Totales (mg/L)	**8546,00±0,00**	**9716,00±123,22**	**8828,00±100,00**	**1600**	N.E.
Alcalinidad Total (mg $CaCO_3$/L)	1455,00±142,00	1293,00±10,78	1099,53±10,78	N.E.	N.E.
Dureza Total (mg $CaCO_3$/L)	42,00±32,00	88,33±7,64	50,00±10,00	N.E.	400
Cloruros (mg/L)	**1288,00±56,00**	**1347,06±18,20**	**1274,25±18,20**	N.E.	**1000**
Cloro Residual Libre (mg/L)	664,69±187,17	620,38±0,00	53,18±0,00	N.E.	N.E.
Sulfatos (mg/L)	161,00±157,00	8,71±0,22	4,88±0,24	**400**	1000
DQO (mg/L)	74,50±9,59	**2721,67±27,6**1	**7664,33±30,35**	**900**	**350**

CC BY-SA 4.0

Tabla 4. Continuación

Parámetros	Inicial	Tratamientos		Valor de ref. Art.15	Valor de ref. Art.10
		3	4		
pH	**12,15±0,21**	7,31±0,15	7,08±0,09	6-9	6-9
Salinidad (g/L)	8820,00±1,53	4,81±0,28	5,26±0,07	N.E.	N.E.
Conductividad (mS/cm)	15,88±2,69	8,53±0,24	9,43±0,22	N.E.	N.E.
Sólidos Totales Disueltos (g/L)	8253,33±1,15	5574,33±224,19	6194,67±149,92	N.E.	N.E.
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	**113,00±61,00**	36,33±5,69	41,67±3,51	400	**80**
Sólidos Totales (mg/L)	**8546,00±0,00**	**6332,67±152,75**	**7424,00±43,59**	**1600**	N.E.
Alcalinidad Total (mg $CaCO_3$/L)	1455,00±142,00	**1648,58±10,78**	323,25±10,78	N.E.	N.E.
Dureza Total (mg $CaCO_3$/L)	42,00±32,00	13,33±5,77	13,33±5,77	N.E.	400
Cloruros (mg/L)	**1288,00±56,00**	**1292,45±18,20**	**1274,25±18,20**	N.E.	**1000**
Cloro Residual Libre (mg/L)	664,69±187,17	354,50±35,45	460,85±17,73	N.E.	N.E.
Sulfatos (mg/L)	161,00±157,00	16,55±0,43	851,37±6,66	**400**	1000
DQO (mg/L)	74,50±9,59	58,17±119,65	23,67±6,03	**900**	**350**

El análisis estadístico mostró que no hubo diferencias significativas entre los tratamientos para el pH final ($p \geq 0,05$), y todos alcanzaron el rango establecido (7,00–7,50), reduciendo el valor inicial (12,15 ± 0,21). Los valores finales fueron: ácido sulfúrico (7,08 ± 0,09), ácido cítrico (7,17 ± 0,12), ácido acético (7,30 ± 0,20) y dióxido de carbono (7,31 ± 0,15), manteniendo condiciones adecuadas para la protección de organismos acuáticos [14]. El ácido sulfúrico requirió menor dosificación debido a su completa disociación [15], mientras que el dióxido de carbono actuó como ácido débil neutralizando la alcalinidad [16].

Respecto a la conductividad eléctrica y la salinidad, ambos parámetros, directamente relacionados por la presencia de sales ionizadas [17], disminuyeron significativamente desde sus valores iniciales (15,88 ± 2,70 mS/cm y 8820,00 ± 153,00 mg/L), sin diferencias significativas entre tratamientos. Los valores finales oscilaron entre 8,13–9,43 mS/cm y 4590–5260 mg/L. La reducción se atribuye a la reacción del ácido acético con iones hipoclorito [18], al efecto quelante del ácido cítrico [19] y, en el caso del dióxido de carbono, a la disminución de iones altamente conductivos y a la conversión de carbonatos en bicarbonatos y sales menos solubles [18], [20].

En sólidos disueltos totales (SDT) y sólidos totales (ST) se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos ($p \leq 0,05$). El ácido cítrico mostró mayor eficiencia en la reducción de SDT por su capacidad quelante [21], mientras que el dióxido de carbono redujo con mayor efectividad los ST debido a la formación de ácido carbónico y subsecuente precipitación de compuestos iónicos [20]. Para los sólidos suspendidos totales (SST) no hubo diferencias significativas ($p = 0,051$), aunque el dióxido de carbono logró la mayor disminución, coherente con el efecto floculante descrito por Chávez [22].

CC BY-SA 4.0
Revista Tecnocientífica URU, No. 29 Julio - Diciembre 2025 (33 - 44)

En cuanto a la alcalinidad total y dureza total, se observaron diferencias significativas ($p \leq 0,05$). La dureza se redujo de forma notable con ácido sulfúrico y dióxido de carbono (13,33 mg $CaCO_3$/L) por precipitación de sales; mientras que, los ácidos orgánicos, especialmente el acético (88,33 mg $CaCO_3$/L), la incrementaron debido a su limitada capacidad para precipitar calcio y magnesio [23]. Aunque el Decreto No. 883 no establece límites para estos parámetros [1], se registró un ligero aumento de alcalinidad con dióxido de carbono por la formación de bicarbonatos, considerado un efecto controlable [24].

En relación con los cloruros, no se detectaron diferencias significativas entre tratamientos ($p \geq 0,05$), con valores entre 1274,25 y 1347,06 mg/L. El ácido cítrico favoreció su disminución mediante complejación [25], mientras que el ácido acético aumentó su concentración por la disolución de sales preexistentes. Para los sulfatos sí se presentaron diferencias significativas ($p \leq 0,05$): el ácido cítrico obtuvo la menor concentración (4,88 mg/L) debido a su participación en procesos de reducción biológica [26], mientras que el ácido sulfúrico incrementó significativamente este ión (851,37 mg/L) por su propia disociación.

Todos los tratamientos redujeron el cloro residual libre, aunque sin diferencias significativas ($p \geq 0,05$). El ácido cítrico fue el más eficiente (53,18 mg/L) debido a su acción reductora [27], seguido por el ácido acético, el sulfúrico y el dióxido de carbono. En los demás tratamientos la disminución se asoció a la conversión del ión hipoclorito (OCl^-) en ácido hipocloroso (HOCl), compuesto menos estable y más reactivo, favorecido por reducciones en pH [17], [28]. Con dióxido de carbono, la generación de ácido hipocloroso promovió su descomposición parcial en oxígeno y cloruros [29].

Finalmente, la demanda química de oxígeno (DQO) presentó diferencias significativas entre tratamientos ($p \leq 0,05$). Los ácidos acético y cítrico incrementaron notablemente este parámetro (2721,67 mg/L y 7664,33 mg/L) debido al aporte de materia orgánica y a la formación de subproductos fácilmente oxidables, comportamiento ya descrito por Kos, Perek y Perek [30]. En contraste, el dióxido de carbono y el ácido sulfúrico lograron reducir la DQO respecto al valor inicial (74,50 mg/L), evidenciando mejor desempeño en términos de disminución de la carga orgánica.

Comparación de los tratamientos aplicados para seleccionar el más adecuado cumpliendo con el Decreto No. 883 para su disposición final

Los resultados de la evaluación de los tres métodos de neutralización aplicados al efluente generado en la producción de hipoclorito de sodio, presentado en la Tabla 4, evidenció que la inyección de dióxido de carbono es la opción más eficiente y ambientalmente sostenible, al alcanzar un pH promedio de $7,31 \pm 0,15$ y reducir varios parámetros fisicoquímicos dentro de los límites del Decreto No. 883 [1]. Sin embargo, aunque los sólidos totales disminuyeron, aún exceden el límite normativo, por lo que se recomienda complementar la sedimentación con coagulantes como PAC o sulfato de aluminio para asegurar su remoción [31]. En contraste, los tratamientos con ácidos orgánicos incrementan la materia orgánica, los sólidos totales y la DQO, deteriorando la calidad del efluente.

Conclusiones

Los análisis fisicoquímicos del efluente generado en la producción de hipoclorito de sodio evidenciaron que el pH, los cloruros y los distintos tipos de sólidos superan los límites establecidos en el Decreto No. 883, Artículo 15. Aunque la sedimentación redujo los sólidos suspendidos y flotantes, el pH elevado requiere un tratamiento químico adicional. Los cuatro tratamientos de neutralización lograron ajustar el pH dentro del rango permitido. El ácido sulfúrico fue el más eficiente en dosis; mientras que, el dióxido de carbono ofreció una neutralización más controlada. En contraste, los ácidos acético y cítrico incrementaron la DQO y los sólidos totales, superando los límites normativos. Los tratamientos con dióxido de carbono y ácido sulfúrico redujeron los sólidos totales, aunque sin cumplir el valor máximo permitido. Solo el ácido cítrico y el dióxido de carbono cumplieron con los límites de sólidos suspendidos. Ningún tratamiento cumplió con los valores exigidos para cloruros ni DQO, por lo que ninguno satisface por completo los requisitos del Artículo 10 del Decreto No. 883. El uso de dióxido de carbono permitió cumplir con los parámetros exigidos en el Artículo

CC BY-SA 4.0

15 del Decreto No. 883 para descarga en redes cloacales, excepto en sólidos totales. En consecuencia, se recomienda complementar la sedimentación con un tratamiento de coagulación-floculación. Por lo tanto, el dióxido de carbono se posiciona como la alternativa más eficiente y ambientalmente favorable para lograr la reducción del pH del efluente generado en la empresa productora de hipoclorito de sodio.

Referencias bibliográficas

[1] Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos, Decreto No. 883. Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela, 1995.

[2] Telwesa, *Normativa y legislación sobre el tratamiento de aguas residuales*, Telwesa, 2023. [En línea]. Disponible en: https://telwesa.com/normativa-legislacion-tratamiento-aguas-residuales

[3] Aguas naturales, industriales y residuales: Guía para las técnicas de muestreo, Norma Venezolana COVENIN 2709:2002, Caracas, Venezuela: FONDONORMA, 2002.

[4] *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23rd ed. Washington, DC, EE. UU.: American Public Health Association, American Water Works Association, y Water Environment Federation, 2017.

[5] T. Romero, H. Rodríguez, y A. Masó, "Caracterización de las aguas residuales generadas en una industria textil cubana", *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol. 37, no. 3, pp. 46-58, 2016.

[6] A. Breytus, A. P. Kruzic, y S. Prabakar, "Chlorine decay and chlorate formation in two water treatment facilities", *Journal AWWA*, vol. 109, no. 4, pp. E110-E120, 2017. [En linea]. Disponible: https://doi.org/10.5942/jawwa.2017.109.0034

[7] G. H. Tran, T. K. Tran, H.-J. Leu, D. Richards, y S.-S. Lo, "An integrated system combining electrochemical oxidation and filtration processes for the removal of chlorine from pharmaceutical industry wastewater", *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 17, no. 2, pp. 103-112, 2024. [En linea]. Disponible: https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2024.105611

[8] M. Gual Frau, "Reutilización de aguas grises para la descarga de inodoros. Aspectos químicos relacionados", Tesis doctoral, Departamento de Química, Universidad de las Islas Baleares, Palma de Mallorca, España, 2005. [En línea]. Disponible: http://hdl.handle.net/11201/153050

[9] K. A. Ayala Gil, "Evaluación de procesos para la remoción de iones cloruro en el agua residual de la planta de alimentos Pepsico (FUNZA)", Tesis de pregrado, Fundación Universidad de las Américas, Bogotá, Colombia, 2016. [En línea]. Disponible: https://hdl.handle.net/20.500.11839/580

[10] M. Gadient, *Mis intentos de ajustar el pH para las plantas con vinagre y ácido cítrico*, 2016. [En línea]. Disponible en: https://mattgadient.com/es/mis-intentos-de-ajustar-el-ph-para-las-plantas-con-vinagre-y-acido-citrico

[11] J. Arce-Menocal *et al.*, "Empleo de ácidos orgánicos en el agua de bebida y su efecto en el desempeño productivo en pollos de engorda", *Abanico veterinario*, vol. 10, no. 1, pp. 1-17, 2020.

[12] J. Gastañadui Cruz *et al*., "Carbon dioxide-based neutralization of high-density sludge effluents as a sustainable climate and water quality alternative to the use of strong mineral acids", *Sustainability*, vol. 16, no. 23, pp. 1-14, 2024. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.3390/su162310363

[13] A. S. Abd Al-Hussein, "Using sulfuric acid (H_2SO_4) for pH adjustment in water treatment," *Journal of Petroleum Research and Studies*, vol. 11, no. 3, pp. 19-27, 2021. [En linea]. Disponible: https://doi.org/10.52716/jprs.v11i3.530

[14] M. Henze, M. C. M. van Loosdrecht, G. A. Ekama y D. Brdjanovic, *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design*, Londres, Reino Unido: IWA Publishing, 2008.

[15] R. Chang, *Química*, 10ma ed., Ciudad de México, México: McGraw-Hill, 2010.

CC BY-SA 4.0
Revista Tecnocientífica URU, No. 29 Julio - Diciembre 2025 (33 - 44)

[16] D. Hincapié, W. Usme, y D. Gallego, "Desarrollo y escalado de un proceso para la neutralización de aguas residuales alcalinas con gases de chimenea", *Revista QUID*, no. 25, pp. 57-68, 2015. [En linea]. Disponible: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5278483

[17] A.M. Romani, S. Amalfitano, J. Artigas, S. Fazi, Sergi Sabater, X. Timoner, I. Ylla & A. Zoppini, "Microbial biofilm structure and organic matter use in mediterranean streams", *Hydrobiologia*, Vol. 719, no. 1, pp. 43-58. 2012. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.1007/s10750-012-1302-y

[18] Metcalf & Eddy, Inc., *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*, 5th ed., Nueva York, EE. UU.: McGraw-Hill Education, 2014.

[19] M.H. Al-Khaldi, H.A. Nasr-El-Din, S. Mehta, y A.D. Al-Aamri, "Reaction of citric acid with calcite", *Chemical Engineering Science*, vol. 62, no. 21, pp. 5880–5896, 2007. [En linea]. Disponible: https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.06.021

[20] G. Tchobanoglous, F. L. Burton y H. D. Stensel, *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, 4th ed., Nueva York, EE. UU.: McGraw-Hill, 2003.

[21] R. Sánchez, y K. García, "Tratamiento de aguas residuales de cargas industriales con oxidación avanzada en sistemas convencionales", *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida,* vol. 27, no. 1, pp. 103-111, 2018.

[22] C. Chávez, "Evaluación de la capacidad de absorción de CO_2 con un proceso mecánico para la neutralización de aguas residuales de Industrias Albus S.A.", Trabajo Especial de Grado, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia, 2023.

[23] J. C. Crittenden, R. R. Trussell, D. W. Hand, K. J. Howe y G. Tchobanoglous, *MWH's Water Treatment: Principles and Design*, 3rd ed., Hoboken, EE. UU.: John Wiley & Sons, 2012.

[24] J. Edzwald, *Water Quality & Treatment: A Handbook on Drinking Water*, 6th ed., Nueva York, EE. UU.: McGraw-Hill Professional, 2010.

[25] T. A. Kurniawan, G. Y. S. Chan, W-H. Lo, y S. Babel, "Physico–chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals", *Chemical Engineering Journal*, vol. 118, no. 1-2, pp. 83-98, 2006. [En linea]. Disponible: https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.01.015

[26] A. J. M. Stams, J. Huisman, P. A. García Encina, y G. Muyzer, "Citric acid wastewater as electron donor for biological sulfate reduction", *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 83, no. 5, pp. 957-963, 2009. [En linea]. Disponible: https://doi.org/10.1007/s00253-009-1995-7

[27] X. Fan y J. B. Gurtler, "Depletion of free chlorine and generation of trichloromethane in the presence of pH control agents in chlorinated water at pH 6.5", *Journal of Food Protection*, vol. 87, no. 7, 100296, 2024. [En línea]. Disponible: https://doi.org/10.1016/j.jfp.2024.100296

[28] K. Cortez, *Porque es importante controlar el pH en las PTAR o PTARI*, Fluidesa, 2021. [En línea]. Disponible en: https://fluidesa.com.pe/sin-categoria/178/

[29] Hydro Instruments, *Basic Chemistry of Chlorination*. [En línea]. Disponible en: https://www.hydroinstruments.com/files/Basic%20Chemistry%20of%20Chlorination.pdf

[30] L. Kos, K. Michalska, R. Żylla, y J. Peerkowski, "Effect of acetic acid on pollutant decomposition in textile wastewater treated by the Fenton method", *Environmental Protection Engineering*, vol. 38, no. 2, pp. 29-39, 2012. [En linea]. Disponible: https://epe.pwr.edu.pl/2012/2_2012/Kos_2-2012.pdf

[31] E. Quispe, "Remoción de sólidos suspendidos para mejorar la calidad de agua superficial en el sector Pampilla de la cuenca Azángaro, Ananea", Tesis de pregrado, Universidad Continental, Huancayo, Perú, 2021. [En línea]. Disponible: https://hdl.handle.net/20.500.12394/11356

Revista Tecnocientífica URU
Universidad Rafael Urdaneta
No. 29 Julio - Diciembre 2025
Depósito Legal: PPI 201402ZU4464
ISSN: 2343-6360
CC BY-SA 4.0

Diseño de un Centro de Salud Mental basado en criterios de Psicología Ambiental

Design of a Mental Health Center Based on Environmental Psychology Criteria

Valeria S. Calles-Palumbo
Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería, Escuela de Arquitectura
Maracaibo-Venezuela
https://orcid.org/0009-0008-8367-3070 | Correo electrónico: valeria.30181863@uru.edu

Carla I. Villalobos-Molero
Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería, Escuela de Arquitectura,
Maracaibo-Venezuela
https://orcid.org/0009-0000-6547-4221 | Correo electrónico: carla.30683166@uru.edu

Leonardo A. Badell-Gutierrez
Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería, Escuela de Arquitectura, Maracaibo-Venezuela
Universidad del Zulia, Facultad de Arquitectura y Diseño, Maracaibo-Venezuela
https://orcid.org/0000-0002-0296-2399 | Correo electrónico: Leonardo.badell.60646@uru.edu
Recibido: 22-11-2025 Admitido: 01-12-2025 Aprobado: 04-12-2025
DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.20208703

Resumen
La presente investigación tiene como objetivo abordar el diseño de un centro de salud mental con criterios de la psicología ambiental. Para la investigación se analizó la falta de consideración por las necesidades emocionales y psicológicas de los pacientes con trastornos de salud mental, lo cual ha llevado a la deshumanización de los espacios asistenciales, viendo cómo esta situación puede impactar negativamente en la experiencia de los usuarios y su proceso de recuperación. Se propone un Centro de Salud Mental Especializado para adultos de entre 15 y 64 años que presenten patologías como trastornos afectivos y trastornos de ansiedad. La metodología utilizada es analítica, descriptiva y factible, basada en casos internacionales, con recomendaciones por expertos en el tema. Finalmente, se sugiere la implementación de este tipo de edificación para la atención especializada de pacientes con trastornos de salud mental, debido a su contribución en la recuperación de estos pacientes al proporcionar un ambiente terapéutico y seguro, promoviendo la conexión a la naturaleza, su entorno y la interacción social.
Palabras clave: Psicología ambiental, centro de salud mental, arquitectura hospitalaria, humanización de espacios, entorno terapéutico.

Abstract
The present research aims to address the design of a mental health center using environmental psychology criteria. For this research, the lack of consideration for the emotional and psychological needs of patients with mental health disorders was analyzed, seeing as this has led to the dehumanization of care facilities, seeing how this situation can negatively impact the experience of users and their recovery process. A Specialized Mental Health Center is proposed for those adults between 15 and 64 years' old who present pathologies such as affective disorders and anxiety disorders. The methodology used is analytical, descriptive and feasible, based on international cases, with recommendations by experts in the field. Finally, the implementation of this type of building is suggested for the specialized care of patients with mental health disorders due to its contribution to the recovery of these patients by providing a therapeutic and safe environment, promoting connection to nature, their environment, and social interaction.
Keywords: *Environmental psychology, mental health centers, healthcare architecture, humanization of architecture, therapeutic environments.*

V.S. Calles-Palumbo, C.I. Villalobos-Molero y L.A. Badell-Gutierrez. CC BY-SA 4.0
Revista Tecnocientífica URU, No. 29 Julio - Diciembre 2025 (45 - 55)

Introducción

La presente investigación tiene como objetivo abordar el diseño de un centro de salud mental con criterios de la psicología ambiental. En este sentido, se estructura en cuatro apartados principales que guían el desarrollo y análisis del trabajo.

El planteamiento del problema aborda la deshumanización de los espacios de atención en salud, derivada de la escasa consideración hacia las dimensiones emocionales y psicológicas de los pacientes. Esta situación repercute negativamente en la experiencia de los usuarios y en sus procesos de recuperación, lo que justifica la necesidad de un enfoque arquitectónico sensible y adaptado a la psicología ambiental.

En el marco teórico se analizan conceptos clave como la inhibición y la experiencia del usuario en espacios inhibidores, así como los fundamentos de la psicología ambiental aplicados a la tipología asistencial. Se revisan estudios previos que sustentan la relación entre el entorno físico y el bienestar emocional de los individuos, con el fin de establecer una base conceptual sólida para el diseño. A su vez, el marco metodológico describe los métodos y técnicas empleados; estos integran instrumentos de recolección de datos y criterios de análisis que permitirán la interpretación de los resultados de manera rigurosa. Se justifica cada decisión metodológica en función de la pertinencia para el objeto de estudio.

Finalmente, el análisis de resultados contempla el estudio urbano, la caracterización de la población y los aspectos específicos que fundamentan la propuesta arquitectónica. Estos insumos servirán para iniciar el proceso de diseño del centro de salud mental, el cual busca la generación de espacios humanizados que favorezcan la recuperación integral de los pacientes.

Marco teórico

Centro de Salud Mental

Psiquiatría [1] define al Centro de Salud Mental como “dispositivos de atención ambulatoria para la atención de pacientes psiquiátricos de un área geográfica específica”. El Centro de Salud Mental consta de una serie de profesionales como psiquiatras, psicólogos, trabajadores sociales y personal de enfermería. Estos fueron introducidos por primera vez en Estados Unidos en 1963 bajo el nombre de “Community Mental Health Center”.

De la misma forma Tecglen [2] determina que “un Centro de Salud Mental es un dispositivo para pacientes ambulatorios que tiene como atención principal las consultas clínicas, la rehabilitación, y la reinserción en Psiquiatría y Salud Mental correspondientes a un distrito determinado”. Estos centros también realizan tareas orientadas hacia la prevención de las enfermedades y trastornos mentales, además de la potenciación de la salud mental.

La Fundación de Instituto Spiral [3] define a los Centros de Salud Mental como “aquellos lugares especializados donde profesionales de salud (psicólogos, psiquiatras, y trabajadores sociales) brindan tratamiento a personas que presentan trastornos mentales”. Están diseñados para abordar una amplia variedad de patologías como la depresión, la ansiedad, el trastorno bipolar, los trastornos alimenticios, el estrés post-traumático, entre otros; ofreciendo programas ambulatorios, residenciales, o en centros de día.

Psicología ambiental

Hernández [4] define la psicología ambiental como “una disciplina que estudia la naturaleza de la interdependencia entre las personas y el ambiente (...)”. Para la psicología ambiental los procesos de interacción, tanto de forma individual como social, no pueden explicarse utilizando únicamente características personales y sociales, sino que es necesario tener en cuenta las propiedades del escenario en el que se desarrolla la acción.

Por su parte, Aragonés y Amérigo [5] define a la psicología clínica como la “disciplina que estudia las relaciones recíprocas de las personas y el ambiente socio-físico tanto natural como construido (...)”.Además, consideran a psicología ambiental como la disciplina que estudia los procesos de interacción, tanto en su

dimensión individual como social, los cuales no pueden explicarse recurriendo exclusivamente a características personales y sociales, sino que es preciso tener en cuenta las propiedades del escenario en el que se desarrolla la acción."

Al tener en cuenta estos conceptos. se puede decir que la psicología ambiental se define como el estudio y análisis de la interrelación e interacción del ser humano con su entorno. Esta se centra en las variables conductuales y psicológicas de las personas en relación a los diversos entornos, reconociendo que el medio no se trata de un espacio neutral, sino más bien de un contexto cargado de significados, el cual modela y a su vez es modelado por el comportamiento humano.

Psicología ambiental en la tipología asistencial

Como se mencionó previamente, el ambiente influencia fuertemente a las personas, otorgando una sensación de seguridad y confortabilidad, o incluso inestabilidad en el caso de que un usuario se enfrente a un ambiente en el que no se siente cómodo. Con base en esto, Ullán y Manzanera [6] abordan la importancia de humanizar los espacios, especialmente aquellos relacionados con la salud, con el objetivo de incrementar el bienestar de los ocupantes y crear espacios de calidad que promuevan la salud social y comunitaria de dichos lugares.

Según Schweitzer [7], los hospitales diseñados en décadas anteriores muchas veces tienden a ser lugares intimidantes, con múltiples accesos y corredores largos y laberínticos en los que es difícil sentir comodidad. En la actualidad, si bien los hospitales se han modernizado, se han desarrollado también con un énfasis en el diagnóstico y el tratamiento, por lo que su estructura y diseño están orientados a satisfacer estas necesidades. Este enfoque puede originar espacios demasiado institucionalizados que generan ansiedad, estrés e incomodidad en los pacientes y en el personal. No obstante, han empezado a surgir hospitales que toman en cuenta las necesidades de los pacientes, familiares y personal, cuyos diseños tienen un impacto positivo en su salud y ayudan a fortalecer las relaciones interpersonales de estas personas.

Dentro del área de la salud mental, la relación entre las personas y los espacios es especialmente importante ya que el ambiente físico puede considerarse como un instrumento terapéutico que impacte positivamente en la recuperación del paciente [8]. El diseño de los espacios puede cambiar y adaptarse según las necesidades de los distintos tipos de centros y puede utilizarse de igual forma para que los pacientes sean más propensos a cierto tipo de comportamiento.

Usualmente, al plantear un equipamiento de salud no siempre se toma en cuenta el diseño y la correcta distribución de los espacios, sino que la construcción se enfoca solamente en las funciones básicas indispensables. Si un paciente se encuentra en espacios encerrados y en condiciones de hacinamiento en las que cuenta con poca privacidad y circulación limitada, es muy probable que desarrolle una respuesta traumática y reaccione con agresividad frente a situaciones de estrés [8].

Criterios de la Psicología Ambiental

La psicología ambiental, como disciplina que estudia las interacciones entre las personas y su entorno físico [5], ofrece un marco conceptual esencial para el diseño de espacios asistenciales orientados al bienestar emocional. En el contexto de la salud mental, el entorno construido no solo cumple funciones operativas, sino que actúa como un agente terapéutico capaz de modular estados afectivos, cognitivos y conductuales [8].

Diversos estudios han demostrado que variables ambientales como la luz natural, la vegetación, la acústica y la legibilidad espacial inciden directamente en la percepción del usuario, su nivel de ansiedad y su disposición al tratamiento [7, 9, 10]. En este sentido, el diseño del Centro de Salud Mental propuesto incorpora los siguientes criterios derivados de la psicología ambiental:

a) Conexión con la naturaleza: La inclusión de jardines terapéuticos, visuales hacia vegetación autóctona y corredores ecológicos busca reducir el estrés, fomentar la contemplación y estimular la interacción social [9, 10].

b) Iluminación natural y control lumínico: El aprovechamiento de la luz natural mediante vanos estratégicos y superficies traslúcidas contribuye a la regulación de los ritmos circadianos y mejora el estado de ánimo, mientras que la iluminación artificial regulable permite adaptar la atmósfera a las necesidades clínicas [7].

c) Ventilación cruzada y confort térmico: Se emplean estrategias pasivas como ventanas enfrentadas, techos ventilados y vegetación como filtro térmico, garantizando ambientes frescos, saludables y emocionalmente neutros [4, 11].

d) Confort acústico: La zonificación funcional, el uso de materiales absorbentes y la incorporación de barreras acústicas permiten mantener niveles sonoros óptimos (45 dB diurnos y 35 dB nocturnos), minimizando estímulos negativos y favoreciendo la introspección [7, 12].

e) Materialidad emocionalmente neutra: La selección de materiales cálidos, suaves y duraderos, junto con una paleta cromática neutra, evita la percepción institucional y promueve la seguridad emocional [13,14].

f) Legibilidad espacial y autonomía: El diseño de recorridos intuitivos, transiciones graduales entre lo público y lo privado, y una zonificación clara permiten al paciente orientarse con facilidad, fortaleciendo su sentido de control y pertenencia [14, 15].

g) Interacción social y elección personal: Se crean espacios comunes supervisados que promueven vínculos interpersonales sin comprometer la privacidad, permitiendo al usuario decidir entre el aislamiento terapéutico o la conexión social según su estado emocional [16, 17].

Metodología

La investigación se desarrolló en el ámbito de la arquitectura asistencial, específicamente en el diseño de un centro de salud mental fundamentado en criterios de la psicología ambiental. El estudio se llevó a cabo en Maracaibo, estado Zulia, Venezuela, Parroquia Cacique Mara, durante el período comprendido entre 2024 y 2025, y se orientó hacia la generación de lineamientos proyectuales adaptados a los criterios de la psicología ambiental, para humanizar los espacios asistenciales y responder de manera integral a las necesidades emocionales y psicológicas de los usuarios.

Esta investigación se clasificó como tipo proyectiva, dado que busca aportar soluciones aplicables al diseño arquitectónico de espacios de salud mental. A su vez, se enmarcó en un diseño documental y de campo, ya que combinó la revisión exhaustiva de teorías y antecedentes con el análisis urbano y poblacional del contexto de estudio.

Análisis de Resultados

En correspondencia con el objetivo general de diseñar un Centro de Salud Mental fundamentado en criterios de la psicología ambiental, los resultados obtenidos se estructuran en función de los objetivos específicos planteados. Estos hallazgos permitieron establecer lineamientos proyectuales que integran las necesidades emocionales y psicológicas de los pacientes con las condiciones espaciales y arquitectónicas requeridas para un entorno asistencial humanizado.

Identificación de criterios de psicología ambiental aplicados a la tipología asistencial

El análisis documental permitió identificar los conceptos clave de la psicología ambiental relevantes para la arquitectura asistencial. Se evidenció que variables como iluminación natural, ventilación cruzada, materiales cálidos, control acústico y disposición espacial influyen directamente en la percepción del paciente y en su proceso de recuperación. Asimismo, se reconoció la importancia de factores psicosociales como la interacción social, la orientación espacial y la percepción de seguridad. Estos resultados fundamentan recomendaciones orientadas a la práctica, tales como la incorporación de ambientes más acogedores, la reducción de estímulos negativos y la creación de espacios que promuevan interacciones positivas entre usuarios y personal de salud (Tabla 1).

Tabla 1. Criterios de la Psicología Ambiental

Aspectos	Espacial	Urbano
Entorno	Ventanas con vistas a la naturaleza reduce la ansiedad e incrementa la tolerancia al dolor de los pacientes. Acceso a la naturaleza mediante jardines interiores y exteriores [9].	Espacios verdes como parques, jardines, techos y paredes verdes, y corredores ecológicos para mejorar la calidad del aire y proporcionar áreas de recreación. Plazas, calles peatonales y zonas comunes que faciliten el encuentro y la cohesión social [10].
Luz	Correcta iluminación Luz regulable [18].	Espacios públicos que aprovechen al máximo la luz natural mediante la orientación adecuada [19].
Topografía	N/A	Espacios públicos que aprovechen la topografía natural del terreno para minimizar la intervención y aprovechar las características existentes, como colinas, valles y pendientes. Caminos y estructuras que respeten y mejoren la conexión visual y la accesibilidad, facilitando la movilidad y la integración de la comunidad con el entorno natural. [19].
Ventilación	La ventilación natural aumenta la eficiencia de cualquier edificio y regula la temperatura interior Ventanas que puedan abrirse [20].	Sistemas de filtración de aire y utilizar vegetación que ayude a purificar el aire [20].
Materiales	Materiales con patrones simples y formas poco complejas Materiales duraderos, ya que los pacientes de este tipo de instituciones tienden a interactuar físicamente con su entorno [13].	Materiales de construcción ecológicos y de bajo impacto ambiental Materiales que no solo sean funcionales y sostenibles, sino también estéticamente agradables y confortables al tacto y la vista [14].
Sonido	Rango óptimo de decibeles se ubica en los 45 dB en el día y aproximadamente 35 dB en la noche [7].	Espacios que favorezcan el confort acústico. Barreras acústicas y zonas de amortiguación del ruido [12].

Factores inhibidores en los espacios asistenciales

El estudio de los espacios existentes permitió identificar barreras arquitectónicas y de diseño que generan sensación de inhibición en los usuarios. Entre ellas destacan la falta de accesibilidad universal, la rigidez en la distribución espacial, la ausencia de áreas de transición y la escasa consideración de la privacidad. Se comprobó que estas condiciones limitan la movilidad, la comodidad y la interacción social de los pacientes. En respuesta, se plantearon estrategias de adaptación que incluyeron la implementación de tecnologías innovadoras, la mejora de la accesibilidad mediante rampas y circulaciones fluidas, y la incorporación de espacios flexibles que reduzcan la percepción de confinamiento (Tabla 2).

V.S. Calles-Palumbo, C.I. Villalobos-Molero y L.A. Badell-Gutierrez. CC BY-SA 4.0
Revista Tecnocientífica URU, No. 29 Julio - Diciembre 2025 (45 - 55)

Tabla 2. Traducción de la inhibición a la Arquitectura

Variable	Descripción	Autor
Usos	La monotonía en el diseño y la falta de variedad de usos pueden hacer que los espacios urbanos se sientan aislados y poco acogedores	Richard De Voe, M. [21]
Accesibilidad	Un diseño urbano que no considera las necesidades y dimensiones humanas, así como la falta de accesibilidad para personas de todas las edades y habilidades, puede generar una sensación de exclusión y alienación	Gehl, J. [15]
Límites	La falta de límites físicos o simbólicos entre espacios públicos y privados puede contribuir a la sensación de inseguridad y falta de control en el entorno urbano.	Newman, O. [22]
Interacción Social	La falta de oportunidades para interacciones sociales de calidad y relaciones comunitarias diversificadas puede provocar una sensación de aislamiento y desconexión en los residentes	Appleyard, D. [12]
Entorno	Un entorno urbano que carece de una estructura clara y organizada, dificultando la orientación y la navegación intuitiva, puede generar una sensación de confusión y alienación	Lynch K. [14]

Relación entre necesidades del paciente y grado de inhibición del espacio

La investigación de campo permitió contrastar las necesidades de los pacientes con los criterios espaciales de la psicología ambiental. Se identificaron aspectos prioritarios como movilidad, accesibilidad, privacidad, comodidad y seguridad, los cuales se ven afectados por el grado de inhibición presente en los espacios asistenciales. El análisis reveló patrones de correlación entre la falta de privacidad y la sensación de inseguridad, así como entre la rigidez espacial y la incomodidad percibida. Estos hallazgos confirman que la configuración del entorno asistencial puede facilitar o dificultar la satisfacción de las necesidades individuales. En consecuencia, se formularon recomendaciones específicas para optimizar la distribución espacial, garantizar la privacidad en áreas de atención y promover ambientes que reduzcan la ansiedad y favorezcan la recuperación (Tabla 3).

Tabla 3. Lista de variables de cotejo según la variable ambiental

Característica	Si	No
Usos y actividades		
Variedad de usos		X
Vitalidad y actividad en los espacios públicos		X
Uso eficiente del espacio público		X
Accesibilidad		
Mantenimiento adecuado de infraestructuras y espacios públicos		X
Accesibilidad para todas las edades y habilidades		X
Límites		
Establecimiento de límites físicos o simbólicos		X
Sentido de propiedad y control territorial		X

Interacción social		
Oportunidades para interacciones comunitarias	X	
Entorno		
Estructura clara y organizada		X
Disposición lógica de servicios y equipamientos		X
Señalización clara y eficaz		X
Legibilidad y comprensión del entorno		X
Facilidad de orientación y navegación		X

Ámbito de Cobertura del Servicio

Según la Gaceta Oficial de Normas para Equipamiento Urbano [23] el Centro Especializado de Salud Mental se comprende bajo el uso asistencial como tipo de "Hospital Especializado" en el Ámbito General, donde el índice de m^2 por habitante es de un 0,20. Este dato se multiplicó por la población de la ciudad de Maracaibo proyectada hasta el 2040 obteniendo así una cantidad de 54.86 hectáreas a lo cual se añadió el 5% de áreas verdes, por lo cual la demanda de equipamientos de tipo asistencial para uso de Hospital Especializado fue de 57.60 hectáreas. De estas hectáreas calculadas el 23.85% de ellas, es decir, 13.74 hectáreas, corresponden a equipamientos asistenciales de salud mental, viendo así una falta de 43.86 hectáreas para el año 2040.

Sabiendo que 10.46 hectáreas de las restantes pertenecen a equipamientos asistenciales de salud mental, en este trabajo se diseñó un equipamiento de 2.5 hectáreas, que servirá como modelo a replicar para cumplir con la demanda calculada.

Propuesta de diseño del Centro de Salud Mental

El análisis de la población objetivo (adultos entre 15 y 64 años con trastornos afectivos y de ansiedad) permitió definir las características del Centro de Salud Mental Especializado. Se estableció una distribución espacial que contempla áreas de atención individual y grupal, espacios para actividades terapéuticas, zonas de bienestar y áreas de transición que faciliten la movilidad y reduzcan la sensación de confinamiento. Asimismo, se propusieron programas y servicios específicos como terapia individual y grupal, intervenciones psicológicas especializadas, programas de prevención y promoción de la salud mental, y servicios de apoyo y seguimiento. La propuesta arquitectónica integró criterios de sostenibilidad, confort ambiental y diseño inclusivo, consolidando un modelo asistencial que responde a las necesidades emocionales y psicológicas de los pacientes

Proceso de diseño

Teniendo en cuenta el análisis, se estableció una propuesta urbana enfocada, utilizando tres líneas estratégicas: rehabilitar, resignificar, y renaturalizar.

Rehabilitar, abarca consolidar el sector reconociendo la dinámica urbana existente mediante una mixtura de usos en edificios de mediana densidad, centralizados en la avenida 41. En esta mixtura de usos se dan comercios, oficinas y viviendas, las cuales tienen dos propósitos, densificar el tejido urbano, y reubicar a los habitantes en zonas de riesgo por inundación. Bajo este criterio se plantean cinco (5) tipologías, una vivienda bifamiliar pareada, vivienda bifamiliar pareada productiva, edificio residencial de mediana densidad, edificio mixto de mediana densidad, y edificio polifuncional.

Resignificar por su parte, habla de los vacíos urbanos como oportunidades para desarrollar una red de espacios públicos, los cuales luego de su planificación le dan una nueva identidad al sector. Esta red de espacios públicos, permiten la permanencia del usuario y la permeabilidad del sector, tomando más importancia la implementación de parques, plazas, y el parque metropolitano.

V.S. Calles-Palumbo, C.I. Villalobos-Molero y L.A. Badell-Gutierrez. CC BY-SA 4.0
Revista Tecnocientífica URU, No. 29 Julio - Diciembre 2025 (45 - 55)

Finalmente, renaturalizar identifica el espacio vacío anteriormente utilizado por las viviendas en zona de riesgo como espacio de desarrollo para las cañadas, dándole las medidas adecuadas para evitar inundaciones, bordeando esto con aceras y ciclovías, así mismo, utilizando el corredor ecológico como elemento articulador del espacio público conectándose con el parque metropolitano, el cual está adaptado a las condiciones topográficas existentes, utilizando los espacios públicos como articuladores para la permeabilidad del sector (Figura 1).

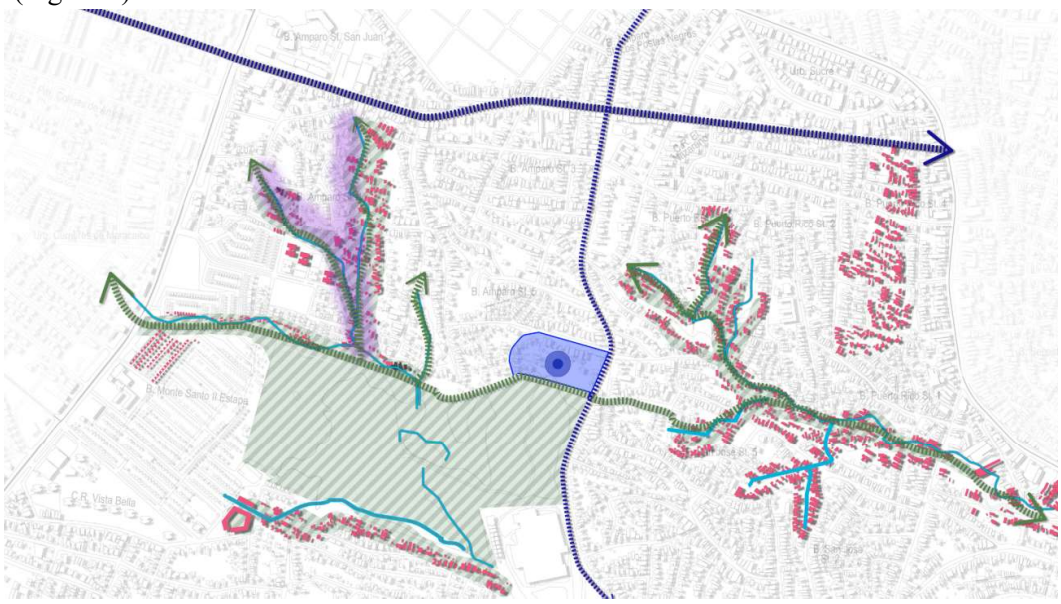


Figura 1. Plano de emplazamiento según las líneas estratégicas

El edificio es planteado como centro de la propuesta urbana, siendo este una combinación de las líneas estratégicas aplicadas, buscando la conexión con el entorno tanto en las áreas exteriores mediante el paisajismo y su relación al parque metropolitano, como en los espacios interiores, visto en las texturas de piso que indican recorridos y espacios de permanencia para el disfrute de las visuales.

A continuación, en la Figura 2, se presenta el diagrama para la obtención de la forma requerida en el proyecto:

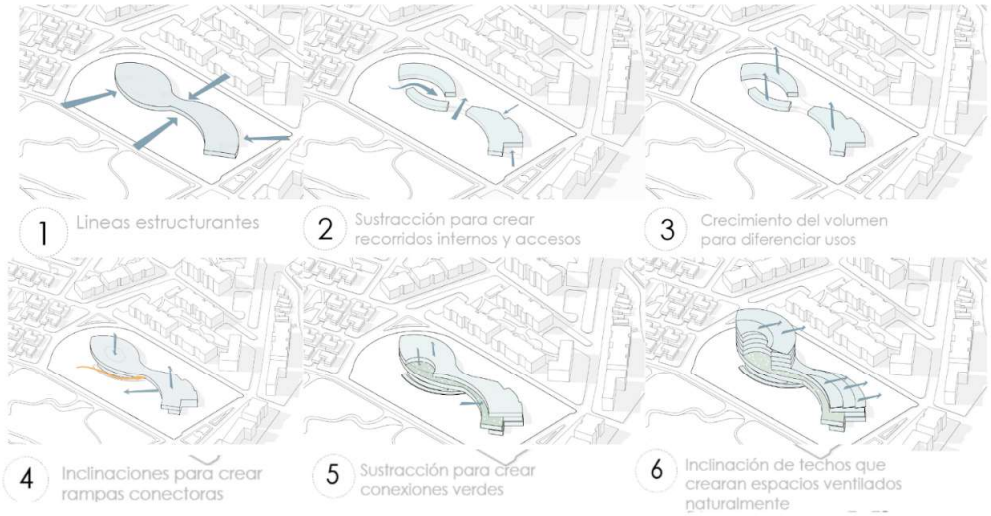


Figura 2. Diagrama de obtención de forma

Como se observa en la Figura 2, las áreas están programadas según el grado de privacidad requerido, teniendo el área de emergencia como la entrada más próxima a la vía principal, al noreste del edificio, viéndose enmarcada por un techo curvo extendido. La planta baja se caracteriza por la gran cantidad de áreas de esparcimiento, mediante museos, talleres, salones de yoga, entre otras actividades que fomentan la conexión con el entorno tanto físico como personal (Figura 3).

Los edificios se encuentran conectados en el primer piso por una rampa externa y pasillos internos programados con áreas de permanencia, lo cual permite que el usuario recorra el edificio, aprovechando las visuales hacia el sur, donde está ubicado el parque metropolitano. También se encuentran varios vacíos que permiten ver hacia niveles inferiores y superiores, creando dobles alturas, e incluso, cuádruples alturas.

Por su parte el segundo piso crea una conexión entre los módulos mediante una pasarela destechada, bordeada por una jardinera en el exterior, llevando la conexión con la naturaleza dentro del edificio; enfatizando esto con una plaza central en el exterior del primer módulo, creando visuales agradables tanto para los pacientes y visitantes en las habitaciones, como espacios de permanencia y contemplación para el usuario que no tenga acceso a las habitaciones.

A partir del tercer piso se crea una separación entre los módulos, siendo el primer módulo aquel correspondiente a las habitaciones para tratamiento continuo y consultorios dirigidos para pacientes residentes que deben ser acompañados por el personal encargado y enfermeros; y el segundo módulo como huerto y café para aquellos pacientes rutinarios, que no necesitan estar vigilados en su totalidad por el personal asistencial, pero aun así deben asistir a sus respectivas consultas.

Figura 3. Planta Baja Conjunto (según plano vial)

Para una población proyectada hasta el 2040, se seleccionarán aquellos adultos entre 15 a 64 años con trastornos afectivos y trastornos de ansiedad, siendo estos los trastornos con mayor prevalencia en ámbitos generales, teniendo como población usuaria a 7.157 adultos. En el caso de la espacialidad, el centro de salud mental debe contar con espacios de atención inmediata como lo es emergencias, espacios de atención

programada, espacios de tratamiento continuo, y espacios de esparcimiento y conexión, para satisfacer las necesidades tanto de los pacientes y personal asistencial, como de visitantes y algún otro usuario externo.

Los pacientes se dividirán por sexo y posteriormente por la gravedad de su patología, los pacientes con trastornos de leves a moderados son recomendados para compartir habitación con cualquier otra patología, los pacientes con trastornos de moderados a graves son recomendados a compartir habitaciones solo con pacientes de la misma patología, y aquellos pacientes con trastornos graves, síntomas psicóticos, o ideaciones suicidas, deben estar aislados.

Conclusiones

Estudiando los criterios de la psicología ambiental, se puede concluir que factores como la iluminación, ventilación, el sonido, la topografía, los materiales, entre otros, son estimulantes para el paciente, y el uso apropiado de los mismos es capaz de mejorar el confort del paciente y por ende, su tratamiento se ve acelerado. Estos criterios son aplicables a la arquitectura y el urbanismo, por lo cual se propone una tipología asistencial adaptada, tomando al paciente con trastornos psicosociales como el usuario principal del diseño.

En el contexto urbano actual, las cañadas han sido tratadas como espacios residuales, sin planificación ni integración funcional. Sin embargo, su presencia representa una oportunidad para resignificar el paisaje urbano y hacer énfasis en los elementos naturales como ejes estructurantes del diseño arquitectónico y urbano. La cañada, al generar su vegetación, topografía y corredores ecológicos propios, se transforma en un sistema de articulación espacial, permitiendo organizar el proyecto en torno a su recorrido.

La arquitectura del proyecto emula los elementos naturales no de forma literal, sino como una traducción espacial de sus características, viéndose en las formas orgánicas, materiales naturales, ventilación cruzada y patios internos, iluminación natural, y vegetación interna (jardines, jardineras, huertos). De esta manera, la arquitectura se convierte en una extensión del paisaje urbano, reforzando la importancia de la conexión entre el usuario y su entorno.

Referencias bibliográficas

[1] Psiquiatría, “Centro de Salud Mental (CSM)”. [En línea]. Disponible en: https://psiquiatria.com/glosario/centro-de-salud-mental. [Consultado: Ene. 29, 2024].

[2] C. Tecglen, “¿Cómo y cuándo acudir a un centro de salud mental?”, 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.discapnet.es/salud/guias-y-articulos-de-salud/guia-sobre-salud-mental/como-y-cuando-acudir-un-centro-de-salud-mental-tipos-de-centros. [Consultado: Mar. 4, 2024].

[3] Fundación Instituto Spiral, “Salud Mental”, 2024. [En línea]. Disponible en: https://fispiral.com.es/saludmental/ [Consultado: Mar. 4, 2024].

[4] B. Hernández, “Psicología Ambiental: la relación persona-medio ambiente”, *Revista de psicología social aplicada*, no. 2-3, pp. 5-14, 1997. [En línea]. Disponible en: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=159311. [Consultado: Mar. 4, 2024].

[5] J. I. Aragonés, y M. Amérigo, *Psicología Ambiental*. Ediciones Pirámide, 1998.

[6] A. M. Ullán, y P. Manzanera, “Las paredes cuentan: arte para humanizar un espacio de salud pediátrico”, *Arte, Individuo y Sociedad*, 21, 123-142, 2009. [En línea]. Disponible en: https://revistas.ucm.es/index.php/ARIS/article/view/ARIS0909110123A https://www.redalyc.org/pdf/5135/513551277009.pdf. [Consultado: Ago. 6, 2025].

[7] M. Schweitzer, L. Gilpin, y S. Frampton, “Healing Spaces: Elements of Environmental Design That Make an Impact on Health”, *The journal of Alternative and Complementary Medicine*, vol. 10, no. 1, 71-83, 2004. [Internet]. Disponible en: https://www.liebertpub.com/doi/pdf/10.1089/acm.2004.10.S-71?download=true

[8] E. Roth, *Psicología Ambiental: Interfase entre conducta y naturaleza*. Revista Ciencia y Cultura, no. 8, pp. 63-78, 2000. [En línea]. Disponible en: https://www.studocu.com/es-ar/document/universidad-de-buenos-aires/psicologia/roth-2000-psicologia-ambiental-interfase-entre-conducta-y-naturaleza/121325722

[9] R. S. Ulrich, "La vista a través de una ventana puede influir en la recuperación de una cirugía", *Science*, vol. 224, no. 4647, pp. 420-421, 1984. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/17043718_View_Through_a_Window_May_Influence_Recovery_from_Surgery. [Consultado: Ago. 6, 2025].

[10] R. Kaplan, S. Kaplan, y R. L. Ryan, *With people in mind: design and management of everyday nature*, Island Press, 2000. [En línea]. Disponible en: https://placesjournal.org/assets/legacy/pdfs/with-people-in-mind-design-and-management-of-everyday-nature.pdf. [Consultado: Ago. 6, 2025].

[11] I. L. McHarg, *Design with nature*. Wiley, New York, EE. UU: Natural History Press, 1969.

[12] D. Appleyard, "Livable Streets: Protected Neighborhoods?", *The Annals of the American Academy of Political and Social Science: Changing Views on Historical Conservation in Cities*, pp. 106-117, 1980.

[13] F. Lotito Catino, "Arquitectura, Psicología, Espacio, e Individuo", Arquitectura / Urbanismo / Sustentabilidad, vol. 6, no. 17, 2009. [En línea]. Disponible en: http://revistas.uach.cl/pdf/aus/n6/art03.pdf. [Consultado: Mar. 4, 2024].

[14] K. Lynch, *The image of the city*. MIT Press, USA. 1960.

[15] J. Gehl, *Ciudades para la gente*. 1ra Ed. Ciudad Autónoma de Buenos Aire: Infinito, 2010.

[16] M. Zabella, "Del Miedo a la Calma. Espacios para la Salud Mental", Trabajo Fin de Grado, Proyectos Arquitectónicos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2023. [En línea]. Disponible en: https://oa.upm.es/72578/. [Consultado: Ene. 21, 2024].

[17] G. Evans, "The Built. Environment and Mental Health", *Journal of Urban Health: Bulletin of the New York Academy of Medicine*, vol. 80, pp. 536-555, 2003. [En línea]. Disponible en: https://link.springer.com/article/10.1093/jurban/jtg063

[18] R. Neutra, *Realismo Biológico. Un nuevo Renacimiento humanístico en arquitectura*. Buenos Aires, Argentina: Nueva Visión, 1973.

[19] L. Becerra, "Arquitectura como herramienta terapéutica en el campo de la salud mental", Trabajo Especial de Grado, Fac. Arquitectura, Univ. de Chile, 2017. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/144264

[20] M. Richard De Voe (Ed.), "Urban thinker with and ecologist´s eye-Jane Jacobs Legacy", *Coastal Heritage*, vol. 20, no. 1, 2011.

[21] O. Neuman, *Defensible Space; Crime Prevention Through Urban Design. 3ra Ed. Nueva York, EE. UU: Collier Books, 1978.*

[22] Normas para equipamiento urbano, Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 33.289. Caracas, Venezuela. Resolución Nº 151 de fecha 14 de agosto de 1985. Disponible en: https://www.fau.ucv.ve/idec/normas_construccion/Gaceta_Normas_equipamiento.pdf

Revista Tecnocientífica URU
Universidad Rafael Urdaneta
No. 29 Julio - Diciembre 2025
Depósito Legal: PPI 201402ZU4464
ISSN: 2343-6360
CC BY-SA 4.0

Diseño de un sistema de mantenimiento preventivo para los equipos de una línea de extrusión de polietileno en una empresa de tuberías plásticas[1]

Design of a Preventive Maintenance System for Polyethylene Extrusion Line Equipment in a Plastic Piping Company

Rosa V. Molina-Márquez
Universidad Rafael Urdaneta, Decanato de Postgrado e Investigación, Doctorado en Economía, Gestión y Política.
Maracaibo, Venezuela
https://orcid.org/0009-0002-9954-5467 | Correo electrónico: rosavmolinam@gmail.com
Recibido: 22-11-2025 Admitido: 01-12-2025 Aprobado:04-12-2025
DOI:

Resumen
La competitividad en la extrusión de polietileno de alta densidad (PEAD) demandó una disponibilidad de equipos operativos superior al 85 %. No obstante, la línea de extrusión B-75 en una empresa de tuberías plásticas laboró bajo un patrón de mantenimiento correctivo; esta situación provocó paradas no planificadas y, en consecuencia, pérdidas operacionales, económicas y de credibilidad. En virtud de lo anterior, la investigación tuvo como propósito el diseño de un sistema de mantenimiento preventivo para dicha línea. Metodológicamente, el estudio se enmarcó como un proyecto factible, con un diseño de campo y descriptivo, sobre una muestra de catorce equipos críticos. Para ello, se aplicó un diagnóstico inicial, al cual siguió un análisis de criticidad y la estandarización conforme a la Norma COVENIN 3049-93. Entre los principales hallazgos se evidenció la inexistencia de un sistema de mantenimiento preventivo; este hecho se tradujo en 182 horas de inactividad no planificada. Como parte de las soluciones, la propuesta incluyó la realización de inventarios, una matriz de análisis de criticidad, rutinas de inspección y la programación de las labores preventivas. Finalmente, se proyectó que, mediante la ejecución de esta propuesta, disminuyan las fallas y se efectúe la transición de un modelo reactivo hacia una gestión proactiva, eficiente y fiable para la producción.
Palabras Clave: Mantenimiento preventivo, Línea de extrusión, Gestión de activos, Fiabilidad del equipo, Disponibilidad

Abstract
Competitiveness in high-density polyethylene (HDPE) extrusion demanded an operational equipment availability exceeding 85%. However, the B-75 extrusion line in a plastic piping company operated under a corrective maintenance pattern; this situation caused unplanned downtime and, consequently, operational, economic, and credibility losses. In view of the above, the research aimed to design a preventive maintenance system for said line. Methodologically, the study was framed as a feasible project, with a field and descriptive design, based on a sample of fourteen critical pieces of equipment. To this end, an initial diagnosis was applied, followed by a criticality analysis and standardization in accordance with the COVENIN 3049-93 Standard. Among the main findings, the lack of a preventive maintenance system was evidenced; this fact resulted in 182 hours of unplanned downtime. As part of the solutions, the proposal included the development of inventories, a criticality analysis matrix, inspection routines, and the scheduling of preventive tasks. Finally, it was projected that, through the implementation of this proposal, failures would decrease and a transition from a reactive model toward proactive, efficient, and reliable production management would be achieved.
Keywords: *Preventive maintenance, Extrusion, Asset management, Equipment reliability, Availability.*

[1]Artículo adaptado de la ponencia presentada en la II Jornada de Ingeniería de la Universidad Rafael Urdaneta, 2025.

R.V. Molina-Márquez. CC BY-SA 4.0
Revista Tecnocientífica URU, No. 29 Julio - Diciembre 2025 (57 - 64)

Introducción

Según Nastaj y Wilczyński [1], la manera eficiente de armonizar el uso de recursos humanos, materiales, técnicos, temporales y financieros incide en el desarrollo de los procesos administrativos y operativos, así como en la calidad de los productos y servicios que ofrecen las organizaciones al mercado. En este orden de ideas, la extrusión de polietileno de alta densidad (PEAD) requiere una disponibilidad superior al 85 % para ser competitiva.

Para Hernández [2], este sector en Venezuela notifica paradas anuales no programadas que suscitan pérdidas significativas. Por esta razón, la implementación de sistemas de mantenimiento preventivo demuestra eficacia en la reducción de estas paradas en América Latina, con un impacto estimado entre el 30 % y el 40 %.

Es conveniente puntualizar que las organizaciones cuya razón social radica en la producción y prestación de servicios necesitan herramientas que impulsen la competitividad. Los sistemas de mantenimiento añaden elementos que permiten la incorporación de diversos ciclos o etapas de procesos clave, lo cual impulsa operaciones que se desarrollan de manera continua, armónica y orientada al éxito.

Dentro de este contexto, la inestabilidad que evidencian los factores políticos y de mercado propicia que las empresas nacionales, medianas y pequeñas, refuercen sus herramientas e instrumentos administrativos. Esto lleva a la búsqueda de técnicas y métodos orientados a la gestión gerencial, supervisión, control e incremento en el desempeño eficaz de sus funciones. Asimismo, las empresas productoras y de servicios operan en entornos competitivos cuyas circunstancias influyen en la ejecución de los procesos; este escenario incide en la recuperación del capital y en la disminución de los costos.

En ese escenario se ubica la empresa REVINCA, C.A., la cual opera con una línea de extrusión B-75 integrada por 14 equipos críticos: 4 bañeras de vacío/aspersión, arrastre, marcador, sierra y 2 bobinadores. En dicha organización se registran 63 paradas no planificadas con un acumulado de 182 horas; este hecho provoca sobrecostos no estipulados que se destinan a reparaciones correctivas. Por ello, la ausencia de un sistema de mantenimiento preventivo causa pérdidas considerables y la acumulación de un registro histórico de poca fiabilidad. Con base en el planteamiento expuesto, se formula como propósito de la investigación el diseño del sistema de mantenimiento preventivo de los equipos de la línea de extrusión B-75 de la empresa REVINCA, C.A.

La implementación de este sistema no puede ofrecerse de forma improvisada, sino que debe conformar las acciones estratégicas de la organización. Estas engloban factores económicos proyectados a la reducción de costos de mantenimiento y de parada, el incremento de la disponibilidad operativa y la alineación con las normas COVENIN 3049-93 [3] e ISO 55000 [4]. El desconocimiento de las fallas en los equipos limita la capacidad de acción y el establecimiento de un mantenimiento proactivo en las instalaciones, pues evidencia una gestión no consolidada ni cuantificada. En virtud de lo anterior, la investigación tiene como propósito diseñar un sistema de mantenimiento preventivo para la línea de extrusión B-75 de REVINCA, C.A. mediante el enfoque de criticidad RAM (*Reliability, Availability, Maintainability*).

Fundamentación teórica

Según Duffuaa *et al.*, [5]., el mantenimiento se define como la combinación de todas las acciones técnicas y acciones asociadas mediante las cuales un equipo o un sistema se conserva o repara para que pueda realizar sus funciones específicas. Para Torres [6], su importancia radica en alcanzar el máximo nivel de efectividad productiva, asumiendo el menor costo y contaminación posibles. Newbrough [7], por su parte, complementa esta visión señalando que maximizar la disponibilidad de la maquinaria es esencial para la resiliencia económica de las organizaciones, pues minimiza el deterioro y preserva el valor de los activos.

Históricamente, la gestión del mantenimiento en la industria manufacturera ha evolucionado de los enfoques correctivos a la aplicación de estrategias preventivas centradas en la reducción de los fallos mediante intervenciones programadas. Este cambio obedece a la necesidad de evitar paradas y evitar costos adicionales, así como riesgos operativos mayores. Como parte de una transición natural, el mantenimiento se ha encaminado

Revista Tecnocientífica URU, No. 29 Julio - Diciembre 2025 (57 - 64)

hacia la predicción y al análisis de las condiciones, las cuales incorporan evaluación de datos, monitoreo de variables críticas, anticipación de fallos, entre otros aspectos. En este escenario, el mantenimiento preventivo proporciona la estructura necesaria para mejorar la gestión de activos, especialmente en las industrias de extrusión de polímeros, pues se encarga de garantizar que los equipos conserven su capacidad operativa para ejecutar funciones específicas.

Según la norma COVENIN 3049, su objetivo radica en conservar un sistema productivo en forma adecuada, de manera que pueda cumplir su misión, logrando la producción esperada en empresas productivas, con la calidad de servicios exigida a escala global. Esta evolución permite transitar de la reparación de emergencia a una conservación que contrarreste las causas conocidas de fallas mediante tareas programadas [5].

Más allá de la planificación, la gestión moderna se apoya en indicadores de desempeño (KPIs), elementales para los sistemas de mantenimiento preventivo, como la disponibilidad, el *Overall Equipment Effectiveness*. el Tiempo Medio entre Fallas (MTBF) y el Tiempo Medio Entre Reparación (MTTR). El MTBF es crítico para estimar la fiabilidad y determinar los intervalos óptimos de intervención, trascendiendo su función como métrica aislada, mientras que el MTTR refleja la capacidad del sistema de mantenimiento de reestablecer las operaciones en el menor tiempo posible, constituyéndose en soportes esenciales de la gestión de activos de la ISO 55000.

Esta norma internacional exige que las organizaciones tomen sus decisiones en datos fiables para maximizar el valor de sus activos; en consecuencia, el MTBF y el MTTR proporcionan la base cuantitativa necesaria para evaluar el desempeño y el riesgo. Al monitorear estos indicadores, el sistema de mantenimiento preventivo se alinea con los objetivos de mejora continua de la norma, transformando los datos históricos de paradas en la línea B-75 en información estratégica para optimizar el ciclo de vida del equipo y garantizar la sostenibilidad operativa [1].

En este orden de ideas, la criticidad de los equipos puede ser determinado mediante el análisis de fallas o el mantenimiento enfocado en la confiabilidad [5]. Para Rausand y Hoyland [8], en el caso de extrusoras de PEAD, los subsistemas suelen ser críticos, pues su desgaste de cabezal genera obstrucción y averías en el sistema de temperatura, por lo que el mantenimiento puede modelarse mediante la distribución de *Weibull* para estimar el término entre fallas y el tiempo promedio entre reparaciones.,

Por su parte, McKinsey y Company [9], el mantenimiento preventivo se utiliza en sensores, con la finalidad de monitorear posibles vibraciones, fallos eléctricos, cambios de temperatura en tiempo real, reduciendo los costos significativamente. La solidez de un sistema preventivo es el requisito técnico para escalar hacia tecnologías de monitoreo. Para extrusoras, señala Mobley [10], la espectroscopía de vibración detecta los desgastes en rodamientos de tornillo, mientras que termografía se encuentra en la capacidad de identificar aquellas zonas de sobrecalentamiento en bandas calefactoras.

En la perspectiva de Torres [6], para lograr esto urge la ejecución planificada de un sistema de inspecciones periódicas, cíclicas, programadas y de un servicio de trabajos de mantenimiento previsto como necesario para aplicar a todas las instalaciones, máquinas o equipos, con el fin de disminuir los casos de emergencias y permitir un mayor tiempo de operación en forma continua.

Del mismo modo, que este tipo de mantenimiento coincide con la conservación planeada de fábrica, lo que conduce a inspecciones periódicas que descubran las condiciones defectuosas [7]. Por ende, entre sus beneficios se destacan menor tiempo perdido como resultado de menos paradas de maquinaria; mayor conservación y duración de los bienes; menor costo por conceptos de horas extraordinarias de trabajo; menos reparaciones en gran escala, pues son prevenidas mediante reparaciones oportunas y de rutina; menor costo por concepto de arreglos; menor ocurrencia de desperdicios; mayor identificación de los equipos que originan gastos; mejores condiciones de seguridad.

R.V. Molina-Márquez. CC BY-SA 4.0

Metodología

El estudio se desarrolló bajo la modalidad de proyecto factible, puesto que propone una solución operativa a un problema de ingeniería industrial tangible, como la falta de planificación en las labores de mantenimiento de la línea de extrusión en la empresa REVINCA, C.A. Su diseño fue de campo, lo cual permitió la recolección de datos directos; estos se complementaron con la revisión documental para el análisis de contenido y de las normas vigentes.

En cuanto a su nivel, la investigación es descriptiva, pues caracteriza el estado actual de los equipos y de sus subsistemas críticos. La unidad de análisis se centró en el área de producción de la empresa, con una muestra censal constituida por la línea de extrusión B-75, la cual integra catorce (14) equipos críticos: la extrusora principal, el co-extrusor, 4 bañeras de vacío/aspersión, sistemas de arrastre, sierra y dos (2) bobinadores. Para la obtención de la información técnica, se aplicó la observación directa y un instrumento de diagnóstico de la gestión del mantenimiento.

En virtud de lo anterior, el estudio contempló las siguientes etapas: diagnóstico situacional, inventario y codificación de equipos, análisis de criticidad (Enfoque RAM) y diseño del sistema de mantenimiento preventivo. Adicionalmente, se establecieron acciones específicas y los mecanismos de intervención necesarios. Finalmente, el proceso concluyó con el diseño de los formatos requeridos para la gestión del sistema.

Resultados y Discusión

Diagnóstico y análisis de criticidad

El diagnóstico realizado en la línea de extrusión B-75 de REVINCA, C.A reveló la inexistencia de un sistema de mantenimiento preventivo formal. Esto se traduce en una gestión predominantemente reactiva, cuyos efectos se evidenciaron con 63 paradas no planificadas y un acumulado de 182 horas de inactividad durante el período evaluado, lo cual confirma que la prevalencia del mantenimiento correctivo afecta la disponibilidad y genera sobrecostos operativos, con una pérdida acentuada de la capacidad de producción, dejando a la empresa fuera de las métricas de competitividad requerida (>85%).

Desde un enfoque técnico, este escenario sitúa la disponibilidad de la línea por debajo del 85%, el estándar mínimo de competitividad para los procesos de extrusión de PEAD. La recurrencia de estas fallas compromete la capacidad de producción y genera sobrecostos operativos que validan la urgencia de transitar hacia un modelo preventivo alineado con la norma COVENIN 3049-93 [3].

Tabla 1. Resumen de diagnóstico operativo y criticidad de la Línea B-75

Variable de Control	Hallazgo	Impacto Técnico
Fallas registradas	63 paradas no planificadas	Alta tasa de fallas por gestión reactiva
Tiempo de inactividad	182 horas acumuladas	Lucro cesante y sobrecostos operativos
Disponibilidad actual	< 85%	Incumplimiento de estándares de competitividad internacional
Configuración de línea	Sistema seriado	La falla de un componente detiene el proceso total.
Equipos críticos	14 unidades codificadas	Base censal para el sistema preventivo.
Normativa de base	COVENIN 3049-93	Soporte legal y técnico de la gestión.

La estructuración del sistema se sustentó en la normalización técnica de los activos de la línea de extrusión B-75. Siguiendo los lineamientos de la norma COVENIN 3049-93 [3], se ejecutó una codificación jerárquica

para identificar de forma unívoca cada componente y plantear la relación que tiene con los subsistemas que componen el equipo principal.

Esta base de datos técnicas, constituye el soporte informativo para la trazabilidad operativa. El análisis reveló que la línea opera como un sistema seriado, lo que implica que la criticidad es inherente a casi todos los componentes, puesto que la falla de un subsistema periférico detiene el flujo productivo total. Así, la falla de un subsistema, como el cabezal o las bandas calefactoras, puede provocar la interrupción total del flujo. Para Duffuaa *et al.*, [5], la criticidad de estos sistemas no se ve limitado solo por el costo de la reparación, sino que se define por el lucro cesante de la indisponibilidad del proceso.

Por esta razón, el diseño operativo se centró en la estandarización de las acciones de mantenimiento, siguiendo una matriz de programación técnica. En lugar de planes aislados, se diseñó una propuesta metodológica que agrupa las distintas actividades en función de su frecuencia y del estado requerido del equipo, lo que facilita la optimización de los recursos humanos y técnicos de REVINCA.

Dicha agrupación conduce a una gestión eficiente de las rutinas, a la vez que reduce la complejidad de los procesos administrativos de mantenimiento. Por ende, es necesario la aplicación RAM para validar qué componentes técnicos necesitan del monitoreo predictivo para evitar degradaciones futuras.

Diseño del sistema de mantenimiento propuesto

El diseño se fundamentó en la normalización técnica y la jerarquización de los activos, por lo cual se centró en la estandarización de acciones inmediatas a través de una matriz de programación técnica que contiene las actividades por frecuencia y estado del equipo, según se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Matriz de Programación Técnica

Código de activo	Subsistema crítico	Estado requerido	Frecuencia	Actividad estándar	Duración (min)	Responsable
EX-B75-01	Tornillo extrusor	Parado	Semanal	Lubricación	30	Mecánico
CO-B75-02	Resistencias térmicas	Operando	Mensual	Termografía	45	Electricista
BA-B75-03	Sistema de vacío	Parado	Quincenal	Limpieza de boquillas	60	Operario

La asignación de frecuencias presentada en la Tabla 2 responde a una alineación entre las recomendaciones técnicas del fabricante y las estadísticas históricas de falla detectadas en la línea B-75 Asimismo, para garantizar la ejecución, se diseñaron instrumentos de control y órdenes de trabajo preventivo, conforme a lo presentado en la Tabla 3.

Tabla 3. Instrumentos de Control y Órdenes de Trabajo Preventivo

Campo del instrumento	Finalidad técnica	Fuente de datos	Frecuencia de uso
Código de orden de trabajo	Trazabilidad única	Sistema interno	Por cada actividad
Descripción de la actividad	Estandarización de tareas	Manual técnico	Por cada actividad
Estado inicial del equipo	Detección de desviaciones	Inspección visual	Durante la ejecución
Firma del responsable	Responsabilidad técnica y legal	Ejecutor	Al cierre de la OT
Cierre de la orden	Registro de cumplimiento y anomalías	Ejecutor y supervisor	Post-ejecución

R.V. Molina-Márquez. CC BY-SA 4.0
Revista Tecnocientífica URU, No. 29 Julio - Diciembre 2025 (57 - 64)

Los instrumentos de control diseñados en esta tabla, transforman la orden de trabajo en una herramienta de recolección de datos en campo, permitiendo documentar la condición inicial del activo (*Adec/Inad*) para alimentar el ciclo de mejora continua. Por ende, esta herramienta no pretende ser un formato administrativo más, sino un instrumento de recolección de datos falible en el campo de trabajo.

Se precisa, en consecuencia, de un registro detallado de repuestos, tiempos de ejecución y personal asignado, cuyos campos técnicos se detallan en la Tabla 4.

Tabla 4. Campos Técnicos de Registro, Tiempos y Personal Asignado

Campo técnico	Unidad de medida	Uso en análisis de confiabilidad	Relación con ISO 55000
Repuesto utilizado	Código interno	Cálculo de MTBF y MTTR	Activos – ciclo de vida
Tiempo de ejecución real	Minutos	Ajuste de frecuencia preventiva	Mejora continua
Personal asignado	Especialidad	Análisis de capacidad técnica	Gestión de recursos
Fecha de ejecución	DD/MM/AAAA	Tendencia temporal de fallas	Datos para decisión
Desviación detectada	Texto breve	Entrada a matriz de riesgo	Evaluación de desempeño

Este enfoque permite ajustar dinámicamente las frecuencias de mantenimiento, cerrando el ciclo de mejora continua que exige la norma ISO 55000 [4], transformando el mantenimiento de un gasto necesario en una inversión estratégica para la disponibilidad de la planta. De igual forma, este diseño aborda la vulnerabilidad crítica identificada en la fase de diagnóstico, como lo fue la dependencia a una gestión reactiva, cuyo resultante fue unas 182 horas de inactividad.

Al pasar a una programación técnica basada en la norma COVENIN 3049-93 [3], se da un paso de la improvisación a la aplicación de una intervención programada, cíclica y estructural. Esto se alinea a la teoría de gestión de activos de la norma ISO 55000 [4], al trascender de la mera recolección de datos en el campo y encaminarse hacia estrategias basadas en la información, con la finalidad de realizar cálculos de indicadores de confiabilidad, como el Tiempo Medio Entre Fallas.

Así, el diseño cumple una función operativa, pero de forma más significativa, actúa como una base para consolidar las labores de mantenimiento en REVINCA, C.A., permitiendo una eventual integración de nuevas tecnologías para el monitoreo predictivo, Con ello se proyecta una mejora sustancial en la eficiencia operativa, estimando la reducción de las paradas no planificadas, elevando la disponibilidad de la línea B-75 por encima del estándar de competitividad del 85%, convirtiéndose en un referente regional, nacional e internacional.

El sistema de mantenimiento preventivo propuesto no debe considerarse como estático o limitativo, sino como una base para la evolución hacia un mantenimiento de mayor madurez tecnológica. La estandarización de rutinas, la codificación de equipos, el registro de tiempos, fallas y repuestos, son requisitos técnicos para la incorporación progresiva de otro tipo de herramientas, como la termografía infrarroja o el monitoreo en tiempo real, lo que va más allá de la prevención tradicional, avanzando hacia la toma de decisiones soportada en datos, haciendo más eficiente el mantenimiento como práctica sostenible.

Finalmente, es preciso destacar que el sistema de mantenimiento preventivo diseñado no constituye el fin de la empresa REVINCA C.A., sino el sustento para evolucionar hacia nuevas estrategias de mantenimiento proactivo cada vez más complejos. En este orden de ideas, consolidar este sistema permitirá que se pueda avanzar hacia el mantenimiento predictivo, apoyado en herramientas como la termografía, con el propósito de identificar el sobrecalentamiento de bandas calefactoras y los desgastes prematuros en los rodamientos del tornillo extrusor. Este progreso, en compañía de la digitalización de la actividad industrial, conduce a una

Revista Tecnocientífica URU, No. 29 Julio - Diciembre 2025 (57 - 64)

programación basada en la condición real del equipo, superando la programación temporal, optimizando los intervalos de mantenimiento, garantizando la disponibilidad operativa a los niveles requeridos.

Conclusiones

El diagnóstico operativo reveló que la gestión y la ingeniería de mantenimiento actual, enfocada en la corrección de fallas, suscita vulnerabilidades críticas que afectan la capacidad productiva. La acumulación de 63 paradas no planificadas confirma la ausencia de previsión de riesgos; este hecho representa un problema económico, técnico y de credibilidad que aleja a la línea B-75 de los estándares internacionales de disponibilidad (>85 %) requeridos por el sector plástico.

A través de la aplicación de la Norma COVENIN 3049-93, se logró el inventario técnico y la identificación de catorce (14) equipos con sus respectivos subsistemas. Esta codificación constituye el fundamento para la trazabilidad de las fallas y el cálculo futuro de los indicadores de confiabilidad. El análisis dejó al descubierto que la línea opera bajo una dependencia en serie, donde la totalidad de los componentes son críticos para el proceso de extrusión; en consecuencia, cualquier avería afecta el flujo total.

Por lo tanto, el diseño del sistema preventivo no se limitó a la extrusora principal, sino que integró rutinas sincronizadas para todos los equipos periféricos con el fin de minimizar riesgos y cuellos de botella. La propuesta comprende matrices de programación anual y rutinas de inspección que permiten la estandarización de la empresa mediante intervenciones oportunas; esto facilita la transición de la evidencia empírica hacia el conocimiento científico transferible. El modelo ofrece a REVINCA, C.A. la posibilidad de migrar hacia una planificación preventiva que anticipe el desgaste de componentes vitales, reduzca costos por reparaciones y maximice la vida de los recursos.

En miras de mantener la eficiencia operativa y dar cumplimiento al sistema propuesto, se plantean las siguientes recomendaciones:

- Informar al departamento de mantenimiento de la empresa los datos encontrados para que de esta manera conozcan la situación detectada y se puedan generar las acciones pertinentes, de igual forma aplicar estos instrumentos en otros estudios con el objeto de potenciar su capacidad en otros trabajos u otros tipos de investigación.
- Ejecutar el sistema propuesto a los equipos que conforman la Línea de Extrusión B-75 para incrementar la productividad.
- Sensibilizar al personal en lo que corresponde a la aplicación del sistema de mantenimiento preventivo.
- Aplicar normas de mantenimiento tales como COVENIN 3049-93.
- Crear un departamento de mantenimiento autónomo e independiente del departamento de operaciones que coordine, controle y elabore toda la gestión de mantenimiento.
- Diseñar el sistema de mantenimiento preventivo basado en los formatos de trabajo propuestos por los investigadores para realizar las actividades de organización, planificación, programación, control y ejecución del mantenimiento, con los cuales pueden establecer los registros históricos de la línea, tanto de reparación, mantenimiento y costos aplicados, donde la administración pueda establecer el control de los costos de operaciones de los demás departamentos, según las normas venezolanas.
- Evaluar periódicamente la gestión de mantenimiento con el objeto de detectar anormalidades y deficiencias en las operaciones de trabajo y del mantenimiento.
- Mantener actualizada la documentación de los registros históricos del control de mantenimiento.
- Crear indicadores de gestión para la verificación y control de las actividades desarrolladas en el departamento de mantenimiento según las especificaciones establecidas por la empresa y las normas del país.

Finalmente, la fortaleza de esta investigación radica en la integración del diagnóstico con el diseño de herramientas bajo las normas COVENIN 3049-93 e ISO 55000, lo cual valida la propuesta como una solución aplicable para la mitigación de fallas críticas.

R.V. Molina-Márquez. CC BY-SA 4.0
Revista Tecnocientífica URU, No. 29 Julio - Diciembre 2025 (57 - 64)

Referencias bibliográficas

[1] A. Nastaj y K. Wilczyński, "Optimization and Scale-Up for Polymer Extrusion", *Polymers*, vol. 13, no. 10, p. 1547, 2021. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.3390/polym13101547.

[2] I. Hernández, Z. Castillo, A. Zapata y C. Alcalá, "Identificación y Reducción de Tiempos Muertos como Estrategia de Productividad en la Industria Metal-Mecánica", *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar,* vol. 8, no. 5, pp. 12743-12753, 2024. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5.14726 .

[3] Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN). Mantenimiento. Definiciones. COVENIN 3049-93. Caracas, Venezuela, 1993.

[4] International Organization for Standardization (ISO), Asset management – Overview, principles and terminology, Norma ISO 55000:2014, Ginebra, Suiza, 2014.

[5] S. Duffuaa, A. Raouf y J. Dixon, Sistemas de Mantenimiento Planeación y Control, Ciudad de México, México: Editorial LIMUSA, S.A., 2000.

[6] L. Torres, Mantenimiento su Implementación y Gestión, Caracas, Venezuela: Editorial Universitas, 2005.

[7] E. Newbrough, Administración del Mantenimiento Industrial, Ciudad de México, México: Editorial Diana, 1998.

[8] M. Rausand y A. Høyland, System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications, New Jersey, Estados Unidos: Editorial John Wiley & Sons, 2004.

[9] McKinsey & Company. (2021). Una forma más inteligente de digitalizar el mantenimiento y la fiabilidad [En línea]. Disponible en: https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/a-smarter-way-to-digitize-maintenance-and-reliability#/.

[10] R. K. Mobley, Maintenance Fundamentals, 2nd ed. Amsterdam, Países Bajos: Butterworth-Heinemann, 2004.

Revista Tecnocientífica URU
Universidad Rafael Urdaneta
No. 29 Julio - Diciembre 2025
Depósito Legal: PPI 201402ZU4464
ISSN: 2343-6360
CC BY-SA 4.0

Estabilización de suelo por métodos de mezcla aplicados a suelos areno–arcillosos ubicados en el Sector Cañada Honda, Municipio Maracaibo, Estado Zulia

Soil stabilization by mixing methods applied to sandy clay soils located in the Cañada Honda Sector, Maracaibo Municipality, Zulia State

Isabella V. Martínez-García
Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil. Maracaibo, Venezuela.
https://orcid.org/0009-0000-0550-7431 | Correo electrónico: isavalmg12@gmail.com

María A. García-Román
Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil. Maracaibo, Venezuela.
https://orcid.org/0000-0002-5799-3600 | Correo electrónico: maria.garcia.62540@uru.edu
Recibido: 05-10-2025 Admitido: 16-11-2025 Aprobado: 30-11-2025
DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.20208277

Resumen
Esta investigación tuvo como objetivo comparar la efectividad de métodos de estabilización por mezcla en suelos areno-arcillosos (SC) del sector Cañada Honda, Maracaibo, estado Zulia, con el fin de mejorar su capacidad portante y comportamiento mecánico. La metodología comprendió la caracterización física y mecánica del suelo en estado natural, mediante ensayos de granulometría, límites de consistencia, gravedad específica, contenido de humedad, Proctor modificado y valor soporte California Bearing Ratio (CBR). Posteriormente, se aplicaron procesos de estabilización con grava al 15 % y óxido de calcio (cal seca) al 7,5 %, evaluando las muestras tratadas mediante compactación y ensayos CBR bajo condiciones normalizadas. Los resultados iniciales indicaron que el suelo natural presentó un valor de CBR de 8,2 %, inferior a los requerimientos mínimos para su uso como subrasante en proyectos viales, además de una plasticidad media asociada al contenido de finos arcillosos. Las mezclas estabilizadas evidenciaron mejoras significativas en la densidad seca máxima y reducciones en la humedad óptima, lo que se reflejó en un incremento sustancial de la capacidad portante. En particular, la estabilización con cal alcanzó un valor de CBR de 75 %, mientras que la mezcla con grava registró un CBR de 19,1 %, valores que superan ampliamente la condición inicial del suelo. Estos hallazgos demuestran que la aplicación de estabilización por mezcla mejora de manera efectiva las propiedades mecánicas de los suelos SC de la zona, posibilitando su aprovechamiento como material de subrasante en infraestructuras viales y reduciendo los riesgos de asentamientos diferenciales.
Palabras clave: Estabilización de suelos, Suelos areno-arcillosos, Relación de soporte California, Capacidad portante, Compactación de suelos.

Abstract
This research aimed to compare the effectiveness of mixing stabilization methods applied to sandy clay soils (SC) located in the Cañada Honda sector, Maracaibo, Zulia State, in order to improve their bearing capacity and mechanical behavior. The methodology included the physical and mechanical characterization of the natural soil, through grain size distribution, Atterberg limits, specific gravity, moisture content, Modified Proctor compaction, and California Bearing Ratio (CBR) tests. Subsequently, stabilization processes were carried out by incorporating 15% gravel and 7.5% quicklime (CaO), after which compaction and CBR tests were performed again on the treated samples under standardized conditions. Initial results showed that the natural soil exhibited a CBR value of 8.2%, below the minimum requirements for its use as subgrade in road projects, in addition to medium plasticity associated with its clay content. Stabilized mixtures demonstrated significant improvements in maximum dry density and reductions in optimum moisture content, reflected in a substantial increase in bearing capacity. In particular, lime stabilization reached a CBR value of 75%, while the gravel mixture achieved 19.1%, both considerably higher than the natural condition. These

findings confirm that mixing stabilization effectively enhances the mechanical properties of SC soils in the study area, enabling their use as subgrade material for road infrastructure and reducing the risk of differential settlements. In conclusion, lime proved to be the most efficient additive to increase the bearing capacity of Cañada Honda SC soil, while gravel also represents a viable option, although with lower effectiveness. Further research is recommended to evaluate combined or intermediate dosages to define optimal parameters that maximize technical and economic efficiency in future stabilization projects.
Key words: *Soil stabilization, Sandy clay soils, California Bearing Ratio, Bearing capacity, Soil Compaction.*

Introducción

El suelo areno-arcilloso está compuesto por una fracción predominante de arena y una proporción significativa de arcilla, lo que le otorga propiedades mecánicas mixtas y lo convierte en un material complejo desde el punto de vista geotécnico. Suele presentar plasticidad media a alta, baja a moderada permeabilidad y cierta cohesión, pero su comportamiento es altamente sensible a la humedad: la acumulación de agua reduce la fricción entre partículas, reblandece la fracción arcillosa y disminuye tanto la resistencia al corte como la capacidad portante. Esta última se mide comúnmente mediante el CBR (California Bearing Ratio), parámetro clave en el diseño de subrasantes y estructuras viales. El Manual de Carreteras del Perú [1], por ejemplo, establece un valor mínimo de 6 % para suelos usados como subrasante; sin embargo, los suelos areno-arcillosos pueden registrar valores tan bajos como 2,4 %.

En República Checa se han reportado CBR de hasta 3 % y plasticidades de 17,8 %, con consecuencias estructurales y económicas significativas [2]. En Chiclayo (Perú), se han registrado asentamientos de hasta 30 mm en vías construidas sobre estos suelos, con variaciones del 20 % en la capacidad de carga [3]. En Venezuela, en la ciudad de Maracaibo [4] se identificaron suelos areno-arcillosos con CBR entre 2,4 % y 2,9 %, acompañados de altos niveles de absorción y expansión, evidenciando su inestabilidad en condiciones húmedas.

Ante esta situación, distintas investigaciones han demostrado que mediante técnicas de estabilización se puede mejorar significativamente el comportamiento mecánico de estos suelos. La adición de estabilizantes permite elevar el CBR desde valores inferiores al 3 % hasta más del 30 % [5], además de reducir la plasticidad, el potencial de expansión y los asentamientos diferenciales [6]. Por ejemplo, al sur de Lima, Perú [7]; se evaluó la incorporación de conchas de abanico trituradas en suelos areno-arcillosos, logrando un incremento del CBR del 42 % con una dosificación óptima del 34 %. De forma similar, estabilizaron un suelo arcilloso con cal en El Salvador [8], aumentando el CBR de 1,93 % a 54 % y eliminando completamente la plasticidad, lo que permitió reducir el espesor de pavimento requerido sin comprometer su desempeño estructural.

La estabilización del suelo areno-arcilloso representa una solución técnica eficiente, económica y sostenible, que permite mejorar la capacidad portante, reducir costos de mantenimiento, reutilizar materiales locales y minimizar el impacto ambiental. Su aplicación resulta especialmente relevante en zonas donde las condiciones del terreno limitan el desarrollo constructivo.

En Maracaibo, donde la información geotécnica regional es limitada y los suelos tipo SC están ampliamente distribuidos, urge implementar soluciones que garanticen la estabilidad de las infraestructuras, particularmente en áreas con tránsito constante, instalaciones estratégicas o actividad industrial. En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo comparar la efectividad de métodos de estabilización por mezcla aplicados a suelos areno-arcillosos del sector Cañada Honda, estado Zulia.

Materiales y Métodos

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque comparativo con diseño experimental, estructurado en cuatro fases principales (Figura 1). El estudio se llevó a cabo en el sector Cañada Honda, municipio Maracaibo, estado Zulia, caracterizado por suelos residuales de origen arcilloso-arenoso.

Las muestras de suelo se obtuvieron mediante excavación manual por calicata lateral a una profundidad de 0,5 m desde la superficie del corte natural. La zona de muestreo presentaba una capa endurecida de material

oxidado, conocido localmente como "piedra de ojo", característica asociada a la presencia de óxidos de hierro. Se recolectaron aproximadamente 100 kg de suelo, para su posterior análisis en laboratorio.

Figura 1. Diagrama de fases metodológicas de la investigación.

A continuación, se detallan las fases de la investigación desarrolladas conforme a los objetivos planteados.

Fase 1: Caracterización de muestra natural de suelo.

Esta fase tuvo como finalidad determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo areno-arcilloso en su estado natural, recolectado en el sector Cañada Honda, municipio Maracaibo, estado Zulia. Esta caracterización permitió establecer una línea base para comparar el comportamiento del suelo antes y después de aplicar los métodos de estabilización.

Previo al desarrollo de los ensayos, se seleccionaron 15 kg de muestra, la cual fue extendida y secada al aire libre durante 12 horas con el propósito de reducir su humedad superficial. Posteriormente, el material fue tamizado utilizando malla No. 4, lo que permitió separar la fracción gruesa de la fina. Dado que más del 50 % del material pasó por este tamiz, se confirmó la predominancia de suelos finos. Finalmente, se homogeneizó el material y se procedió al cuarteo, con el fin de extraer las porciones necesarias para cada ensayo. Seguidamente, se mencionan los ensayos realizados para obtener los resultados y conclusiones necesarias.

a. Examen visual y táctil, según los criterios propuestos por Badillo y Rodríguez (2005) [9], para una primera clasificación del suelo en campo, basada en color, textura, plasticidad y reacción al contacto con el agua.

b. Análisis granulométrico (COVENIN 255:2006) [10], destinado a determinar la distribución de tamaños de partículas y clasificar el tipo de suelo según su proporción de arenas, limos y arcillas.

c. Ensayo de azul de metileno (SAEMA: IE-T-410) [11], que permite evaluar la presencia y actividad de minerales arcillosos expansivos, relevantes para estimar el comportamiento volumétrico del suelo frente a la humedad.

d. Determinación de la gravedad específica (ASTM C128-07) [12], (ASTM C127-07) [13], y (ASTM D854:2002) [14], con el objetivo de establecer la relación entre el peso del sólido y el volumen que ocupa, parámetro necesario para cálculos de densidad y esfuerzos.

e. Contenido de humedad natural (ASTM D2216-2010) [15], que mide el porcentaje de agua presente en la muestra al momento de su extracción, útil para conocer el estado inicial del suelo.

f. Límites de Atterberg (ASTM D4318-10) [16], que determinan los límites de plasticidad y de líquido, esenciales para establecer la consistencia del suelo y su potencial de deformación.

g. Ensayo de compactación Proctor modificado (ASTM D1557:2002) [17], que permite obtener la humedad óptima y la densidad seca máxima, fundamentales para definir las condiciones adecuadas de compactación en obra.

I.V. Martínez-García y M.A. García-Román. CC BY-SA 4.0
Revista Tecnocientífica URU, No. 29 Julio - Diciembre 2025 (65 - 75)

h. Ensayo de penetración CBR (ASTM D1883:2007) [18], que evalúa la capacidad portante del suelo como subrasante, a través de su resistencia a la penetración, siendo un criterio clave en el diseño de pavimentos.

Fase 2: Ensayo de compactación a muestras tratadas

Mezcla suelo natural + 15 % grava (3/8'')

Se prepararon mezclas con 2550 g de suelo natural y 450 g de grava (15 %), para un total de 3 kg por punto, cantidad necesaria para llenar adecuadamente el molde en 5 capas. Se ensayaron cinco contenidos de humedad: 5 %, 6 %, 7 %, 8 % y 9 %. Las mezclas fueron compactadas con un martillo de 10 lb en capas, y se determinó la densidad seca y el contenido de humedad real tras secado en horno. El objetivo fue obtener la curva de compactación para esta mezcla estabilizada.

Mezcla suelo natural + 7,5 % cal seca

Basado en la literatura para suelos de plasticidad moderada, se seleccionó un 7,5 % de cal respecto al peso seco del suelo. Para cada punto se mezclaron 2312,5 g de suelo y 187,5 g de cal (total 2,5 kg), en cinco niveles de humedad: 6 %, 8 %, 10 %, 12 % y 14 %. La mezcla se homogeneizó manualmente hasta adquirir una coloración grisácea. Se compactó con el mismo procedimiento anterior, se registró el peso del molde y se tomó una muestra para horno. Luego, se calcularon las humedades reales y las densidades secas de cada punto, para obtener la correspondiente curva de compactación.

Fase 3: Ensayo CBR a muestras tratadas

Con el objetivo de analizar el efecto de estabilizantes en la capacidad portante del suelo natural, se prepararon dos grupos de muestras tratadas: una mezcla con 15 % de grava (3/8") y otra con 7,5 % de cal seca, calculados con base en el peso seco del suelo. Para cada grupo se elaboraron tres moldes, compactados con tres niveles de energía: alta (56 golpes/capa), media (25 golpes/capa) y baja (12 golpes/capa). En todos los casos, se aplicaron cinco capas de igual espesor, utilizando la humedad óptima específica determinada previamente mediante el ensayo Proctor modificado.

El mezclado fue manual, buscando una distribución homogénea del estabilizante. En las muestras con grava, el agregado se incorporó progresivamente al suelo húmedo, asegurando una mezcla sin segregación. En las muestras con cal, esta se añadió en forma seca al suelo previamente humedecido, permitiendo una activación parcial antes de la compactación para favorecer la reacción puzolánica inicial.

Una vez compactadas las mezclas, se registró el peso total del conjunto (molde + muestra + agua). Luego se instaló el sistema de sobrecarga (plato, vástago graduable y pesas) sobre la superficie de cada muestra y se colocó el trípode con el reloj comparador para registrar la lectura inicial.

Las seis muestras tratadas fueron sumergidas completamente en un tanque de agua durante un período de 96 horas, con lecturas diarias del comparador para monitorear cambios volumétricos por expansión o retracción. Tras finalizar el periodo de inmersión, se retiraron las cargas, se inclinó cada molde para permitir el drenaje, y se registró el peso final de cada muestra.

Luego, cada molde fue evaluado en la máquina CBR (prensa multiensayo). Se reinstaló la carga de sobrecarga correspondiente y se posicionó el pistón metálico para iniciar la prueba. Se registraron las lecturas de carga (en lb) correspondientes a las siguientes profundidades de penetración: 0,025", 0,050", 0,075", 0,1", 0,2", 0,3", 0,4" y 0,5", siguiendo el protocolo estándar.

Con los datos obtenidos, se calcularon los esfuerzos de penetración para cada caso y se trazaron las curvas esfuerzo–penetración. Además, se elaboraron gráficas de densidad seca vs CBR (%), permitiendo evaluar comparativamente el comportamiento mecánico de las mezclas tratadas en relación con el suelo natural.

Fase 4: Comparación de resultados obtenidos

Finalizados los ensayos para evaluar la capacidad portante de cada muestra analizada, se procedió al procesamiento de los datos obtenidos mediante planillas de cálculo y gráficas correspondientes a cada prueba.

Se realizó un análisis comparativo de los efectos generados por la adición de cal y grava, por separado, sobre el comportamiento del suelo areno-arcilloso estudiado en esta investigación. Posteriormente, se establecieron las conclusiones con base en la clasificación de capacidad de soporte propuesta por Crespo Villalaz (2004) en su libro Mecánica de Suelos y Cimentaciones [19].

Esta comparación de resultados fue hecha mediante una gráfica realizada en el lenguaje de programación *Python*, donde se observa los rangos de clasificación mediante zonas de distintos colores para una sencilla y práctica interpretación.

Resultados

Caracterización de muestra de suelo natural

Los ensayos realizados determinaron el tipo de suelo en base a los análisis a sus propiedades físicas y mecánicas, obteniendo el valor de capacidad soporte para posteriormente hacer las comparaciones correspondientes al objetivo de la investigación. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los ensayos realizados a las muestras de suelo (Figura 2).

RESULTADOS		
IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA	**PROPIEDAD EVALUADA**	**RESULTADO**
Procedencia: Sector Cañada Honda	Granulometría	Pasante T#200= 22,2%
	Límites de Consistencia	L.L= 31%
		L.P= 14%
		I.P= 17%
	Azul de Metileno	Illitas
	Humedad natural de los Suelos	1.40%
	Gravedad Específica	2.707%
	Clasificación	S.U.C.S: (SC) Arena arcillosa
		H.R.B: A-2-6 (1)
	Proctor Modificado	DMS =1990 kg/m3
		H. Ópt = 7,7%
	CBR (0,20") %	8,2

Figura 2. Tabla resumen de resultados de caracterización de suelo natural.

La muestra natural de suelo extraída del sector Cañada Honda presentó un porcentaje de finos (pasante por el tamiz #200) del 22,2 %, lo que evidencia una proporción considerable de partículas menores a 0,075 mm. Según los ensayos de límites de consistencia, el suelo posee un límite líquido (LL) de 31 % y un límite plástico (LP) de 14 %, arrojando un índice de plasticidad (IP) de 17 %, clasificado como plasticidad media. El resultado del ensayo de azul de metileno indica la presencia de arcilla tipo illita, una fracción mineral que puede afectar la estabilidad del suelo en condiciones de humedad.

La humedad natural del suelo fue de 1,4 %, un valor bajo, posiblemente relacionado con condiciones climáticas locales al momento de la toma de muestra. La gravedad específica obtenida fue de 2,707, dentro del rango típico para suelos inorgánicos. De acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) [20], el material se clasifica como arena arcillosa (SC), mientras que según el sistema AASHTO [21] se ubica en el grupo A-2-6 (1), correspondiente a suelos de calidad regular como subrasante.

En el ensayo Proctor modificado, se obtuvo una densidad máxima seca (DMS) de 1990 kg/m³ con una humedad óptima (H. Ópt) de 7,7 %. Finalmente, el valor de soporte CBR (penetración de 0,20") fue de 8,2 %, indicando una capacidad portante limitada que, si bien supera el mínimo exigido en algunas normativas como el MTC de Perú (6 %) [1], no es adecuada para estructuras viales exigentes sin tratamiento previo.

I.V. Martínez-García y M.A. García-Román. CC BY-SA 4.0
Revista Tecnocientífica URU, No. 29 Julio - Diciembre 2025 (65 - 75)

Ensayo de compactación de muestras tratadas

Se trabajó con contenidos de humedad reales entre 4,9 % y 13,2 %, con el fin de identificar el punto de humedad óptima y la densidad seca máxima (DMS) correspondiente para cada mezcla. Los resultados obtenidos mostraron una respuesta diferenciada en cada caso, según las propiedades físicas de los materiales incorporados.

La mezcla de suelo natural con grava (15 %) presentó la mayor densidad seca, con un valor de 2057 kg/m³, y una humedad óptima de 7,6 %. Esta mejora en la compactación se debe a la corrección en la gradación del suelo: la incorporación de partículas gruesas facilitó un mejor acomodo entre las fracciones del suelo, reduciendo los vacíos internos y permitiendo una mayor concentración de masa por unidad de volumen. Además, al disminuir el índice de plasticidad, la mezcla se volvió más estable ante la acción del agua durante la compactación, lo que optimizó la eficiencia del proceso (Figura 3).

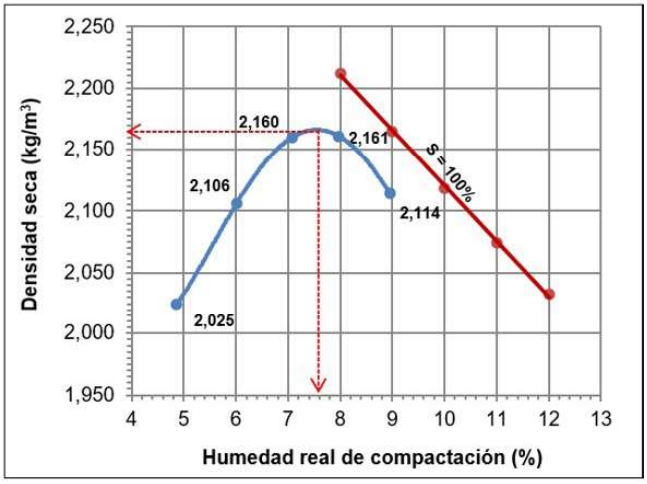


Figura 3. Curva de compactación del suelo con 15% de grava.

En cuanto a la mezcla de suelo natural con cal seca (7,5 %), esta mostró una densidad seca máxima menor, de 1971 kg/m³, con una humedad óptima de 8,8 %, es decir, 1,2 % más alta que la registrada en la mezcla con grava. El incremento en la humedad requerida se explica por la naturaleza microporosa de la cal, la cual absorbe parte del contenido de agua durante las reacciones de hidratación. Esta característica, junto con su menor densidad relativa, influye directamente en la disminución de la densidad alcanzada durante la compactación (Figura 4).

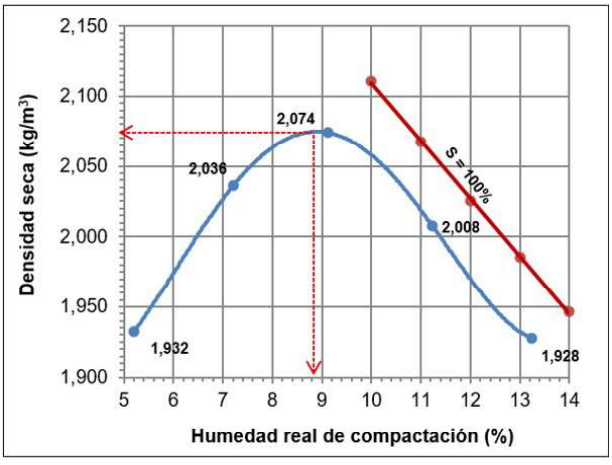


Figura 4. Curva de compactación del suelo con 7,5% óxido de calcio.

Ensayo CBR a muestras tratadas

La mezcla con 15 % de grava presentó un valor de CBR de 19,1 %, más del doble respecto al suelo natural. Esta mejora se atribuye a una mejor distribución granulométrica y a una reducción del contenido de finos cohesivos, lo cual incrementó la fricción interna y la resistencia al corte del material. La presencia de partículas gruesas también contribuyó a mejorar el entrelazado de los componentes del suelo, favoreciendo una estructura más densa y estable bajo cargas externas. Este valor sitúa a la mezcla dentro de los rangos aceptables (Figura 5) para subrasantes de tráfico medio, incluso sin recurrir a técnicas de refuerzo adicionales.

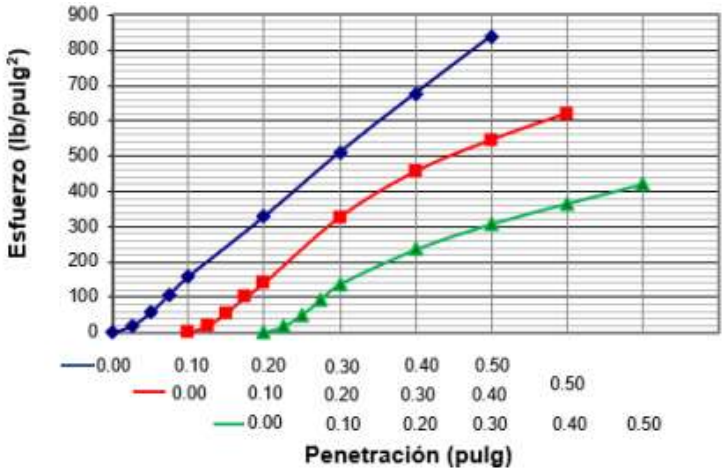


Figura 5. Curva esfuerzo-penetración del suelo natural más grava.

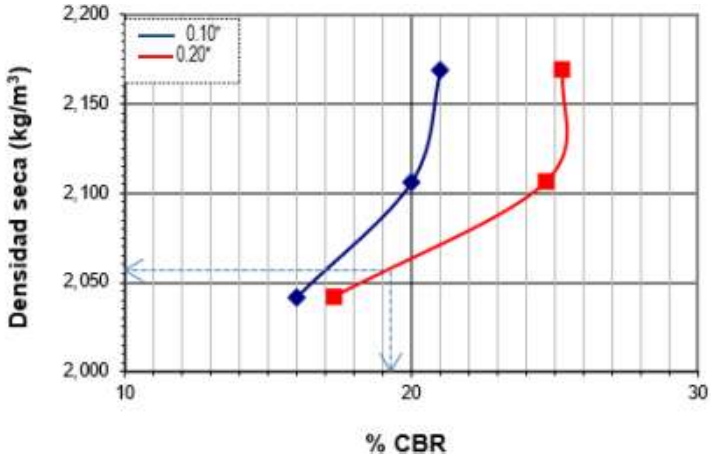


Figura 6. Curva de valor soporte de suelo natural más grava.

Por otro lado, la mezcla tratada con 7,5 % de cal seca alcanzó un CBR de 75,0 %, lo cual representa un aumento excepcional de casi nueve veces respecto al suelo sin tratar. Este resultado refleja el efecto combinado de los procesos físico-químicos inducidos por la cal. En primer lugar, ocurre una reducción de plasticidad y mejora en la cohesión a través de la floculación y aglomeración de partículas arcillosas. En segundo lugar, y más importante, se desarrollan reacciones pozolánicas entre los óxidos de calcio y los minerales arcillosos presentes en el suelo, formando compuestos cementantes que rigidizan la matriz del suelo. Esto genera un material estabilizado con propiedades mecánicas mucho más elevadas, adecuado incluso para capas estructurales más exigentes como bases o sub-bases (Figuras 7y 8).

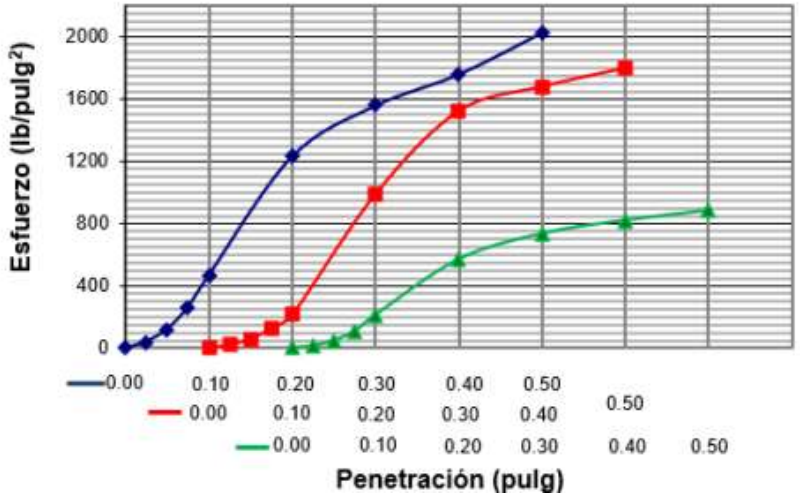


Figura 7. Curva esfuerzo-penetración de suelo natural más óxido de calcio.

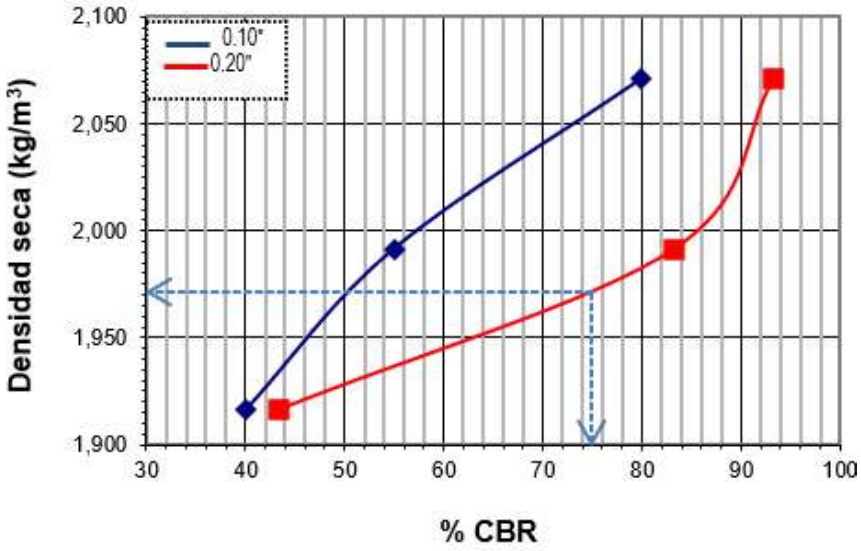


Figura 8. Curva de valor soporte de suelo natural más óxido de calcio.

En conjunto, los resultados del CBR evidencian que la estabilización del suelo areno-arcilloso mediante el uso de aditivos puede transformar un material inadecuado en una base funcional, con mejoras sustanciales en su comportamiento mecánico y su capacidad portante. Si bien la grava mejora la compacidad y resistencia de forma inmediata, la cal seca introduce transformaciones químicas que logran un reforzamiento más profundo y duradero del suelo tratado.

Comparación de resultados obtenidos

Seguidamente, se presenta un contraste de los resultados obtenidos de la capacidad soporte de los suelos tratados, con base en el valor CBR obtenido del suelo natural (Figura 9).

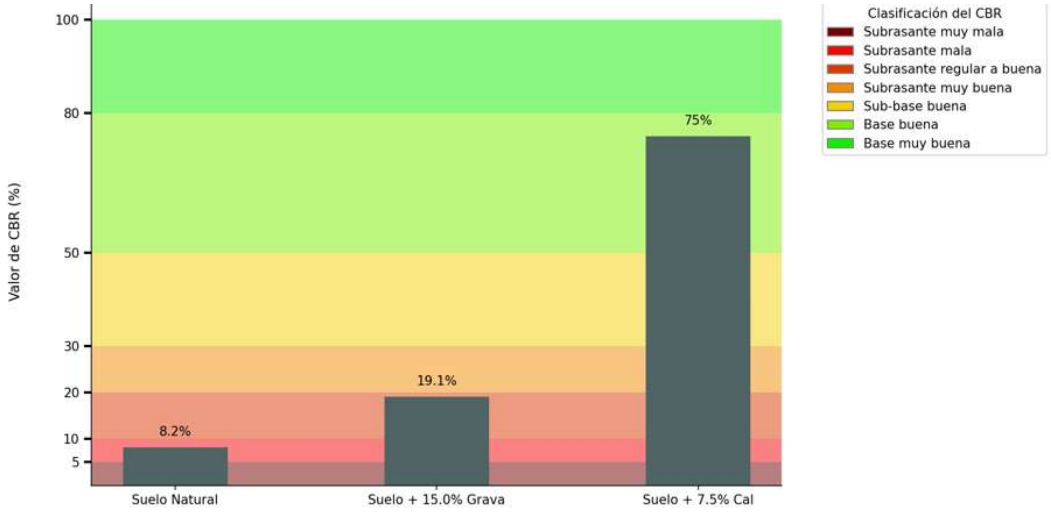


Figura 9. Comparativa de la capacidad de soporte del suelo

La gráfica ilustra de forma clara la evolución del valor de CBR (California Bearing Ratio) en las diferentes mezclas estudiadas, tomando como punto de referencia el suelo natural, cuya capacidad portante representa el nivel base de comparación.

El valor de CBR de 8,2% perteneciente al suelo natural indica una subrasante deficiente, clasificada como "subrasante mala" de acuerdo con la clasificación propuesta por Crespo en 2004 [19], con una capacidad portante insuficiente para soportar cargas estructurales sin deformaciones significativas. En términos prácticos, un CBR de este orden obliga a considerar técnicas de estabilización o sustitución, dado que está por debajo del mínimo exigido por normativas como la del MTC Perú (≥6 %) [1] y no cumple con los requerimientos de estabilidad para obras de infraestructura vial.

La adición de grava generó un CBR de 19,1%, es decir, un incremento del 133 % respecto al valor inicial. Este aumento es consecuencia de una mejora granulométrica: la grava rellena espacios vacíos, reduce la compresibilidad del suelo y aumenta la fricción interna. Si bien el CBR resultante aún no alcanza las categorías de sub-base o base, se sitúa dentro de una subrasante regular a buena, permitiendo su uso en estructuras viales de bajo tránsito o como capa de transición. Es una mejora significativa desde el punto de vista físico, aunque limitada frente a soluciones químicas.

El tratamiento con cal seca obtuvo un valor de capacidad portante de 75%, lo que significa un incremento del 814 % en comparación con el suelo natural. Esta mejora masiva evidencia la eficacia del proceso de estabilización química, donde la cal reacciona con los minerales arcillosos formando compuestos cementantes que aumentan la cohesión y rigidez del suelo. Además, el tratamiento elimina la plasticidad, mejora la compactación y confiere una estructura más estable frente a la humedad. Este valor posiciona al suelo tratado como una base muy buena, adecuada para soportar altas cargas, incluso en zonas de tránsito pesado.

Conclusiones

La muestra de suelo natural caracterizada como un suelo areno- arcilloso de mediana plasticidad, presentó una baja capacidad portante. Este suelo no es apto para realizar cualquier tipo de estructura sobre él, por las características que el mismo posee.

Al obtener un suelo estabilizado gracias a los aditivos agregados, con una capacidad portante de 19,1% y 75% respectivamente, ya este suelo deficiente ahora puede ser utilizado para estructuras de mayor índole; como una base para estructura de pavimento.

A pesar de la presencia de contenido arcilloso en el suelo estudiado, no hubo presencia de expansión en el mismo al momento de realizar el ensayo. Se atribuye a su alto contenido arenoso.

La adición de cal al suelo areno arcilloso eliminó la plasticidad del suelo en su totalidad.

El método de estabilización utilizando óxido de calcio, fue el más efectivo y favorable para el suelo. Aumentando su capacidad portante en un 814,63%.

Referencias bibliográficas

[1] Instituto de la Construcción y Gerencia (ICG). (2013). Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos. Recuperado de: https://cdn-web.construccion.org/normas/files/tecnicas/Manual_Suelos_Pavimentos.pdf

[2] Pavel Reiterman, P., Mondschein, P., Douˇsova, B., Davidova, V., Keppert, M. (2022). Utilization of concrete slurry waste for soil stabilization. Case Studies in Construction Materials, Vol. 16, p. e00900. Recuperado de: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509522000328#ab0015

[3] S. P. Muñoz-Pérez, J. G. Aguilar-Morante & I. P. Diaz-Flores. (2023) Subgrade soil stabilization using marine debris: A literature review. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia,* no. 109, Pag 25-34. Recuperado de: https://revistas.udea.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/347333/20809614

[4] Asslan, G. & Marín, M. J. (2014) Análisis de la relación humedad densidad y valor soporte de los suelos de la zona I del municipio Maracaibo. Trabajo Especial de Grado. Universidad Rafael Urdaneta, Venezuela. Recuperado de: https://uru.insiemp.com/educa/biblio/2301-14-07282.pdf

[5] Sukawati, N. K. S. A., Juniastra, I. M., Wibawa, I. M. S., Sunatha, I. G. N., & Nada, I. M. (2024). Stabilization of Krobokan Clay Soil with California Bearing Ratio (CBR) for Highway Pavement. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA,* 10(7), 4301–4312. https://doi.org/10.29303/jppipa.v10i7.7983

[6] Firoozi, A. A., Guney Olgun, C., Firoozi, A. A., Mojtaba Shojaei Baghini, M. S. (2017) Fundamentals of soil stabilization. Geo-Engineering 8, 26. https://doi.org/10.1186/s40703-017-0064-9

[7] Garcia, G. A., & Rabines, A. (2023). Mejoramiento de la sub rasante de suelos areno arcillosos utilizando 22%, 34% y 48% de conchas de abanico en la zona sur de Lima. Tesis de licenciatura. Universidad Privada del Norte, Perú. Recuperado de: https://hdl.handle.net/11537/35642

[8] Hernández, J. Mejía, D. Zelaya, C (2016). Propuesta de estabilización de suelos arcillosos para su aplicación en pavimentos rígidos en la Facultad Multidisciplinaria Oriental de la Universidad de El Salvador. Universidad de El Salvador. El Salvador. Recuperado de: https://hdl.handle.net/20.500.14492/23359

[9] Badillo, J., & Rodríguez, R. (2005). Mecánica de suelos: fundamentos de la mecánica de suelos, tomo I. (Pág 127-161). Limusa.

[10] COVENIN. (2006). *COVENIN 255: Ensayo de granulometría de suelos por tamizado y sedimentación.* Instituto Venezolano de Normas Técnicas.

[11] SAEMA. Determinación de partículas finas, mediante el uso de azul de metileno. (2007). Maracaibo, Venezuela. Norma numero: IE-T-410.

[12] ASTM. (2007). *ASTM C127-07: Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate*. ASTM International.

[13] ASTM. (2007). *ASTM C128-07: Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate.* ASTM International.

[14] ASTM. (2002). *ASTM D854-02: Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer.* ASTM International.

[15]ASTM. (2010). *ASTM D2216-10: Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass.* ASTM International.

[16] ASTM. (2010). *ASTM D4318-10: Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils.* ASTM International.

[17] ASTM. (2002). *ASTM D1557-02: Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (56,000 ft·lbf/ft³).* ASTM International.

[18] ASTM. (2007). ASTM D1883-07: *Standard test method for California bearing ratio (CBR) of laboratory-compacted soils.* ASTM International.

[19] Crespo Villalaz, C. (2004). Mecánica de suelos y cimentaciones, 5a ed. Limusa.

[20] ASTM. (2017). *Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)* (ASTM D2487-17). ASTM International.

[21] American Association of State Highway and Transportation Officials. (2017). *Standard specification for classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes* (AASHTO M 145-17). AASHTO.

Revista Tecnocientífica URU
Universidad Rafael Urdaneta
No. 29 Julio - Diciembre 2025
Depósito Legal: PPI 201402ZU4464
ISSN: 2343-6360
CC BY-SA 4.0

Evaluación de la construcción de transformadores de distribución tipo poste usando hexafluoruro de azufre como dieléctrico-refrigerante, y conductores de aleación bimetálica en sus devanados, mediante elementos finitos

Evaluation of the construction of pole-mounted distribution transformer using sulfur hexafluoride as a dielectric-coolant and bimetallic alloy conductor in their windings, using the finite element method.

Ángel E. Machuca-Hernández
Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Eléctrica. Maracaibo, Venezuela.
https://orcid.org/0009-0005-9328-9708 | Correo electrónico: angel.30200791@uru.edu

José R. Espina-Alvarado
Universidad del Zulia, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Eléctrica. Maracaibo, Venezuela.
https://orcid.org/0009-0004-8301-7592 | Correo electrónico: jose.espina.80401@uru.edu

Guillermo D. Cano-Valles
Ingeniería, Construcción, Inspección y Suministros, C. A. (ICIS). Maracaibo, Venezuela.
https://orcid.org/0000-0001-7227-0999 | Correo electrónico: gcanovalles@gmail.com
Recibido: 27-06-2025 Admitido: 04-11-2025 Aprobado: 18-11-2025
DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.20085324

Resumen
El aumento en los robos de transformadores y los riesgos del aceite mineral, como la inflamabilidad y su degradación, motivaron esta investigación para evaluar materiales alternativos en transformadores de distribución tipo poste. En particular, el objetivo principal de esta investigación fue evaluar la construcción de transformadores de distribución tipo poste usando hexafluoruro de azufre como dieléctrico-refrigerante y conductores de aleación bimetálica en sus devanados. Para ello, se identificaron las características constructivas y operativas de los transformadores establecidos en normativas reconocidas, se analizaron las propiedades del Conduground y del gas SF_6, y se modeló un transformador tipo poste de 25 kVA para realizar estudios térmicos bajo distintas condiciones operativas y constructivas. Con respecto al Conduground, la carencia de información adecuada limitó la capacidad para formular una conclusión concisa sobre su viabilidad como conductor. En contraste, el gas SF_6, aunque inicialmente superaba las temperaturas permitidas por la normativa, logró ajustarse a ellas al aumentar la presión (100%) o el tamaño de la cuba (30%), evidenciando su potencial como alternativa al aceite.
Palabras clave: Transformadores de distribución, Hexafluoruro de azufre, Modelado multifísico, Análisis térmico, Aislamiento eléctrico.

Abstract
The increase in transformer thefts and the risks associated with mineral oil, such as flammability and the degradation of its properties, motivated this research to evaluate alternative materials in pole-mounted distribution transformers. The primary objective was to assess the construction of pole mounted distribution transformers using sulfurhexaflouride as a dielectric-coolant and bimetallic alloy conductors in their windings. To achieve this, the constructive and operational characteristics of transformers established in recognized standards were identified, the properties of Conduground and SF_6 gas were analyzed, and a 25 kVA pole-mounted transformer was modeled to conduct thermal studies under various operational and constructive conditions. Regarding Conduground, the lack of adequate information limited the ability to formulate a concise conclusion on its feasibility as a conductor. In contrast, SF_6 gas, while initially

exceeding the regulatory temperature thresholds, met the required limits by increasing the pressure (100%) or the enclosure size (30%), demonstrating its potential as an alternative to oil.
Keywords: *Distribution transformers, Sulfur hexafluoride, Multiphysics modeling, Thermal analysis, Electrical insulation.*

Introducción

La energía eléctrica es un recurso indispensable para el desarrollo industrial, científico y social de cualquier país. En este contexto, los transformadores de distribución desempeñan un rol fundamental, al ser el enlace entre los circuitos primarios y secundarios de las redes de distribución eléctrica. Tradicionalmente, estos equipos se construyen con devanados primarios hechos con pletina cobre y los secundarios elaborados con láminas de aluminio, utilizando como medio aislante y refrigerante el aceite mineral. Sin embargo, estos materiales presentan desafíos significativos: el cobre, por su alto valor comercial, es un blanco frecuente de hurto; por otro lado, el aceite mineral, además de su inflamabilidad, sufre de un proceso de degradación que disminuye sus capacidades dieléctricas y de disipación térmica, comprometiendo, en última instancia, el rendimiento y vida útil del transformador.

En respuesta a estos problemas, materiales alternativos como el *Conduground* y el hexafluoruro de azufre (SF_6) han surgido como soluciones potenciales. El *Conduground*, un conductor en forma de tira compuesto de una aleación de zinc, cobre y estaño, destaca por su resistencia a la corrosión y su nulo valor en el mercado negro; mientras que el SF_6, un gas inerte no inflamable, posee propiedades dieléctricas excepcionales y una capacidad regenerativa que permite la reducción de los mantenimientos requeridos al equipo. Aunque ambos materiales han sido estudiados individualmente en aplicaciones específicas, no existen investigaciones que evalúen su desempeño conjunto en transformadores de distribución.

Ante esta carencia, la presente investigación, desarrollada con el apoyo de la empresa ICIS C.A. y la Universidad Rafael Urdaneta, se propone evaluar la construcción de transformadores tipo poste usando hexafluoruro de azufre como dieléctrico-refrigerante y conductores de aleación bimetálica en sus devanados mediante el método de elementos finitos.

Metodología

La presente investigación posee un carácter explicativo y proyectivo, con diseño mixto documental y experimental, maneja como unidades de análisis el *Conduground*, el gas SF_6 y el comportamiento térmico del gas SF_6 en transformadores de distribución tipo poste.

La población está integrada por los transformadores de distribución tipo poste que operan con tensiones primarias que oscilan entre 4,8 y 34,5 kV y tensiones secundarias entre 120/240 y 7970 V, con potencias nominales en el rango de 10 a 500 kVA. Utilizando un muestreo no probabilístico de tipo intencional, se seleccionó como muestra un transformador de distribución tipo poste convencional con especificaciones de 13,8 kV-240/120 V, ONAN y una potencia nominal de 25 kVA.

El desarrollo de la investigación se estructuró en tres fases. La fase I, denominada “Criterios de diseño y operativos del transformador de distribución”, consistió en una revisión bibliográfica de normativas y literatura especializada para identificar los parámetros constructivos necesarios para modelar un transformador de distribución tipo poste en COMSOL Multiphysics, así como recopilar los criterios operativos estipulados en la normativa que aseguran su correcto funcionamiento.

En la fase II, “Estudio de las propiedades del *Conduground* y gas SF_6”, se llevó a cabo un análisis exhaustivo de las características fisicoquímicas y eléctricas de estos materiales, fundamentado en una revisión sistemática de la literatura. Este análisis permitió identificar las propiedades clave que influyen significativamente en el comportamiento electrofísico de los transformadores de distribución.

Finalmente, en la fase III, “Simulación del comportamiento” se desarrolló un modelo tridimensional del transformador de distribución tipo poste en COMSOL Multiphysics, integrando criterios constructivos previamente recopilados junto con las propiedades del gas SF_6. Finalmente, los resultados fueron analizados

a través de gráficos, tablas y mapas de colores, lo que permitió una evaluación detallada del comportamiento electrofísico del transformador bajo diversos escenarios.

Resultados

Normativa aplicable y literatura reconocida

Los transformadores de distribución están regulados por un marco normativo internacional y regional que asegura su correcto funcionamiento. En esta investigación, se consultaron diversos estándares con el propósito de establecer las características operativas específicas del transformador de distribución tipo poste objeto de estudio, cuyos valores se encuentran referenciados a 85 ºC y sintetizados en la Tabla 1.

Asimismo, se ha recurrido a una selección de literatura reconocida y especializada con el objetivo de establecer los criterios de diseño y construcción que garanticen que el modelo diseñado se alinee con las prácticas y exigencias del sector, entre los cuales destaca Avelino [1].

Tabla 1. Características operativas requeridas para transformadores de distribución

Parámetro	Valor	Referencia
Impedancia equivalente (%)	2,50	Covenin 536 [2]
Pérdidas en el cobre (W)	430	Covenin 536 [2]
Pérdidas en vacío (W)	115	Covenin 536 [2]
Corriente de excitación (%)	1,2	Covenin 536 [2]
Elevación promedio de temperatura (ºC)	65	IEEE Std 57.12.00 [3]
Máxima elevación de temperatura (ºC)	80	IEEE Std 57.12.00 [3]
BIL	125	IEEE Std 57.12.00 [3]
Capacidad de cortocircuito (kA)	40	Covenin 536/IEC 60076-5 [2], [4]
Polaridad	Sustractiva	IEEE Std 57.12.00 [3]

Análisis de las propiedades del Conduground

El *Conduground* es un conductor fabricado a partir de una aleación de cobre, estaño y una aleación de zinc (CZ9) que se presenta comercialmente en tiras rectangulares de 0,060” de espesor y anchos variables (7/16” a 1 ½”), con una densidad de 2,229 g/cm^3, siendo cuatro veces más ligero que el cobre [5].

Al ser una aleación, la conductividad eléctrica del *Conduground* es inferior a la del cobre puro, siendo 9,26 veces menor, mientras que su coeficiente térmico es 2,6 veces mayor que el del cobre. Si bien se desconoce su conductividad térmica, se estima inferior a la del cobre y el aluminio debido a su composición a base de estaño y zinc; no obstante, su mayor capacidad térmica volumétrica y su elevada temperatura de fusión, confiere resistencia a las altas temperaturas durante periodos prolongados. El resumen de sus propiedades se presenta en la Tabla 2.

La simulación del *Conduground* en COMSOL Multiphysics se ve limitada debido a la falta de datos y discrepancias en sus propiedades. Bajo esta premisa, resulta inviable alcanzar conclusiones definitivas y, por lo tanto, es esencial que futuras investigaciones se centren en la recopilación de información más completa que permita el avance de la comprensión del comportamiento del material.

Á.E. Machuca-Hernández J.R. Espina-Alvarado y G.D. Cano-Valles. CC BY-SA 4.0
Revista Tecnocientífica URU, No. 29 Julio - Diciembre 2025 (77 - 91)

Tabla 2. Parámetros físicos del Conduground en comparación con el cobre [5]

Parámetro	Conduground	Cobre
Conductividad (%)	10,8	100
Resistividad (Ω.m)	$3,5x10^{-8}$	$1,72x10^{-8}$
Coeficiente térmico (1/K)	605	234
Capacidad térmica volumétrica ($J/cm^3.K$)	3,931	3,45
Temperatura de fusión (°C)	1510	1085

Discriminación de las propiedades del gas SF_6

El hexafluoruro de azufre (SF_6) es un gas sintético cuya estructura molecular octaédrica consiste en un átomo central de azufre cuyos seis vértices están ocupados por átomos de flúor. Esta configuración le confiere una alta estabilidad química y térmica, así como una excepcional resistencia dieléctrica, cualidades que han consolidado su uso en aplicaciones de alta y media tensión, como los interruptores eléctricos y subestaciones encapsuladas (GIS) [6].

Propiedades físicas

Debido a su temperatura crítica de 43,6 ºC, el hexafluoruro de azufre está sujeto a un proceso de licuefacción si, en condiciones de operación, se exceden ciertos límites de presión, lo que reduce su densidad, resistencia dieléctrica y capacidad de disipación térmica. En consecuencia, es fundamental mantener la presión del SF_6 en niveles inferiores a 15,2 bar para evitar este fenómeno. No obstante, esta limitación no representa un problema en términos de rendimiento debido a que las presiones operativas típicas para aplicaciones de alta tensión, según lo establecido por Xiao [6], oscilan entre 3,4 y 5 bar.

Propiedades térmicas

En lo que respecta a las propiedades térmicas, el SF_6 presenta una conductividad térmica diez veces menor que la del aceite mineral y 1,85 veces menor que la del aire. Aunque su coeficiente de transferencia de calor por convección supera al del aire, sigue siendo limitado en comparación con el aceite. Este comportamiento se debe a su alta densidad (6,139 kg/m³) y elevado calor específico (663 J/mol·K), que contribuyen a un coeficiente de transferencia de calor relativamente alto en comparación con el del aire.

Tanto la viscosidad como el calor específico del SF_6 dependen de la temperatura, aunque en diferente medida. La viscosidad es considerablemente baja con una variación del 32 % entre 0 y 100 ºC. Por otro lado, el calor específico exhibe una variación más compleja con la temperatura; a bajas temperaturas (200 K - 1300 K), la relación con la temperatura es no lineal con un comportamiento monótonamente ascendente; sin embargo, entre 1300 K y 10000 K, su comportamiento se vuelve notablemente errático, como lo demuestra Yokomizu [7]. No obstante, el rango de temperatura en las cuales debe operar el transformador, conforme a lo especificado con anterioridad, recae en el rango de bajas temperaturas, donde estas propiedades térmicas son consistentes y estables.

Propiedades dieléctricas

El SF_6 destaca por su alta electronegatividad, es decir, su capacidad para capturar electrones libres y formar iones negativos. Otro aspecto crucial que influye en las propiedades dieléctricas del gas es la uniformidad del campo pues, en campos eléctricos uniformes, la tensión disruptiva del gas obedece la ley de Paschen en un amplio rango de presiones; no obstante, a medida que el campo eléctrico pierde su uniformidad, la influencia de la presión sobre la tensión disruptiva se ve significativamente reducida, exhibiendo un comportamiento de saturación.

Consideraciones ambientales

Pese a que el SF_6 sea uno de los gases regulados por el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París debido a su elevado potencial de calentamiento global (23500 veces superior al del CO_2), su uso en sistemas eléctricos cerrados, sumado a los rigurosos protocoles de recuperación y reciclaje conforme a normativas internacionales [8], contribuye a que las emisiones de SF_6 referentes al sector eléctrico representen solo el 0,1% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero, equivalentes a 125 millones de toneladas de CO_2 al año, en comparación con los 21 billones de toneladas de CO_2 emitidas anualmente, según datos recopilados por Xiao [6].

Diseño de transformador de distribución tipo poste para el estudio.

El diseño del transformador se basó en criterios constructivos descritos en la literatura, así como los criterios operativos detallados en la Tabla 1, cuyas dimensiones geométricas y parámetros eléctricos se detallan en la Tabla 3.

Definición del modelo

El modelo geométrico empleado en esta investigación fue simplificado para optimizar los tiempos de cómputo sin comprometer la precisión de los resultados, este consta de los elementos fundamentales para los estudios realizados, como el núcleo, la cuba, los devanados y el aislamiento entre devanado de baja tensión y núcleo. Elementos como los collarines y los canales de refrigeración fueron excluidos debido a su baja influencia en los fenómenos físicos analizados.

Tabla 3. Síntesis de datos del transformador diseñado.

Núcleo		
Altura de la ventana (cm)	27,826	
Dimensiones de la sección transversal (cm)	8,184 x 20,461	
Ventana (cm)	5,586	
Devanado		
	A.T	B.T
Calibre del conductor (mm)	0,912	9,266
Nº de vueltas	2126	37
Altura efectiva (cm)	21,434	23,240
Devanado-núcleo (mm)	x	3,175
Aislamiento A.T-B.T (cm)	13	
Espesor de la bobina (mm)	14,840	18,846
Cuba		
Diámetro (mm)	440	
Altura (mm)	660	
Parámetros eléctricos		
Pérdidas en vacío (W)	110,987	
Corriente de excitación (%)	0,514	
Pérdidas en los devanados (W)	329	
Reactancia de dispersión (Ω)	161,317	
Impedancia equivalente (%)	2,5	

Posteriormente, se le asignaron materiales a cada elemento para definir sus propiedades físicas, utilizando la biblioteca predeterminada de COMSOL Multiphysics 6.2 y materiales personalizados, para el caso del cartón prensado y el acero al silicio TRAN-COR H-1. En la Tabla 4, se detalla la asignación de materiales en el modelo.

Para analizar los fenómenos electromagnéticos y térmicos en el transformador de distribución tipo poste, se emplearon cuatro interfaces físicas: campo magnético (mf), circuito eléctrico (cir), transferencia de calor en sólidos y fluidos (ht) y flujo laminar (spf). Asimismo, se incorporó la multifísica de "flujo no isotérmico", que acopla las físicas de transferencia de calor y flujo laminar, necesaria para modelar la convección natural del gas, en la cual la temperatura, la velocidad y la presión se deben determinan de manera simultánea.

Tabla 4. Materiales de los diferentes elementos del transformador.

Componente	Material
Devanado de baja tensión	Aluminio
Devanado de alta tensión	Cobre
Núcleo	TRAN-COR H-1
Cuba (superficie)	Acero
Cuba (volumen interno)	Gas SF_6
Aislamiento	Cartón prensado

La física de campo magnético (mf) permitió determinar la distribución del flujo en el núcleo y los devanados, así como la corriente inducida en estos últimos, empleando el nodo de Ley de Ampère en sólidos para representar el comportamiento no lineal del acero mediante una curva B–H efectiva. Para optimizar recursos computacionales se estableció una condición de simetría magnética, así como un contorno de impedancia en los límites externos de la cuba, que confina el campo magnético dentro de la misma. Por otro lado, la física de circuito eléctrico (cir) se utilizó únicamente para imponer la excitación del devanado primario y las condiciones de carga en el secundario.

La física de transferencia de calor en sólidos y fluidos (ht) se empleó para modelar el comportamiento térmico del transformador, definiendo los dominios del sistema de aislamiento, del núcleo y los devanados como sólidos. Estos dos últimos, a su vez, se definieron como fuentes de calor basadas en las pérdidas eléctricas obtenidas del modelo electromagnético. El volumen interno de la cuba se modeló como fluido, mientras que su superficie se trató mediante un nodo de capa fina térmicamente delgada, adecuado para la elevada conductividad del acero frente al fluido circundante.

Por último, para las condiciones de frontera térmica se asignó el nodo de radiación superficie-ambiente a la superficie del cilindro y el nodo de flujo de calor para representar la convección natural externa, en el cual, conforme a las recomendaciones del manual de COMSOL [9], se aplicaron correlaciones específicas según la orientación de cada superficie: la de pared vertical en las superficies laterales y las de placa horizontal superior e inferior en los discos extremos.

La física de flujo laminar (spf) se utilizó para resolver el campo de velocidades y presión del SF_6 en el interior de la cuba. Dado que la densidad del fluido depende de la temperatura y la presión, el flujo se configuró como compresible y se habilitó la acción de la gravedad, ajustando su dirección al eje correspondiente. Se aplicó la condición de "no deslizamiento" en todas las superficies que delimitan el fluido, con el fin de representar los efectos de la fricción en el movimiento de este, y se incorporó un punto de restricción de presión ubicado en la misma posición de referencia del término hidrostático, a fin de garantizar la convergencia del modelo.

Validación del modelo

Con el objetivo de validar el modelo implementado en COMSOL Multiphysics, se realizaron simulaciones en el dominio de la frecuencia de las pruebas de cortocircuito y circuito abierto para obtener los parámetros equivalentes del transformador y compararlos con los valores presentados en la Tabla 3.

Prueba de cortocircuito

La prueba de cortocircuito se simuló utilizando una fuente de corriente con un valor igual a la corriente nominal pico del transformador, mientras que la salida del devanado secundario se configuró con una resistencia prácticamente nula. En la Tabla 5 se presentan los resultados obtenidos en la simulación, junto con los valores presentados en la Tabla 3 y el error relativo correspondiente.

Tabla 5. Parámetros calculados y obtenidos de la simulación de la prueba de cortocircuito del transformador.

Parámetro	Valor calculado	Valor obtenido	Error relativo porcentual
Reactancia de dispersión (Ω)	161,317	162,92	1%
Pérdidas en el devanado primario (W)	154,724	154,718	0,003%
Pérdidas en el devanado secundario (W)	108,063	105,63	2,25%

La Figura 1 ilustra el comportamiento del transformador durante la prueba de cortocircuito. Los resultados evidencian bajas densidades de flujo magnético en el núcleo, comportamiento característico de este tipo de pruebas debido a la baja tensión aplicada. Asimismo, es importante destacar que el espaciamiento entre los devanados presenta un flujo magnético elevado en comparación con otras partes del transformador, producto del flujo de dispersión generado en esa región, claramente representado en las líneas de flujo en la Figura 1.

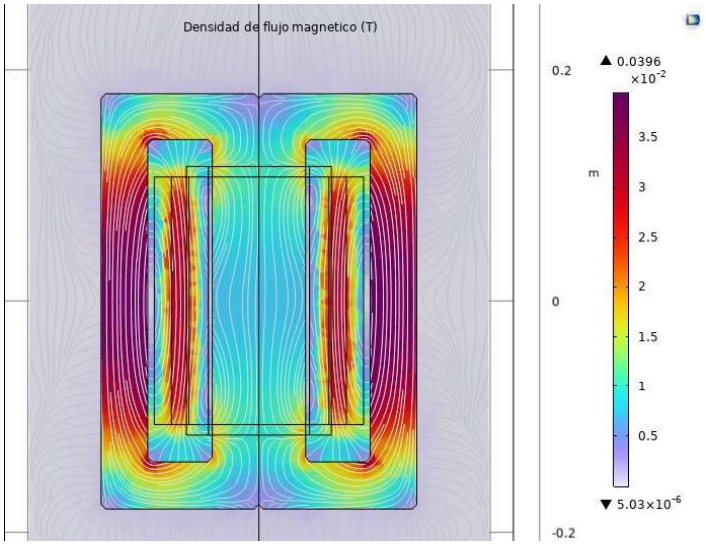


Figura 1. Densidad de flujo magnético en la prueba de cortocircuito

Prueba de circuito abierto

Debido a las simplificaciones realizadas en el modelo, los valores obtenidos para la corriente de excitación no reflejan fielmente el comportamiento real del transformador. Sin embargo, para los fines de la presente investigación, es suficiente modelar de manera precisa las pérdidas en el núcleo, ya que estas constituyen una fuente significativa de generación de calor en los estudios térmicos.

Cabe destacar que las dimensiones de la sección transversal del núcleo, así como su ancho y el espesor utilizados para la simulación, obedecen a los presentados en la Tabla 6 debido a que el modelo implementado no incluye material aislante, eliminando la necesidad de aplicar el factor de apilamiento. Asimismo, dado que en un entorno de simulación no es necesario aplicar un factor de desperdicio a las pérdidas, y considerando las dimensiones utilizadas; las nuevas pérdidas en vacío se presentan en la Tabla 6. Finalmente, en la Tabla 7 se presentan los resultados obtenidos en la simulación, junto con los valores calculados presentados en la Tabla 6 y el error relativo asociado.

La Figura 2 ilustra el comportamiento del transformador durante la prueba de circuito abierto. Se observa que la densidad de flujo magnético en las columnas alcanza 1,5 T, mientras que, en las esquinas externas del núcleo, la densidad disminuye progresivamente hasta alcanzar valores de 0,2 T. En contraste, las esquinas de la ventana presentan densidades significativamente mayores, alcanzando 2,5 T, debido a su proximidad a las trayectorias del flujo magnético.

Tabla 6. Nuevos parámetros eléctricos y geométricos asociados al núcleo.

Parámetro	Valor
Área de la sección transversal (cm^2)	162,439
Dimensiones de la sección transversal (cm)	8,062 x 20,152
Pérdidas en vacío (W)	96,385

Tabla 7. Parámetros calculados y obtenidos de la simulación de la prueba de circuito abierto del transformador.

Parámetro	Valor calculado	Valor obtenido	Error relativo porcentual
Pérdidas en el núcleo (W)	96,385	94,593	1,86%

El error relativo máximo registrado fue de 2,25 %; mientras que, los demás se mantuvieron por debajo del 2 %. Estos valores se consideran aceptables según los criterios de validación establecidos de ±5 %, lo que confirma la precisión del modelo implementado y garantiza que los resultados obtenidos en los estudios son representativos de los transformadores de distribución tipo poste.

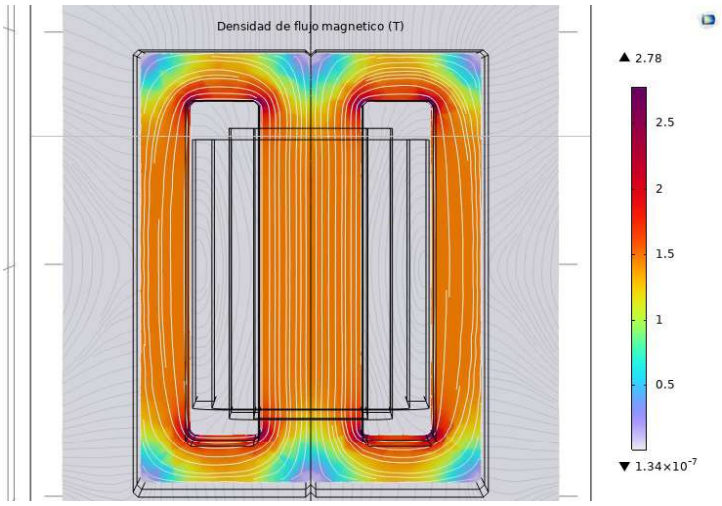


Figura 2. Densidad de flujo magnético en la prueba de circuito abierto.

Análisis de los resultados

Caso 1: Temperatura ambiente máxima con carga nominal

La condición de mayor estrés térmico para un transformador está determinada por la temperatura ambiente máxima (40 ºC) y su nivel de carga nominal. Aunque esta no representa una condición típica de operación para un transformador de distribución, su análisis permite evaluar si, bajo las condiciones nominales más demandantes, el gas SF_6 es capaz de mantener las temperaturas dentro de los límites especificados en la Tabla 1.

En la siguiente figura se muestra la distribución de temperatura en el transformador refrigerado en gas SF_6. Los puntos clave, como la temperatura máxima y las diferencias respecto a los límites normativos, se resumen en la Tabla 8.

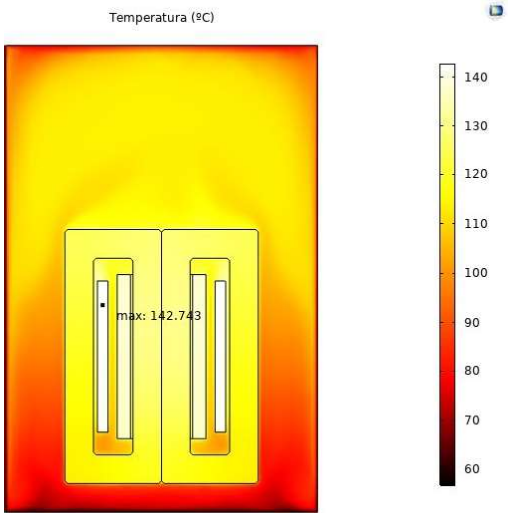
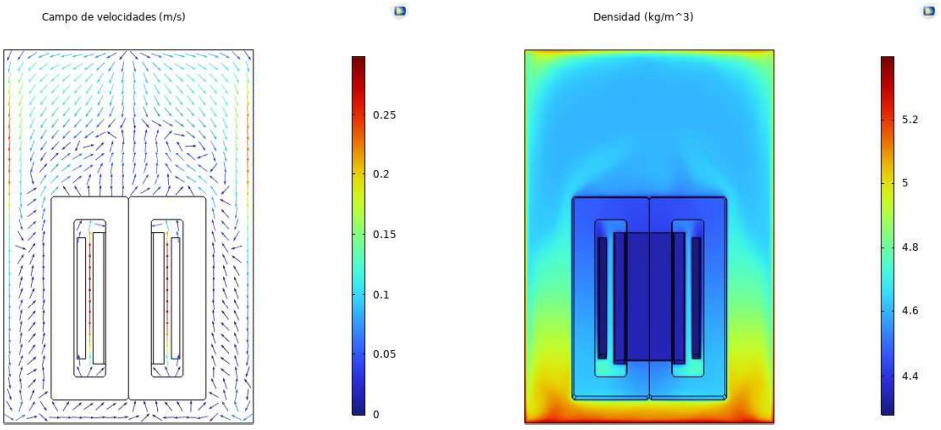


Figura 3. Distribución de temperatura en el transformador (SF_6).

La Figura 4 presenta la distribución de densidad y el campo de velocidades del gas en el transformador. Se observa que las regiones de menor densidad, como la parte superior, presentan velocidades más altas debido a la fuerza de flotación generada por la variación de densidad y la acción de la gravedad, formando celdas de convección. Asimismo, se aprecia como cerca de las paredes de la cuba, la velocidad del fluido disminuye progresivamente de 0,3 m/s a 0,08 m/s, lo que se atribuye a la transferencia de calor hacia las paredes metálicas, que enfría el gas, aumentando su densidad y provocando su descenso, completando así el ciclo de convección natural.

Tabla 8. Temperatura registrada en el transformador (SF_6) y comparaciones con los límites normativos

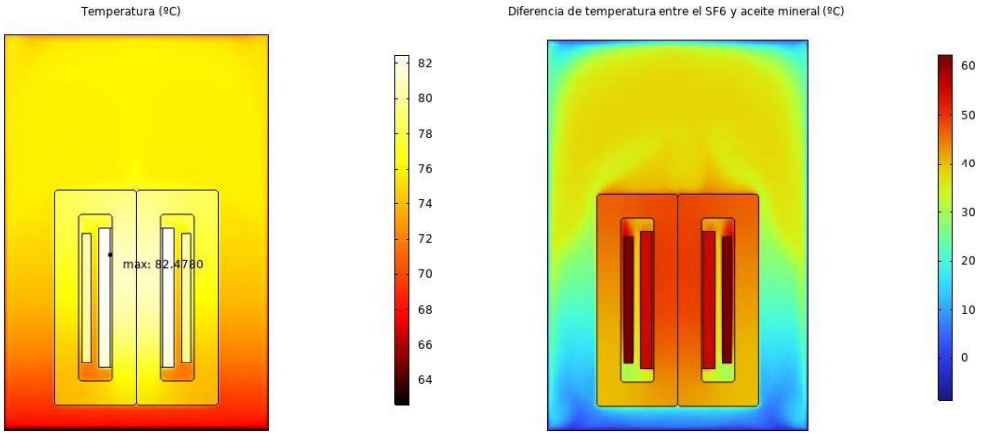
Ubicación	Temperatura registrada (ºC)	Aumento de temperatura respecto al ambiente (ºC)	Diferencia respecto al límite normativo (ºC)
Punto más caliente (devanado de alta tensión)	142,743	102,743	+22,743
Sección superior del transformador	114	74	+9



(a) **(b)**

Figura 4. (a) Campo de velocidades en el transformador (SF_6). (b) Densidad del gas en el transformador (SF_6).

Con el fin de realizar una comparación exhaustiva de los resultados de la simulación, se llevó a cabo un análisis equivalente utilizando aceite mineral como medio refrigerante. En la Figura 5 se ilustra tanto la distribución de temperatura en el transformador refrigerado con aceite, como la diferencia en la distribución de temperaturas entre el aceite mineral y el gas SF_6. Las variaciones de temperatura entre ambos medios en puntos claves del transformador se resumen en la Tabla 9.



(a) **(b)**

Figura 5. (a) Distribución de temperatura en el transformador (Aceite). (b) Diferencia entre la distribución de temperatura en el transformador del gas SF_6 y el aceite mineral.

Estos resultados indican que, bajo las mismas condiciones de operación, la temperatura máxima alcanzada en el gas SF_6 es 73,07% mayor que la obtenida en el aceite, mientras que la temperatura en la sección superior del gas SF_6 es 50,19% mayor que la sección superior del aceite.

Tabla 9. Diferencia de temperatura entre el aceite mineral y gas SF_6

Ubicación	Diferencia de temperatura (ºC)
Devanado de alta tensión	62
Devanado de baja tensión	55
Sección superior del yugo	48
Sección inferior del transformador	4
Sección superior del transformador	38

Caso 2: Variación de cargas en el transformador

Aunque la normativa establece la evaluación del aumento máximo de temperatura bajo condiciones de carga nominal, los transformadores de distribución operan en condiciones de carga variables. Debido a las altas exigencias computacionales que implicaría la simulación de un perfil de demanda diario, se optó por analizar el aumento de temperatura considerando cargas de 0,5, 0,7 y 1 p.u. a una temperatura ambiente típica (25 ºC). Los puntos clave, como la temperatura máxima y las diferencias respecto a los límites normativos, de los distintos niveles de cargas estudiados se resumen en la Tabla 10.

Los resultados arrojados indican que, para cargas menores a 0,7 p.u a una temperatura ambiente típica de 25 ºC, el transformador refrigerado por SF_6 alcanza una temperatura máxima 11,54% superior a la obtenida con aceite mineral en el caso 1. Aun así, el incremento de temperatura experimentado por el gas se encuentra dentro de los límites establecidos por la normativa.

Caso 3: Variación de temperatura ambiente

Los transformadores de distribución operan bajo condiciones ambientales variables que afectan su comportamiento térmico. Por ello, resulta esencial evaluar cómo las fluctuaciones en la temperatura ambiente, en un rango de 20 ºC a 40 ºC, impactan las características térmicas de los transformadores refrigerados con gas SF_6. La Figura 6 ilustra la relación entre la temperatura máxima interna del transformador y la temperatura ambiente.

Tabla 10. Temperatura en el transformador a distintos niveles de carga.

Carga (p.u)	Ubicación	Temperatura registrada (ºC)	Aumento de temperatura respecto al ambiente (ºC)	Diferencia respecto al límite normativo (°C)
1	Punto más caliente (devanado de alta tensión)	129	104	+24
	Sección superior del transformador	100	75	+10
0,7	Punto más caliente (devanado de baja tensión)	92,074	67,074	-12,926
	Sección superior del transformador	76,4	51,4	-13,6
0,5	Punto más caliente (núcleo)	75,936	50,936	−29,064
	Sección superior del transformador	65	37	-28

De esta figura se puede concluir que la relación entre la temperatura máxima y la temperatura ambiente es lineal, con una tasa de cambio de 0,929 ºC por grado de temperatura ambiente. Esto indica que el aumento de temperatura en cada uno de los casos sigue un patrón aproximadamente constante; por lo tanto, incluso a temperaturas bajas, el SF_6 presenta aumentos de temperatura que sobrepasan los límites establecidos en la normativa.

Á.E. Machuca-Hernández J.R. Espina-Alvarado y G.D. Cano-Valles. CC BY-SA 4.0
Revista Tecnocientífica URU, No. 29 Julio - Diciembre 2025 (77 - 91)

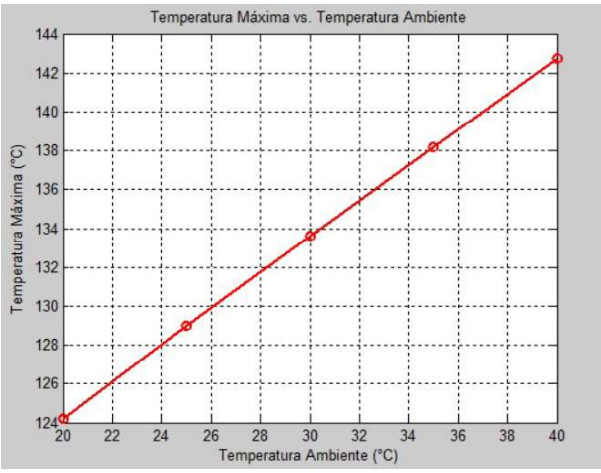


Figura 6. Temperatura máxima en función de la temperatura ambiente.

Caso 4: Variación en las medidas de la cuba

Los resultados indican que, bajo condiciones nominales y a diversas temperaturas ambiente, el gas SF_6 no cumple con los límites establecidos por la normativa. Sin embargo, hasta ahora, el análisis se ha centrado en parámetros operativos del transformador, sin considerar aspectos constructivos que podrían influir en su comportamiento térmico, como las dimensiones de la cuba.

Para evaluar el efecto del tamaño de la cuba en el comportamiento térmico del transformador, se realizó un estudio paramétrico aumentando las dimensiones de la cuba (diámetro y altura) entre un 10 % y un 40 %, manteniendo las condiciones operativas establecidas en el caso 1. La Figura 7 presenta las distribuciones de temperatura para los incrementos del 0 % y 40 %, mientras que los puntos clave, como la temperatura máxima y las diferencias respecto a los límites normativos, de los distintos aumentos de la cuba estudiados se resumen en la Tabla 11.

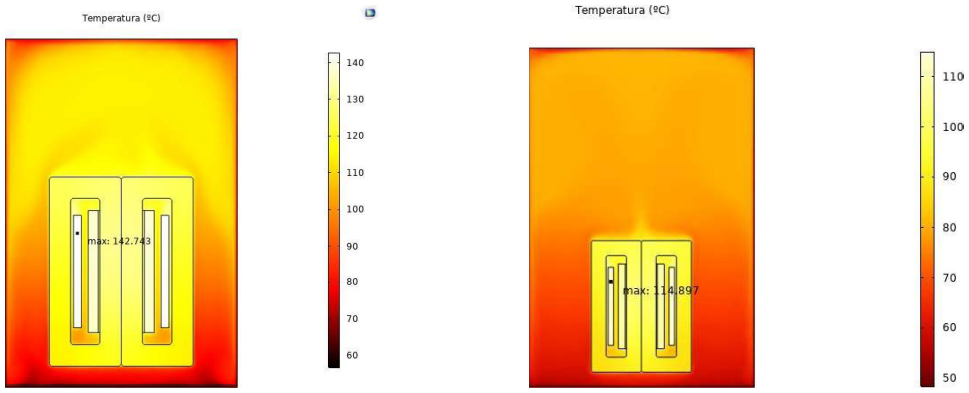


Figura 7. Distribución de temperatura con un aumento de las dimensiones del (a) 0% (b) 40%.

En la Tabla 11 se observa cómo, pese a que inicialmente las disminuciones de temperatura son significativas, estas se vuelven progresivamente menores, evidenciando un comportamiento de saturación. Asimismo, de los valores obtenidos con anterioridad se afirma que un transformador aislado en gas debe ser, como mínimo, 1,3 veces más grande que un transformador aislado en aceite para obtener temperaturas que no sobrepasen los límites estipulados. Esto quiere decir que un transformador refrigerado en gas SF_6 será, pese a su gran volumen, tres veces más liviano que un transformador refrigerado con aceite.

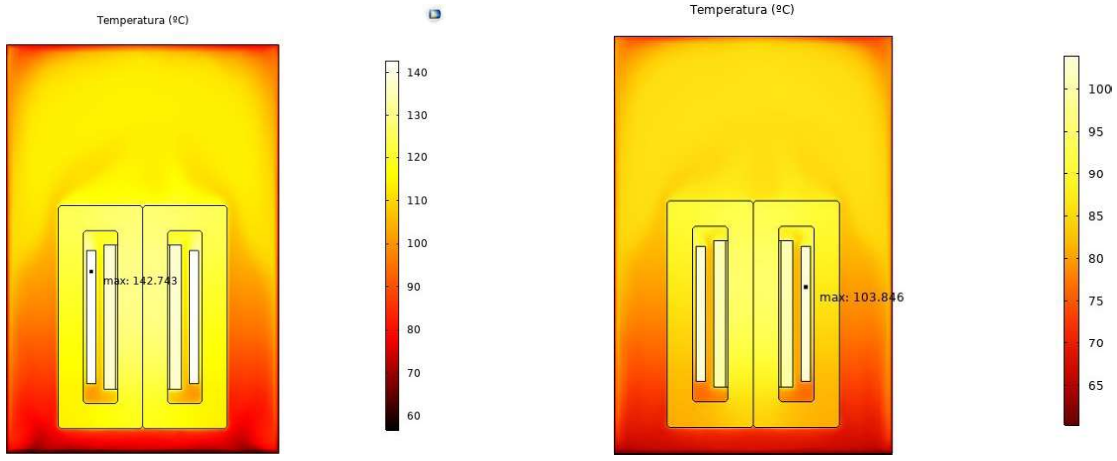
Tabla 11. Temperatura en el transformador a distintos tamaños de cuba

Aumento del tamaño de la cuba (%)	Ubicación	Temperatura registrada (ºC)	Aumento de temperatura respecto al ambiente (ºC)	Diferencia respecto al límite normativo (°C)
10	Punto más caliente	131,693	91,693	+11,693
	Sección superior del transformador	102,234	62,234	−2,766
20	Punto más caliente	124,754	84,754	+4,754
	Sección superior del transformador	92,947	52,947	−12,053
30	Punto más caliente	119,593	79,593	-0,407
	Sección superior del transformador	87,775	47,775	−17,225
40	Punto más caliente	114,897	74,897	−5,103
	Sección superior del transformador	80,872	40,872	−24,128

Caso 5: Variación en la presión del gas

Si bien las propiedades térmicas del SF_6 son prácticamente independientes de la presión, su influencia sobre la densidad impacta determinantemente la convección natural. Para analizar dicho impacto, se realizó un análisis paramétrico variando la presión entre 1 y 4 atm, manteniendo las condiciones operativas del caso 1. La Figura 8 muestra la distribución de temperatura para las presiones extremas del rango, mientras que la Tabla 12 resume los resultados clave para las distintas presiones a las cuales se verá sometido el transformador.

De los datos obtenidos se puede concluir que, similar al caso anterior, la disminución de temperatura con respecto al aumento de presión presenta un comportamiento de saturación. Asimismo, se concluye que, para mantener las temperaturas dentro de los límites normativos, se requiere operar a una presión de 2 atm como mínimo, lo que implica un incremento, teórico, del 100 % en el peso del gas respecto a 1 atm, sin considerar el refuerzo estructural necesario de la cuba para soportar dicha presión.



(a) **(b)**

Figura 8. Distribución de temperatura en el transformador con un aumento de presión de (a) 1 atm (b) 4 atm.

Tabla 12. Temperatura en el transformador a distintas presiones

Presión (atm)	Ubicación	Temperatura registrada (°C)	Aumento de temperatura respecto al ambiente (°C)	Diferencia respecto al límite normativo (°C)
2	Punto más caliente	119,306	79,306	-0.694
	Sección superior del transformador	96,8	56,8	−8,2
3	Punto más caliente	109,502	69,502	-10,498
	Sección superior del transformador	89,8	49,8	−15,2
4	Punto más caliente	103,846	63,846	−16,154
	Sección superior del transformador	85,9	45,9	−19,1

Análisis de viabilidad

Los resultados obtenidos muestran que el SF_6 no puede competir térmicamente con el aceite mineral en configuraciones convencionales, debido a su baja conductividad y a su limitado coeficiente de transferencia de calor por convección. No obstante, las simulaciones evidenciaron que su comportamiento mejora de manera significativa cuando se incrementan las dimensiones de la cuba o se opera a presiones de, al menos, 2 atm, permitiendo cumplir los límites normativos de temperatura estipulados en la Tabla 1.

Si bien estas modificaciones permiten optimizar el desempeño térmico del gas, también introducen exigencias constructivas adicionales. El aumento del volumen de la cuba requiere una estructura de mayor tamaño, lo que puede complicar su instalación en postes estándares; mientras que, operar a altas presiones de manera sostenida implica el uso de cubas reforzadas capaces de soportar esfuerzos internos superiores, lo que introduce mayores exigencias mecánicas. En conjunto, estas adaptaciones derivan, finalmente, en un incremento significativo de los costos de construcción frente a un transformador convencional refrigerado en aceite mineral.

Por otro lado, desde la perspectiva operativa, la aplicación del SF_6 en transformadores de distribución introduce desafíos significativos. La incorporación de sistemas de monitoreo y detección de fugas, indispensables para cumplir con los estrictos requisitos de operación, manipulación y disposición final establecidos en normativas internacionales como la IEEE Std 37.122.3 [9], demanda una infraestructura adicional que contrasta con la simplicidad operativa propia de los transformadores de distribución tipo poste, diseñados para operar con mínima aparamenta y esquemas de mantenimiento predominantemente correctivo; en consecuencia, la implementación del SF_6 en este nivel de la red no resulta compatible con la filosofía operativa de estos equipos. En conclusión, el SF_6 constituye una alternativa viable únicamente si se adoptan diseños optimizados que mitiguen sus desventajas térmicas y en contextos donde la seguridad intrínseca y la reducción de mantenimiento puedan justificar los costos adicionales asociados a su construcción e implementación.

Conclusiones

El diseño de transformadores de distribución tipo poste debe cumplir con normativas nacionales e internacionales que definen parámetros críticos para garantizar una operación segura y eficiente. La viabilidad del uso de gas SF_6 y *Conduground* fue evaluada bajo este marco normativo, permitiendo cuantificar su desempeño frente a los estándares para los diseños convencionales.

La evaluación del *Conduground* en transformadores de distribución tipo poste enfrenta limitaciones debido a la falta e inconsistencias en datos fundamentales, como su conductividad térmica, resistividad y

conductividad eléctrica. Esta carencia impide realizar simulaciones precisas y extraer conclusiones definitivas sobre su viabilidad en estas aplicaciones.

Pese a la existencia de múltiples softwares especializados en análisis mediante el método de los elementos finitos, COMSOL Multiphysics destacó por su capacidad para modelar fenómenos multifísicos, como la transferencia de calor por convección, funcionalidad que fue clave para obtener resultados realistas del comportamiento térmico del SF_6

Bajo condiciones de máximo estrés térmico, un transformador refrigerado con SF_6 alcanza temperaturas un 73,07 % superiores a las obtenidas con aceite mineral, excediendo los límites normativos en 22,743 °C; sin embargo, el aumento del 30 % en las dimensiones de la cuba reduce la temperatura del punto más caliente en un 16,22 %, mientras que operar a una presión de 2 atm permite disminuirla adicionalmente en un 16,42 %

Los resultados presentados demostraron que el gas SF_6 es una alternativa viable al aceite mineral como refrigerante en transformadores de distribución tipo poste, siempre que se implementen ajustes sustanciales en su diseño para garantizar el cumplimiento de los límites normativos de temperatura.

Agradecimientos

En especial a la empresa ICIS, C.A por su apoyo técnico para el desarrollo de esta investigación, a la Universidad Rafael Urdaneta y a la profesora Nancy Mora de Morillo por su apoyo metodológico.

Referencias bibliográficas

[1] P. Avelino, *Transformadores de distribución: Teoría, cálculo, construcción y pruebas,* 3ra ed. Barcelona, España: Editorial Reverté S.A., 2008.

[2] *Transformadores de potencia. Generalidades,* Norma COVENIN 536, Fondonorma, Caracas, Venezuela, 2021.

[3] *IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers,* IEEE Std C57.12.00, Nueva York, EE. UU., 2021.

[4] *Power transformers – Part 5: Ability to withstand short circuit,* Norma IEC 60076-5, Comisión Electrotécnica Internacional, Londres, Reino Unido, 2011.

[5] D. Brosolo y G. Máttar, "Evaluación de *Conduground* como material conductor alternativo al cobre para sistemas de puesta a tierra", Trabajo Especial de Grado, Fac. Ingeniería, Univ. Rafael Urdaneta, Maracaibo, Venezuela, 2018.

[6] D. Xiao, *Gas Discharge and Gas Insulation*. Berlín, Alemania: Springer, 2016.

[7] Y. Yokomizu, T. Kobayashi, y T. Matsumura, "Particle Composition and Heat Capacity of High-Temperature SF6 Present at Constant Volume: Discussion on Formula Expressing Relationship between Constant-Pressure and Constant-Volume Heat Capacities," *IEEJ Transactions on Electrical and Electronics Engineering,* vol. 10, pp. 683–688, 2015, doi: 10.1002/tee.22147.

[8] *IEEE Guide for Sulphur Hexafluoride (SF6) Gas Handling for High-Voltage (over 1000 Vac) Equipment*, IEEE Std C37.122.3, Nueva York, EE. UU., 2024.

[9] *Heat Transfer Module User's Guide,* COMSOL Multiphysics, Estocolmo, Suecia, 2024.

Revista Tecnocientífica URU
Universidad Rafael Urdaneta
No. 29 Julio - Diciembre 2025
Depósito Legal: PPI 201402ZU4464
ISSN: 2343-6360
CC BY-SA 4.0

Manual práctico para el uso de paneles de madera contra laminada (CLT) en la economía circular de la construcción venezolana

Practical manual for the use of cross-laminated timber (CLT) panels in the circular economy of Venezuelan construction

Robmary B. Coronado-Durán
Universidad Rafael Urdaneta, Decanato de Postgrado e Investigación, Programa de Especialización en Construcción de Obras Civiles, Mención Edificaciones. Maracaibo, Venezuela.
https://orcid.org/0009-0009-2954-7898 | Correo electrónico: Robmarycoronado06@gmail.com

Mario V. Herrera-Boscán
Universidad Rafael Urdaneta, Decanato de Postgrado e Investigación, Programa de Especialización en Construcción de Obras Civiles, Mención Edificaciones. Maracaibo, Venezuela.
https://orcid.org/0009-0003-9725-5973 | Correo electrónico: mherrerab.2020@gmail.com
Recibido: 10-10-2025 Admitido: 25-10-2025 Aprobado: 17-11-2025
DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.20208482

Resumen
La investigación evaluó los paneles de madera contra laminados (CLT) como una opción sostenible para la construcción en Venezuela, analizando su impacto ambiental y conexión con la economía circular. Se destacaron sus propiedades estructurales, reciclaje y reutilización, en comparación con materiales como el hormigón y el acero. El CLT mostró una huella de carbono menor, reduciendo el impacto ambiental en la construcción. Sin embargo, enfrenta barreras como la falta de regulaciones, desconocimiento del material y limitaciones económicas. El estudio propuso estrategias para superar estos desafíos, como normativas, incentivos financieros, capacitación y proyectos piloto. Basándose en experiencias internacionales, se concluyó que el CLT puede impulsar la construcción sostenible en Venezuela, fortaleciendo la economía circular a través del reciclaje y reutilización, mejorando la eficiencia energética y reduciendo desperdicios. Su adopción requiere un enfoque colaborativo entre los sectores público y privado para transitar hacia un modelo más ecológico.
Palabras clave: Madera contralaminada (CLT), construcción de madera, análisis de ciclo de vida (ACV), gestión de residuos de construcción, economía circular.

Abstract
The research evaluated cross-laminated timber (CLT) panels as a sustainable option for construction in Venezuela, analyzing their environmental impact and connection to the circular economy. Their structural properties, recycling, and reuse were highlighted in comparison with materials such as concrete and steel. CLT demonstrated a significantly lower carbon footprint, reducing the environmental impact of construction. However, it faces barriers such as the lack of regulations, material unawareness, and economic limitations. The study proposed strategies to overcome these challenges, including regulations, financial incentives, professional training, and pilot projects. Drawing on international experiences, it was concluded that CLT can promote sustainable construction in Venezuela, strengthening the circular economy through recycling and reuse, improving energy efficiency, and reducing waste. Its adoption requires a collaborative approach between public and private sectors to transition to a more ecological model.
Keywords: *Cross-Laminated Timber (CLT), Mass Timber Construction, Life Cycle Assessment (LCA), Construction Waste Management, Circular Economy.*

R.B. Coronado-Durán y M.V. Herrera-Boscán. CC BY-SA 4.0
Revista Tecnocientífica URU, No. 29 Julio - Diciembre 2025 (93 - 101)

Introducción

En el ámbito de la construcción, tradicionalmente se han utilizado materiales como el hormigón y el acero, no obstante, su impacto ambiental es significativo, representando entre el 7% y el 9% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero [1]. Este alto nivel de emisiones, junto con su elevado consumo energético durante la producción, ha puesto de manifiesto la urgencia de buscar alternativas más sostenibles. Por lo tanto, los paneles de madera contra laminados (CLT, siglas en inglés) han demostrado ser una alternativa viable con múltiples usos, destacando por su resistencia y eficiencia.

Estos paneles están formados por capas de madera dispuestas de manera perpendicular y unidas mediante adhesivos estructurales, lo que les confiere una alta estabilidad dimensional y resistencia mecánica, dado que los paneles CLT pueden soportar cargas de hasta 610 kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm²) en dirección longitudinal y 760 kg/cm² en dirección transversal, dependiendo de la configuración de las capas y el tipo de madera utilizada. Además, su diseño estructural permite una distribución uniforme de las cargas, haciéndolos ideales para aplicaciones internas en muros, techos y entrepisos. En términos de rendimiento, un muro de CLT de 100 mm de espesor puede ofrecer un nivel de aislamiento térmico equivalente al de un muro de hormigón de aproximadamente 1,80 m de espesor, esto lo convierte en una opción viable y sostenible para proyectos en una amplia variedad de condiciones climáticas, lo que ha aumentado su popularidad en todo el mundo, especialmente en Europa, América del Norte y Asia [2].

Este diseño proporciona una alta estabilidad dimensional y resistencia mecánica, estimando así que la producción global de paneles CLT supera los 2 millones de metros cúbicos anuales. Considerando que, a nivel global, la industria de la construcción representa el 40% del consumo de energía primaria, el 33% de las emisiones de CO_2 y el 60% de la materia prima extraída de la litósfera [3], es evidente que esta actividad genera el mayor consumo de recursos naturales. Ahora bien, la madera utilizada en los paneles CLT proviene de bosques gestionados de manera sostenible, lo que contribuye a la reducción de la huella de carbono.

Además, los paneles CLT pueden ser reciclados para fabricar nuevos productos de madera, como tableros aglomerados o fibras para aislamiento térmico y acústico. Incluso, los residuos generados durante su fabricación o desmontaje pueden ser aprovechados como biomasa para la generación de energía renovable, contribuyendo a la reducción de desperdicios. Estas características no solo prolongan la vida útil del material, sino que también disminuyen la necesidad de extraer nuevos recursos naturales, su fabricación requiere menos energía que otros materiales de construcción convencionales y en cuanto a durabilidad, ligereza, excelente aislamiento térmico y acústico, y su capacidad para soportar cargas elevadas, este panorama muestra el gran potencial del sector para buscar soluciones que minimicen los impactos generados por su actividad [4].

Experiencias previas en países como Argentina, Chile y Brasil, han demostrado la versatilidad y el bajo impacto ambiental de los paneles CLT. Aunque la reutilización específica de estos paneles en América Latina aún está en desarrollo, su uso sostenible y su potencial para la economía circular los convierten en una opción prometedora teniendo en consideración que, al finalizar la vida útil de la construcción, estos paneles son 100% renovables y no introducen componentes tóxicos, favoreciendo ambientes más sanos y habitables [4].

En los mencionados países, se ha seguido un proceso de diseño integrado a través de todas las etapas del proyecto arquitectónico, lo que ha permitido una adopción más rápida y eficiente de esta tecnología. En Venezuela, donde el uso de hormigón y acero prevalece, el CLT podría constituirse como una solución accesible y eficaz, especialmente considerando los recursos forestales disponibles en el país, ya que, este cuenta con una riqueza forestal significativa, abalada por el Sistema Nacional Integrado de Información Forestal (SINIIF) con aproximadamente 50 millones de hectáreas de bosques, lo que representa casi el 50% de su territorio. Estos recursos están concentrados principalmente en los estados de Bolívar, Amazonas y Delta Amacuro, que albergan la mayor parte de los bosques tropicales del país [4].

Dentro de esas áreas de bosques, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) estima que 29 millones de hectáreas tienen potencial productivo, con un volumen de madera calculado en 6.700 millones de metros cúbicos, de los cuales 3.500 millones corresponden a especies aptas

para el mercado. Sin embargo, se ha explorado el diseño estructural y la evaluación económica de un sistema constructivo en madera [5].

Es crucial analizar cómo se integrarían los paneles CLT en un enfoque circular en el ámbito de la construcción en Venezuela, considerando aspectos como la reutilización en otras áreas de la misma edificación o en otras estructuras, la metodología de reciclaje, la eficiencia energética y la huella ambiental, así como su impacto social, económico y regulatorio en el país, por lo que este artículo tiene como finalidad proponer un manual para el uso de paneles de madera contra laminada (CLT) en la economía circular en el sector construcción venezolano.

Materiales y Métodos

Ante todo, es importante destacar que esta investigación se lleva a cabo en el contexto de la construcción venezolana, específicamente en el uso de paneles de madera contra laminada (CLT) dentro de la economía circular. El estudio se enfoca en el estado de Zulia, durante el período comprendido entre mayo de 2024 y junio de 2025, en donde se analizaron las prácticas actuales y potenciales para la implementación de CLT en la construcción, observando su impacto en la sostenibilidad y eficiencia de los recursos. La población de estudio incluyó profesionales del sector de la construcción, tales como ingenieros civiles, arquitectos y constructores, que participaron en proyectos donde se emplearon o se podrían emplear paneles de CLT.

Además, se revisaron estudios de caso, artículos y experiencias previas, tanto a nivel nacional como internacional, con el fin de proporcionar un marco de referencia comparativo. La investigación excluye otros tipos de materiales de construcción no relacionados con CLT, así como proyectos de construcción fuera del estado de Zulia o fuera del período especificado. El enfoque principal es la recopilación de datos teóricos y empíricos, con énfasis en la observación y análisis de prácticas actuales en el campo.

La investigación realizada correspondió al enfoque de tipo proyectivo, ya que se concentró en la elaboración de un manual para el uso de paneles de madera contra laminada (CLT) en la economía circular de la construcción venezolana. El diseño fue de nivel descriptivo, que, según Hurtado [6] tiene como objetivo la descripción precisa del evento de estudio, asociándose con el diagnóstico, pues busca detallar y analizar las características, ventajas y aplicaciones de los paneles CLT en el contexto constructivo venezolano. En este tipo de investigación se buscó exponer el evento estudiado haciendo una enumeración detallada de sus características.

Seguidamente, se empleó un diseño de investigación de campo, univariable y transeccional contemporáneo. Hurtado [6] define el diseño de campo como un proceso que se realiza en un entorno natural o social donde se encuentra el objeto de estudio, permitiendo al investigador recopilar datos directamente de la realidad, sin manipulación o control de las variables. Su propósito es describir variables y analizar su incidencia en un momento dado. Este enfoque no experimental implica que no se manipulan las variables independientes, sino que se observan, recopilan datos en su contexto real y describen los fenómenos tal como ocurren en su entorno natural, lo que permite una comprensión más profunda del problema.

Dentro de este marco, el mismo autor [6] explica que la investigación no experimental se caracteriza por la observación y análisis de fenómenos en su contexto natural sin interferir en su desarrollo. De esta forma, se satisface la necesidad de promover prácticas de construcción más sostenibles y eficientes en el contexto venezolano. En este sentido, el uso de paneles de madera contra laminada (CLT) ofrece una alternativa ecológica y renovable frente a los materiales de construcción tradicionales, como el concreto y el acero, que tienen un mayor impacto ambiental.

El sector de la construcción en Venezuela enfrenta desafíos significativos en términos de sostenibilidad y economía circular, por lo cual, la implementación de paneles CLT puede contribuir a la reducción de residuos y al aprovechamiento de recursos locales, promoviendo así una economía circular en el ámbito de la construcción. Por lo que, esta investigación es relevante porque proporciona un manual práctico para la adopción de paneles CLT en la construcción venezolana, basándose en experiencias y estudios de caso tanto nacionales como internacionales, cuyos resultados sirven como una guía para profesionales de la construcción,

ingenieros y arquitectos, promoviendo la difusión de técnicas sostenibles y eficientes que beneficien tanto al medio ambiente como a la economía local.

De esta manera, se busca ofrecer una contribución significativa al desarrollo de la construcción sostenible en Venezuela, ya que se siguen criterios de normas y referencias de diversos aportes de autores para garantizar la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos, los cuales se plasman en el manual propuesto.

Análisis de resultados

Durante la investigación, se llevó a cabo un análisis detallado sobre el reciclaje y reutilización de paneles de madera contra laminados. Se comenzó con la recopilación de información relevante, abarcando estudios previos y casos de éxito en diversas regiones de diferentes países latinoamericanos incluyendo España [7] y Chile [8]. Posteriormente, se evaluaron las propiedades y características de los paneles de madera contra laminados, lo que permitió determinar su viabilidad para procesos de reciclaje y reutilización.

Estos datos no solo sirvieron para validar la pertinencia del material dentro de un enfoque sostenible, sino que también evidencian su potencial para transformar el sector constructivo en países como Venezuela, específicamente en el estado Zulia, ya que contamos con recursos forestales en los bosques secos de la cuenca del Lago de Maracaibo, que a pesar de no ser tan extensos como en otras regiones del país, como Bolívar o Amazonas, su manejo sostenible podría contribuir al desarrollo de iniciativas locales, lo que reduciría costos de transporte y fomentaría la economía local. Para complementar estos hallazgos, se presenta la primera tabla, la cual recoge datos relevantes sobre el mercado global de la madera laminada y reciclada, su crecimiento proyectado y su uso en la construcción sostenible.

Tabla 1. Datos del mercado de paneles de madera laminada y reciclada [9]

Mercado	Dato
Tamaño del mercado 2024	USD 217.900 millones
Crecimiento esperado (2034)	USD 349 mil millones
CAGR global	4,8%
Producción esperada (2029)	474,27 millones m^3
Uso en construcción sostenible	30% con madera reciclada

A medida que avanzó el estudio, se identificaron diversas técnicas y métodos aplicables, los cuales fueron analizados en profundidad para definir su potencial en el contexto de la construcción venezolana. También se examinaron casos de estudio en Venezuela y otros países, lo que proporcionó una perspectiva comparativa y permitió extraer aprendizajes clave, con base en los hallazgos obtenidos, se desarrollaron propuestas específicas orientadas a optimizar el uso de estos materiales dentro del sector de la construcción.

Además, se contó con acceso a bases de datos académicas y técnicas, apoyo de universidades y centros de investigación, y el uso de herramientas avanzadas de análisis y diseño NIUFORM [10]. Estos recursos resultaron fundamentales para la formulación de soluciones eficaces y adaptadas a la realidad del país.

Mediante el desarrollo de la investigación, se recopiló información detallada sobre la producción y el uso de paneles contra laminados, con el propósito de evaluar su impacto ambiental. Entre los análisis realizados, se consideró la comparación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generadas por estos paneles y otros materiales de construcción tradicionales. Este enfoque permitió establecer una perspectiva más clara sobre la contribución de cada material a la huella de carbono en el sector de la construcción.

La segunda tabla, resume los datos más relevantes obtenidos, destacando el desempeño de los paneles contra laminados frente a materiales como el hormigón, el acero estructural y el ladrillo cerámico.

Tabla 2. Comparación de emisiones de CO_2 entre materiales de construcción [11]

Material	Emisiones de CO_2 (kg/m^2)
Paneles contra laminados	25,80 - 140,32
Hormigón armado	300 - 400
Acero estructural	800 - 1200
Ladrillo cerámico	150 - 250

A partir de estos resultados, se identificaron oportunidades para disminuir la huella de carbono de los paneles contra laminados, empleando herramientas especializadas de análisis de ciclo de vida (LCA) [11], el cual es una herramienta metodológica utilizada para evaluar los impactos ambientales asociados a un producto, proceso o actividad a lo largo de todas las etapas de su existencia, es una herramienta clave para promover la sostenibilidad, ya que ayuda a reducir la huella ambiental de productos y servicios mediante la optimización de recursos y la minimización de impactos negativos.

Entre las estrategias se incluye la optimización de los procesos de fabricación para disminuir residuos y consumo energético, la utilización de adhesivos ecológicos, ya que estos no solo son compatibles con las propiedades estructurales del CLT, sino que también refuerzan su perfil sostenible, por que al estar libres de compuestos tóxicos como el formaldehído, garantizan que los paneles mantengan su estabilidad dimensional y resistencia mecánica sin comprometer la salud humana ni el medio ambiente el reciclaje de paneles usados, la incorporación de fuentes de energía renovable en su producción y el diseño sostenible que facilite su reutilización [12]. Estas medidas buscan disminuir la huella de carbono y potenciar la eficiencia ambiental del sector construcción [13, 14].

De igual manera, se llevó a cabo un análisis detallado del estado actual de la economía circular en la construcción venezolana (Tabla 3), con el propósito de comprender su grado de implementación y los desafíos presentes en el sector, estas acciones no solo buscan mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, sino también maximizar la eficiencia ambiental en el sector de la construcción, alineándose con los principios de la economía circular, destacando aspectos esenciales como los desafíos estructurales y culturales, así como las oportunidades para fomentar prácticas sostenibles en proyectos constructivos. A partir de este diagnóstico, se plantean iniciativas como el desarrollo de marcos regulatorios, la capacitación de trabajadores y la promoción de alianzas público-privadas, que son indispensables para consolidar la economía circular en el contexto venezolano.

R.B. Coronado-Durán y M.V. Herrera-Boscán. CC BY-SA 4.0
Revista Tecnocientífica URU, No. 29 Julio - Diciembre 2025 (93 - 101)

Tabla 3. Análisis del estado actual de la economía circular en la construcción

Aspectos	Detalles
Grado de implementación	-Uso limitado de prácticas de reciclaje y reutilización de materiales. - Enfoques incipientes en proyectos de construcción sostenible. - Potencial sin explotar en zonas urbanas y rurales.
Barreras y desafíos	- Infraestructura insuficiente: falta de instalaciones para gestionar residuos. - Cultura y aceptación: Resistencias hacia materiales reciclados. - Falta de incentivos: Políticas regulatorias débiles.
Oportunidades	-Innovación tecnológica en materiales sostenibles. -Generación de empleo en reciclaje y manufactura. -Reducción de impacto ambiental al disminuir residuos y emisiones.
Casos de estudio	- Proyectos piloto en viviendas ecológicas. -Uso experimental de CLT reciclado en construcciones locales. -Ejemplo de sistemas circulares en países vecinos como Colombia o Brasil.
Recomendaciones	-Desarrollo de marcos regulatorios que promuevan incentivos fiscales. -Sensibilización y capacitación para trabajadores de la industria. -Establecimiento de alianzas público-privadas para fomentar la economía circular.

Se identificaron diversas barreras que dificultan la integración de paneles de madera contra laminados, incluyendo aspectos técnicos, como la falta de conocimiento sobre las propiedades estructurales y resistencia de estos paneles en comparación con materiales tradicionales; económicos, como los costos iniciales más altos en comparación con opciones convencionales y normativos por regulaciones poco claras o insuficientes sobre el uso de materiales reciclados en la construcción.

A partir de la información recopilada, se diseñaron estrategias específicas destinadas a superar estas barreras y facilitar la adopción de prácticas más sostenibles, tal como promover el conocimiento sobre los beneficios de los paneles, fomentar políticas de apoyo financiero para proyectos que integren materiales reciclados e incentivar el desarrollo de regulaciones que faciliten la adopción de estos materiales en el sector.

Para la elaboración del manual práctico, se recopiló información detallada a partir de los datos y análisis obtenidos de la Tabla 2 de los datos de la huella de carbono entre los paneles CLT y materiales tradicionales como el hormigón armado, el acero estructural y el ladrillo cerámico, lo que permite evaluar bajo una clasificación de “muy alto impacto” o “bajo impacto”, el impacto ambiental de cada material en comparación al significativamente menor de los CLT.

La Tabla 4 sintetiza estos hallazgos, proporcionando un panorama claro sobre las emisiones de CO_2 asociadas a cada material, pero no solo bajo su consumo energético sino también su durabilidad y mantenimiento, su reciclabilidad y reutilización y el impacto en la salud humana. Este análisis refuerza la importancia de adoptar prácticas más sostenibles y tecnológicamente avanzadas en el contexto venezolano. Esto incluyó estudios sobre técnicas de reciclaje y reutilización, cálculos de la huella de carbono, y estrategias para la integración de los paneles de CLT en la economía circular. Una vez reunida la información clave, se organizó el contenido en secciones claras y estructuradas, facilitando su comprensión y aplicación.

Revista Tecnocientífica URU, No. 29 Julio - Diciembre 2025 (93 - 101)

Tabla 4. Comparación de impacto ambiental entre materiales de construcción

Material	Emisiones de CO_2 (kg/m²)	Impacto ambiental
Paneles contra laminados (CLT)	25,80 - 140,32	Bajo impacto, material renovable y reciclable
Hormigón armado	300 - 400	Alto impacto, alta emisión de CO_2 en producción
Acero estructural	800 - 1200	Muy alto impacto, requiere gran consumo energético
Ladrillo cerámico	150 - 250	Impacto medio-alto, depende del proceso de fabricación

Finalmente, se diseñó un manual práctico con instrucciones detalladas para la implementación de estas estrategias en el ámbito de la construcción (Figura 1). Este manual no solo establece un marco claro y accesible para la adopción de prácticas sostenibles, sino que también ofrece recomendaciones adaptadas al contexto local, considerando los retos y oportunidades específicos de la construcción en Venezuela.

Figura 1. Flujograma para el uso del CLT en la construcción sostenible

El manual incluye pasos estructurados que abarcan desde la evaluación inicial de materiales y recursos disponibles hasta la ejecución de proyectos piloto, que podrían enfocarse en la construcción de viviendas ecológicas, edificios públicos o espacios comunitarios utilizando paneles CLT. Estos proyectos no solo servirían para demostrar las ventajas técnicas y ambientales del material, sino también para sensibilizar a los actores involucrados, como constructores, arquitectos y comunidades locales, sobre su potencial. cada paso está diseñado para promover la innovación y garantizar la eficiencia en todas las etapas del proceso de construcción.

El manual mencionado, enfatiza la importancia de la colaboración entre los diferentes grupos involucrados, como empresas constructoras, instituciones educativas, gremios y el gobierno, promoviendo un enfoque integral para consolidar la transición hacia una economía circular en el ámbito de la construcción.

Por último, se proponen iniciativas como programas de capacitación y talleres, ya que, en Venezuela, varias instituciones y expertos independientes podrían colaborar en la organización de estas charlas en la construcción sostenible y el uso de paneles CLT, que refuercen las competencias técnicas necesarias, tanto regionales, nacionales como internacionales. Estas actividades también están orientadas a sensibilizar a los participantes sobre los beneficios de las prácticas sostenibles, subrayando su impacto favorable en

la conservación ambiental y el impulso de la economía nacional. Este enfoque integral no solo facilita la implementación de los paneles CLT, sino que también crea un modelo replicable y escalable para futuras iniciativas en la construcción venezolana

Conclusiones

El estudio permitió evaluar la viabilidad y el impacto ambiental de los paneles de madera contra laminados (CLT) en la construcción venezolana, destacando su potencial para impulsar un modelo más sostenible y alineado con la economía circular. A partir del análisis de sus propiedades físicas, emisiones de carbono y barreras de adopción, se desarrollaron estrategias concretas para su implementación, asegurando su viabilidad técnica, económica y normativa. Los hallazgos demostraron que el CLT presenta una huella de carbono considerablemente menor en comparación con materiales tradicionales como el hormigón y el acero, lo que lo posiciona como una alternativa ecológica, adaptable a cualquier clima y que con el mantenimiento necesario pueden mantener su funcionalidad y estética durante décadas.

Sin embargo, En Venezuela, el uso de materiales renovables en la construcción representa un porcentaje bajo en comparación con otros países de América Latina, menos del 5% de los desechos generados en el país son reutilizados, lo que refleja un bajo nivel de integración de prácticas sostenibles. En contraste, países como Brasil y Colombia tienen porcentajes significativamente más altos en el uso de materiales reciclados y renovables, entre el 20 y 30% gracias a políticas públicas y programas de incentivo. No obstante, su integración en Venezuela enfrentó desafíos estructurales, como la falta de regulaciones específicas, el desconocimiento técnico y las limitaciones económicas. Para abordar estos obstáculos, se propusieron medidas estratégicas, incluyendo normativas claras, incentivos financieros y proyectos piloto destinados a demostrar la eficiencia del CLT en distintos contextos constructivos.

Asimismo, se diseñó un manual práctico con pasos detallados para la adopción del CLT en la construcción venezolana, proporcionando herramientas para facilitar su incorporación en el mercado. Este enfoque integral permitió establecer un marco de acción realista, basado en experiencias internacionales y estudios técnicos que validaron su implementación en el país.

En definitiva, el CLT representa una oportunidad clave para transformar la industria de la construcción en Venezuela, promoviendo eficiencia energética, reducción de emisiones y una gestión más responsable de los recursos naturales. Su aplicación depende de la colaboración entre el sector público, privado y académico, demostrando que, con planificación adecuada y voluntad de cambio, la construcción sostenible puede convertirse en una realidad tangible en el país.

Referencias bibliográficas

[1] I. F. Medina-Arboleda y P. F. Páramo-Bernal, “La educación ambiental y para el cambio climático en Latinoamérica: una revisión de alcance,” *Suma Psicológica*, vol. 31, no. 1, pp. 63–93, ene.–jun. 2024. doi: 10.14349/sumapsi.2024.v31.n1.8. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-43812024000100063

[2] J. T. Franco, “¿Es la madera laminada cruzada (CLT) el hormigón del futuro?,” *ArchDaily en Español,* 14 ago. 2019. [En línea]. Disponible en: https://www.archdaily.cl/cl/921337/es-la-madera-laminada-cruzada-clt-el-hormigon-del-futuro

[3] H. Striegel, “El Método de la Valoración del Ciclo de Vida (LCA),” *DIN/ISO 14040 Series,* 2000. [En línea]. Disponible en: https://www.oc-praktikum.de/nop/es/articles/pdf/LCAMethod_es.pdf

[4] C. A. do Nascimento, “Posibilidades para el desarrollo de la tecnología de madera contralaminada (CLT) y su aplicación en la construcción: estudio sobre la situación actual en Brasil,” Tesis de Máster, Univ. Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2020.

[5] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), "El estado de los bosques del mundo 2024: Innovaciones en el sector forestal hacia un futuro más sostenible," 13 jul. 2024. [En línea]. Disponible en: https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd1211es

[6] J. Hurtado de Barrera, Metodología de la Investigación Holística, 3ª ed. Caracas, Venezuela: SYPAL, 2000.

[7] J. Galván, R. Carabaño, I. Oteiza y E. Martínez, "Madera contralaminada (CLT), situación actual. Alternativa para una construcción sostenible en España," en *I Congr. Int. sobre Investigación en Construcción y Tecnología Arquitectónicas,* Univ. Politécnica de Madrid, ETSAM, Madrid, España, jun. 11–13, 2014.

[8] R. Medeiros, "Catálogo Técnico CLT Hilam Arauco," Arauco, Chile, 2025. [En línea]. Disponible en: https://arauco.com/hilam/wp-content/uploads/sites/29/2025/06/Catalogo_Hilam_2025.pdf

[9] Global Market Insights, "Mercado de paneles a base de madera Tamaño y compartir 2025-2034," Informe GMI6553, 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.gminsights.com/es/industry-analysis/wood-based-panel-market

[10] NIUFORM, "Detalles constructivos en CLT," Guía técnica, Santiago de Chile, Chile, 2023. [En línea]. Disponible en: https://niuform.cl/detalles-constructivos-en-clt-niuform/

[11] M. Perevochtchikova, "La evaluación del impacto ambiental y la importancia de los indicadores ambientales," *Gestión y Política Pública,* vol. 22, no. 2, pp. 283–312, ene. 2013. doi: 10.22201/cide.14051079e.2013.22.2.1. [En línea]. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-10792013000200001

[12] Slow Studio, "Sistemas constructivos / Construcción con madera contralaminada CLT - Llevando la resistencia estructural de la madera al máximo," *Slow Studio Research*, 9 nov. 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.slowstudio.es/research/construccion-con-madera-contralaminada-clt

[13] T. A. Cristóbal Astete, "Evaluación de propiedades estructurales de madera contralaminada (CLT) fabricada con especies forestales de mediana densidad nativas del Perú para construcciones sustentables," Tesis de Pregrado, Univ. Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú, 2023. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/10275

[14] Y. Zhang y L. Cheng, "Eficiencia energética en construcción: óptimo consumo de energía," *En Obra,* 25 may. 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.en-obra.com/es/noticias/construccion-representa-el-40-del-uso-de-energia

Revista Tecnocientífica URU
Universidad Rafael Urdaneta
No. 29 Julio - Diciembre 2025
Depósito Legal: PPI 201402ZU4464
ISSN: 2343-6360
CC BY-SA 4.0

Caracterización fisicoquímica y microbiológica del queso semiduro fortificado con *Spirulina* (*Arthrospira platensis*)

Physicochemical and microbiological characterization of semi-firm cheese fortified with Spirulina (Arthrospira platensis)

Rafael A. Murgas Arambulo
Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Escuela de Ingeniería de Producción Animal, Maracaibo, Venezuela.
https://orcid.org/0009-0005-1643-2267 | Correo Electrónico: rafaelmurgasa@gmail.com

Reinaldo A. Briñez Castro
Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Escuela de Ingeniería de Producción Animal, Maracaibo, Venezuela.
https://orcid.org/0009-0000-4892-0138 | Correo Electrónico: reinaldobrinez1@gmail.com

Laura R. Soto Arrieta
Universidad del Zulia, Facultad Experimental de Ciencias, Departamento de Química, Maracaibo, Venezuela.
https://orcid.org/0000-0002-4250-5088 | Correo Electrónico: laurasotoarrieta@gmail.com
Recibido: 17-07-2025 Admitido: 30-07-2025 Aprobado: 15-08-2025
DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.20208565

Resumen
En Venezuela, el consumo de alimentos funcionales ha experimentado un incremento en las últimas décadas. El presente estudio tuvo como objetivo caracterizar fisicoquímica y microbiológicamente un queso semiduro fortificado con *Spirulina (Arthrospira platensis)*. Para ello, se empleó un diseño experimental completamente al azar, con la realización de análisis sensoriales, fisicoquímicos y microbiológicos conforme a las Normas COVENIN. En la caracterización fisicoquímica, se observaron diferencias significativas (prueba *t-student,* $p < 0,05$) en el contenido de grasa (31,62 % vs. 25,02 %), proteína (18,23 % vs. 17,70 %) y humedad (41,34 % vs. 40,06 %) entre el queso fortificado y el control, respectivamente. El contenido de cenizas no mostró variaciones significativas ($p > 0,05$). Los análisis microbiológicos confirmaron la ausencia de *Salmonella* y *E. coli* dentro de los límites permisibles; sin embargo, los recuentos de *Staphylococcus aureus* ($3,9x10^3$ UFC/g) superaron el límite establecido por la norma COVENIN 3821 ($<1x10^2$ UFC/g). Se concluye que la fortificación con *Spirulina* al 0,33 % es tecnológicamente viable y mejora el perfil nutricional del queso semiduro, aunque se deben optimizar las buenas prácticas de manufactura para garantizar su inocuidad microbiológica.
Palabras clave: Queso semiduro, Alimentos funcionales, Spirulina (Arthrospira platensis), Inocuidad de los alimentos, Análisis bromatológico

Abstract
In Venezuela, the consumption of functional foods has increased in recent decades. The present study aimed to characterize a semi-hard cheese fortified with Spirulina (Arthrospira platensis) from a physicochemical and microbiological perspective. For this purpose, a completely randomized experimental design was employed, including sensory, physicochemical, and microbiological analyses in accordance with COVENIN standards. In the physicochemical characterization, significant differences (t-test, $p < 0.05$) were observed in fat content (31.62% vs. 25.02%), protein (18.23% vs. 17.70%), and moisture (41.34% vs. 40.06%) between the fortified cheese and the control, respectively. Ash content did not show significant variations ($p > 0.05$). Microbiological analyses confirmed the absence of Salmonella and E. coli within permissible limits; however, the counts of Staphylococcus aureus ($3.9x10^3$ CFU/g) exceeded the established limit. According to the COVENIN 3821 standard ($<1x10^2$ CFU/g). It is concluded that fortification with 0.33%

Spirulina is technologically feasible and improves the nutritional profile of semi-hard cheese, although good manufacturing practices should be optimized to ensure its microbiological safety.
Keywords: *Semi-hard Cheese, Functional Foods, Spirulina (Arthrospira platensis), Food Safety, Physicochemical Characterization.*

Introducción

Dentro de los ingredientes con potencial funcional, la microalga *Spirulina* (*Arthrospira platensis*) ha despertado un gran interés. Según Spínola, Mendes y Prates [1], la *Spirulina* se destaca por su elevado contenido proteico, que representa entre el 50 y 70 % de su peso en seco, lo que le permite competir con fuentes tradicionales de proteína como la soja o el huevo. Esta característica, junto con su perfil de aminoácidos esenciales, la convierte en una alternativa viable para combatir las deficiencias nutricionales. Adicionalmente, contiene una amplia gama de nutrientes bioactivos como vitaminas (complejo B, E y K), minerales (hierro, calcio, magnesio), ácidos grasos esenciales (como el ácido gamma-linolénico), ficobiliproteínas (como la ficocianina, un potente antioxidante) y polisacáridos [1, 2]. Izaguirre, Molina, Figueroa, Ramos y Torres [2] afirman que "la *Spirulina* contiene cerca del 95% de los nutrientes considerados indispensables para la nutrición humana", lo que la posiciona como un alimento ideal para la fortificación.

La producción de *Spirulina* es también destacable por su sostenibilidad. Se cultiva en sistemas de bajo consumo hídrico y alta eficiencia fotosintética, evitando la competencia con cultivos agrícolas convencionales y teniendo un bajo impacto ambiental. Esto la convierte en un recurso ideal para la formulación de alimentos funcionales en un contexto global que demanda sistemas alimentarios más sostenibles [2].

La fortificación de productos lácteos con microalgas, particularmente con *Spirulina platensis* y *Spirulina maxima*, ha sido ampliamente justificada en la literatura científica por sus múltiples beneficios nutricionales, tecnológicos y sensoriales [3]. Estudios previos [4] y [5] demuestran que la adición de *Spirulina* a diferentes tipos de queso, incluyendo queso Ricotta, queso procesado y queso de pasta blanda, incrementa significativamente el contenido de proteínas, minerales totales (cenizas), fibra, compuestos fenólicos, β-caroteno y capacidad antioxidante, en comparación con los quesos control sin fortificar. Desde el punto de vista tecnológico, la incorporación de *Spirulina* mejora las propiedades texturales del queso, reduciendo la separación de grasa y la capacidad de fusión, al tiempo que retrasa la aparición de mohos y levaduras durante el almacenamiento, lo que contribuye a extender su vida útil [4]. Además, la viabilidad sensorial de estos productos ha sido confirmada en concentraciones óptimas de adición (0,25% - 3%), logrando una aceptabilidad comparable o incluso superior a la del queso convencional, especialmente cuando se optimiza la formulación para maximizar el contenido de hierro y la actividad antioxidante [6]. En conjunto, estas investigaciones justifican el empleo del queso como matriz alimentaria ideal para la fortificación con *Spirulina*, permitiendo el desarrollo de productos funcionales innovadores con alto valor nutricional, estabilidad mejorada y buena aceptación por parte del consumidor, lo que resulta particularmente relevante en contextos de déficit nutricional y búsqueda de alimentos sostenibles [6].

A partir de lo antes mencionado, el presente estudio propone caracterizar un queso semiduro fortificado con *Spirulina* (*Arthrospira platensis*), a través de análisis sensoriales, fisicoquímicos y microbiológicos, se busca determinar la viabilidad tecnológica de la fortificación, evaluar la calidad e inocuidad del nuevo producto y medir su aceptabilidad por parte del consumidor, sentando las bases para el desarrollo de un alimento funcional innovador y contextualizado a la realidad venezolana.

Metodología

Para el desarrollo de esta investigación, se empleó un diseño experimental completamente al azar. La unidad experimental de esta investigación, estuvo representada por el queso fortificado con *Spirulina* con tres concentraciones 0,33%; 0,66% y 1 %, al cual se le aplicaron análisis sensoriales, fisicoquímicos y microbiológicos por quintuplicado, para medir el efecto de las variables independientes (causa - concentraciones de *Spirulina*) sobre las variables dependientes (efecto - calidad fisicoquímica). En la caracterización se empleó un queso control (sin fortificación) como elemento de comparación.

Para la recolección de información, se utilizó la observación directa [7] y como instrumento de recolección de datos se diseñó un cuestionario para recoger datos de parámetros sensoriales con la finalidad de determinar el tratamiento ideal para realizar posteriormente la caracterización fisicoquímica, a través de análisis de laboratorio estandarizados.

Se hizo un análisis estadístico, mediante la aplicación de la prueba Kruskal Wallis de variables no paramétricas, en el análisis sensorial y una prueba *t-student* a las variables analizadas en la caracterización del queso fortificado con *Spirulina*.

Fortificación de Spirulina en los quesos

Se realizaron cuatro (4) tratamientos como se describe en la Tabla 1, de acuerdo al porcentaje de adición de *Spirulina* en el queso evaluado.

Tabla 1. Dosis de fortificación de *Spirulina (Arthrospira platensis)*

Tratamiento	Dosis de *Spirulina (Arthrospira platensis)* aplicada en el queso
A	0,33
B	0,66
C	1,0
D	0,0

Las dosis de cada tratamiento se realizaron en la fase de cuajado cuando se formuló el queso en estudio. Las pruebas de laboratorio se realizaron considerando cinco (5) réplicas por experimento.

Análisis sensoriales de los quesos fortificados

Para el análisis sensorial de los quesos fortificados con *Spirulina*, se utilizó un panel entrenado compuesto por diez (10) personas, en el cual se determinaron las siguientes características: aspecto, olor, sabor y textura, con respecto a los tres quesos fortificados que se elaboraron, con diferentes concentraciones de *Spirulina* (*Arthrospira platensis*), como sigue: queso A presentó 0,33% de *Spirulina*, el queso B 0,66% y por último el queso C 1% de *Spirulina*. Se aplicó una escala hedónica de cinco (5) niveles para esta prueba (1= muy malo, 2= malo, 3= regular, 4= bueno y 5= muy bueno).

Análisis fisicoquímicos de los quesos fortificados con Spirulina

Se practicó el análisis proximal de Weende, debido a que éste se relaciona estrechamente con la determinación de parámetros fisicoquímicos de los alimentos, y ofrece información sobre los componentes básicos que definen las características nutricionales y funcionales de los alimentos [8].

El porcentaje de humedad de los quesos fortificados con *Spirulina* se determinó utilizando el método de peso constante, el cual se basó en un procedimiento de deshidratación, en el cual se eliminó el agua contenida en la muestra y se midió la diferencia de peso antes y después del secado [9]. Se seleccionó una muestra representativa del alimento, se pesó con precisión la muestra inicial y se colocó en un horno de secado a una temperatura constante, entre 100°C y 105°C, durante un período de tiempo determinado, para eliminar toda el agua libre presente en la muestra, sin descomponer otros componentes. Después de la fase de secado, la muestra se retiró del horno y se dejó enfriar en un desecador para evitar la absorción de humedad ambiental. Posteriormente, se pesó la muestra ya seca, y la cantidad de agua presente en la muestra se determinó por la diferencia de peso entre la muestra antes y después del secado.

Para estimar el porcentaje de proteína cruda se utilizó el método de Kjedahl, un procedimiento ampliamente utilizado para determinar el contenido de nitrógeno total en una muestra, el cual se utiliza para calcular el contenido de proteína cruda en alimentos y otros materiales biológicos [10]. La muestra de queso se mezcló con ácido sulfúrico concentrado en presencia de un catalizador, esta mezcla se calentó para

descomponer las moléculas orgánicas, liberando nitrógeno en forma de amoníaco, que se convierte en sulfato de amonio en el medio ácido. Después de la digestión, el analíto se enfrió y se diluyó con agua. Luego, se neutralizó con una base fuerte, lo que liberó el amoníaco en forma gaseosa y el amoníaco liberado se destiló y se recogió en una solución de ácido bórico. Luego en la valoración, el nitrógeno capturado en la solución receptora se tituló con una solución estándar de ácido. A partir del volumen de ácido necesario para neutralizar el amoníaco, se calculó el contenido de nitrógeno. Dado que las proteínas contienen aproximadamente un 16% de nitrógeno, el contenido de nitrógeno se multiplicó por un factor de conversión (generalmente 6,25) para estimar el contenido de proteína cruda.

La determinación de la grasa se consiguió por el método de Röse-Gottlieb, que es un procedimiento gravimétrico ampliamente utilizado para determinar el contenido de grasa en alimentos, especialmente en productos lácteos [11]. Se tomó una cantidad precisa de la muestra de alimento y se pesó cuidadosamente, luego se añadió una cantidad específica de amoníaco concentrado para disolver las proteínas presentes en la muestra, se incorporó etanol como solvente para facilitar la extracción de grasas, luego se usó éter dietílico y éter de petróleo para extraer las grasas de la solución acuosa. La mezcla se agitó vigorosamente y se centrifugó o se dejó reposar para separar las capas, la grasa se disolvió en los solventes orgánicos, formando una capa separada. Por último, los solventes se evaporaron mediante calentamiento controlado o en un baño de agua para eliminar todo el éter, y el residuo graso restante se secó a una temperatura controlada y luego se pesó con precisión.

Finalmente, el análisis del contenido de cenizas en los quesos, se llevó a cabo utilizando el método de incineración, con el objetivo de identificar la fase inorgánica del producto. Para ello, la muestra fue introducida a un horno dentro de un crisol de porcelana con una temperatura de 600 °C durante dos horas, al finalizar este período se pesó la muestra y se calculó el porcentaje de cenizas, dividiendo la pérdida de peso de la muestra por el peso inicial de la misma [11].

Análisis estadísticos de los datos fisicoquímicos

Se utilizó la prueba t de student, una herramienta estadística que consiste en comparar, teniendo en cuenta la dispersión de los datos, la media observada en la muestra con la esperada bajo la hipótesis nula. Si el p-valor asociado al estadístico de contraste es mayor que α se asumirá la hipótesis nula, lo que significará que la muestra pertenece a la población [12].

Para el queso semiduro fortificado con *Spirulina* (*Arthrospira platensis*) y el queso semiduro sin fortificar, se compararon los siguientes parámetros: humedad, fibra, proteína, ceniza y grasa con la finalidad de establecer si hubo alguna modificación en la calidad nutricional del queso.

Análisis microbiológicos del queso fortificado con *Spirulina*

Para determinar la calidad microbiológica del queso fortificado con *Spirulina* y el queso sin fortificar, se emplearon las siguientes determinaciones:

Escherichia coli (COVENIN 1104): Para ello, se pesó una cantidad específica de la muestra de queso bajo condiciones estériles, luego se diluyó en un volumen adecuado de un diluyente estéril, como solución salina peptonada al 0,1 %, la mezcla se homogenizó en un agitador para asegurar una distribución uniforme de los microorganismos. Luego, el homogenizado se incubó en caldo lactosado a 35–37 °C durante 24 horas, lo cual permitió recuperar posibles células de *E. coli* que pudieran estar debilitadas. Se transfirió una alícuota del caldo lactosado a un medio selectivo líquido, como el caldo *Escherichia coli* o caldo verde brillante, que favoreció el crecimiento de coliformes y *E. coli* mientras inhibe otros microorganismos. Se incubó a 44,5 °C durante 24–48 horas, para favorecer el crecimiento de *E. coli* termotolerante. Del medio enriquecido, se sembró en placas con medios diferenciales y selectivos, como: Agar EMB (Eosina Azul de Metileno) donde las colonias de *E. coli* típicamente tienen un brillo metálico verdoso, y Agar MacConkey donde las colonias de *E. coli* fermentan lactosa y producen colonias de color rosado. Las placas se incubaron a 35–37 °C durante

24 horas y las colonias sospechosas se sometieron a pruebas bioquímicas adicionales para confirmar que pertenecen a *E. coli* [13].

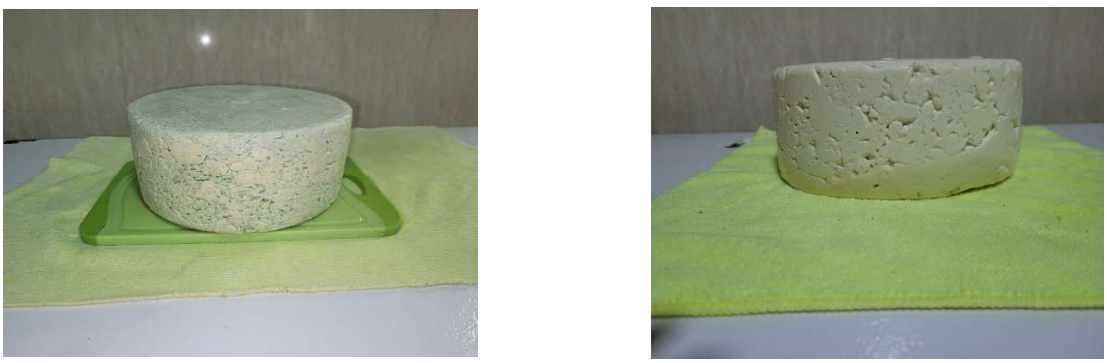
Salmonella spp. (COVENIN 1291): Para preparación inicial de la muestra, se tomó una muestra de 25 gramos de queso, y se mezcló con 225 mL de agua peptonada tamponada estéril y luego la mezcla se homogenizó cuidadosamente para dispersar de manera uniforme los microorganismos presentes. En el enriquecimiento selectivo primero una porción del pre-enriquecimiento se transfirió a medios selectivos líquidos, como: Caldo selenito-cistina donde la muestra se incubó a 37 °C durante 18 a 24 horas y Caldo tetrationato con incubación a 42 °C durante el mismo período. Estos medios están formulados para estimular el crecimiento de *Salmonella* mientras inhiben otros microorganismos. Luego se realizó la siembra en medios sólidos, donde del cultivo selectivo enriquecido, se tomaron alícuotas y se sembraron en medios sólidos diferenciales y selectivos como: Agar XLD (Xilosa Lisina Desoxicolato) en el que las colonias de *Salmonella* suelen ser negras por la producción de sulfuro de hidrógeno, Agar SS (*Salmonella-Shigella*) donde las colonias típicas aparecen incoloras o negras con centros oscuros y el Agar Hektoen en el que las colonias sospechosas son verdes con puntos negros. Las placas se incubaron a 37 °C durante 24 a 48 horas para permitir el crecimiento de *Salmonella*. Por último, se practicaron las pruebas confirmatorias, donde las colonias sospechosas obtenidas se sometieron a análisis adicionales para confirmar la presencia de *Salmonella*, tales como: TSI (Triple Sugar Iron) y LIA (Lisina Hierro Agar) [14].

Staphylococcus aureus (COVENIN 1292): Se pesó una cantidad representativa de la muestra, generalmente entre 10 y 25 gramos de queso. La muestra se homogenizó en un diluyente estéril en una proporción 1:9, se realizaron diluciones seriadas decimales cuando fue necesario, una porción de la muestra o sus diluciones se sembró en Agar Baird-Parker, un medio específico para el aislamiento de *Staphylococcus aureus*, este medio contiene telurito de potasio y yema de huevo, que inhiben otros microorganismos y permiten observar características típicas de *S. aureus*. Las placas se incubaron a 35–37 °C durante 24 a 48 horas y las colonias típicas de *S. aureus* en Agar Baird-Parker se observaron de color negro o grisáceo con un halo claro (debido a la actividad lipolítica sobre la yema de huevo), brillantes y convexas. Las colonias sospechosas se sometieron a las siguientes pruebas para confirmar la presencia de *S. aureus*: coagulasa, catalasa y fermentación del manitol [15].

Resultados y Discusión

El queso con *Spirulina* presentó características que coinciden con lo señalado por Ismail *et al.* [16] de color verde-azul-blanco característico, textura semidura y ligeramente elástica, y un sabor fresco con notas *umami*, saladas y un ligero amargor que complementa la acidez del queso.

La Figura 1 muestra fotografías de los quesos elaborados, tanto el tratamiento control como el fortificado son *Spirulina*.



A **B**

Figura 1. Fotografías de los quesos elaborados. A: Queso semiduro sin fortificar B: Queso semiduro fortificado con Spirulina al 0,33%.

Grado de aceptación del queso semiduro fortificado con *Spirulina*

En la Tabla 2 se pueden observar los resultados de la prueba de media en las variables correspondientes al análisis sensorial. En la variable apariencia se pudo observar que el tratamiento 1 es significativamente diferente y los tratamientos 2 y 3, son similares. Para la variable olor se encontró que el tratamiento 1 es significativamente diferente con respecto a los tratamientos 3 y 2, los cuales si guardan similitud. Por su lado, para la variable textura el tratamiento 1 es similar al tratamiento 2 pero no al tratamiento 3 y el tratamiento 3 es similar al tratamiento 2 y difiere con el tratamiento 1. Por último, la variable sabor el tratamiento 1 es significativamente diferente a los tratamientos 2 y 3. De esta manera, se determinó que el tratamiento 1, es decir, el queso fortificado con 0,33% de *Spirulina*, fue el que obtuvo mayores valores de aceptación por parte del panel, en todas las características evaluadas como apariencia, olor, textura y sabor.

Tabla 2. Prueba de media de las variables sensoriales

Tratamiento		Rangos			
		Apariencia	Olor	Textura	Sabor
1	0,33 %	24,30 B	23,60 B	21,50 B	24,35 B
2	0,66 %	13,50 A	13,70 A	14,75 AB	13,35 A
3	1 %	8,70 A	9,20 A	10,25 A	8,80 A

La Tabla 3 presenta los resultados obtenidos de los análisis del queso fortificado con *Spirulina* (0,33%) seleccionado de la prueba sensorial frente al queso control sin fortificar, mientras que la Tabla 4 muestra los análisis estadísticos de estos parámetros.

Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos y nutricionales del queso fortificado con Spirulina

Parámetros analizados	Queso semiduro sin fortificar (control)					Queso semiduro fortificado (0,33% *Spirulina*)				
	QA1	QA2	QA3	QA4	QA5	QB1	QB2	QB3	QB4	QB5
Fibra (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Grasa (%)	24,69	24,56	22,36	28,34	25,13	28,57	31,78	31,60	32,46	33,69
Proteína (%)	17,25	17,78	17,50	18,00	17,98	18,47	18,12	18,13	18,16	18,25
Humedad (%)	39,56	40,23	40,17	41,22	39,13	41,74	41,78	41,36	41,00	40,80
Ceniza (%)	2,95	3,22	3,56	2,92	2,98	3,95	2,57	4,13	3,95	3,93

Tabla 4 Análisis estadísticos de los parámetros fisicoquímicos

Variable	Prueba *t*	*p*-valor
Grasa	5,16	0,0009
Proteína	3,31	0,0107
Humedad	3,17	0,0131
Ceniza	1,87	0,0989

El análisis estadístico reveló diferencias significativas ($p < 0,05$) en el contenido de grasa, proteína y humedad entre el queso fortificado y el control. El queso con *Spirulina* presentó un incremento notable en el contenido graso (31,62 % vs. 25,02 %) y proteico (18,23 % vs. 17,70 %), así como una mayor retención de humedad (41,34 % vs. 40,06 %). Estos hallazgos son consistentes con la literatura. Ismail *et al.*, [16] reportaron que la adición de *Spirulina* en queso Ricotta mejoró la retención de humedad y modificó el perfil de textura. El aumento de proteína se atribuye directamente al alto contenido proteico de la microalga añadida. El incremento en el porcentaje de grasa, aunque contra intuitivo dado el bajo contenido graso de la *Spirulina*, podría explicarse por una interacción de la matriz alimentaria que facilita una mejor extracción de la grasa láctea durante el análisis, o bien, a una variabilidad en la materia prima láctea utilizada en las diferentes réplicas.

El contenido de cenizas, que representa la fracción mineral, no mostró diferencias significativas ($p > 0,05$), aunque se observó un valor promedio ligeramente superior en el queso fortificado (3,71 % vs. 3,13 %). Esto sugiere que, si bien la *Spirulina* es rica en minerales, la cantidad añadida (0,33 %) no fue suficiente para modificar estadísticamente este parámetro, o que la variabilidad natural del contenido mineral de la leche pudo haber influido.

Comparativamente, Salazar [17] obtuvo para un queso fresco fortificado con un 1% de *Spirulina* valores de humedad (71,6 %) y proteína (17,90 %) que, si bien son de una magnitud diferente por el tipo de queso (fresco vs. semiduro), muestran la misma tendencia al aumento proteico. Su valor de cenizas (3,84 %) fue muy similar al obtenido en el presente estudio para el queso fortificado, reforzando un leve aporte mineral.

Calidad microbiológica del queso fortificado

En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos del análisis microbiológico del queso semiduro sin fortificar (control) y del queso fortificado con *Spirulina* (*Arthrospira platensis*).

Tabla 4. Análisis microbiológicos del queso fortificado con Spirulina

Parámetros	Métodos	Queso A	Queso B	Límites permisibles
E. coli, NMP/g	COVENIN 1104	93,0	93,0	93,0
Salmonella spp., ufc/25g	COVENIN 1291	Ausente	Ausente	Ausencia en 25 g de muestra.
Staphylococcus aureus, ufc/g	COVENIN 1292	$4,0x10^3$	$3,8x10^3$	$1x10^2$

*Valores promedios de cinco réplicas

Los resultados indicaron que tanto el queso control como el fortificado cumplieron con la normativa para *E. coli* y *Salmonella* spp., confirmando la ausencia de estos patógenos. Sin embargo, se detectó un incumplimiento crítico para *Staphylococcus aureus*. Los recuentos obtenidos ($4,0x10^3$ y $3,8x10^3$ UFC/g) superaron ampliamente el límite máximo permitido de $1,0x10^2$ UFC/g establecido por la norma COVENIN 3821 [18] para queso pasteurizado.

La presencia de *S. aureus* en estos niveles es un indicador de deficiencias en las buenas prácticas de manufactura (BPM), muy posiblemente asociadas a una contaminación post-pasteurización. Dado que la leche de partida fue pasteurizada, la contaminación pudo haber ocurrido durante la manipulación de la cuajada, el hilado, el salado (incluyendo la incorporación de la *Spirulina*, si no se aseguró su inocuidad), o el moldeado. El hecho de que el queso control también presente recuentos altos sugiere que la contaminación no es inherente a la *Spirulina*, sino al proceso de elaboración en sí mismo. En la Tabla 4 se observó que los recuentos de *Escherichia coli* en los quesos A y B se encontraron dentro del límite establecido por la norma correspondiente. En relación con *Salmonella*, no se detectó presencia en ninguna de las muestras analizadas.

Conclusiones

La fortificación de queso semiduro con *Arthrospira platensis* (*Spirulina*) es tecnológicamente viable, siendo la concentración de 0,33 % la que presentó la mayor aceptación sensorial en términos de apariencia, olor, textura y sabor, según la evaluación de un panel entrenado.

La incorporación de *Spirulina* al 0,33 % modificó significativamente la composición fisicoquímica del queso, incrementando el contenido de proteína (18,23 % vs. 17,70 %), grasa (31,62 % vs. 25,02 %) y humedad (41,34 % vs. 40,06 %) en comparación con el queso control. El contenido de cenizas no presentó variaciones significativas, lo que sugiere que la fracción mineral del producto permanece estable bajo las condiciones de fortificación evaluadas.

Los análisis microbiológicos revelaron el cumplimiento de los parámetros normativos para *Escherichia coli* y *Salmonella* spp.; no obstante, se detectaron recuentos de *Staphylococcus aureus* ($3{,}9 \times 10^3$ UFC/g) que superaron el límite máximo permisible establecido en la norma COVENIN 3821 ($<1{,}0 \times 10^2$ UFC/g). Este hallazgo evidencia deficiencias en las buenas prácticas de manufactura durante el proceso de elaboración, independientes de la adición de la microalga.

Referencias bibliográficas

[1] M. Spínola, A. Mendes, y J. Prates, "Chemical Composition, Bioactivities, and Applications of *Spirulina* (*Limnospira platensis*) in Food, Feed, and Medicine," *Foods*, vol. 13, no. 22, p. 3656, 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.mdpi.com/2304-8158/13/22/3656

[2] M. E. Izaguirre Pérez, L. D. Molina Noyola, A. P. Figueroa, M. L. Ramos Ibarra, y P. Torres Bugarin, "La e*Spirulina* como superalimento: Usos y beneficios," *Revista @Limentech: Ciencia y Tecnología Alimentaria*, vol. 10, no. 2, pp. 85–102, 2022. [En línea]. Disponible en: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10046920

[3] H. El Troudi, "Quesos tradicionales venezolanos: Características y contexto," haimaneltroudi.com, 4 mar. 2026. [En línea]. Disponible en: https://haimaneltroudi.com/los-quesos-tradicionales-venezolanos-ofrecen-sabores-unicos/

[4] C. Aarati Sarjerao y Y. Shalini, "Greening the Cheese Spread: Examining Arthrospira (*Spirulina*) platensis and Whey Powder Integration in Cheese Spread for Improved Quality and Health Benefits," *SSRN*, 2024. [En línea]. Disponible en: http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4783313

[5] M. M. Tohamy, H. A. Shaaban, M. A. Ali y A. M. Hasanin, "Effect of *Spirulina platensis* as nutrition source on the chemical, rheological and sensory properties of spreadable processed cheese," *Journal of Biological Science*, vol. 19, no. 1, pp. 84-91, 2018. [En línea]. Disponible en: DOI:10.3923/jbs.2019.84.91

[6] I. Podgórska-Kryszczuk, "*Spirulina*-An Invaluable Source of Macro- and Micronutrients with Broad Biological Activity and Application Potential," *Molecules*, vol. 15, no. 29, p. 5387, 2024. [En línea]. Disponible en: doi:10.3390/molecules29225387

[7] R. Hernández, C. Fernández, y P. Baptista, *Metodología de la investigación*, 6ª ed. México D.F.: McGraw-Hill, 2014.

[8] P. J. Soest, *Nutritional ecology of the ruminant*, 2ª ed. Ithaca, NY: Cornell University Press, 1994.

[9] AOAC International, *Official methods of analysis*, 17ª ed. Gaithersburg, MD: Association of Official Analytical Chemists, 2000.

[10] AOAC International, *Official methods of analysis*, 21ª ed. Gaithersburg, MD: Association of Official Analytical Chemists, 2019.

[11] R. S. Kirk y R. Sawyer, *Pearson's composition and analysis of foods*, 9ª ed. Harlow, UK: Longman Scientific & Technical, 1991.

[12] F. Olea Serrano, *Técnicas estadísticas aplicadas en nutrición y salud*. Granada, España: Universidad de Granada, 2016. [En línea]. Disponible en: https://www.ugr.es/~fmocan/MATERIALES%20DOCTORADO/testt2016.pdf

[13] FONDONORMA, "Determinación de coliformes fecales y *Escherichia coli* en alimentos," Norma Venezolana COVENIN 1104:1996, Caracas, Venezuela: Fondonorma, 1996.

[14] FONDONORMA, "Métodos para la determinación de *Salmonella* en alimentos," Norma Venezolana COVENIN 1291:2004, Caracas, Venezuela: Fondonorma, 2004.

[15] FONDONORMA, "Aislamiento e identificación de *Staphylococcus aureus* en alimentos," Norma Venezolana COVENIN 1292:2004, Caracas, Venezuela: Fondonorma, 2004.

[16] H. A. Ismail, T. H. El-Sawah, M. Ayyash, B. Adhikari, y W. F. Elkot, "Functionalization of ricotta cheese with powder of *Spirulina platensis*: physicochemical, sensory, and microbiological properties," *International Journal of Food Properties*, vol. 26, no. 1, pp. 1968-1983, 2023. [En línea]. Disponible en: DOI :10.1080/10942912.2023.2238916

[17] E. L. Salazar Vega, "Elaboración de queso fresco con adición de e*Spirulina* (Arthospira platensis) como alimento funcional," Tesis de Grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2023. [En línea]. Disponible en: https://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/18791

[18] FONDONORMA, "Queso blanco," Norma Venezolana COVENIN 3281:2003, Caracas, Venezuela: Fondonorma, 2003.

La **Revista Tecnocientífica URU**, Año 2025, Número 29, correspondiente al período julio-diciembre, fue editada y publicada en formato digital por el Fondo Editorial de la Universidad Rafael Urdaneta el 10 de diciembre de 2025 en Maracaibo, Venezuela. Esta edición se encuentra disponible en acceso abierto (Open Access) a través del portal institucional de revistas científicas de la URU (https://revistas.fondoeditorial.uru.edu/) bajo los registros internacionales ISSN 2343-6360 e ISSN-L 2343-6360.