

Revista **MINERVA**



**UNIVERSIDAD DE
EL SALVADOR**

Secretaría de Investigaciones
Científicas

REVISTA MINERVA

Revista Científica Multidisciplinaria

Volumen 7, Número 3

Enero - junio 2024

ISSN 2521-8794

<https://minerva.sic.ues.edu.sv>

Universidad de El Salvador

Secretaría de Investigaciones Científicas. Final Avenida Héroes y Mártires del 30 de Julio de 1975, Ciudad Universitaria "Dr. Fabio Castillo Figueroa", San Salvador, El Salvador.

Correo electrónico:

revista.minerva@ues.edu.sv

Periodicidad:

Se publica semestralmente, con dos números anuales correspondientes a los períodos enero-junio y julio-diciembre.

Objetivo:

Difundir investigaciones inéditas y originales, de calidad científica, elaboradas por los miembros de la comunidad académica y profesional nacional e internacional.

Alcance:

Revista Minerva cumple con los principios de acceso abierto. Publica artículos científicos de las diferentes áreas del conocimiento entre ellas la Física, la Química, la Biología, las Matemáticas, Ciencias Ambientales, Ciencias Sociales, Ciencias Humanísticas, Medicina, Ingeniería, entre otras. La revista acepta artículos de investigación, revisión y reflexión en español.

ACLARATORIA

LAS IDEAS Y OPINIONES CONTENIDAS EN LOS TRABAJOS Y ARTÍCULOS SON DE RESPONSABILIDAD EXCLUSIVA DE LOS AUTORES Y NO EXPRESAN NECESARIAMENTE EL PUNTO DE VISTA DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.



MINERVA es una revista con licencia creative commons 4.0 CC BY: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

Ing. Agr. M.Sc. Juan Rosa Quintanilla Quintanilla
Rector

Dra. Evelyn Beatriz Farfan Mata
Vicerrectora Académica

M.Sc. Roger Armando Arias Alvarado
Vicerrector Administrativo

Lic. Pedro Rosalío Escobar Castaneda
Secretario General

Lic. Carlos Amilcar Serrano Rivera
Fiscal General

M.Sc. Carlos Armando Villalta
Presidente Asamblea General Universitaria (AGU)

Ing. Agr. M.Sc. José Miguel Sermeño Chicas
Secretario de Investigaciones Científicas; Director Ejecutivo del Consejo de Investigaciones Científicas

COMITÉ TÉCNICO

Director Editor

Isidro Galileo Romero
isidro.romero@ues.edu.sv

Correctores de Estilo

Cristina Isabel Guzmán Cruz
cristina.guzman@ues.edu.sv

Selvin Mauricio Montano Quintanilla
selvin.montano@ues.edu.sv

Edición Adjunta y Maquetación

Ever Martínez
ever.martinez@ues.edu.sv

Saul Antonio Vega
saul.vega@ues.edu.sv

Soporte Técnico

Saul Antonio Vega
saul.vega@ues.edu.sv

COMITÉ CIENTÍFICO

Brenda Iliana Gallegos

Docente de Educación Alimentaria y Nutricional, Facultad de Medicina, Universidad de El Salvador

Rudis Yilmar Flores

Docente Investigador, Facultad Multidisciplinaria Oriental, Universidad de El Salvador

Dagoberto Pérez

Docente de Cultivos Anuales, Departamento de Ciencias Agronómicas, Facultad Multidisciplinaria Paracentral, Universidad de El Salvador

David A. Hernández

Coordinador Becas de Posgrado, Universidad de El Salvador

Evelin P. Gutiérrez de Doradea

Investigadora, Unidad de Investigación, Facultad de Jurisprudencia y Ciencias Sociales, Universidad de El Salvador

José Roberto Ramos López

Docente, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de El Salvador

Andrea L. Joyce

Assistant Professor, University of California, Merced, Estados Unidos

José Rutilio Quezada

Consultor Internacional. Manejo Integrado de Plagas y Control Biológico, Estados Unidos

Ignacio Aisur Agudo Padrón

Gerente Investigador Proyecto "Avulsos Malacológicos - AM", Florianópolis, Santa Catarina / SC, Brasil

Luis A. Mejía

Adjunct Professor, Department of Food Science and Human Nutrition University of Illinois, Urbana-Champaign

Luis Pineda

Técnico en Investigación de Ecosistemas y Biodiversidad, Gerencia de Vida Silvestre, Autoridad Científica en Fauna Silvestre- CITES, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, MARN, El Salvador

Mónica Lara Uc

Profesora Investigadora, Universidad Autónoma de Baja California Sur, México

Mario Ernesto Parada Jaco

Gerente de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA)

Paul Almeida

Professor and Chair of Sociology, University of California, Merced, Estados Unidos

Pedro José Toruño

Profesor, Departamento de Agroecología, Escuela de Ciencia Agraria y Veterinaria, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, León (UNAN-LEÓN)

Randy Atencio Valdespino

Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá

Tania Vianney Gutiérrez Santillán

Estancia Postdoctoral, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León, México

Víctor D. Carmona-Galindo

Professor, Biology Department, Natural Science Division, University of La Verne, La Verne, California, USA

James Iffland

Professor in the Languages department at Boston University

William R. Fowler

Cross College Scholar, Founder and Editor-in-Chief, Ancient Mesoamerica, Associate Professor, Department of Anthropology / Vanderbilt University, Estados Unidos

Carmen Aída Escobar Ramírez

Profesora-Investigadora, Universidad Autónoma de Nuevo León, México

Cirelda Carvajal Rodríguez

Profesor Consultante Facultad de Ciencias Médicas Salvador Allende, Cuba

Montserrat Amoros

Facultad de Investigación de la Universidad Internacional de la Rioja, México

Rafael Bosque Suárez

Centro de Estudios de Educación Ambiental-Gea, Universidad de Ciencias Pedagógicas Enrique José Varona, Cuba

REVISTAS CONSORCIADAS

Revista Iberoamericana Ambiente y Sustentabilidad

Red Iberoamericana de Medio Ambiente (REIMA, A.C.) y Pan American Foundation for International Cooperation for Sustainable Development

ARTÍCULOS CIENTÍFICOS | SCIENTIFIC ARTICLES

Influencia de la relación “agente generador de porosidad versus sol” en la capacidad de adsorción de materiales basados en hidroxiapatita (HAp) para eliminar Cd²⁺ disuelto en agua
Influence of the ratio “porosity-generating agent versus sol” on the adsorption capacity of hydroxyapatite-based materials (HAp) to remove Cd²⁺ dissolved in water

José Galicia-Ayala, José Alfredo-Díaz, Marvin Chávez-Sifontes.....5

Exploración de betalactámicos, tetraciclinas y sulfonamidas en leche fluida ultrapasteurizada en Ciudad de Guatemala

Monitoring of beta-lactams, tetracyclines and sulfonamides in ultra-pasteurized fluid milk in Guatemala City

Laramy Cheyenne Pérez García, Manuel Lepe, Madeleine Stormont.....15

Evaluación de la cultura de la inocuidad alimentaria en la manufacturación y maquila de alimentos listos para el consumo

Assessment of the food safety culture in the manufacturing and processing of ready-to-eat foods

Ana Beatriz Lima de Zaldaña, Iris Esmeralda Villalta de Astorga, Jessica Tatiana Burgos Sierra.....23

Insectos plagas del pino caribe y sus enemigos naturales en la Reserva Forestal La Yeguada, Panamá
Insect pests of Caribbean pine and their natural enemies at the La Yeguada Forest Reserve, Panama

Oswaldo Rodríguez-Flores, Rosa María Estrada-Hernández.....35

Efectividad de *Bacillus subtilis* Cohn (1872) y *Trichoderma harzianum* Rifai (1969) sobre *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Sacc.) Snyder & Hansen, en semillas de tomate (*Solanum lycopersicum* var. CENTA Cuscatlán)

Effectiveness of *Bacillus subtilis* Cohn (1872) and *Trichoderma harzianum* Rifai (1969) on *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Sacc.) Snyder & Hansen, in tomato seeds (*Solanum lycopersicum* var. CENTA CUSCATLÁN)

Moisés Ulises López Torres.....47

Pensamiento complejo: el rizoma para caracterizar a los estudiantes de nutrición

Complex Thinking: The Rhizome to Characterize Nutrition Students

Brenda Iliana Gallegos-López.....67

Factores vinculados a la mortalidad de tilapia (*Oreochromis niloticus*) por estreptococosis causada por contaminación con *Streptococcus agalactiae* en granjas acuícolas del Distrito de Riego de Atiocoyo, El Salvador

Factors associated with the mortality of tilapia (*Oreochromis niloticus*) due to streptococosis produced by *Streptococcus agalactiae* in aquaculture farms in the Atiocoyo Irrigation District, El Salvador

M. Polio-Martínez, C. Buendía, M. Vasquez-Jandres, M. Romero-Rivera, J. Palacios-Valladares, K. Vásquez-Hernández, Y. Perdomo-Ramírez.....81

NOTAS TÉCNICAS | TECHNICAL REPORTS

Factores explicativos del tratamiento mediático de feminicidios en El Salvador

Explanatory elements of the media treatment of femicides in El Salvador

Ivette Rocío Araujo-Velásquez, Luis Enrique Portillo López, Marta Martí-Barrachina.....89

Estudio de cobertura radial para la implementación de una red de sensores con tecnología de radios de largo alcance (LoRa)

Radial coverage study for the implementation of a sensor network with long range radio technology (LoRa)

Ernesto Alonso Arias Argueta, David Isaí Orozco Mejía, Werner David Meléndez Valle.....99

Estudio de calidad del aire presente en el área metropolitana y su estado respecto a los índices centroamericanos

Study of air quality in the metropolitan area and its status with respect to Central American indices in the area of University of El Salvador

Boris Andrés Castillo Rosales, Lyan Donovan Segovia López, Carlos Pocasangre, Omar Otoniel Flores, Fernando Arevalo Navas.....119

Estudio del impacto del tratamiento térmico en los Indicadores de Desempeño Energético (IDE) en edificios municipales

Study of the impact of thermal treatment on Energy Performance Indicators (EPI) in municipal buildings

Gerardo Guerrero, Julio Flores.....129



Revista MINERVA

Plataforma digital de la revista: <https://minerva.sic.ues.edu.sv>

Artículo Científico | Scientific Article

Influencia de la relación “agente generador de porosidad versus sol” en la capacidad de adsorción de materiales basados en hidroxiapatita (HAp) para eliminar Cd^{2+} disuelto en agua

Influence of the ratio “porosity-generating agent versus sol” on the adsorption capacity of hydroxyapatite-based materials (HAp) to remove Cd^{2+} dissolved in water

José Galicia-Ayala¹, José Alfredo-Díaz¹, Marvin Chávez-Sifontes^{1,2}

Correspondencia: marvin.chavez@ues.edu.sv

1 Escuela de Química, Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, Universidad de El Salvador

2 ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8264-291X>

RESUMEN

La contaminación del agua por metales tóxicos es uno de los principales problemas ambientales. La descontaminación se puede realizar por el método de adsorción que tiene ventajas técnicas y económicas para aplicación industrial. En este trabajo se ha investigado la síntesis de materiales basados en hidroxiapatita utilizando residuos de la industria alimentaria como materia prima. También se ha investigado su aplicación como adsorbentes de metales tóxicos disueltos en agua. Los materiales fueron caracterizados mediante isotermas de adsorción de N_2 y DRX, para analizar sus propiedades físicas y químicas. Se comprobó que la relación entre cantidad de agente generador de porosidad y cantidad de sol (Disol. C) influye en las propiedades de los materiales sintetizados (i.e. área superficial, volumen de poro, composición química). Los materiales sintetizados a partir de concha de molusco mostraron buena capacidad de adsorción ($\approx 70\%$), también los materiales sintetizados a partir de cascarón de huevo alcanzaron elevados

DOI: [10.5377/revminerva.v7i3.18902](https://doi.org/10.5377/revminerva.v7i3.18902)

Enviado: 2 de junio de 2023
Aceptado: 6 de junio de 2024

Palabras clave: hidroxiapatita, descontaminación de agua, metales tóxicos, proceso de adsorción.

Keywords: hydroxyapatite, water decontamination, toxic metals, adsorption process.



Este contenido está protegido bajo la licencia CC BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

porcentajes de adsorción ($\approx 95\%$), destacando a cortos tiempos de residencia. A partir de valores de relación cantidad de agente generador de porosidad y cantidad de sol: 0.25-0.50, fueron sintetizados materiales sólidos con las mejores capacidades de adsorción. Se determinó una sinergia entre propiedades físicas y químicas, clave para la eficacia del proceso de adsorción.

ABSTRACT

Water contamination by toxic metals is one of the main environmental problems. Decontamination can be achieved through the adsorption method, which has technical and economic advantages for industrial applications. This work investigates the synthesis of hydroxyapatite-based materials using food industry waste as raw material. The application for example as adsorbents for toxic metals dissolved in water was also studied. To analyze the physical and chemical properties the materials were characterized by N₂ adsorption isotherms and XRD. It was found that the ratio between the amount of porosity-generating agent and the amount of sol (Sol. C) influences the properties of the synthesized materials (i.e. surface area, pore volume, chemical composition). Materials synthesized from mollusk shells showed good adsorption capacity ($\approx 70\%$), and those synthesized from eggshells also achieved high adsorption percentages ($\approx 95\%$), particularly at short residence times. Solid materials with the best adsorption capacities were synthesized from porosity-generating agent to sol ratios of 0.25-0.50. A synergy between physical and chemical properties, crucial for the efficiency of the adsorption process, was determined.

INTRODUCCIÓN

La crisis de contaminación del agua se ha generado debido al desarrollo de la industrialización, la urbanización y la agricultura, sin un respeto a las normativas ambientales. Entre los sectores industriales que destacan por la complejidad de sus procesos podemos mencionar: el farmacéutico, el textil, el petroquímico, el minero y el metalúrgico. Debido al inadecuado o nulo tratamiento de las aguas residuales, estos procesos industriales generan una diversidad de residuos tóxicos que finalizan en los cuerpos de aguas superficiales y aguas subterráneas (da Rocha et al., 2018).

Algunos de los principales contaminantes presentes en el agua son los metales tóxicos, estos tienen una alta densidad; resulta difícil degradarlos mediante procesos biológicos, también muestran un grado significativo de toxicidad hacia los seres humanos incluso en bajas concentraciones. Estos metales incluyen el cadmio, el cobalto, el cobre, el cromo y el plomo, entre otros (Sparks, 2005).

El cadmio es un metal tóxico que en el medio ambiente está estrechamente relacionado con el zinc. Las fuentes naturales que liberan cadmio son los ríos debido a la descomposición de las rocas, los incendios forestales y los volcanes. Las principales fuentes antropogénicas que liberan cadmio son los procesos industriales para la producción de fertilizantes fosfatados y la industria de los pigmentos. El cadmio es fuertemente adsorbido por la materia orgánica del suelo. Esto resulta extremadamente peligroso ya que el cadmio puede incorporarse a las plantas y posteriormente a los animales que se alimentan de ellas. Esto causa un daño potencial debido a la acumulación de cadmio en sus cuerpos (Kubier et al., 2019; Yuan et al., 2019).

La contaminación por cadmio en los seres humanos puede producirse por inhalación, por ingestión de alimentos o agua potable. El cadmio se transporta primero por la sangre hasta el hígado, donde se une a las proteínas formando complejos que se transportan a los riñones donde se acumula causando daños en el mecanismo de filtración. Algunos de los daños son la excreción de proteínas y azúcares esenciales del organismo y el consiguiente daño a los riñones (Sharma et al., 2015).

La descontaminación del agua es una cuestión vital para el medio ambiente. Uno de los procesos para su tratamiento está el de adsorción continua, el cual es objeto de investigación debido a que ha demostrado reducir las cantidades de contaminantes en los efluentes, resultando muy eficaz y también económico en comparación con otros métodos (i.e. membranas para el intercambio de iones, y ósmosis inversa) (Anastopoulos et al., 2019; Demirbas, 2008). En línea con lo anterior, existe gran interés en la preparación de materiales porosos con propiedades fisicoquímicas particulares para ser utilizados como adsorbentes en la eliminación de contaminantes presentes en fase acuosa, o en corrientes gaseosas.

Materiales tipo hidroxifosfato con estructura base hidroxiapatita Ca₁₀(PO₄)₆(OH)₂ (HAp) tienen propiedades fisicoquímicas particulares, así las hidroxiapatitas de calcio (HApCa) han mostrado características adecuadas para ser utilizadas en procesos de adsorción de contaminantes tóxicos en medio acuoso (Ivanets et al., 2019; Szcześ et al., 2017). Las características específicas de la HAp como su baja solubilidad en agua y su elevada estabilidad en condiciones oxidantes y reductoras, hacen que este material sea adecuado como adsorbente en la descontaminación de aguas residuales, eliminando metales tóxicos como, Cd²⁺, As³⁺, Cu²⁺ o Pb²⁺ (Chen et al., 2010).

Se han desarrollado varios métodos para sintetizar HApCa, según métodos químicos húmedos, hidrólisis, irradiación por microondas o métodos hidrotérmicos. Sin embargo, la mayoría de ellos requieren complejos montajes experimentales, autoclaves que implican altas temperaturas, presiones, reactivos costosos y perjudiciales para el medioambiente (i.e. pentóxido de fósforo (V), ácido hexafluorofosfórico, trietilfosfito, etc.) (Fihri et al., 2017; Kumar Nayak, 2010).

Para este trabajo se investigó un procedimiento alternativo basado en el método sol-gel para la síntesis de HApCa, y para ello, se utilizaron residuos de la industria alimentaria (i.e. concha de molusco y cascarón de huevo) como fuente de CaCO_3 , y ácido fosfórico como precursor de iones fosfato. Se propone también el empleo de albumina de huevo como agente generador de porosidad. Se pretende con este nuevo procedimiento y el uso de materias primas alternativas reduce costos, y riesgos ante la manipulación de sustancias elevadamente tóxicas.

Los materiales sintetizados fueron caracterizados por distintas técnicas de análisis y se muestran con detalle en (Galicia Ayala et al., 2022). En este trabajo se presentan resultados del análisis de datos obtenidos a partir de isotermas de adsorción de N_2 , y de análisis de difracción de rayos X. Se calcularon propiedades morfológicas (área superficial, volumen de poro), composición porcentual relativa de las principales fases. Con los resultados se pudo correlacionar una serie de características y propiedades de los materiales tipo hidroxiapatita respecto a su capacidad de adsorción de Cd^{2+} presente en disoluciones acuosas, los resultados fueron prometedores y abren la puerta para el desarrollo de investigaciones orientadas a la aplicación de estos materiales en descontaminación de corrientes de agua residuales de origen urbano o industrial.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Reactivos

En este trabajo se utilizaron reactivos químicos de diversos proveedores (i.e. JT Baker, Fluka, HACH, Merck), estos se utilizaron directamente del frasco sin previo tratamiento o purificaciones, HNO_3 (70 % grado reactivo ACS), H_3PO_4 (85 % grado reactivo ACS), $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (99.9 % grado analítico), $\text{CdSO}_4\cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (99.9 % grado analítico).

Síntesis de materiales basados en hidroxiapatita

Los materiales tipo hidroxiapatita fueron sintetizados con base en el procedimiento experimental

desarrollado por Galicia Ayala J., et al. (Galicia Ayala et al., 2022), se destacan 4 etapas en este proceso.

1. Preparación de materias primas: el cascarón de huevo y concha de molusco fueron lavados con agua y disolución de peróxido de hidrógeno para eliminar material orgánico presente. Después fueron secados en estufa. Finalmente, el cascarón de huevo y concha de molusco fueron triturados y tamizados.
2. Preparación de disoluciones precursoras: (Disol. A), se disolvieron los polvos finos de cascarón de huevo o concha de molusco en ácido nítrico hasta obtener una disolución de nitrato de calcio de concentración ≈ 1.2 M. (Disol. B), se preparó una disolución acuosa de ácido fosfórico ≈ 0.9 M.
3. Preparación del "sol": la Disol. C fue obtenida por combinación de la Disol. A con la Disol. B, la mezcla se mantuvo en agitación, después fue envejecida en un horno para obtener un "sol".
4. Preparación de espumas: el "sol" obtenido a partir de la Disol. C fue mezclado con albumina de huevo (como agente generador de porosidad) en diferentes proporciones, por ejemplo: mL albumina de huevo/mL Disol. C, 0/5, 1.25/5, 2.5/5, y 5/5, y mediante agitación vigorosa se generó una espuma. Esta espuma fue secada en microondas, y posteriormente fue calcinada en una mufla.

Caracterización de los materiales basados en hidroxiapatita

Para este trabajo se utilizaron datos obtenidos a partir de las técnicas de análisis como isotermas de adsorción de N_2 , y análisis de difracción de rayos X. Los análisis de difracción de rayos (XRD) fueron realizados en un equipo CUBIX de PANalytical con un detector PANalytical X'Celerator utilizando geometría Bragg-Bretano. Como fuente de radiación de rayos X $\text{CuK}\alpha$, 45 kV y 40 mA como voltaje e intensidad de tubo, respectivamente. La identificación fue realizada por comparación con bases de datos reportadas en referencias, y el análisis de fases, se llevó a cabo mediante el programa X'Pert HighScore Plus v2.1. Las isotermas de adsorción de nitrógeno fueron realizadas con una masa ≈ 300 mg y 0.4-0.8 mm de tamaño de partícula, en un equipo Micromeritics ASAP-2040. Las propiedades texturales fueron determinadas a partir de los datos de isoterma adsorción/desorción, el área superficial fue calculada utilizando la ecuación BET en el rango P/P_0 desde 0.1 hasta 0.25, el volumen total de poro (poros menores a 3407 \AA diámetro a $P/P_0 = 0.994$) fue determinado mediante la ecuación de adsorción de punto único.

Para determinar la composición (porcentual o molar) de elementos presentes, las muestras sólidas fueron disgregadas en una mezcla de ácidos minerales, posteriormente aforadas con agua destilada a un volumen requerido. Los análisis fueron realizados mediante espectroscopía de emisión óptica mediante plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES) en un equipo Varian 715-ES.

Experimentos para la adsorción de Cd²⁺ presente en disolución acuosa

Se realizaron una serie de experimentos para investigar la capacidad de adsorción de los materiales sintetizados en función de las distintas relaciones, cantidad de agente generador de porosidad frente a Disol. C (mL/mL): 0/5, 1.25/5, 2.5/5 y 5/5. Para esta etapa se estudiaron dos parámetros: a) el efecto de la concentración inicial de Cd²⁺, y b) el efecto del tiempo de adsorción.

Los sistemas de adsorción se establecieron mezclando 0.1 g de sólido tipo hidroxiapatita y 35 mL de solución acuosa de Cd²⁺ a diferentes concentraciones iniciales (150 ppm, 200 ppm, y 250 ppm), el sistema se mantuvo bajo agitación constante (350 rpm) durante diferentes periodos. El sistema fue controlado para mantener la correcta dispersión y suspensión del sólido durante todo el tiempo de experimento. Una vez finalizado el tiempo establecido para cada experimento, se separó la hidroxiapatita mediante filtración, primero se confirmó la presencia de iones Cd²⁺ mediante una prueba cualitativa utilizando una solución de sulfuro de sodio (el color amarillo sugiere la presencia de Cd²⁺ debido a la formación de CdS), la concentración final de Cd²⁺ se cuantificó mediante análisis de absorción atómica. Los resultados de esta etapa se reportan como porcentaje de Cd²⁺ adsorbido (relativo a cada una de las concentraciones iniciales) al final de cada tiempo de residencia.

$$\text{Porcentaje de Cd}^{2+}\text{ adsorbido} = \frac{[\text{Cd}^{2+}]_{\text{inicial}} - [\text{Cd}^{2+}]_{\text{final}}}{[\text{Cd}^{2+}]_{\text{inicial}}} * 100$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades físicas y propiedades químicas de materiales tipo hidroxiapatita sintetizados a partir de carbonato de calcio de cascara de huevo

Por medio de un análisis cualitativo de los difractogramas fue posible apreciar diferencias

relativas a la definición y anchura de picos entre las muestras de hidroxiapatita sintetizada a partir de cascara de huevo. Esto generalmente se relaciona con propiedades como el tamaño de cristal, y a su vez influyen en el área superficial de los materiales sólidos. Aplicando la ecuación de Scherrer y utilizando el programa X'pert Highscore Plus se determinó el tamaño de partícula de las muestras de hidroxiapatita sintetizadas. Se complementó el análisis aplicando isoterma de adsorción de N₂ para calcular área superficial y volumen de poro. En la siguiente tabla se muestran las distintas propiedades físicas para las muestras de hidroxiapatita sintetizada.

En el gráfico de la Figura 1 se muestra como la relación entre cantidad de agente generador de porosidad vs sol (Disol. C, ver parte experimental) afecta las propiedades morfológicas de los materiales sintetizados. Se observa como valores en torno a 0.50 resultarían adecuados para sintetizar materiales con mejores áreas superficiales y tamaños de partícula. Teniendo en cuenta la aplicación como adsorbentes, también se destacan los datos de volumen de poro que fueron obtenidos en estos materiales (ver Tabla 1). La presencia de agente generador de porosidad favorece estas propiedades, pero se debe tener a consideración los valores límite para esta variable.

En la gráfica anterior se observa que la muestra sin agente generador de porosidad reportó menor área superficial que las muestras con agente generador de porosidad. La muestra de material con más alta relación cantidad de agente generador de porosidad versus sol, mostró una reducción significativa en el valor de área superficial respecto a los otros dos materiales con adición de agente; esto puede asociarse al mayor contenido de materia orgánica

Tabla 1

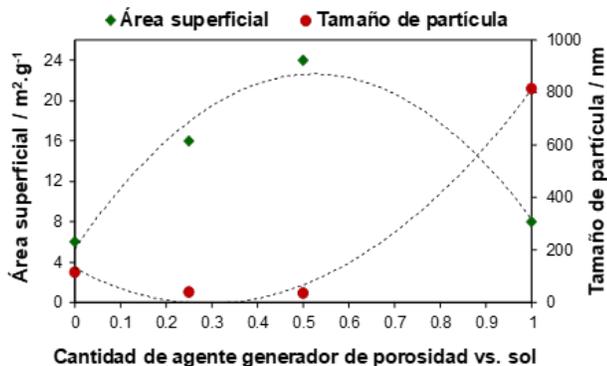
Propiedades morfológicas para las HAp sintetizadas a partir de cascara de huevo. Se comparan en función de la relación cantidad de agente generador de porosidad vs. sol (Disol. C).

Relación agente generador de porosidad vs. sol (mL/mL)	Tamaño de partícula (nm) ^a	Área superficial BET (m ² .g ⁻¹) ^b	Volumen de poro (cm ³ .g ⁻¹) ^b
0.0 (0/5)	116	6	0.09
0.25 (1.25/5)	37	24	0.15
0.5 (2.5/5)	39	16	0.11
1.0 (5/5)	815	8	0.06
HAp comercial	200	9	ND*

Nota. a. Valores calculados utilizando el programa X'pert Highscore Plus y la ecuación de Scherrer, b. Valores calculados a partir de isotermas de adsorción de N₂ y la ecuación BET y la ecuación de punto único, respectivamente. * ND: no determinado.

Figura 1

Efecto de la relación cantidad de agente generador de porosidad vs. Sol (Disol. C) sobre propiedades morfológicas de los materiales sintetizados a partir de cascarón de huevo.



la cual al calcinarse genera mayor temperatura al interior del material favoreciendo de alguna manera la sinterización de las partículas de HAp, lo cual vendría a correlacionar con el elevado tamaño de partícula calculado a partir del difractograma de rayos X y la ecuación de Scherrer (≈ 800 nm).

En la Tabla 2 se muestran los porcentajes relativos para las distintas fases identificadas en los materiales sintetizados. El porcentaje relativo para las distintas fases fue calculado con base en los datos de los difractogramas de rayos X, se tomaron en cuenta los picos de mayor intensidad para cada especie según aragonito $2\theta=26.6^\circ$; calcita $2\theta=29.4^\circ$; β -TCP $2\theta=30.7^\circ$; hidroxiapatita (HAp) $2\theta=31.7^\circ$; y CaO $2\theta=37.9^\circ$ (Galicia Ayala et al., 2022). La presencia de β -TCP ha sido considerada como una posible descomposición de la HAp a la temperatura de calcinación (700°C). Además, el bajo contenido de CaO en las muestras se presenta como una ventaja de cara a una posible bioaplicación de estos materiales pues el CaO reduce la biocompatibilidad de la HAp ya que resulta ser soluble en medio acuoso (Guo et al., 2013; Toibah et al., 2019)

Las propiedades químicas de los materiales sintetizados son importantes para su posible aplicación como adsorbentes, estas propiedades se ven influenciadas debido a la composición de fases. En el gráfico de la Figura 2, se observa que la fase de HAp se presenta como la principal, aunque el porcentaje de HAp es diferente en cada material sintetizado; se determinó que la relación entre cantidad de agente generador de porosidad vs sol influye en la composición de fases. Se puede observar una relación inversamente proporcional entre la fase de HAp versus la fase de CaCO_3 , estas especies

Tabla 2

Composición de fases para los materiales tipo HAp sintetizados a partir de cascarón de huevo, se comparan en función de la relación cantidad agente generador de porosidad vs. sol (Disol. C).

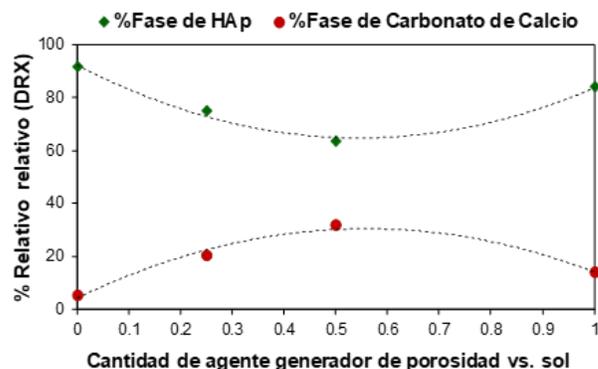
Relación agente generador de porosidad vs. sol (mL/mL)	Porcentaje de fase (%Relativo)			
	Hidroxiapatita HAp	CaCO_3 (Ara + Cal)	$\text{Ca}_2(\text{PO}_4)_2$ β -TCP	CaO
0.0 (0/5)	91.5	5.0	3.0	0.4
0.25 (1.25/5)	74.8	20.2	2.2	2.8
0.5 (2.5/5)	63.4	31.8	2.2	2.6
1.0 (5/5)	83.9	13.8	0.8	1.5

guardan relación como precursor y producto del proceso de síntesis.

Como puede observarse en la gráfica anterior es posible obtener materiales con elevados porcentajes de HAp ($\approx 90\%$) si no se utiliza agente espumante, o bien si se utiliza agente espumante en una relación equivalente a la del sol ($\approx 84\%$), es de tener en cuenta que estos materiales presentan baja área superficial y restringida porosidad (Tabla 1). Mientras que a partir de relaciones agente generador de porosidad vs. sol de 0.25-0.5 se obtuvieron materiales con contenidos de HAp que oscilan entre ≈ 60 -70 %, y mejores propiedades morfológicas. Mediante análisis por ICP se confirmó que a través del control de la cantidad de agente generador de porosidad es posible preparar HAp con similar relación molar de Ca y P, o bien HAp ricas en Ca. Valores Ca/P de 1.1 y 1.7 se obtuvieron para relaciones agente espumante/sol de 0.25 y 1.0, respectivamente.

Figura 2

Efecto de la relación cantidad de agente generador de porosidad vs. sol (Disol. C), sobre el porcentaje de fases de los materiales sintetizados a partir de cascarón de huevo.



Propiedades físicas y propiedades químicas de materiales tipo hidroxiapatita sintetizados a partir de carbonato de calcio de concha de molusco

Las hidroxiapatitas sintetizadas de concha de molusco mostraron características similares a las hidroxiapatitas sintetizadas de cascarón de huevo. En función de la relación entre cantidad de agente generador de porosidad versus sol, se evidenciaron diferencias en la definición de los difractogramas, así como también en la anchura de picos. Para confirmar estas diferencias fue realizado el cálculo del tamaño de cristal utilizando la ecuación de Scherrer y el programa X'pert Highscore Plus. También a partir de los datos de las isotermas de adsorción de N₂ se calcularon valores para área superficial y volumen de poro. Los resultados son presentados en la Tabla 3.

Para La gráfica de la Figura 3 muestra como la relación entre agente generador de porosidad versus sol tiene un efecto sobre el área superficial del material obtenido, la muestra sin agente generador de porosidad mostró menor área superficial que las muestras con adición de agente. Particularmente para la materia prima de concha de molusco se obtuvo un material con mayor área superficial para la relación agente generador de porosidad versus sol 0.5 (2.5/5). Así también la muestra de material con más alta relación mostró una reducción significativa en su área superficial con respecto a los otros dos materiales con adición de agente, lo anterior correlaciona adecuadamente con el elevado tamaño de partícula calculado a partir del difractograma de rayos X y la ecuación de Scherrer, resultados que están en concordancia con los obtenidos para la serie de materiales sintetizados a partir de cascarón

Tabla 3

Propiedades morfológicas para las HAp sintetizadas a partir de concha de molusco. Se comparan en función de la relación cantidad de agente generador de porosidad vs. sol (Disol. C).

Relación agente generador de porosidad vs. sol (mL/mL)	Tamaño de partícula (nm) ^a	Área superficial BET (m ² .g ⁻¹) ^b	Volumen de poro (cm ³ .g ⁻¹) ^b
0.0 (0/5)	101	3	0.06
0.25 (1.25/5)	43	14	0.09
0.5 (2.5/5)	63	17	0.11
1.0 (5/5)	815	5	0.04
HAp comercial	200	9	ND

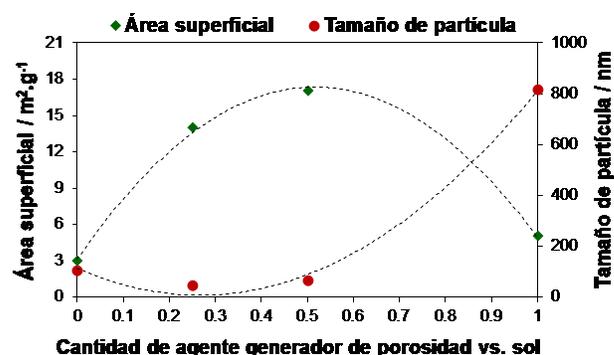
Nota. a. Valores calculados utilizando el programa X'pert Highscore Plus y la ecuación de Scherrer, b. Valores calculados a partir de isotermas de adsorción de N₂ y la ecuación BET y la ecuación de punto único, respectivamente. * ND: no determinado.

de huevo.

En la Figura 3 se observa que la relación entre cantidad de agente generador de porosidad versus sol (Disol. C, ver Parte Experimental) afecta las propiedades morfológicas de los materiales sintetizados. De manera similar a la serie de materiales sintetizados a partir de cascarón de huevo, se observa también que valores entre ≈ 0.40 -0.5 resultaron óptimos para sintetizar materiales con los mejores datos de área superficial y tamaño de partícula. Se puede observar en la Tabla 3 que también estos materiales presentaron los mejores valores de volumen de poro, una propiedad importante teniendo en cuenta el interés de aplicarlos como adsorbentes.

Figura 3

Efecto de la relación cantidad de agente generador de porosidad vs. sol (Disol. C) sobre propiedades morfológicas de los materiales sintetizados a partir de concha de molusco.



Para los materiales sintetizados fueron cuantificadas las fases de las distintas especies basándose en datos de los difractogramas (porcentaje relativo). Se establecieron picos de mayor intensidad como referencia para cada una de las especies según aragonito $2\theta=26.6^\circ$; calcita $2\theta=29.4^\circ$; β -TCP $2\theta=30.7^\circ$; hidroxiapatita (HAp) $2\theta=31.7^\circ$; y CaO $2\theta=37.9^\circ$ (Galicia Ayala et al., 2022). Se identificó la presencia de β -TCP como impureza y se considera debido a descomposición de la HAp a la temperatura de calcinación (700 °C). Se puede considerar que el bajo contenido de CaO en las muestras es una ventaja ya que este compuesto reduce la biocompatibilidad de la HAp pues resulta ser soluble en medio acuoso (Guo et al., 2013; Toibah et al., 2019).

Como se mencionó en párrafos anteriores, es importante prestar atención a las propiedades químicas de los materiales sintetizados en cuanto a su posible aplicación como adsorbentes, estas propiedades se ven influenciadas debido a la

Tabla 4

Propiedades tipo HAp sintetizados a partir de concha de molusco, se compara en función de la relación de cantidad agente generador de porosidad versus sol (Disol. C).

Relación agente generador de porosidad vs. sol (mL/mL)	Porcentaje de fase (%Relativo)			
	Hidroxiapatita HAp	CaCO ₃ (Ara + Cal)	Ca ₃ (PO ₄) ₂ β-TCP	CaO
0.0 (0/5)	95.4	2.3	2.4	0.0
0.25 (1.25/5)	63.0	26.8	6.5	3.6
0.5 (2.5/5)	62.6	31.3	3.7	2.5
1.0 (5/5)	67.4	15.1	15.1	2.4

composición de fases. Como puede observarse en el gráfico de la Figura 4 al no utilizar agente espumante es posible obtener un material de elevado porcentaje de HAp (~ 95 %), los materiales en los que se utilizó agente espumante se obtuvieron con un contenido de HAp que oscilan entre ~ 60-70 % es de tener en cuenta que estos materiales presentan los mayores valores de área superficial y restringida porosidad.

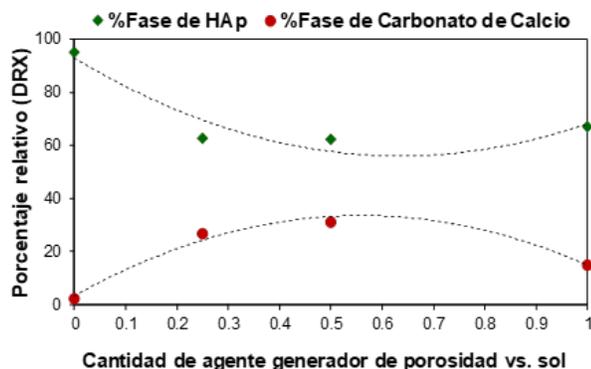
En el gráfico anterior se observa la fase de HAp como la mayoritaria, pero este porcentaje es diferente en cada material sintetizado. Se determinó que la relación entre cantidad de agente generador de porosidad versus sol influye en la composición de fases. Se puede observar una relación inversamente proporcional entre las fases HAp vs CaCO₃ ya que estas especies guardan relación como precursor y producto del proceso de síntesis.

También, se determinó que la relación entre cantidad de agente generador de porosidad vs. sol influye para poder sintetizar HAp con similar relación molar de Ca y P, o bien HAp ricas en Ca. Valores Ca/P de 1.6 y 1.3 se obtuvieron para relaciones agente espumante/sol de 0.0 y 0.5 respectivamente.

Efecto de la relación cantidad de agente

Figura 4

Efecto de la relación cantidad de agente generador de porosidad vs. sol (Disol. C), sobre el porcentaje de fases de los materiales sintetizados a partir de concha de molusco.



generador de porosidad versus sol sobre la capacidad de adsorción de cadmio (Cd²⁺) en disolución acuosa

En la primera fase se desarrollaron experimentos para la adsorción de cadmio durante 24 horas. Se trabajó con disoluciones de concentración inicial equivalente a 250 ppm Cd²⁺.

Los materiales sintetizados a partir de carbonato de calcio de cascarón de huevo mostraron una excelente capacidad adsorbiendo ~ 90 % el metal Cd²⁺, particularmente materiales de relación cantidad de agente generador de porosidad versus sol de 0.25 y 0.5. Mientras que la capacidad de adsorción del material que contiene agente generador de porosidad en una cantidad equivalente a la del sol (5/5) se reduce considerablemente hasta un 67 %.

La capacidad de adsorción de cadmio en materiales sintetizados a partir de carbonato de calcio de concha de molusco resulta más afectada para las relaciones de cantidad de agente generador de porosidad versus sol, citadas en el párrafo anterior, resultando entre ~ 30-65 % en la capacidad adsorción de Cd²⁺.

En la siguiente figura se muestra una gráfica comparativa para el porcentaje adsorbido de Cd²⁺ según los materiales sintetizados a partir de cascarón de huevo o concha de molusco. Los materiales sintetizados a partir de cascarón de huevo presentan

Tabla 5

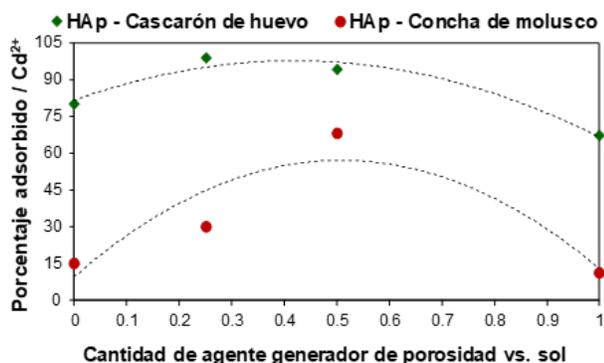
Propiedades tipo HAp sintetizados a partir de concha de molusco, se compara en función de la relación de cantidad agente generador de porosidad versus sol (Disol. C).

Materia prima de CaCO ₃	Relación agente espumante/sol			
	0	0.25	0.5	1.0
Cascarón de huevo	80	99	94	67
Concha de molusco	15	30	68	11

Nota. *Concentración inicial de Cd²⁺: 250 ppm, y tiempo de contacto: 24 horas.

Figura 5

Comparación del porcentaje adsorbido de Cd²⁺ en función de la relación cantidad de agente generador de porosidad vs. sol (Disol. C). Materiales tipo hidroxiapatita sintetizados a partir de ♦ cascarón de huevo y ● concha de molusco.



una mayor efectividad en el proceso de adsorción de Cd²⁺ comparado a los materiales sintetizados a partir de concha de molusco.

Se observa que ambas curvas muestran valores máximos para la adsorción del metal, una capacidad de adsorción de 94 % y 68 % para materiales sintetizados a partir de cascarón de huevo y concha de molusco, respectivamente. Los máximos porcentajes de adsorción se relacionan con materiales sintetizados utilizando relación 0.5 (2.5/5) y cuyos valores de área superficial están entre 16-17 m².g⁻¹. (ver tablas 1 y 3).

Para el valor máximo de la variable en estudio (cantidad de agente generador de porosidad vs. sol, 5/5) se observa en ambos casos una disminución de la capacidad de adsorción, este comportamiento estaría relacionado con la disminución del área superficial y el volumen de poro de estos materiales, resultado que se asocia con las temperaturas de calcinación alcanzadas al interior del material y que favorecieron la sinterización de partículas, lo anterior producto de la combustión del mayor contenido de materia orgánica proveniente del agente generador de porosidad.

Tabla 6

Porcentaje de Cd²⁺ adsorbido en función del tiempo de contacto, materiales tipo hidroxiapatita sintetizados a partir de cascarón de huevo o concha de molusco.

Materia prima CaCO ₃ *	[Cd ²⁺] ₀ /ppm	1 hora	3 horas	6 horas	9 horas	15 horas
Cascarón de huevo (0.25)	255	98	99	99	99	99
Concha de molusco (0.50)	250	53	53	59	60	71

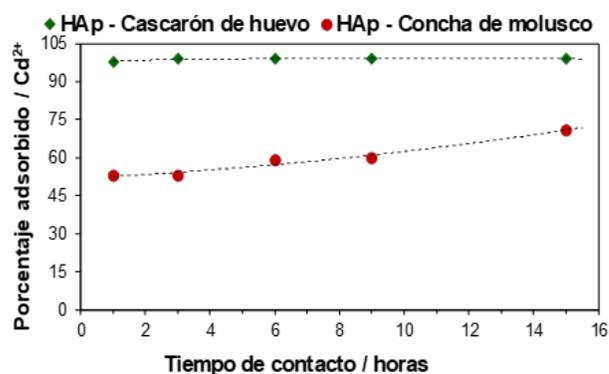
Nota. * Valor en paréntesis: relación cantidad de agente generador de porosidad vs. sol (Disol. C) en mL/mL.

Con base en los resultados anteriores fueron elegidos dos materiales con mejor capacidad de adsorción de Cd²⁺, cada uno sintetizado a partir de las dos materias primas utilizadas como fuente de CaCO₃. La segunda fase fue referida al estudio de la cinética de adsorción de Cd²⁺ a diferentes tiempos de contacto.

El gráfico siguiente muestra como la capacidad de adsorción de Cd²⁺ en función del tiempo de contacto, resulta evidente el comportamiento diferente para ambos materiales, así el material sintetizado de cascarón de huevo alcanza un equilibrio de adsorción más rápido que el material sintetizado de concha de molusco. El material sintetizado con carbonato de calcio de cascarón de huevo y con relación agente generador de porosidad versus sol 0.25 (1.25/5) mostró una capacidad de adsorción del ≥95 % después de la primera hora de contacto, manteniéndose casi constante en las siguientes 3, 6, 9 y 15 horas. Se observa un comportamiento distinto para el material sintetizado a partir de carbonato de calcio de concha de molusco y con relación agente generador de porosidad versus sol 0.50 (2.5/5), después de la primera hora de contacto se adsorbió el 50 % del Cd²⁺ en disolución, posteriormente hay un incremento paulatino hasta alcanzar un ≈ 70 %

Figura 6

Comparación del porcentaje adsorbido de Cd²⁺ en función del tiempo de contacto. Materiales tipo hidroxiapatita sintetizados a partir de ♦ cascarón de huevo y ● concha de molusco.



después de 15 horas de contacto.

Como se ha mencionado anteriormente, la capacidad de adsorción está relacionada directamente con propiedades morfológicas (ver Figuras 1 y 3), a mayor valor de área superficial es mayor la disponibilidad de sitios activos en la superficie del material. De esta manera el material sintetizado a partir de carbonato de calcio de cascarón de huevo dispone de un área mayor lo que favorece el proceso de adsorción del cadmio tanto en cantidad como en velocidad para establecer el equilibrio. Considerando que la diferencia entre las áreas superficiales de los materiales no es significativamente elevada, podemos inferir que el proceso de adsorción de cadmio en estos materiales no es controlado únicamente por procesos físicos, debe existir una sinergia entre las propiedades químico-superficiales de los materiales para favorecer la capacidad de adsorción de este tipo de metales tóxicos (Nayak & Bhushan, 2021). Lo anterior se fundamenta en la moderada capacidad de adsorción mostrada por el material sintetizado a partir de concha de molusco, y la velocidad a la cual se establecería el equilibrio de adsorción, según Thom N.T. et al., en el mecanismo de adsorción resulta importante las etapas de intercambio iónico entre Ca^{2+} presente en la HAp y el Cd^{2+} de la disolución acuosa (Thi Thom et al., 2018).

CONCLUSIONES

Se confirmó que es necesario controlar variables como el tiempo de envejecimiento y temperatura de calcinación (Scalera et al., 2013). Además, en este trabajo se demostró que la relación entre la cantidad de agente generador de porosidad vs. "sol" (DiDisol. C) influye sobre las propiedades físicas y químicas de los materiales sintetizados.

Mediante difracción de rayos X se identificaron picos característicos a distintas fases según, CaCO_3 -aragonito, CaCO_3 -calcita, fosfato tricálcico (β -TCP), hidroxiapatita (HApCa), y CaO. El porcentaje relativo de la fase HApCa resultó ser función de la relación cantidad de agente generador de porosidad vs. sol, a medida se incrementa la cantidad de materia orgánica puede interferir en la reacción del carbonato de calcio para formar fosfato de calcio y otras especies como la HAp.

Se estudió la capacidad de adsorción de estos materiales para eliminar metales tóxicos disueltos en agua. Los materiales sintetizados reportaron buenas capacidades de adsorción de Cd^{2+} . Materiales sintetizados a partir de cascarón de huevo alcanzaron porcentajes de adsorción $\approx 90\%$, mientras

que materiales sintetizados a partir de concha de molusco alcanzaron porcentajes de adsorción $\approx 60\%$.

La capacidad de adsorción de Cd^{2+} resultó ser influenciada por la sinergia de procesos físicos y químicos. Los materiales sintetizados a partir de cascarón de huevo exhibieron elevada capacidad y una mayor velocidad de equilibrio de adsorción de Cd^{2+} debido a que presentan propiedades físicas superficiales y químicas particulares, en comparación a los materiales preparados a partir de concha de molusco los cuales mostraron capacidades de adsorción de Cd^{2+} moderadas.

Para finalizar, la metodología propuesta está en línea con los principios de la química sostenible y hacia el desarrollo de una economía circular (Wang & Hellweg, 2021), y permite aprovechar residuos de la industria alimentaria para sintetizar materiales tipo HApCa. Estos materiales sólidos resultaron aplicables para descontaminar agua conteniendo cadmio que es uno de los metales más tóxicos para los ecosistemas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las autoridades de la Facultad CIMAT por apoyar las actividades de investigación y a SIC-UES por el financiamiento para el proyecto P-17.04. También se hace constar el agradecimiento al Dr. Marcelo E. Domine (Científico Titular ITQ/CSIC-UPV) por su disposición para que el Dr. M. C-S realizara la caracterización de los materiales sintetizados.

REFERENCIAS

- Anastopoulos, I., Pashalidis, I., Hosseini-Bandegharai, A., Giannakoudakis, D. A., Robalids, A., Usman, M., Escudero, L. B., Zhou, Y., Colmenares, J. C., Núñez-Delgado, A., & Lima, É. C. (2019). Agricultural biomass/waste as adsorbents for toxic metal decontamination of aqueous solutions. *Journal of Molecular Liquids*, 295. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111684>
- Chen, S. B., Ma, Y. B., Chen, L., & Xian, K. (2010). Adsorption of aqueous Cd^{2+} , Pb^{2+} , Cu^{2+} ions by nano-hydroxyapatite: Single and multi-metal competitive adsorption study. *Geochemical Journal*, 44(3), 233–239. <https://doi.org/10.2343/geochemj.1.0065>
- da Rocha, M. P., Dourado, P. L. R., Cardoso, C. A. L., Cândido, L. S., Pereira, J. G., de Oliveira, K. M. P., & Grisolia, A. B. (2018). Tools for monitoring aquatic environments to identify anthropic effects. *Environmental Monitoring and*

- Assessment, 190(2). <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6440-2>
- Demirbas, A. (2008). Heavy metal adsorption onto agro-based waste materials: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 157(2–3), 220–229. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.01.024>
- Fihri, A., Len, C., Varma, R. S., & Solhy, A. (2017). Hydroxyapatite: A review of syntheses, structure and applications in heterogeneous catalysis. *Coordination Chemistry Reviews*, 347, 48–76. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2017.06.009>
- Galicia Ayala, J., Díaz, J. A., & Chávez-Sifontes, M. (2022). Propiedades físicas y químicas de materiales tipo hidroxiapatita sintetizados a partir de residuos de la industria alimentaria mediante el empleo de un método sol-gel modificado. *Revista Minerva UES*, 5(2), 1–18.
- Guo, X., Yan, H., Zhao, S., Li, Z., Li, Y., & Liang, X. (2013). Effect of calcining temperature on particle size of hydroxyapatite synthesized by solid-state reaction at room temperature. *Advanced Powder Technology*, 24(6), 1034–1038. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2013.03.002>
- Ivanets, A. I., Kitikova, N. V., Shashkova, I. L., Roshchina, M. Y., Srivastava, V., & Sillanpää, M. (2019). Adsorption performance of hydroxyapatite with different crystalline and porous structure towards metal ions in multicomponent solution. *Journal of Water Process Engineering*, 32(September), 100963. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100963>
- Kubier, A., Wilkin, R. T., & Pichler, T. (2019). Cadmium in soils and groundwater: A review. *Applied Geochemistry*, 108(February). <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104388>
- Kumar Nayak, A. (2010). Hydroxyapatite Synthesis Methodologies: An Overview. *Proceedings - Design Automation Conference*, 2, 903–907.
- Nayak, A., & Bhushan, B. (2021). Hydroxyapatite as an advanced adsorbent for removal of heavy metal ions from water: Focus on its applications and limitations. *Materials Today: Proceedings*, 46(20), 11029–11034. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.149>
- Scalera, F., Gervaso, F., Sanosh, K. P., Sannino, A., & Licciulli, A. (2013). Influence of the calcination temperature on morphological and mechanical properties of highly porous hydroxyapatite scaffolds. *Ceramics International*, 39(5), 4839–4846. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.11.076>
- Sharma, H., Rawal, N., & Mathew, B. B. (2015). The Characteristics, Toxicity and Effects of Cadmium. *International Journal of Nanotechnology and Nanoscience*, 3, 1–9.
- Sparks, D. L. (2005). Toxic metals in the Environment: The Role of Surfaces. *Elements*, 1, 193–198.
- Szczęś, A., Hołysz, L., & Chibowski, E. (2017). Synthesis of hydroxyapatite for biomedical applications. *Advances in Colloid and Interface Science*, 249(April), 321–330. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.04.007>
- Thi Thom, N., Thi Mai Thanh, D., Thi Nam, P., Thu Phuong, N., & Buess-Herman, C. (2018). Adsorption behavior of Cd²⁺ ions using hydroxyapatite (HAp) powder. *Green Processing and Synthesis*, 7(5), 409–416. <https://doi.org/10.1515/gps-2018-0031>
- Toibah, A. R., Misran, F., Shaaban, A., & Mustafa, Z. (2019). Effect of pH condition during hydrothermal synthesis on the properties of hydroxyapatite from eggshell waste. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 13(2), 4958–4969. <https://doi.org/10.15282/jmes.13.2.2019.14.0411>
- Wang, Z., & Hellweg, S. (2021). First Steps Toward Sustainable Circular Uses of Chemicals: Advancing the Assessment and Management Paradigm. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 9(20), 6939–6951. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c00243>
- Yuan, Z., Luo, T., Liu, X., Hua, H., Zhuang, Y., Zhang, X., Zhang, L., Zhang, Y., Xu, W., & Ren, J. (2019). Tracing anthropogenic cadmium emissions: From sources to pollution. *Science of the Total Environment*, 676, 87–96. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.250>



Revista MINERVA

Plataforma digital de la revista: <https://minerva.sic.ues.edu.sv>

Artículo Científico | Scientific Article

Exploración de betalactámicos, tetraciclinas y sulfonamidas en leche fluida ultrapasteurizada en Ciudad de Guatemala

Monitoring of betalactams, tetracyclines and sulfonamides in ultrapasteurized fluid milk in Guatemala City

Laramy Cheyenne Pérez García¹, Manuel Lepe López^{1, 3}, Madeleine Stormont^{2, 4}

Correspondencia: laramycheyenne13@gmail.com

- 1 Programa de Maestría en Ciencia Animal, Escuela de Estudios de Postgrado, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad de San Carlos de Guatemala
- 2 Escuela de Medicina Veterinaria, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad de San Carlos de Guatemala
- 3 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4745-964X>
- 4 ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4301-5827>

RESUMEN

En países de la región se reportan residuos de antibióticos en leche pasteurizada. La demanda en Guatemala es abastecida con producto local e importado. Debido a lo anterior, el propósito de esta investigación es explorar residuos de antibióticos en leche ultrapasteurizada en el área metropolitana de Guatemala. Se exploraron antibióticos betalactámicos, tetraciclinas y sulfonamidas mediante la técnica rápida de inmunocromatografía de oro coloidal con la prueba MilkSafe™ 3BTS. Se adquirieron n = 258 litros individuales de leche, ofrecidas al público, a temperatura ambiente, por 78 supermercados. La disponibilidad de las 8 marcas varió por sitio al momento del muestreo, provocando diferencias en las cantidades de unidades adquiridas. La totalidad las muestras (100 %) resultaron negativas a la prueba MilkSafe™ 3BTS. Se discuten los posibles motivos de obtener resultados por debajo de los límites máximos de residuos (LMR) y las implicaciones de estos hallazgos en el

DOI: [10.5377/revminerva.v7i3.18903](https://doi.org/10.5377/revminerva.v7i3.18903)

Enviado: 4 de julio de 2023
Aceptado: 16 de enero de 2024

Palabras clave: leche, residuos de antibiótico, leche pasteurizada, inocuidad de alimentos

Keywords: milk, antibiotic residues, dairy, food safety



Este contenido está protegido bajo la licencia CC BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

sistema de vigilancia de residuos veterinarios en leche para consumo humano.

ABSTRACT

Antibiotic residues in pasteurized milk have been report in countries of the region. The demand of fluid milk is supplier with local and imported products. Due to the above, our purpose is to explore antibiotic residues in ultra-pasteurized milk in the metropolitan area of Guatemala. Beta-lactam, tetracycline, and sulfonamide antibiotics were screening using the rapid colloidal gold immunochromatographic technique with the MilkSafe™ 3BTS test. A total of 258 liters of milk at room temperature, offered to the public in 78 supermarkets, were used in this study. The availability of the eight brands varied by site at the time of sampling, causing differences in the quantities of units purchased. All samples (100 %) resulted in the absence of the MilkSafe™ 3BTS test residues. The possible reasons for obtaining results below the maximum residue limits (MRL) and the implications of these findings in the surveillance system for veterinary residues in milk for human consumption are discussing.

INTRODUCCIÓN

Los residuos de antibióticos procedentes de los sistemas de producción animal son de gran preocupación para la salud pública (Redwan Haque et al. 2021). A corto plazo pueden provocar reacciones anafilácticas en los consumidores, mientras que a largo plazo estimulan la resistencia antimicrobiana (RAM) (Lee et al. 2001). No obstante, suspender por completo el uso de antibióticos se dificulta debido a la necesidad del tratamiento de bacteriosis en los animales y su uso como promotor del crecimiento (Bacanli y Başaran 2019). Además, en los países con carencia regulatoria del uso de antibióticos se ha observado un abuso e indiscriminación en la producción de alimentos (Redwan Haque et al. 2021). En el caso de la leche, los residuos betalactámicos son los más frecuentes detectados a nivel mundial en un 36.54 %, seguido de las tetraciclinas (14.01), fluoroquinolonas (13.46), sulfonamidas (12.64) y aminoglucósidos (10.44) (Sachi et al. 2019).

A nivel global se reconoce el aporte nutricional de la leche en la dieta de las personas y la necesidad de pasteurizarla para eliminar microorganismos patógenos (Vranješ et al. 2015). La mayoría de las personas que consumen leche se encuentran en países en desarrollo. Por ejemplo, Argentina, Costa Rica y Mongolia presentan un consumo per cápita elevado (150 kg), México, Nueva Zelanda y Pakistán muestran un consumo medio (30-150 kg) e Irán, Senegal y Vietnam consumen menos de 30 kg (FAO, 2019). En Guatemala, la leche es el quinto ingrediente

relevante en la dieta de los habitantes (después de los cereales, la carne, los vegetales y la fruta) (Valdés-Ramos et al. 2001; Bermudez et al. 2008). Algunas estimaciones sugieren un consumo per cápita de 30 L al año en dicho país centroamericano (con oscilaciones entre 15 a 100 L) (Ruano, 1996). De manera anecdótica se reporta para 2019 un consumo que oscila los 60 L (Valdez-Sandoval, 2023). La interfaz de programación de aplicaciones World Population Review (2023), en su categoría de milk consumption by country propone para el 2023 un consumo de 42 L para Guatemala.

A pesar del bajo consumo de leche, para Guatemala se reporta la circulación de antibióticos en leche artesanal no pasteurizada del área rural (Jáuregui y Celis 2018). Dichos autores reportaron aminoglucósidos en 64.44 %, betalactámicos en 91.11 %, y tetraciclinas en 28.89 % de 90 muestras en el departamento de Chiquimula. Además de la presencia de antibióticos en leche artesanal a nivel local, también se ha reportado en países vecinos la circulación de antibióticos en leche pasteurizada. Velázquez et al. (1980) informan que de una muestra del área metropolitana de 96 L de leche pasteurizada, un 60 % contienen residuos de betalactámicos, 75 % aminoglucósidos y 43 % tetraciclinas. En el caso de México se han continuado los esfuerzos de monitoreo, incluso en leche en polvo y condensada con resultados positivos (Cruz et al. 1986). De manera similar en Costa Rica se ha informado de un 9 % de leche cruda y 2 % de leche pasteurizada contiene residuos de betalactámicos y sulfonamidas (Monge et al. 1993).

Por otra parte, una encuesta sobre el efecto de la falta de higiene, manejo de agua potable y uso de antibióticos en humanos, realizada en dos zonas urbanas de Guatemala muestra una prevalencia de resistencia a ampicilina, amoxicilina, estreptomina, sulfametoxazol, trimetoprima, tetraciclina cuatro veces mayor (> 30 %) en comparación con ceftazidima, cloranfenicol, ciprofloxacina y kanamicina (< 8 %) (Ramay et al. 2020). Por consiguiente, tanto la producción de leche artesanal como las prácticas domésticas son propicias para el fenómeno RAM, aunque la leche destinada a la industria láctea es sometida a pasteurización para eliminar microorganismos. Sin embargo, se carecen de datos exactos sobre las cantidades de leche artesanal procesada en la industria guatemalteca y es bien sabido que la pasteurización, esterilización o ultrapasteurización no eliminan los residuos de medicamentos antimicrobianos (Lozano y Arias, 2008).

La regulación internacional del Codex alimentarius propone la ausencia de residuos de antibióticos en la leche para consumo humano (Codex Alimentarius 2011). Además, se indican límites máximos de residuos (LMR) en leche para antibióticos específicos, por ejemplo 4 µg/l para bencilpenicilina procaínica (betalactámico), 100 µg/l para tetraciclinas y 25 µg/l para sulfonamidas (FAO y OMS, 2015). En Guatemala, la Comisión Guatemalteca de Normas (COGUANOR) supone la ausencia de antibióticos de manera general y el cumplimiento del tiempo de retiro de su uso en animales, sin estipular límites máximos residuales y sistemas de monitoreo (Coguanor, 2005). De igual forma, el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA) ofrece en el Reglamento Técnico Centroamericano (RTCA, 2015), un calendario de monitoreo para la verificación de residuos de enrofloxacin y florfenicol para 2018, betalactámicos en 2019 y oxitetraciclinas en 2022. No obstante, se carece de la publicación de resultados por parte del RTCA en Guatemala, haciendo necesario realizar otros esfuerzos de monitoreo por el traspaso de residuos y transmisión de agentes infecciosos resistentes desde los animales hacia las personas (Dweba et al. 2018).

Según la base de datos estadísticos corporativos de la FAO (FAOSTAT, 2023) para el 2021 Guatemala produjo 590 toneladas e importó 1077 Tn de leche (excluyendo mantequilla) para satisfacer la demanda. Considerando la presencia de residuos de antibióticos en leche artesanal rural y en leche pasteurizada en países vecinos (Gutiérrez et al. 2005), es necesario verificar la circulación de residuos de antibióticos en leche de marcas comerciales en Guatemala. El propósito de esta investigación es explorar residuos de antibióticos betalactámicos, tetraciclinas y sulfonamidas en una muestra de leche ultrapasteurizada en el área metropolitana de Guatemala. Aunque se suponen procesos de control de calidad para la industria láctea, la vulnerabilidad reportada para países pobres y en desarrollo a enfermedades infecciosas resistentes a antimicrobianos (Redwan Haque et al. 2021), hace necesario verificar dichos supuestos en este país centroamericano.

MATERIALES Y MÉTODOS

La exploración consideró las cadenas de supermercados e hipermercados ubicados en el área metropolitana de Guatemala durante mayo a septiembre 2022. Se adquirieron n = 258 litros individuales de leche en envase Tetra Pak, ofrecidas al público a temperatura ambiente. La disponibilidad de las marcas varió por sitio al momento del

muestreo, provocando diferencias en las cantidades de unidades adquiridas por marca. Las muestras fueron transportadas a temperatura ambiente al Laboratorio de Control de Calidad Amerador, ubicado en el departamento de Escuintla, al sur del país.

Se registró el sitio de adquisición de la muestra, la marca, el lote del empaque Tetra Pak, la fecha de caducidad y el resultado de la prueba MilkSafe™ 3BTS (negativo, positivo, débil positivo e inválido por ausencia de línea de control). Para realizar la prueba MilkSafe™ 3BTS se necesita la miniincubadora MilkSafe™ para elevar la temperatura a 40 ± 2 °C. Se estimó la frecuencia absoluta y relativa de los resultados a la prueba MilkSafe™ 3BTS.

Las muestras fueron procesadas por la técnica rápida de inmunocromatográfica de oro coloidal MilkSafe™ 3BTS para la detección de, al menos, el 95 % de las réplicas de LMR para betalactámicos, tetraciclinas y sulfonamidas presentes en la lista de la Unión Europea para leche EU No 37-2010 (CHR Hansen, n.d.). Por ejemplo, para penicilina la prueba es sensible desde 2 ppb, para tetraciclina es sensible desde 50 ppb, y para sulfatiazol es sensible desde 3 ppb. El principio de esta prueba es similar al funcionamiento tipo sándwich del método ELISA, con la diferencia que la reacción inmunológica es por acción capilar del papel cromatográfico (Byzova et al. 2011). La inmunocromatografía ha sido un método ampliamente usado para detectar residuos veterinarios en alimentos, por su simplicidad, rapidez, estabilidad y costo en comparación a otros métodos (Ilievski et al. 2022, Ashuo et al. 2020).

RESULTADOS

Todas las muestras (n = 258 litros), obtenidas en 78 supermercados de 6 diferentes cadenas y 8 marcas comerciales diferentes, fueron negativas a la prueba MilkSafe™ 3BTS. Las fechas de vencimiento se encontraban entre julio 2022 a enero 2023. .

DISCUSIÓN

Es necesario continuar los esfuerzos por estimar los residuos de antibióticos en productos lácteos de Guatemala. Para las muestras del presente estudio, los residuos pueden proponerse por debajo del LMR sugeridos por la Unión Europea. En este sentido, es relevante mencionar que las muestras podrían tener concentraciones menores a las cuales la prueba MilkSafe™ 3BT no es sensible. En otras palabras nuestros resultados no significan la ausencia absoluta de residuos. Lo anterior es similar a los resultados obtenidos por la prueba Delotest en un estudio

experimental de residuos de Ceftiofur (cefalosporina de tercera generación) en vacas lecheras, en donde todos los resultados fueron negativos para este test rápido (Durel et al. 2019). De forma similar fueron los resultados negativos a residuos de antibióticos en leche pasteurizada de seis marcas comerciales en Montería (Colombia) aplicando la prueba rápida Bio-X-Total antibiotic Bio K 331 (Máttar et al. 2009). Este tipo de resultados son razonables debido a que varias pruebas de bajo costo son sensibles a valores iguales o superiores a LMR, siendo una limitante para identificar residuos en el presente estudio. Dado lo anterior, sugerimos en próximos estudios de leche pasteurizada en Guatemala, suponer residuos por debajo de los LMR recomendados por la UE.

Los resultados falsos negativos pueden ocurrir en pruebas de bajo costo debido a la interacción con moléculas de conservantes para leche y detergentes aplicados en las máquinas de procesamiento (Schlemper y Sachet, 2017). Además, en leche producida en Guatemala es necesario considerar que la norma COGUANOR permite aplicar peróxido de hidrogeno, lactoxidasa y catalasa como preservantes (Coguanor 2005). Por otra parte, es necesario considerar que una posible explicación a nuestros resultados es el efecto de dilución, debido a que una parte de leche con LMR se puede mezclar con nueve partes de leche sin residuos para estar por debajo del límite (Durel et al. 2019). Lo anterior podría ser otra hipótesis por confirmar ante la ausencia de LMR de antibióticos resultantes, precisando más estudios con valores residuales mínimos de 1 ppb (esto representaría un mayor costo de pruebas de laboratorio respecto este estudio).

La importación de leche proveniente de países que cumplen con los tiempos de retiro de los diferentes principios activos que contempla MilkSafe™ 3BTS podría ser otra explicación a nuestros resultados. Por ejemplo, Costa Rica reporta la disminución residuos betalactámicos en monitoreos locales (Monge et al. 1993; Leiva et al. 2019), país de procedencia del mayor número de muestras consideradas en el presente estudio (n = 90, equivalente al 34 %). También se ha propuesto que las altas temperaturas de la ultrapasteurización (135 C°, 3-5 segundos) podría reducir los residuos de antimicrobianos (Rahman et al. 2021). La estabilidad de cada grupo de antibiótico para degradarse en metabolitos indetectables varía según la estructura química, las variaciones de temperatura y el tiempo de pasteurización (Kellnerová et al. 2015).

Respecto a sensibilidad de la prueba Milk Safe 3BTS, un estudio comparativo de tres pruebas rápidas para residuos de antibióticos en leche (Milk Safe 3BTS, 4 Sensor y Eclipse Farm 3G) sugiere que la prueba MilkSafe™ 3BTS es altamente sensible en comparación a las otras dos pruebas (Ilievski et al. 2022). Lo anterior debido a que Milk Safe 3BTS obtuvo un mayor número de resultados positivos a menores dosis similares al LMR presentes en la leche, en comparación a las otras pruebas. Es importante mencionar que estas muestras presentaron residuos por encima del LMR. Dicho estudio de diseño experimental, administró un antibiótico betalactámico en dosis recomendadas a 16 vacas Holstein para evaluar residuos en 6, 12, 24, 48 y 72 horas post administración (n = 76). Esto supone confiabilidad a los resultados negativos observados en nuestra exploración en el área metropolitana de Guatemala para la muestra n = 258 unidades. Empero, es necesario reconocer que puede existir un 5 % de error en la detección de MilkSafe™ 3BTS.

La mayoría de estudios de residuos de antibióticos informan resultados positivos y advierten un riesgo para la salud de los consumidores. Zhang et al. (2014) reportaron 0 %, 20.2 %, 7.4 % y 95.7 % de residuos de tetraciclinas, sulfonamidas, sulfametazinas y quinolonas en leche ultrapasteurizada en el mercado chino, además de 7.7 %, 15.4 %, 0 % y 61.5 % respectivamente en leche pasteurizada. Seis años después, Du et al. (2019) reportan en un monitoreo posterior una positividad de 4.7 %, 3.3 %, 2.7 % y 15.5 % a los mismos antibióticos en leche ultrapasteurizada y 6.0 %, 4.0 %, 2.0 %, y 14.0 % respectivamente en leche pasteurizada. En un monitoreo en Bangladesh, Rahman et al. (2021) reportaron 0 % de residuos de betalactámicos y tetraciclinas en leche pasteurizada y 7 % en leche cruda. Así mismo, un monitoreo de antibióticos betalactámicos en tres países del caribe (n = 25 por país) identificó residuos en la leche cruda de fincas de Barbados (8 %) y Jamaica (10 %), a excepción de Costa Rica (0 %) (Baynes et al. 1999). Sin embargo, al verificar la leche ultrapasteurizada en Barbados y Jamaica durante el mismo estudio, se careció de residuos de antibióticos, al igual que la de Costa Rica, sugiriendo que los controles para detección de los mismos en el tanque de recolección previo a trasladarla a la planta procesadora, son estrictos y efectivos.

En el caso de Guatemala, carecemos de estudios que sugieran buenas prácticas en la industria láctea o del buen uso de antibióticos para insinuar ausencia de residuos. En el caso de la avicultura guatemalteca un estudio sugiere problemas de asequibilidad y uso

cruzado de antibióticos como una amenaza a los consumidores (Snively-Martinez, 2019). Otro estudio en carne cruda demuestra altos perfiles de resistencia antimicrobiana de distintas cepas de Salmonella, reforzando las advertencias de transmisión de genes de resistencia desde productos de origen animal hacia las personas (Jarquin, et al., 2015). De forma similar, una exploración de automedicación en población indígena rural indica que la automedicación de antibióticos es frecuente independiente de las características sociodemográficas (Svenson, et al., 2021).

Otro aspecto preocupante es la carencia de datos gubernamentales para contrastar con nuestros datos, planteando la necesidad del fortalecimiento de las entidades encargadas de vigilancia del uso de antimicrobianos en producción animal para Guatemala. Los sistemas nacionales de vigilancia de los alimentos desempeñan una función decisiva para la salud de los consumidores. Sugerimos considerar los principios y directrices para los sistemas nacionales de control de los alimentos del Codex Alimentarius (CXG 82- 2013), dirigidos a la protección del consumidor, enfoque integral de la cadena alimentaria, transparencia de datos y el establecimiento de políticas que verifiquen la circulación de medicamentos veterinarios en leche para consumo humano.

CONCLUSIÓN

La leche ultrapasteurizada que se comercializa en Ciudad de Guatemala para consumo humano no excede los LMR establecidos por la normativa para betalactámicos, tetraciclinas y sulfonamidas.

REFERENCIAS

- Ashuo, A., Wenjia, Z., Jingjie, F., Yang, T., Yu, L., Lui, W., Yang, L., Mari, G.M., Jiang, H. (2020). High Throughput Detection of Antibiotic Residues in Milk by Time-Resolved Fluorescence Immunochromatography Based on QR Code. *Food Additives and Contaminants - Part A Chemistry, Analysis, Control, Exposure and Risk Assessment* 37 (9): 1481–90. <https://doi.org/10.1080/19440049.2020.1778192>.
- Bacanli, M., Nurşen, B. (2019). Importance of Antibiotic Residues in Animal Food. *Food and Chemical Toxicology* 125: 462–66. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2019.01.033>.
- Baynes, R.E., Lyman, R., Anderson, K.L., Brownie, C.F. (1999). A Preliminary Survey of Antibiotic Residues and Viable Bacteria in Milk from Three Caribbean Basin Countries. *Journal of Food Protection* 62 (2): 177–80. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-62.2.177>.
- Bermudez, O.I., Hernandez, L., Mazariegos, M., Solomons, N.W. (2008). Secular Trends in Food Patterns of Guatemalan Consumers: New Foods for Old. *Food and Nutrition Bulletin* 29 (4): 278–87. <https://doi.org/10.1177/156482650802900404>.
- Byzova, N.A., Zvereva, E.A., Zherdev, A.V., Dzantiev, B.B. (2011). Immunochromatographic Technique for Express Determination of Ampicillin in Milk and Dairy Products. *Applied Biochemistry and Microbiology* 47 (6): 627–34. <https://doi.org/10.1134/S0003683811060032>.
- CHR Hansen. n.d. MilkSafe™ 3BTS.
- Codex Alimentarius. (2011). Leche y Productos Lácteos Leche y Productos Lácteos. CODEX Alimentarius. <http://www.fao.org/3/i2085s/i2085s.pdf>.
- Coguanor. (2005). COGUANOR. Diario Oficial 14 de Agosto de 1986.
- Cruz, M., Pérez-Domínguez, M., Velázquez, F. (1986). Frecuencia de La Contaminación de La Leche Disponible En El Valle de México Con Estreptomocina, Tetraciclina y Penicilina. *Salud pública de México* 28 (4): 438–42.
- Du, B., Wen, F., Zhang, Y., Zheng, N., Li, S., Li, F., Wang, J. (2019). Presence of tetracyclines, quinolones, lincomycin and streptomycin in milk. *Food Control*, Volume 100, Pages 171-175, ISSN 0956-7135, <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.01.005>.
- Durel, L., Gallina, G. and Pellet, T. (2019). Assessment of Ceftiofur Residues in Cow Milk Using Commercial Screening Test Kits. *Veterinary Record Open* 6 (1): 1–7. <https://doi.org/10.1136/vetreco-2018-000329>.
- Dweba, C.C., Zishiri, O.T. El Zowalaty, M.E. (2018). Methicillin-Resistant Staphylococcus Aureus: Livestock-Associated, Antimicrobial, and Heavy Metal Resistance. *Infection and Drug Resistance* 11: 2497–2509. <https://doi.org/10.2147/IDR.S175967>.
- Food and Agriculture Organization of the Nations (FAO). (2019). Chapter 7. Dairy and Dairy

- Products. OECD-FAO Agricultural Outlook 2019-2028, 180–89. http://www.fao.org/3/CA4076EN/CA4076EN_Chapter7_Dairy.pdf.
- Food and Agriculture Organization of the Nations (FAO) and World Health Organization (OMS). (2015). Maximum Residue Limits (MRLs) and Risk Management Recommendations (RMRs) for residues of veterinary drugs in foods. FAO.
- Food and Agriculture Organization of the Nations (FAO). (2023). Food Balances (2010-). In: FAOSTAT. Rome. [Cited September 2023]. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FBS>.
- Gutiérrez Tolentino, R., Noa Pérez, M., Díaz González, G., Vega y León, S., González López, M., Prado Flores, G. (2005). Determination of the presence of 10 antimicrobial residues in Mexican pasteurized milk. *Interciencia*, 30(5), 291-294.
- Ilievski, D., Trajkovska, B., Kochoski, L. (2022). Use of screening tests for ceftiofur in evaluation of raw milk safety. *KNOWLEDGE-International Journal*, 52(3), 381–384. Retrieved from <https://ikm.mk/ojs/index.php/kij/article/view/5201>.
- Jáuregui, R., Celis, E. (2018). Prevalencia de Antibióticos Residual es en Leche Cruda de Bovino en Finca en el Departamento de Chiquimula. Dirección General de Investigación. Universidad de San Carlos de Guatemala. http://forschungsunion.de/pdf/industrie_4_0_umsetzungsempfehlungen.pdf https://www.dfki.de/fileadmin/user_upload/import/9744_171012-KI-Gipfelpapier-online.pdf [https://www.bitkom.org/sites/default/files/pdf/Presse/Anhaenge-an-PIs/2018/180607 -Bitkom.pdf](https://www.bitkom.org/sites/default/files/pdf/Presse/Anhaenge-an-PIs/2018/180607-Bitkom.pdf).
- Jarquín, C., Alvarez, D., Morales, O., Morales, A. J., López, B., Donado, P., Valencia, M.F., Arévalo A., Muñoz, F., Walls, I., Doyle, M.P., Alali, W.Q. (2015). Salmonella on raw poultry in retail markets in Guatemala: Levels, antibiotic susceptibility, and serovar distribution. *Journal of food protection*, 78(9), 1642-1650.
- Kellnerová, E., Navrátilová, P., Borkovcová, I. (2015). Effect of pasteurization on the residues of tetracyclines in milk. *Acta Veterinaria Brno*, 83(10), 21-26.
- Lee, M. H., Lee, H. J., Ryu, P.D. (2001). Chemical and Antibiotic Residues. *Asian-Australian Journal of Animal Science*.
- Leiva, A., Méndez, G., Rodríguez, C., Molina, A., Granados-Chinchilla, F. (2019). Chemical Assessment of Mycotoxin Contaminants and Veterinary Residues in Costa Rican Animal Feed. *International Journal of Food Contamination* 6 (1): 1–26. <https://doi.org/10.1186/s40550-019-0075-8>.
- Lozano, M., Arias, D. (2008). Residuos de fármacos en alimentos de origen animal: panorama actual en Colombia. *Revista Colombiana de ciencias pecurias*, 21(1), 121-135.
- Máttar, S., Calderón, A., Sotelo, D., Sierra, M., Tordecilla, G. (2009). Detección de antibióticos en leches: un problema de salud pública. *Revista de Salud Pública*, 11, 579-590.
- Monge, R., Arias, M.L., Ellner, R. (1993). Contamination of Bovine Milk with Residues of Inhibitory Substances in Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 41 (3 B): 855–56.
- Rahman, S., Hassan, M. M., Chowdhury, S. (2021) Determination of antibiotic residues in milk and assessment of human health risk in Bangladesh, *Heliyon*, 7(8). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07739>.
- Ramay, B.M., Claudell, M.A., Cordón-Rosales, C., Archilar, L.D., Palmer, G.H., Jarquin, C., Moreno, P., McCracken, J.P., Rosenkrantz, L., Amram, O., Omulo, S., Call, D.R. (2020). Antibiotic Use and Hygiene Interact to Influence the Distribution of Antimicrobial-Resistant Bacteria in Low-Income Communities in Guatemala. *Scientific Reports* 10 (1): 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70741-4>.
- Redwan Haque, A., Manobendro Sarker, R. D., Abul K. A., Mehedi, H. (2021). A Review on Antibiotic Residue in Foodstuffs from Animal Source: Global Health Risk and Alternatives. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry* 00 (00): 1–18. <https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1912334>.
- Reglamento Técnico Centroamericano. (2015). Reglamento Técnico Centroamericano RTCA 67.04.71:14 Productos Lácteos. Cremas (Natas) y Cremas (Natas preparadas). RTCA.

- Ruano, S. (1996). Guatemala: Situación General de la Producción. In *Latin America Livestock Regional Assessment Workshop*: San José, Costa Rica, April 15-18, 1996 (p. 65). IICA.
- Sachi, S., Jannatul, F., Mahmudul H.S., Azizul, K.H.S.M. (2019). Antibiotic Residues in Milk: Past, Present, and Future. *Journal of Advanced Veterinary and Animal Research* 6 (3): 315-32. <https://doi.org/10.5455/javar.2019.f350>.
- Schlemper, V., Sachet, A.P. (2017). Antibiotic residues in pasteurized and unpasteurized milk marketed in southwest of Paraná, Brazil. *Ciência Rural*, 47.
- Snively-Martinez, A.E. (2019). Ethnographic decision modeling to understand smallholder antibiotic use for poultry in Guatemala. *Medical Anthropology*, 38(3), 295-310.
- Svenson, E.L., Tun, R., Conway, J.H., Legenza, L., Svenson, J.M., Duffy, S., Svenson, J.E. (2021). A one health approach to compare self-prescribed antibiotic use across rural and semi-urban populations in San Lucas Tolimán, Guatemala. *Journal of Health Care for the Poor and Underserved*, 32(4), 1798-1817.
- Valdés-Ramos, R., Mendoza, I., Solomons, N.W. (2001). Concordance of Dietary Intake with the 'Dietary Guidelines for Americans' among Adults in Rural 'Santa Rosa' Province, Guatemala. *Nutrition Research* 21 (1-2): 81-91. [https://doi.org/10.1016/S0271-5317\(00\)00249-9](https://doi.org/10.1016/S0271-5317(00)00249-9).
- Valdez-Sandoval, J. (2023). Marketing digital en la Industria Láctea de Guatemala: Una evaluación de la presencia, impacto y análisis de contenido en facebook, instagram y twitter. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(2), 9179-7201.
- Velázquez, F., Pérez, M., González, R. (1980). Investigación de Residuos de Antibióticos En Leche Pasteurizada y Envasada Que Se Consume En El Área Metropolitana. *Salud Publica de Mexico* 22 (1): 91-99.
- Vranješ, A. P., Popović, M., Jevtić, M. (2015). Raw Milk Consumption and Health. *Srpski Arhiv Za Celokupno Lekarstvo* 143 (1-2): 87-92. <https://doi.org/10.2298/SARH1502087P>.
- World Population Review (2023). Milk consumption by county: Guatemala. <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/milk-consumption-by-country>
- Zhang, Y.D., Zheng, N., Han, R. W., Zheng, B. Q., Yu, Z. N., Li, S. L., Zheng, S. S., Wang, J. Q. (2014). Occurrence of tetracyclines, sulfonamides, sulfamethazine and quinolones in pasteurized milk and UHT milk in China's market, *Food Control*, 36(1):238-242, ISSN 0956-7135, <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.08.012>.

Esta página está dejada intencionalmente en blanco



Revista MINERVA

Plataforma digital de la revista: <https://minerva.sic.ues.edu.sv>

Artículo Científico | Scientific Article

Evaluación de la cultura de la inocuidad alimentaria en la manufacturación y maquila de alimentos listos para el consumo, tomando como caso ejemplo una empresa salvadoreña

Assessment of food safety culture in the manufacturing and processing of ready-to-eat foods, using a Salvadoran company as a case example

Ana Beatriz Lima de Zaldaña^{1,2}, Iris Esmeralda Villalta de Ostorga^{1,3},
Jessica Tatiana Burgos Sierra^{1,4}

Correspondencia: ana.lima@ues.edu.sv

- 1 Universidad de El Salvador, Facultad de Química y Farmacia
- 2 <https://orcid.org/0009-0008-4859-2638>
- 3 <https://orcid.org/0009-0007-0139-1401>
- 4 <https://orcid.org/0000-0001-5149-6016>

RESUMEN

La cultura de la inocuidad alimentaria abarca valores, creencias y normas que influyen en la mentalidad y el comportamiento hacia la seguridad alimentaria en organizaciones. Los expertos abogan por establecer esta cultura para mejorar prácticas. En ausencia de investigaciones locales, este estudio evaluó la cultura de la inocuidad según la Iniciativa Global de Inocuidad Alimentaria (GFSI) en una industria de Alimentos Listos para Consumo (ALC) en El Salvador en el periodo de noviembre 2022 a mayo 2023. Usando encuestas, entrevistas y observación, se analizaron datos para validar los resultados. Se diagnosticó la madurez de la cultura, proponiendo un plan de acción y comunicación para abordar brechas identificadas.

La encuesta reveló que los empleados poseen una buena cultura de inocuidad alimentaria. El mayor porcentaje de

DOI: [10.5377/revminerva.v7i3.18904](https://doi.org/10.5377/revminerva.v7i3.18904)

Enviado: 20 de agosto de 2023

Aceptado: 5 de junio de 2024

Palabras clave: alimentos, inocuidad de los alimentos, industria de alimentos, producción de alimentos.

Keywords: Food, food safety, food industry, food production.



Este contenido está protegido bajo la licencia CC BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

cumplimiento de inocuidad alimentaria para el grupo total encuestado (60 empleados) se obtuvo en la dimensión de concientización de peligros y riesgos con un 89.1% y el menor porcentaje correspondió a la dimensión adaptabilidad con un 80.9 %.

La entrevista evidenció que los empleados en general saben identificar claramente experiencias relacionadas con la inocuidad en su área y que conocen los riesgos y peligros que esto conlleva.

Se determinó que los empleados cuentan con el conocimiento en inocuidad alimentaria lo cual se exterioriza en su comportamiento, no obstante, existen aspectos a mejorar. La comunicación es buena, pero debe ocurrir de manera regular y ser accesible cada vez que se desee.

El grado de madurez de la empresa fue de aproximadamente 3.5, que de acuerdo con el modelo de madurez utilizado corresponde al nivel **CONOCER**: las personas de toda la empresa **conocen** la seguridad alimentaria y demuestran ese conocimiento.

ABSTRACT

The culture of food safety encompasses values, beliefs, and norms that shape attitudes and behaviors towards food safety within organizations. Experts advocate for establishing this culture to enhance practices. In the absence of local research, this study evaluated food safety culture based on the Global Food Safety Initiative (GFSI) in a Ready-to-Eat Food industry (RTE) in El Salvador from November 2022 to May 2023. Using surveys, interviews, and observation, data were analyzed to validate results. The maturity of the culture was diagnosed, proposing an Action and Communication Plan to address identified gaps.

The survey revealed that employees have a strong food safety culture. The highest compliance percentage for food safety within the total surveyed group (60 employees) was in the Awareness of Hazards and Risks dimension, at 89.1%, while the lowest percentage corresponded to the Adaptability dimension, at 80.9%.

Interviews showed that employees can clearly identify experiences related to food safety in their area and are aware of the risks involved. It was determined that employees possess knowledge of food safety, which is evident in their behavior. However, there are areas for improvement.

Communication is effective but should occur regularly and be accessible whenever needed.

The maturity level of the company was approximately 3.5, according to the maturity model used, which corresponds to the KNOW level: individuals throughout the organization are knowledgeable about food safety and demonstrate that knowledge.

INTRODUCCIÓN

La Política Nacional de Seguridad Alimentaria y Nutricional de El Salvador 2018-2028 (MINSAL, 2018), plasma estrategias y acciones a realizar en los diferentes componentes de la seguridad alimentaria y nutricional como son disponibilidad, acceso, consumo y utilización biológica de los alimentos. Sin embargo, la calidad e inocuidad de alimentos se establece solo con el objetivo de propiciar en las familias salvadoreñas un consumo de alimentos en cantidad y calidad hasta niveles recomendados y no como una cultura de inocuidad que permita generar hábitos higiénicos que contribuyan a disminuir los riesgos de enfermedades transmitidas por alimentos (ETA).

Según datos del boletín epidemiológico del MINSAL sobre la situación epidemiológica de enfermedad diarreica aguda, El Salvador, SE 01-51 2021 (MINSAL, 2022), el total general de casos para el año 2021 fue de 218,034. Del total de egresos por diarrea, el 53 % corresponden al sexo masculino. La mayor proporción de egresos se encuentra entre los menores de 5 años (76 %) seguido de los de 5 a 9 años (8 %). La letalidad hospitalaria por diarrea fue de 0.6 %. El diagnóstico real sobre el agente etiológico productor de las enfermedades gastrointestinales como las diarreas en El Salvador se desconoce, pero en grado importante, pueden ser provocadas por el consumo de alimentos contaminados. La OMS (2015) estima que, en la región de las Américas, 77 millones de personas todavía se enferman anualmente al consumir alimentos contaminados, y de esas personas mueren alrededor de 9,000 al año. De las personas que se enferman, 31 millones son menores de 5 años y de ellos mueren más de 2,000 al año.

La escasa educación en calidad e inocuidad de los alimentos consumidos en El Salvador es un

problema recurrente que se ve reflejado por los tipos de enfermedades que comúnmente se presentan. De aquí la necesidad de medir el conocimiento que se tiene sobre inocuidad alimentaria, ya que de acuerdo con Yiannas (2009) sin medición, no es posible mejorar el desempeño de la misma o reducir aún más el riesgo de ETA. Es únicamente a través del uso de medidores que se puede saber si es que el desempeño en inocuidad alimentaria de una organización está mejorando, sigue igual o ha empeorado. Pero no se debe medir únicamente el conocimiento, se debe medir el comportamiento.

La Iniciativa Global de Inocuidad Alimentaria, en su documento "Una cultura de Inocuidad Alimentaria", define cultura de inocuidad como "valores, creencias y normas compartidas que afectan la forma de pensar y el comportamiento con relación a la inocuidad alimentaria en, a través y a lo largo y ancho de una organización" (GFSI, 2018, p. 10).

El Codex Alimentarius (Rev. 2020) en el documento Principios Generales de Higiene de los Alimentos CXC 1-1969, establece que, dentro del compromiso de la dirección con la seguridad alimentaria, es fundamental para el funcionamiento adecuado de cualquier sistema de higiene alimentaria el establecimiento y mantenimiento de una cultura de inocuidad positiva, reconociendo la importancia del comportamiento humano a la hora de proporcionar alimentos seguros.

Lo anterior, según FDA (2022) ha dado lugar a la realización de investigaciones sobre la cultura de seguridad alimentaria en diferentes contextos y a pesar que los investigadores están de acuerdo en que la cultura de inocuidad alimentaria está relacionada con los valores, creencias y comportamientos de los empleados dentro de una organización y de que existen múltiples factores que influyen en la cultura de seguridad alimentaria (capacitación del personal, comunicación efectiva, liderazgo comprometido, participación de los empleados, importancia otorgada a la seguridad alimentaria en la toma de decisiones, entre otros), existe una cantidad mínima de herramientas diseñadas específicamente para ayudar a la industria alimentaria a crear y promover una cultura de seguridad alimentaria efectiva.

La mayoría de las herramientas de evaluación de la cultura de inocuidad alimentaria son instrumentos de encuesta destinados a difundirse entre el personal de la industria en diferentes niveles dentro de una organización, incluida la alta gerencia, la gerencia media y los manipuladores de alimentos. Muchos de los instrumentos se desarrollaron y validaron utilizando métodos mixtos, incluidas revisiones de literatura, grupos focales con expertos en inocuidad de los alimentos y análisis psicométricos. Algunos investigadores utilizaron un enfoque de triangulación para desarrollar y validar sus resultados sobre cultura de inocuidad alimentaria, combinando múltiples métodos como encuestas, entrevistas y auditorías. La literatura no indica si los instrumentos y escalas de medición funcionarían por igual en diferentes organizaciones, sectores de la industria alimentaria, o entre países. Es por ello que se necesita más investigación para evaluar la validez de estas herramientas dentro de diferentes entornos organizacionales, así como en diferentes lugares del mundo.

En vista de tal situación, se evaluó la cultura de la inocuidad alimentaria en una empresa salvadoreña que produce alimentos listos para el consumo. Específicamente, se analizó el comportamiento y las prácticas que los empleados demuestran habitualmente en términos de inocuidad alimentaria en El Salvador.

METODOLOGÍA

La primera etapa de la metodología para la evaluación consistió en la recolección y el análisis de la información. La recolección de la información se llevó a cabo mediante una encuesta de creencias, valores y conductas al personal relacionado con la cadena de producción de ALC utilizando una escala de respuesta tipo Likert, diseñada tomando en cuenta las cinco dimensiones en inocuidad alimentaria del documento expositivo de la Iniciativa Global de Inocuidad Alimentaria (GFSI, 2018): Visión y misión, personas, consistencia, adaptabilidad y concientización de peligros y riesgos. Además, la encuesta estuvo acompañada de entrevistas semiestructuradas y observación de comportamientos en el terreno. En el estudio

participaron los cargos de gerente, coordinador, supervisor y líder de equipo (Nivel 2) y operador, analista y asistente (Nivel 3). El análisis de la información se enfocó principalmente en identificar posibles brechas que pudieran afectar la cultura de inocuidad alimentaria de la empresa en estudio.

En la segunda etapa se realizó la validación de los resultados a través de un proceso de triangulación metodológica de la información, específicamente la escala de autoevaluación (encuesta), las entrevistas semiestructuradas y la observación en terreno.

En la tercera etapa se determinó el estado de madurez de la cultura de inocuidad de la organización, para ello, los resultados de la evaluación de las dimensiones de GFSI se asociaron al modelo de madurez propuesto por IBRO Academy (Ibáñez, s.f.).

Finalmente, con base a los resultados, se elaboró un plan de acción y un plan comunicacional, orientados a disminuir las brechas encontradas.

Universo y muestra

Para efectos de este estudio un universo finito de acuerdo con el número de involucrados de la empresa (desde la alta gerencia hasta operarios: 117 empleados). El tamaño de la muestra se calculó en función de la cantidad de trabajadores y correspondió a un total de 60 empleados.

Encuesta sobre cultura de inocuidad alimentaria

La encuesta basada en las cinco dimensiones en inocuidad alimentaria del documento expositivo de GFSI (2018), se elaboró a partir de la información obtenida de IBRO Academy (Ibáñez, s.f.) y tuvo como objetivo principal medir la cultura de inocuidad alimentaria de la empresa en estudio.

Se basó en 50 afirmaciones relacionadas con cada una de las dimensiones de la inocuidad alimentaria y se pidió a los encuestados que las evaluaran mediante una escala de respuesta tipo Likert de cinco puntos. A cada punto se le asignó un valor numérico: 1 = muy de acuerdo, 2 = algo de acuerdo, 3 = ni de acuerdo ni en desacuerdo, 4 = algo en desacuerdo y 5 = muy en desacuerdo. Con esta puntuación se analizó la información recolectada.

La forma de contestar cada afirmación fue seleccionando y marcando con una X la alternativa considerada más adecuada.

Entrevista semiestructurada sobre cultura de inocuidad alimentaria

El objetivo de este instrumento fue obtener información sobre los diferentes actores de la empresa implicados en la producción de ALC frente a la cultura de la inocuidad alimentaria para contrastar resultados de la encuesta y validar los datos. Se construyó tomando como base las recomendaciones realizadas por NSF International (2020).

El tamaño de la muestra para aplicar la entrevista fue calculado mediante un muestreo estratificado y en función de la cantidad de trabajadores que respondieron la encuesta de autoevaluación. Dicho tamaño fue de 40 empleados, de los cuales 7 pertenecerían al nivel 2 y 33 al nivel 3, sin embargo, a la hora de realizar las entrevistas de manera presencial, únicamente se pudo entrevistar a 6 empleados pertenecientes al nivel 2. El nivel 3 se entrevistó en su totalidad.

La entrevista se inició solicitando al entrevistado relatar una experiencia que hubiese tenido relacionada con la inocuidad, posteriormente se le preguntó ¿cómo se sintió en esa situación?, ¿cómo supo qué hacer?, ¿qué hubiese hecho diferente? y ¿qué esperaba de sus superiores?

Cada pregunta de la entrevista fue asociada con opciones de niveles de posibles respuestas, para de esta manera poder obtener datos cuantitativos al igual que en las encuestas.

Observación en campo sobre cultura de inocuidad alimentaria

Este instrumento fue elaborado con el fin de registrar información a partir de la observación de la planta sobre los diferentes actores de la empresa implicados en la producción de ALC frente a la cultura de la inocuidad alimentaria.

Se evaluaron comportamientos, como, por ejemplo, los comportamientos diarios en producción. Además, se observaron las instalaciones, los mensajes que se

publican, las señalizaciones y el servicio de limpieza que se tiene en general.

Para establecer las puntuaciones al analizar la información recolectada se diseñó y aplicó una tabla de ponderación y factorización.

A los resultados de la aplicación de la lista de verificación, se le adjudicó la escala de calificación siguiente: (1) Nunca: El factor no cumple el aspecto evaluado, (2) Casi nunca: El factor cumple lo básico del aspecto evaluado, (3) En ocasiones: El factor cumple parcialmente con el aspecto evaluado, (4) Casi siempre: El factor cumple moderadamente con el aspecto evaluado y (5) Siempre: El factor cumple excelentemente el aspecto evaluado

Estado de madurez de la cultura de inocuidad de la empresa

Se evaluó la madurez de la empresa, tomando como base el modelo de madurez propuesto por IBRO Academy (Ibáñez, s.f.). Bajo este modelo, y para cada dimensión GFSI, se tienen los “habilitadores” que son elementos de cada dimensión.

Para cada habilitador se definen niveles de madurez, son cinco niveles: 1. Dudar, 2. Reaccionar, 3. Conocer, 4. Predecir y 5. Interiorizar.

La matriz de madurez de la cultura de seguridad alimentaria explica para cada habilitador los cinco niveles de madurez.

Se evaluaron estos habilitadores para la empresa en estudio, dando una puntuación de uno (menos maduro) a cinco (más maduro) según el modelo. Los puntajes de los habilitadores en cada dimensión se promediaron para dar un puntaje para la dimensión relevante. Y los puntajes de las cinco dimensiones se

promediaron para un puntaje general de madurez de la cultura de inocuidad alimentaria en la misma escala.

Plan de acción para mejorar la cultura de inocuidad alimentaria

Tomando en cuenta que es importante enfocar la implementación de la cultura de inocuidad alimentaria en las brechas identificadas, se elaboró una propuesta de plan de acción considerando estas brechas y organizado según las dimensiones GFSI.

Plan comunicacional de cultura de inocuidad alimentaria

Además del plan de acción de mejora se elaboró un plan comunicacional, valorando que, en el documento de Benchmarking comparativo de esquemas que se implementan en la cadena alimentaria (GFSI, 2020), se establecieron 4 elementos necesarios para impulsar la cultura de inocuidad dentro de las empresas, entre ellos la comunicación sobre políticas y responsabilidades en materia de seguridad de los alimentos (plan comunicacional) con acciones y responsabilidades concretas. Los otros tres elementos: la formación, la opinión de los empleados sobre cuestiones relacionadas con la seguridad alimentaria y la medición del desempeño se consideraron previamente en el plan de acción.

Triangulación de la información

Con el objetivo de aumentar la validez y confiabilidad de los resultados mediante los diferentes métodos de evaluación utilizados (las encuestas, las entrevistas y lo observado), se realizó la triangulación de la información tomando como categorías el conocimiento en inocuidad alimentaria, el comportamiento del personal y las comunicaciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Información recolectada mediante la encuesta de autoevaluación

Los datos obtenidos de la encuesta fueron analizados estadísticamente. En la Tabla 2 se presenta el resumen de los parámetros estadísticos estimados de cada una de las dimensiones de cultura de inocuidad alimentaria para el nivel 2 y el nivel 3. En la

Tabla 1

Tabla de ponderación y factorización

Factor	Ponderación
Comportamientos	60
Mensajes	20
Señalizaciones	10
Instalaciones	5
Servicio de limpieza	5

Figura 1, se presentan diagramas de barra en los que se comparan los promedios por nivel y para el grupo en su totalidad para cada dimensión.

Resultados Nivel 2

Según los datos presentados en la Tabla 2 y la Figura 1, en el Nivel 2, las medias por dimensión oscilan entre 4.3 y 4.7. Las dimensiones muestran desviaciones relativas (DER), que varían entre 4.99 % y 12.37 %.

Resultado Nivel 3

De acuerdo con la información proporcionada en la Tabla 2 y en la Figura 1, en el Nivel 3, los valores de la media por dimensión se sitúan entre 4.00 y 4.40. Las desviaciones relativas oscilan entre 2.47 % y 14.50 %.

Resultado niveles combinados

Tal y como puede consultarse en la Tabla 2 y la Figura 1, se observa una diferenciación en las respuestas promedio entre el Nivel 2 y el Nivel 3, lo que indica heterogeneidad. Las DER promedio para las dimensiones del Nivel 2 (4.99 % a 12.37 %) son menores que las del Nivel 3 (2.47 a 14.50). Esto sugiere que, en promedio, hay una mayor variabilidad en las valoraciones para el Nivel 3 en comparación con el Nivel 2.

Después de aplicar la prueba T de Student para determinar si existe una diferencia significativa en la

cultura de inocuidad alimentaria entre los dos niveles, se obtuvo un valor de t de 6. Este valor se comparó con la tabla de valores críticos de la distribución t de Student, con un nivel de confianza del 95 %. Se observó que el valor p es significativamente menor que el valor crítico de t (una cola) de 2.13. Esto indica que existe evidencia estadística suficiente para afirmar que hay una diferencia significativa en la cultura de inocuidad alimentaria entre los dos niveles. Además, al considerar el valor p de dos colas, también se observó que es menor que el valor crítico de t (dos colas) de 2.78, lo que respalda la afirmación anterior.

Las personas ven que la inocuidad alimentaria está en la agenda de la empresa, como se establece en su visión y misión y en su política de inocuidad alimentaria, además, porque se transmiten mensajes para comunicar la inocuidad alimentaria a todos los empleados, sin embargo, consideran que desconocen si se mide la efectividad de la comunicación.

En la dimensión personas, los empleados manifiestan conocer claramente sus responsabilidades, reconocen que las capacitaciones recibidas han mejorado la forma en que realizan su trabajo y que saben los riesgos de inocuidad que están asociados a las actividades que realizan, sin embargo, expresaron que existe poco trabajo en equipo y que no se les ha

Tabla 2

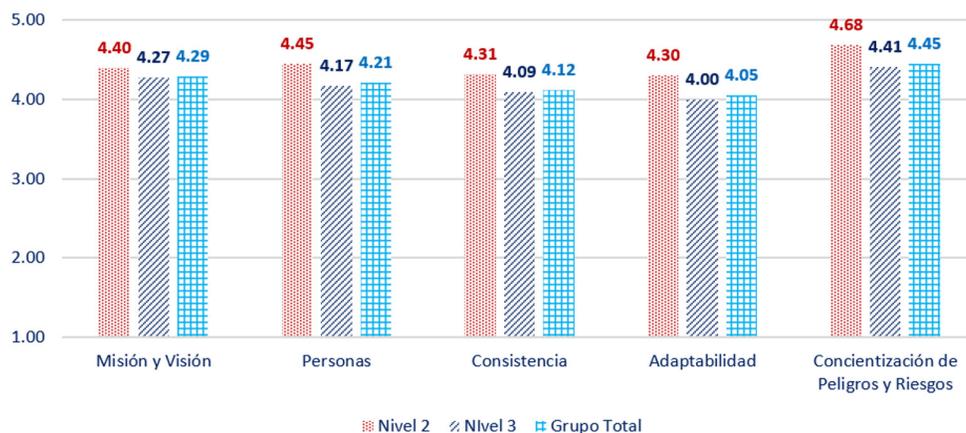
Resumen de parámetros estadísticos estimados de las dimensiones de Cultura de Inocuidad Alimentaria por nivel

Dimensión de Cultura de Inocuidad	Nivel 2			Nivel 3		
	Media	Desviación estándar	%DER	Media	Desviación estándar	%DER
Misión y Visión	4.4	0.22	5.01	4.3	0.24	5.62
Personas	4.5	0.55	12.37	4.2	0.6	14.5
Consistencia	4.3	0.4	9.31	4.1	0.18	4.5
Adaptabilidad	4.3	0.29	6.8	4	0.1	2.47
Concientización de Peligros y Riesgos	4.7	0.23	4.99	4.4	0.32	7.21
Promedio De Nivel	4.44			4.2		

Nota. DER: Desviación Estándar Relativa = ((Desviación estándar) / (Media)) * 100

Figura 1

Dimensiones de Cultura de Inocuidad Alimentaria por nivel



La adaptabilidad se evaluó como la más baja de las dimensiones consideradas, sin embargo, se piensa que hay poca diferencia en relación con las demás dimensiones.

Las personas ven la necesidad de que la empresa trabaje de manera aún más integral en la adaptabilidad.

La dimensión con puntuación más alta fue la concientización de peligros y riesgos. Los empleados manifiestan entender los peligros y riesgos en los niveles evaluados.

Se calculó y analizó también el porcentaje de cumplimiento para cada dimensión de cultura de inocuidad alimentaria, por nivel y para el grupo en su totalidad, el cual se resume en la Tabla 3.

Para analizar dicho porcentaje de cumplimiento se tomó como puntaje máximo 100 %, y se interpretaron los resultados de la siguiente manera:

- De 100 % a 81 % indica que la industria cuenta con una fuerte cultura de inocuidad alimentaria.
- De 80 % a 51 % indica que la industria cuenta con una buena cultura de inocuidad alimentaria.

- De 50 % a 26 % indica que la industria cuenta con una escasa cultura de inocuidad alimentaria.
- De 25 % a 0 % indica que la industria no cuenta con una cultura de inocuidad alimentaria.

Se evidencia de acuerdo con la Tabla 3 que el porcentaje de cumplimiento de cultura de inocuidad alimentaria para cada dimensión en todos los niveles es bastante alto, en el rango de 100 % - 81 %, lo que indica que la empresa posee una fuerte cultura de inocuidad alimentaria.

A partir del análisis de los datos obtenidos mediante la encuesta, se observó que el comportamiento responsable en las actividades diarias de los empleados de la empresa contribuye a un mayor porcentaje de cumplimiento de cultura de inocuidad alimentaria. Cada una de las cinco dimensiones

Tabla 3

Porcentaje de cumplimiento de Cultura de Inocuidad Alimentaria por nivel y para el grupo en su totalidad

Dimensión de Cultura de Inocuidad	% Nivel 2	% Nivel 3	% Grupo Total
Misión y Visión	88.0	85.4	85.8
Personas	89.1	83.3	84.3
Consistencia	86.3	81.7	82.5
Adaptabilidad	86.0	79.9	80.9
Concientización de Peligros y Riesgos	93.6	88.2	89.1

de la encuesta incluidas para medir la cultura de inocuidad alimentaria miden en efecto los aspectos considerados y permiten identificar las brechas con las cuales será posible mejorar el desempeño o reducir aún más los riesgos para la inocuidad alimentaria. La validez del contenido del instrumento de evaluación está fundamentada en el hecho que para su elaboración se ha utilizado como base el Documento Expositivo de GFSI (2018), el cual ha sido elaborado por un grupo técnico de trabajo focalizado en cultura de inocuidad alimentaria y según el documento, las dimensiones se encuentran fundamentadas en la ciencia y basadas en el análisis de los modelos existentes, utilizados para evaluar la inocuidad alimentaria y la cultura organizacional.

Información obtenida a través de entrevistas semiestructuradas

Con base en el análisis estadístico realizado por nivel y al obtenido para el grupo total se muestra en la Figura 2 el puntaje promedio para cada pregunta, en donde puede observarse que el nivel 2, manifiesta haber tenido experiencias sobre inocuidad, relacionadas mayormente con las instalaciones, mientras que en el nivel 3, la mayor parte de las experiencias han estado relacionadas con las personas. La situación al nivel 2 ha hecho que se sientan afectados por la situación mientras que en el nivel 3 se han sentido fuertemente afectados ante la misma. En general ambos niveles manifiestan conocer los procedimientos y saber

qué hacer ante una problemática relacionada con la inocuidad y coinciden en que es necesario planificar una respuesta antes de que ocurra un incidente, al igual que piensan que es primordial contar con el apoyo inmediato de sus superiores.

Información recopilada mediante observación en campo

Aplicando la tabla de ponderación y factorización se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 4. Como cada factor tiene una importancia relativa (peso) respecto de los demás factores, la media ponderada es la medida de tendencia central, que es apropiada en este caso, la cual resulta ser de aproximadamente 3.5, lo que indica que, según lo observado, la empresa cumple moderadamente con los factores evaluados.

Triangulación de la información para validar los resultados

La Tabla 5 resume el análisis del proceso de triangulación según las categorías consideradas.

Los resultados alcanzados ponen de manifiesto que los empleados cuentan con el conocimiento en inocuidad alimentaria lo cual se manifiesta en su comportamiento, sin embargo, existen aspectos que hay que mejorar, como el trabajo en equipo, la disponibilidad de documentación en planta para su consulta en caso de que sea necesario y el

Figura 2

Resumen de respuestas de entrevista por nivel

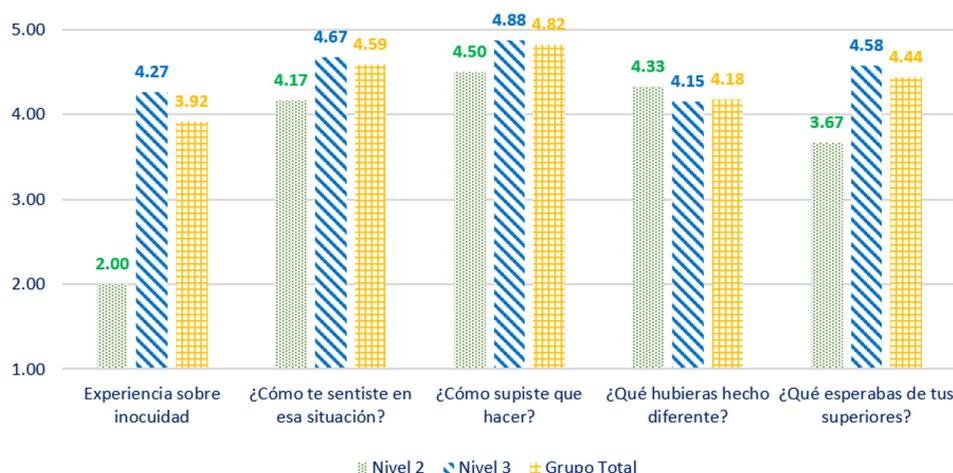


Tabla 4

Resultados de la observación en campo aplicando ponderación del factor

Factor	Ponderación del factor	Puntaje	Ponderación obtenida
Comportamientos	60	3.3	1.98
Mensajes	20	3.4	0.68
Señalizaciones	10	3.5	0.35
Instalaciones	5	5.0	0.25
Servicio de limpieza	5	4.5	0.23
TOTAL	100		3.49

empoderamiento de los empleados. La comunicación es buena, pero debe ocurrir de manera regular y ser accesible cada vez que se desee.

De esta forma, tras realizar el estudio de fiabilidad y validez, se puede evidenciar que la triangulación permitió la interpretación de los hallazgos en cuanto a la identificación de similitudes, diferencias, relaciones y crear generalizaciones, garantizando que las fortalezas y debilidades de cada método fueron compensados, y asegurando de esta manera una mejor propuesta de planes de acción de mejora de

Tabla 5

Triangulación de la información obtenida de las encuestas, entrevistas y observación en campo

Categoría	Encuesta	Entrevista	Observación en campo
Conocimiento en inocuidad alimentaria	Los empleados manifestaron conocer claramente sus responsabilidades, reconocieron que las capacitaciones recibidas han mejorado la forma en que realizan su trabajo y que saben los riesgos de inocuidad que están asociados a las actividades que realizan,	Identificaron claramente haber tenido una experiencia relacionada con la inocuidad y haberse sentido entre afectados y fuertemente afectados por dicha situación ya que conocen los riesgos y peligros que esto conlleva.	Se notó que los empleados conocen y comprenden la importancia de la inocuidad alimentaria y tienen claras sus responsabilidades. Cada uno sabe qué hacer.
Comportamiento del personal	Expresaron que existe poco trabajo en equipo y que no se les ha dado la responsabilidad para poder actuar directamente en caso de que surja un problema de seguridad alimentaria en su área. En general, saben que a través de su comportamiento en su puesto de trabajo pueden motivar a sus compañeros a ser mejor en lo que hacen, pero algunos no reconocen que, con su comportamiento, a veces perjudican el trabajo de los demás.	Todos expresaron saber qué hacer ante una problemática relacionada con la inocuidad pues manifiestan conocer los procedimientos y haber recibido capacitaciones, además de comentar brevemente que algunos procedieron a ayudar con la corrección inmediatamente, mientras que en otros casos trabajaron en equipo con otras áreas.	Se identificó en la mayoría de los empleados el cumplimiento de las BPM a través de lavado de manos antes de ingresar al área de procesos, además del uso de ropa limpia y correcto uso de redcilla entre otros. Durante la producción de los alimentos se observó que todos evitan comportamientos que puedan contaminar los alimentos, pero tienen el inconveniente de no poder consultar los procesos y procedimientos ante alguna necesidad porque la información no se encuentra disponible en planta.
Comunicación	Los empleados manifestaron que se transmiten mensajes para comunicar la inocuidad alimentaria, que estos son claros y que son comunicados en todos los niveles.	Expresaron que sabían qué hacer gracias a que se mantiene un diálogo continuo y planificado sobre la seguridad e inocuidad alimentaria dentro de la empresa.	La política de inocuidad es conocida por todos los empleados, pero no se hace referencia a ella regularmente en las comunicaciones de la empresa. Los mensajes de inocuidad se difunden a todo nivel y se hace uso de una diversidad de estrategias para su divulgación. La señalización de PCC es evidente al igual que la identificación de las áreas de materia prima para evitar contaminación cruzada.

cultura de inocuidad alimentaria para la empresa en estudio, tal como señala Jespersen y Wallace (2017), que al aplicar la triangulación de métodos y revisar los resultados es posible orientar adecuadamente los planes de mejora posteriores.

Diagnóstico del estado de madurez de la cultura de inocuidad de la empresa

La Tabla 6 muestra los resultados de evaluar los habilitadores del modelo de madurez propuesto por IBRO Academy (Ibáñez, s.f.).

En la Figura 3 se puede observar cómo están distribuidos la madurez para los habilitadores y en la Figura 4 la distribución de la madurez para cada dimensión.

Según los resultados, la madurez de la empresa se encuentra en el **nivel 3: CONOCER**. La descripción de esta etapa del modelo de madurez corresponde,

Figura 3

Distribución de la madurez por habilitador para la empresa en estudio



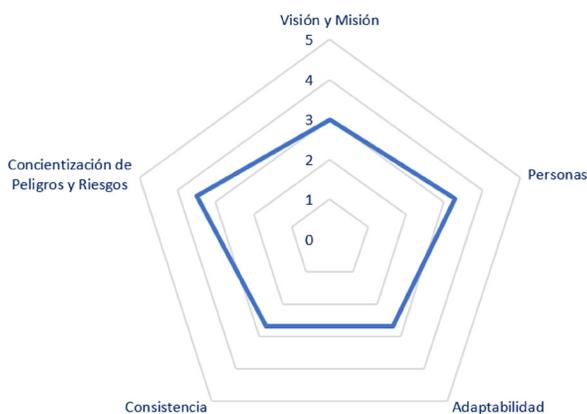
Tabla 6

Puntuación obtenida de los habilitadores para la empresa en estudio

Dimensión	Habilitador	Madurez Habilitador	Madurez Dimensión	Madurez de la Empresa
Valor y Misión	Mensajes de liderazgo	4	3.0	3.0
	Estrategia y planificación	3		
	Recursos	2		
Personas	Aprendizaje	3	3.3	
	Comunicación	4		
	Consecuencias	3		
Adaptabilidad	Cambio	2	2.7	
	Resiliencia	3		
	Actitud de equipo	3		
Consistencia	Sistema	1	2.7	
	Datos	3		
	Tecnología	4		
Concientización de Peligros y Riesgos	Percepción	3	3.5	
	Análisis de Riesgo	4		

Figura 4

Distribución de la madurez por dimensión para la empresa en estudio



a que las personas de toda la empresa **conocen** la seguridad alimentaria y demuestran ese conocimiento.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de la encuesta reflejaron que, en general, los empleados poseen una buena cultura de inocuidad alimentaria. El mayor porcentaje de cumplimiento de inocuidad alimentaria para el grupo total encuestado (60 empleados) se obtuvo en la dimensión de concientización de peligros y riesgos con un 89.1% y el menor porcentaje correspondió a la dimensión adaptabilidad con un 80.9%.

El análisis de datos realizado a la información obtenida mediante la entrevista reflejó que los empleados en general saben identificar claramente experiencias relacionadas con la inocuidad en su área y que conocen los riesgos y peligros que esto conlleva. Además, que gracias a las capacitaciones que reciben, conocen qué hacer en estos casos.

Los resultados de la observación en campo indicaron que los comportamientos de los empleados, los mensajes que se comunican, las señalizaciones, las instalaciones y el servicio de limpieza de la empresa cumplen moderadamente los aspectos evaluados.

La triangulación de los métodos empleados para recoger la información pone de manifiesto que los empleados cuentan con el conocimiento en

inocuidad alimentaria lo cual se manifiesta en su comportamiento, sin embargo, existen aspectos que hay que mejorar, como el trabajo en equipo, la disponibilidad de documentación en planta para su consulta en caso de que sea necesario y el empoderamiento de los empleados. La comunicación es buena, pero debe ocurrir de manera regular y ser accesible cada vez que se desee.

El grado de madurez de la empresa fue de aproximadamente 3.5, que de acuerdo con el modelo de madurez utilizado (propuesto por IBRO Academy y elaborado con información referencial de GFSI como base) corresponde al nivel **CONOCER**: las personas de toda la empresa **conocen** la seguridad alimentaria y demuestran ese conocimiento.

El plan de acción de mejora y el plan comunicacional propuestos en esta investigación, fueron elaborados basándose en las brechas identificadas, y han permitido el diseño de acciones que se consideran necesarias para mejorar aquellos aspectos que se estimaron oportunos en el momento y espacio de la evaluación y que se encaminan a mejorar la cultura de inocuidad alimentaria de la empresa en estudio.

REFERENCIAS

Codex Alimentarius (Rev. 2020). *Principios Generales de Higiene de los Alimentos. CXC 1-1969*. https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/en/?Ink=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252Fstandards%252FCXC%2B1-1969%252FCXC_001s.pdf

Ibáñez, A. (s.f.). *Cultura de Inocuidad Alimentaria* [MOOC]. IBRO Academy. <https://ibro-academy.com/courses/enrolled/1137224>

Iniciativa Global de Inocuidad Alimentaria, GFSI. (26 de febrero de 2020). *Benchmarking Requirements for CPOs Version 2020.1*. [Archivo PDF]. https://mygfsi.com/news-and-resources/?fwp_type=publications&keyword=What%20%80%99s%20Changing%20in%20Version%202020&_type=publications

Iniciativa Global de Inocuidad Alimentaria,

- GFSI. (2018). *Una Cultura de Inocuidad Alimentaria. Documento Expositivo de la GFSI. V1.0-4/11/18*. <https://mygfsi.com/wp-content/uploads/2019/09/GFSI-Food-Safety-Culture-Summary-SP.pdf>
- Jespersen, L. y Wallace, C. (2017). Triangulation and the importance of establishing valid methods for food safety culture evaluation. *Food Research International*. 100(1), 244-253. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.07.009>
- Ministerio de Salud de El Salvador, MINSAL. (2022). *Dirección de Epidemiología. Boletín Epidemiológico Semana 51 (del 19 al 25 de diciembre de 2021)* [Archivo PDF]. <https://www.salud.gob.sv/boletines-epidemiologicos-2021/>
- Ministerio de Salud de El Salvador, MINSAL. (2018). *Política Nacional de Seguridad Alimentaria y Nutricional* [Archivo PDF]. <https://w5.salud.gob.sv/22-11-2018-lanzamiento-oficial-de-la-politica-nacional-de-seguridad-alimentaria-y-nutricional/>
- NSF Internacional. (2020). *Cómo Evaluar la Efectividad de su Plan de Desarrollo de Cultura de Inocuidad* [Webinar]. Youtube. <https://youtu.be/yq2gK3wEIRw>
- Organización Mundial de la Salud, OMS. (2015, 3 de diciembre). *Informe de la OMS señala que los niños menores de 5 años representan casi un tercio de las muertes por enfermedades de transmisión alimentaria*. [https://www.who.int/es/news/item/03-12-2015-who-s-first-ever-global-estimates-of-foodborne-diseases-find-children-under-5-account-for-almost-one-third-of-deaths#:~:text=Las%20enfermedades%20diarreicas%20\(causadas%20por,las%20enfermedades%20de%20transmisi%C3%B3n%20alimentaria](https://www.who.int/es/news/item/03-12-2015-who-s-first-ever-global-estimates-of-foodborne-diseases-find-children-under-5-account-for-almost-one-third-of-deaths#:~:text=Las%20enfermedades%20diarreicas%20(causadas%20por,las%20enfermedades%20de%20transmisi%C3%B3n%20alimentaria)
- U.S. Food and Drug Administration. (2022). *Food Safety Culture Systematic Literature Review*. <https://www.fda.gov/media/163588/download>
- Yiannas Frank (2009). *Cultura de Inocuidad Alimentaria. Crear un Sistema de Gestión en Inocuidad Alimentaria Basado en el Comportamiento*. <https://www.achipia.gob.cl/wp-content/uploads/2017/10/CULTURA-DE-LA-INOCUIDAD-Frank-Yiannas.pdf>



Revista MINERVA

Plataforma digital de la revista: <https://minerva.sic.ues.edu.sv>

Artículo Científico | Scientific Article

Insectos plagas del pino caribe y sus enemigos naturales en la Reserva Forestal La Yeguada, Panamá

Insect pests of Caribbean pine and their natural enemies at the La Yeguada Forest Reserve, Panama

Oswaldo Rodríguez-Flores^{1,2}, Rosa María Estrada-Hernández^{1,3}

Correspondencia: oroflores@yahoo.com

- 1 Museo de Entomología, Departamento de Protección Agrícola y Forestal, Universidad Nacional Agraria; Managua, Nicaragua
- 2 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3659-2584>
- 3 ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8621-4015>

RESUMEN

En Panamá, el pino caribe (*Pinus caribaea*) es un recurso forestal importante, sin embargo, el conocimiento de los problemas fitosanitarios de este, en el país, es poco. Se desarrolló esta investigación para identificar los insectos plagas que causan daños en la producción maderera de pino y conocer sus enemigos naturales. La investigación se realizó en plantaciones de pino caribe de la Reserva Forestal La Yeguada, Panamá. En los aserraderos e inmediaciones se realizaron muestreos de daños en madera, instalación de trampas Lindgren, cría de insectos en jaulas de emergencia y muestreos de árboles afectados. Para los parasitoides se estimó el nivel de parasitoidismo larval a lo largo del fuste y se compararon estadísticamente. Se encontraron dos tipos de daños en la madera aserrada: perforaciones y el manchado azul. Las perforaciones fueron ocasionadas por *Xyleborus affinis* y el manchado por un hongo asociado con un escarabajo del género *Ips*. Se encontraron diez especies

DOI: [10.5377/revminerva.v7i3.18905](https://doi.org/10.5377/revminerva.v7i3.18905)

Enviado: 9 de octubre de 2023

Aceptado: 16 de enero de 2024

Palabras clave: ambrosiales, *Ips apache*, control biológico, plagas forestales, termitas, escarabajos descortezadores.

Keywords: Ambrosia beetles, *Ips apache*, biological control, forest pest, termites, bark beetles.



Este contenido está protegido bajo la licencia CC BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

insectiles de enemigos naturales, de estas, nueve son depredadores y un parasitoide. Dentro de los depredadores, dos especies de los géneros *Epiphloeus* y *Nemozoma* se especializan en escarabajos descortezadores y ambrosiales. El enemigo natural más abundante fue *Roptrocerus xylophagorum*, presentando niveles de parasitoidismo para *Ips* sp. de 12,6 %, valor frecuente para este parasitoide en especies de *Ips*. La distribución del parasitoide a lo largo del fuste fue mayor en la sección apical, lo cual está relacionado con la mayor presencia de larvas de tercer estadio presentes en esta sección.

ABSTRACT

Caribbean pine (*Pinus caribaea*) in Panama is an important forest resource; however, in the country there is little knowledge of its phytosanitary problems. This research was developed to identify the insect pests that cause damage in pine timber production and to know their natural enemies. The research was carried out in Caribbean pine plantations at Yeguada Forest Reserve, Panama. In the sawmills and surrounding areas, were carried out: wood damage sampling, setting Lindgren traps, breeding insects in emergency cages and sampling affected trees. For parasitoids, level of larval parasitoidism was estimated along the stem and statistically compared. Two types of damage were found in the sawn wood: perforations and blue staining. Perforations were caused by *Xyleborus affinis* and the blue spotting by a fungus associated with a beetle of the genus *Ips*. Ten insect species of natural enemies were found, nine of these are predators and one parasitoid. Among predators, two species of *Epiphloeus* and *Nemozoma* genera specialize in bark and ambrosia beetles. *Roptrocerus xylophagorum* was most abundant natural enemy, his parasitoidism levels on *Ips* sp. is 12.6%, frequent value for this parasitoid in *Ips* species. The distribution of the parasitoid along the stem was greater in the apical section, which is related to the greater presence of third-stage larvae in this section.

INTRODUCCIÓN

El pino caribe (*Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Sénécl.) W.H. Barrett & Golfari) es una de las especies forestales exóticas más conocidas en Panamá (Villalaz-Pérez et al. 2017). La experiencia forestal en el país con esta especie se ha adquirido en diferentes proyectos (Jaén, 2012). Por ejemplo, el proyecto (pionero) de plantaciones de pino caribe establecidas en la Reserva Forestal La Yeguada (Arcia, 2003; Howell, 1972). Es una de las especies incluidas en los programas de plantaciones anuales de la República de Panamá, establecida principalmente en sitios que tienen suelos de baja calidad o degradados que no son adecuados para el cultivo de otras especies maderables más valiosas (Jaén, 2012; Lyon et al. 2012).

Los insectos que se comportan como plagas, en las plantaciones de pino caribe, están muy poco estudiados en Panamá, en comparación con otros lugares de la región centroamericana. En el país, las investigaciones realizadas en plagas de pinos se han enfocado en aspectos ecológicos y taxonómicos de especies consideradas plagas importantes, como los escarabajos descortezadores del género *Ips* (Jaén, 2013; Smith y Cognato, 2009; Rodríguez et al. 2011) y algunos escarabajos ambrosiales (Guerra-Rodríguez, 2011).

La Reserva Forestal La Yeguada es un proyecto de reforestación caracterizado por tener la mayor área plantada de pino caribe en Panamá (Arcia, 2003). Durante los últimos años, las empresas dedicadas a la explotación maderera en la Reserva han reportado daños en la madera de pino, lo cual ha impactado negativamente en su comercialización. Este problema se agrava porque no se cuenta con capacidades, ni el conocimiento básico sobre los agentes causantes de daños en pino a nivel local y nacional. Solo una investigación relacionada con insectos de importancia forestal ha incluido a esta Reserva, que se enfocaba en estudiar la comunidad de los escarabajos ambrosiales de la subfamilia Scolytinae (Coleoptera: Curculionidae) en ecosistemas de pino en Panamá (Guerra-Rodríguez, 2011).

La detección e identificación adecuada de plagas son cruciales para la correcta aplicación de medidas fitosanitarias (Food and Agriculture Organization [FAO], 2006). Los insectos fitófagos en los sistemas forestales presentan variaciones en la densidad poblacional, estos cambios están regulados por factores bióticos y abióticos que afectan la vitalidad y supervivencia de los individuos, siendo los principales el clima y el conjunto de antagonistas naturales (Roversi y Nannelli, 2012). Dentro de los antagonistas naturales están los enemigos naturales o agentes del control biológico (depredadores, parasitoides y patógenos) (Hajek y Eilenberg, 2018). La caracterización precisa de los agentes de control biológico es un paso clave en los programas de control (Lima et al., 2018). Esto adquiere importancia en los ecosistemas forestales, porque los agentes del control biológico se proyectan positivamente en la regulación de plagas, debido a que, intuitivamente, los ecosistemas forestales deberían ser más favorables para ellos (Kenis et al., 2017).

En Panamá el pino caribe contribuye en la transformación de suelos degradados o de baja calidad, a áreas de uso forestal. Además, realiza

aportes a la economía nacional, a la preservación de los bosques nativos y, específicamente, a la dinámica comercial y ambiental de la Reserva Forestal La Yeguada. Sin embargo, el conocimiento de sus plagas y enfermedades es poco en el país, siendo esto una condición negativa al momento de enfrentar los problemas fitosanitarios que le ocurren a esta especie. Con el propósito de identificar los insectos que están causando daños en la producción maderera de la Reserva Forestal La Yeguada e identificar aspectos taxonómicos y ecológicos de sus enemigos naturales, se realizó la presente investigación. La cual, además de explicar un problema local, aportará al conocimiento de las plagas de pino caribe en Panamá y sus enemigos naturales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del estudio

Los muestreos se realizaron en la Reserva Forestal La Yeguada, ubicada en el Corregimiento La Yeguada, distrito de Calobre, Provincia de Veraguas, República de Panamá. Tiene una extensión de 7 802 hectáreas (González, 1990) con un área de reforestación de 2 333,5 hectáreas de *P. caribaea* var. *hondurensis* (Gallardo, 1998). Está ubicada entre las coordenadas 8°27'33" hasta 8°31'00" latitud norte y 80°49'00" hasta 80°54'00" longitud oeste (González, 1990). La altitud fluctúa entre los 540 y 1350 m.s.n.m. (Instituto Nacional de Recursos Naturales Renovables [INRENARE], 2000).

Procedimiento de muestreo

Con el propósito de identificar taxonómicamente las plagas que afectan a los productos comerciales obtenidos del sistema forestal e identificar enemigos naturales de las plagas encontradas, se muestrearon aserraderos, áreas de corte y rodales maduros de *P. caribaea* var. *Hondurensis* con una edad de 20 años. Se realizaron dos muestreos durante el año 2015, un muestreo en abril durante la estación seca y otro en junio durante la estación lluviosa. En el muestreo de junio, además de los muestreos de depredadores, se realizaron muestreos para identificar características bioecológicas de los parasitoides de escarabajos descortezadoras.

Muestreo de daños y sus agentes causales

Se muestrearon dos aserraderos donde se realizaron tres tipos de muestreos: directo en las estructuras afectadas, cría de insectos asociados a los daños y muestreo de insectos plagas en los aserraderos y alrededores. La cría de insectos asociados a los

daños, consistió en colocar secciones de los árboles y madera aserrada afectada en jaulas diseñadas para este propósito. Las jaulas tenían dimensiones de 0.60 m de alto, 1.20 m de ancho y 0,50 m de profundidad, construidas con tubo PVC de ½" de diámetro, forradas con tela de nylon de 1 250 agujeros por pulgada cuadrada. El muestreo de insectos plagas (descortezadores, barrenadores, ambrosiales y termitas) se realizó en los aserraderos y alrededores. Para los descortezadores, barrenadores y ambrosiales, en cada sitio se instalaron tres trampas Lindgren de ocho embudos por un periodo de 48 horas. Las trampas fueron cebadas con esencia de trementina y alcohol etílico al 96 % a razón 1:1, se instalaron a una altura de 0,5 m del suelo, y con una distancia de 200 m entre ellas. Para el muestreo de termitas se empleó el método de muestreo por transecto, estos se realizaron en dos áreas del bosque contiguas a los aserraderos. La metodología utilizada fue la descrita por Eggleton et al. (1997), revisando diferentes microambientes: suelo y hojarasca, hasta una profundidad de cinco cm, troncos y ramas caídas en diferentes estados de descomposición, incluyendo árboles y troncos en pie hasta una altura de dos metros para la búsqueda de nidos o galerías.

Muestreo de depredadores de escarabajos descortezadores y de escarabajos ambrosiales en pino

Se utilizaron tres métodos: captura con trampas Lindgren, captura en jaulas de emergencia y captura directa en galerías. El método de muestreo de depredadores fue el mismo utilizado para los descortezadores, barrenadores y ambrosiales, utilizando el principio de alelomonas de los semioquímicos utilizados. La captura en jaulas de emergencia consistió en colocar estructuras de madera de pino afectadas y con presencia de las plagas identificadas en el primer muestreo y capturar todos los insectos emergidos en las jaulas.

Muestreo de depredadores y parasitoides en galerías del descortezador del pino

Con el propósito de capturar parasitoides y depredadores larvales o pupales y determinar niveles de parasitoidismo, se seleccionaron cuatro árboles adultos derribados y afectados (30 días). Las alturas de los árboles eran de 24.7 a 32.68 m, el diámetro a la altura del pecho entre 0.33 – 0.47 m y la altura comercial entre 10.7 - 16 m. El tallo principal de cada árbol fue delimitado en cuatro secciones: base del fuste comercial, medio del fuste comercial,

ápice del fuste comercial y tallo central con ramas. En cada sección se realizaron muestreos basados en la metodología utilizada por Nebeker et al. (1978), pero modificada en cuanto al área de descortezado para muestreo, que consistió en descortezar en cada sección del árbol un área de 0.10 m x 0.20 m a cada costado.

Identificación de los insectos plagas, sus depredadores y parasitoides

Los insectos encontrados fueron identificados taxonómicamente y depositados en las colecciones entomológicas del Programa Centroamericano de Maestría en Entomología de la Universidad de Panamá, Panamá y del Museo de Entomología de la Universidad Nacional Agraria, Nicaragua. Las literaturas utilizadas para la identificación taxonómica fueron Hulcr y Smith (2010) y Douglas et al. (2019) para escarabajos ambrosiales y escarabajos descortezadores; Constantino (2002a) y Mill (1983) para termitas; De Vere Graham (1969), Hanson y Gauld (1995) y Fernández (2003) para depredadores y parasitoides del orden Hymenoptera; Leavengood (2008), Opitz (2008) y Kolibáč (2013) para depredadores del orden Coleoptera. Los especímenes fueron observados en un estereoscopio Motic SMZ-168 con magnificación de 15 - 100x y un microscopio Motic BA310E con magnificación de 40 - 1 000x. Las fotografías fueron realizadas con una cámara DSLR Canon montada en un estereoscopio VanGuard 1272ZL, la edición de estas fue con el programa Adobe PhotoShop CS6.

Análisis estadísticos

Para determinar los porcentajes de parasitoidismo en descortezadores se utilizó la fórmula:

$$\text{Porcentaje de parasitoidismo} = \frac{\text{Cantidad de larvas parasitoidadas}}{\text{Cantidad de total de larvas registradas}} \times 100$$

Se realizaron comparaciones estadísticas de las capturas de parasitoides en las secciones del árbol por medio de Análisis de Varianza (ANOVA) y pruebas de comparación de medias con el estadístico de Tukey. Todas las pruebas estadísticas se realizaron con un valor de significancia de 0,05; además se realizaron pruebas de normalidad (estadístico Shapiro-Wilk) y pruebas de Homocedasticidad de la varianza (estadístico Levene) de los datos para realizar la prueba ANOVA. Los análisis se realizaron con los programas STATISTICA versión 8 y SPSS versión 24.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Daños encontrados, sus agentes causales y otros insectos plagas

En la madera aserrada, dos tipos de daños fueron identificados: perforaciones (figura 1a) y el manchado azul de la madera (figura 1d). Un total de 90 especímenes del escarabajo *Xyleborus affinis* Eichhoff, 1868 (Coleoptera, Curculionidae) (figura 1b-c) emergieron de las jaulas de crías, también esta especie fue capturada en las trampas instaladas en las áreas de corte de los aserraderos. En los muestreos una especie del género *Ips* (Coleoptera, Curculionidae) (figura 1d-e) fue encontrada en abundancia (761 especímenes) en los árboles recién derribados en las áreas de corte de los aserraderos. Con respecto a las termitas, se encontraron 88 especímenes con tres especies: *Nasutitermes corniger* (Motschulsky, 1855), *N. glabritergus* Snyder and Emerson, 1949 (Blattodea, Termitidae) y *Heterotermes convexinotatus* (Snyder, 1924) (Blattodea, Rhinotermitidae). La especie más abundante fue *N. corniger*, con 26 especímenes. Con respecto a *N. glabritergus* y *H. convexinotatus* se registraron 22 y 18 especímenes, respectivamente.

X. affinis es una especie con hábitos xilomicetófagos utilizando diferentes hospederos no emparentados, entre ellos varias especies del género *Pinus* (Zanuncio, 2002). Es una especie con amplia presencia en los trópicos americanos (Macedo-Reis et al. 2016; Pérez-De La Cruz et al. 2016). En Panamá se ha encontrado en localidades con predominio de Pino (Lyon et al. 2012) y en bosques del área del canal de Panamá (Rodríguez-Flores y Barrios, 2020). La importancia de *X. affinis* radica en los daños estructurales que puede producir en la madera de uso comercial por las galerías que construye (Rangel et al. 2012), siendo mayores que otros tipos de escarabajos ambrosiales, debido a la organización familiar, a las divisiones de labores de la progenie, así como la conducta de sobreponer sus poblaciones dentro de un mismo huésped (Sobel et al. 2015). Lo anteriormente planteado refuerza el planteamiento de que esta especie está afectando directamente la calidad de la madera de pino en la Reserva Forestal La Yeguada.

Con respecto a las termitas encontradas, las especies *N. corniger* y *H. convexinotatus* son consideradas plagas de estructuras de maderas (Constantino, 2002b). *N. corniger* es una especie neotropical con una gran adaptabilidad a un amplio rango de hábitats, en Centroamérica, por ejemplo, es común en tierras bajas (Dunn y Messier, 1999). Esta especie es considerada una de las plagas más importantes

Figura 1

Daños encontrados en pino caribe y sus agentes causales. A. Perforaciones en madera aserrada realizada por *Xyleborus affinis*; B. *Xyleborus affinis* en vista lateral; C. Declive elitral de *Xyleborus affinis*; D. Madera aserrada con el hongo del manchado azul; E. *Ips cf. apache* en vista lateral; F. Declive elitral de *Ips cf. apache*



en el nuevo mundo (Constantino, 2002b; Álvarez, 2016; Boulogne et al. 2017). Su alimentación es variada: madera seca, húmeda o en descomposición (He et al. 2013), sin embargo, se ha observado que tiene preferencia por madera recién descompuesta (Bustamante y Martius, 1998). De la especie *H. convexinotatus*, al igual que el género *Heterotermes*, existe muy poca información respecto a subbiología y distribución geográfica. Las especies del género *Heterotermes* son consideradas de importancia económica, se encuentran ampliamente distribuidas en Suramérica, pueden encontrarse tanto en hábitat urbanos como naturales (Constantino, 2000). Con respecto a *N. glabritergus*, hasta la fecha no se cuentan con datos sobre su ecología o biología, existen algunos registros de su distribución geográfica (Costa Rica, Panamá y Ecuador), por lo que es considerada neotropical (Krishna, 2013). En las zonas donde se ubicaron los transectos no se observaron árboles y estructuras de madera con afectaciones, tampoco los propietarios y trabajadores de los aserraderos manifestaron problemas vinculados con termitas. La presencia de estas especies de termitas en el sistema productivo de pino se debe a la disponibilidad constante de madera que el sistema genera, ya sean como desecho, sobrantes o bien por la mortalidad de los árboles. Aunque pueden ser un problema fitosanitario, su presencia en el sistema forestal se

identifica como parte de la fauna degradadora de materia vegetal. Esto porque muchas especies de termitas tienen roles importantes en los procesos de descomposición, aireando el suelo por medio del ciclo de nutrientes, reciclando materia vegetal y fijando nitrógeno (Vasconcellos y da Silva, 2010).

El manchado azul de la madera es ocasionado por hongos de los géneros *Grosmannia* y *Ceratocystis* (Ascomycota: Sordariomycetes), los cuales son transmitidos por las especies de escarabajos descortezadores del género *Ips* (Douglas et al. 2019; Krokene y Solheim, 1998; Meng et al. 2015). La especie de descortezador del género *Ips* encontrada en todos los muestreos es caracterizada por tener seis pares de espinas a cada lado del declive elitral y el disco elitral con punturaciones entre las estrías (figura 1e y f). Dentro del género *Ips* hay dos especies que presentan estas características morfológicas: *I. apache* e *I. calligraphus* (Douglas et al. 2019), ambas especies presentes en Panamá (Jaén, 2013; Smith, y Cognato, 2009). Sin embargo, identificar estas dos especies, a través de caracteres morfológicos, es difícil debido a la similitud que tienen entre ellas. La distribución conocida de *I. calligraphus* indica que esta especie habita en el Neártico, Antillas Mayores y Filipinas, mientras que *I. apache* se distribuye desde el sureste de los Estados Unidos hasta Panamá (Douglas et al. 2019). Esta condición conlleva a

proponer que la especie de *Ips* de seis espinas que se encontró en el área de estudio, es *I. apache*. No obstante, para comprobar esto es fundamental utilizar protocolos adecuados de identificación taxonómica, como el realizado por Smith y Cognato (2009).

Depredadores y parasitoides de descortezadores y escarabajos ambrosiales

Se encontraron nueve especies depredadoras y una especie parasitoide de escarabajos descortezadores (Tabla 1). Dentro del grupo de especies depredadoras, siete se observaron depredando larvas, pupas y adultos de *I. cf. apache* durante los muestreos. Una especie depredadora fue capturada en las trampas instaladas en los aserraderos y una en las jaulas de emergencia. El parasitoide *Roptrocercus xylophagorum* (Ratzeburg, 1844) fue la especie que más se capturó durante los muestreos, actuando como parasitoide de larvas de *I. cf. apache*.

R. xylophagorum (Figura 2a-c) es un ectoparasitoide idiobionte de larvas y pupas de Scolytinae (Coleoptera, Curculionidae) que afectan coníferas, especialmente de los géneros *Pinus* y *Picea* (Mills, 1983; Samson, 1984; Espelie et al. 1996). Este parasitoide, en especies del género *Ips*, tiene una marcada conducta de ovipositar un huevo por hospedero, así como una preferencia de oviposición en el tercer instar larval y en la etapa de pupa del hospedero (Samson, 1984).

Es una de las especies de parasitoides de escarabajos descortezadores más abundantes (Wegensteiner et al. 2015), con amplia distribución, conocida de países de Europa, América, Asia y Oceanía (De Vere Graham, 1969; Espelie et al. 1996; Mendel y Halperin, 1981; Garrido y Nieves-Aldrey, 1999; Doychev et al. 2016). En Centroamérica se ha reportado en Guatemala (De Vere Graham, 1969). En Panamá, una especie no identificada del género *Roptrocercus* ha sido encontrada parasitoidando larvas de *Ips grandicollis* (Rodríguez et al. 2011). Sin embargo, *R. xylophagorum*, a la fecha, no se había registrado para Panamá, por lo tanto, su hallazgo en el presente trabajo constituye el primer registro de la especie para este país.

Dos especies del orden Coleoptera depredadoras fueron encontradas en los muestreos, pertenecientes a las familias Cleridae y Trogossitidae. Ambas familias tienen varias especies depredadoras de escarabajos descortezadores (Wegensteiner et al. 2015; Stephen y Dahlsten, 1976; Hérard y Mercadier, 1996). Sin embargo, las especies depredadoras de Trogossitidae exhiben conductas de depredación especializada, mientras que las de Cleridae exhiben conductas generalistas (Kohnle y Vité, 1984). Tres especímenes adultos de una especie del género *Nemozoma* (Trogossitidae) se obtuvieron de las jaulas de emergencia. Los representantes del género *Nemozoma* son depredadores, los adultos viven juntos con sus larvas bajo la corteza de coníferas cazando especialmente

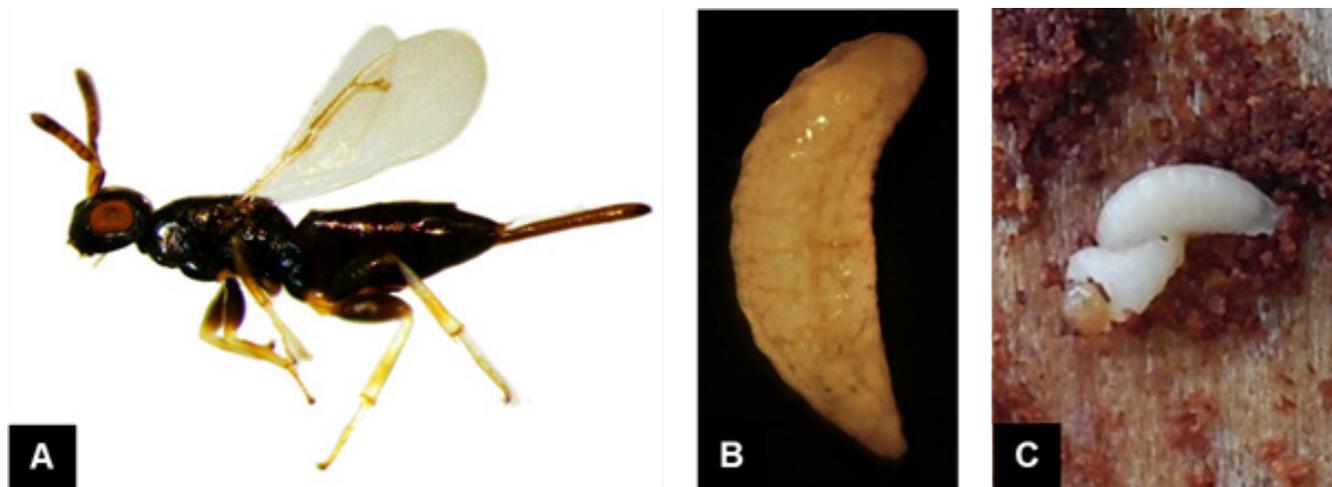
Tabla 1

Depredadores y parasitoides encontrados en el sistema forestal de pino de la Reserva Forestal La Yeguada, Panamá

Conducta observada	Insecto (orden: nombre científico)	Especímenes capturados	Hospedero/presa
Parasitoide	Hymenoptera: <i>Roptrocercus xylophagorum</i>	107	<i>Ips cf. apache</i> .
Depredador	Coleoptera: <i>Nemozoma</i> sp. <i>Epiphloeus</i> sp.	3 2	<i>Xyleborus affinis</i> Varias especies de Scolytinae
Depredador ocasional	Hymenoptera: <i>Solenopsis</i> sp. <i>Polybia occidentalis</i> Oliver, 1791 <i>Agelaia areata</i> (Say, 1837) <i>Agelaia myrmecophila</i> (Ducke, 1905) <i>Pseudomyrmex</i> sp. <i>Paratrechina</i> sp. <i>Neivamyrmex</i> sp.	17 3 2 2 1 1 1	<i>Ips cf. apache</i>

Figura 2

Parasitoide *Roptrocerus xylophagorum*. A. Hembra en vista lateral; B. Larva; C. Larva de *Roptrocerus xylophagorum* parasitoidando larva de *Ips cf. apache*



escarabajos descortezadores (Kolibáč, 2013). Con respecto a Cleridae, dos especímenes de una especie del género *Epiphloeus* fueron capturados con las trampas instaladas en el área de corte. Los representantes del género *Epiphloeus* son depredadores, estos frecuentan los troncos caídos para depredar adultos y larvas de insectos xilófilos, como los escarabajos descortezadores (Opitz, 2008). En Panamá, cuatro especies están presentes: *E. duodecimmaculatus*, *E. fundurufus*, *E. princeps* y *E. tigrinus* (Opitz, 2014).

Las especies del orden Hymenoptera depredadoras encontradas en los muestreos, exhibieron conductas de captura activa y constante de larvas, pupas y adultos de *Ips cf. apache*. La actividad depredadora exhibida por estas especies con el descortezador del género *Ips* posiblemente ocurra de forma ocasional. Esto debido a que la depredación sucedió posterior al descortezamiento que se realizó durante los muestreos, en los cuales había una exposición constante de inmaduros y adultos de esta especie. En la clase Insecta, los grupos taxonómicos sobresalientes con especies depredadoras de descortezadores incluyen Coleoptera, Diptera y Hemiptera (Heteroptera), existen otros ordenes insectiles con especies depredadoras, pero tienen poco impacto en la dinámica poblacional de los escarabajos descortezadores, por lo tanto, han recibido poca atención de investigación (Wegensteiner et al. 2015). La interacción de Formicidae y Vespidae

con escarabajos descortezadores muy poco se ha documentado, esto posiblemente esté relacionado con el poco impacto significativo que realizan en la dinámica poblacional de los escarabajos descortezadores.

Comportamiento y niveles de parasitoidismo de *R. xylophagorum* en *Ips cf. apache*

Un total de 94 larvas de *I. cf. apache* se encontraron parasitoidadas por *R. xylophagorum*, representando un 12,6 % de parasitoidismo general en larvas (Tabla 2). El porcentaje de parasitoidismo osciló entre 5 a 19 % en los árboles muestreados. Se determinó la distribución de las larvas de *I. cf. apache* a lo largo del fuste de los árboles muestreados y los niveles de parasitoidismo de *R. xylophagorum* en esta distribución. Encontrándose diferencias estadísticas (Prueba ANOVA $P < 0.05$) en la cantidad de larvas parasitadas en las secciones de los árboles. La diferencia fue entre la base y la sección de ramas, en esta última se identifica una mayor cantidad de larvas parasitoidadas, mientras que en las otras secciones las cantidades no fueron diferentes estadísticamente (Tabla 3).

Los niveles de parasitoidismo de *R. xylophagorum* encontrados en el muestreo están dentro de los niveles reportados para este parasitoide en especies del género *Ips*. En Australia, investigaciones en laboratorio, evaluaron la eficacia y el establecimiento

Tabla 2

Características cuantitativas del parasitoidismo por *Roptrocerus xylophagorum* en larvas de *Ips cf. Apache*

Parámetro	Árbol muestreado				Total
	1	2	3	4	
Larvas totales encontradas	160	202	209	175	746 ± 11,47
Larvas parasitadas	9	23	39	23	94 ± 6,13
Porcentaje de parasitismo	5,62 %	11,38 %	18,66 %	13,14 %	12,60 %

Tabla 3

Niveles de parasitismo de *Roptrocerus xylophagorum* en las secciones de los árboles muestreados en la Reserva Forestal La Yeguada, Panamá.

Sección del árbol	Larvas totales encontradas	Larvas en tercer estadio	Larvas parasitoidadas ^a	Porcentaje de parasitoidismo
Fuste-base	161 ± 18,12 a	47 ± 8,11 b	7 ± 0,25 b	7,44
Fuste-medio	147 ± 7,27 a	35 ± 0,62 b	20 ± 1,68 ab	21,27
Fuste-ápice	229 ± 7,68 a	102 ± 7,77 ab	19 ± 1,54 ab	20,21
Ramas	209 ± 11,23 a	91 ± 1,08 a	48 ± 3,62 a	51,06
Total	746 ± 5,74	275 ± 2,94	94 ± 1,36	100

Nota: letras diferentes en la misma columna, indican diferencias estadísticas ($p < 0,05$).

de *R. xylophagorum* como parasitoide de *I. grandicollis*, las tasas de parasitoidismo encontradas en larvas oscilaron entre 8,8 y 12,5 % (Samson y Smibert, 1986). En estudios realizados en Estados Unidos las tasas de parasitoidismo de esta especie sobre *I. paraconfusus*, en campo, alcanzaron un 10 % (Ball y Dahlsten, 1973). Mientras que, en Bulgaria, los niveles de parasitoidismo sobre *I. typographus* fue de un 1,6 % (Georgiev y Stojanova, 2006). Con respecto a la diferenciada concentración del parasitoide en la sección del tallo donde se forma la copa, esto puede estar relacionado con el grosor de la corteza y la alta presencia de larvas de tercer estadio de *Ips cf. apache* en esta sección (Tabla 3). Se ha dicho que el grosor de la corteza, una función del diámetro limita la capacidad de los parasitoides para ovipositar a través de la corteza y llegar a sus hospederos (Nuorteva, 1956; Ryan, 1962). Ball & Dahlsten (1973) encontraron ó una marcada tendencia del parasitoidismo de himenópteros sobre *Ips paraconfusus* en ramas de pino de menor diámetro. Estudios realizados con *R. xylophagorum* en *Ips grandicollis* encontraron una marcada preferencia de oviposición en el tercer instar larval (Samson, 1984). En un estudio con parasitoides,

que incluía a *R. xylophagorum*, se encontraron altas tasas de parasitoidismo sobre *Ips spp.* en el tronco superior de dos especies de pino (Berisford et al. 1971).

CONCLUSIÓN

En la Reserva Forestal La Yeguada, se identificaron dos tipos de daños en la madera aserrada de pino: perforaciones y el manchado azul. Las perforaciones son ocasionadas por el escarabajo *X. affinis*, mientras que el manchado azul es ocasionado por un hongo, el cual está asociado con una especie de escarabajo descortezador del género *Ips* encontrada en abundancia durante los muestreos.

Se encontraron diez especies de insectos considerados enemigos naturales de los insectos relacionados con los daños encontrados. De estas especies, nueve actúan como depredadores y una como parasitoide. Dentro del grupo de los depredadores, dos especies se especializan en escarabajos descortezadores y ambrosiales, encontrándose evidencias de depredación en galerías de *X. affinis* de un coleóptera del género *Nemozoma*.

El enemigo natural más abundante fue la avispa parasitoide *R. xylophagorum* con un 12,6 % de parasitoidismo de larvas del género *Ips*. La distribución del parasitoide fue mayor en la sección apical del fuste de los árboles.

AGRADECIMIENTOS

Al Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD) por el financiamiento parcial de la presente investigación. A los profesionales del Ministerio de Ambiente de Panamá: Fidencio Aisprua y Bolívar Jaen, por brindar las facilidades de acceso a la Reserva Forestal La Yeguada.

REFERENCIAS

- Alvarez, S. (2016). Potential economic costs of invasive structural pests: conehead termites, *Nasutitermes corniger*, in Florida. *Journal of Environmental Planning and Management*, 59(12), 2145-2162.
- Arcia, D. (21-23 de mayo de 2003). Reforestación en áreas degradadas de Panamá, el caso de la Yeguada, Veraguas: una respuesta concreta para generar empleo y mitigar la pobreza. V Congreso Forestal Centroamericano, Ciudad de Panamá, Panamá.
- Ball, J. C. y Dahlsten, D. L. (1973). Hymenopterous parasites of *Ips paraconfusus* (Coleoptera: Scolytidae) larvae and their contribution to mortality: I. Influence of host tree and tree diameter on parasitization. *The Canadian Entomologist*, 105(11), 1453-1464.
- Berisford, C. W., Kulman, H. M., Pienkowski, R. L. y Heikkinen, H. J. (1971). Factors affecting distribution and abundance of hymenopterous parasites of *Ips* spp. bark beetles in Virginia (Coleoptera: Scolytidae). *The Canadian Entomologist*, 103(2), 235-239. <https://doi.org/10.4039/Ent103235-2>
- Boulogne, I., Constantino, R., Amusant, N., Falkowski, M., Rodrigues, A. M. y Houël, E. (2017). Ecology of termites from the genus *Nasutitermes* (Termitidae: Nasutitermitinae) and potential for science-based development of sustainable pest management programs. *Journal of Pest Science*, 90, 19-37.
- Bustamante, N. C. R. y Martius, C. (1998). Nutritional preferences of wood-feeding termites inhabiting floodplain forests of the Amazon River, Brazil. *Acta amazonica*, 28(3), 301-301. <https://doi.org/10.1590/1809-43921998283307>
- Constantino, R. (2000). Key to the soldiers of South American Heterotermes with a new species from Brazil (Isoptera: Rhinotermitidae). *Insect Systematics & Evolution*, 31(4), 463-472.
- Constantino, R. (2002a). An illustrated key to Neotropical termite genera (Insecta: Isoptera) based primarily on soldiers. *Zootaxa*, 67(1), 1-40. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.67.1.1>
- Constantino, R. (2002b). The pest termites of South America: taxonomy, distribution and status. *Journal of Applied Entomology*, 126(7-8), 355-365.
- De Vere Graham, M. W. R. (1969). The Pteromalidae of North-Western Europe. *Bulletin of the British Museum of Natural History*, 16, 1-908. <https://doi.org/10.5962/p.258046>
- Douglas, H. B., Cognato, A. I., Grebennikov, V. y Savard, K. (2019). Dichotomous and matrix-based keys to the *Ips* bark beetles of the World (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae). *Canadian Journal of Arthropod Identification*, 38. doi:10.3752/cjai.2019.38
- Doychev, D., Kechev, M., Todorov, I., Mirchev, P., Bencheva, S. y Georgiev, G. (2016). New Entomophagous Enemies of *Ips typographus* (Linnaeus, 1758) (Coleoptera: Curculionidae) from Bulgaria. *Acta zoologica bulgarica*, 68(1), 131-134.
- Dunn, R. y Messier, S. (1999). Evidence for the opposite of the dear enemy phenomenon in termites. *Journal of insect behavior*, 12, 461-464. <https://doi.org/10.1023/A:1020958505815>
- Eggleton, P. (1997). The species richness and composition of termites (Isoptera) in primary and regenerating lowland dipterocarp forest in Sabah, East Malaysia. *Ecotropica*, 3, 119-128.
- Espelie, K. E., Berisford, C. W. y Dahlsten, D. L. (1996). Use of cuticular hydrocarbons in bark beetle parasitoid taxonomy: a study of *Roptrocercus xylophagorum* (Ratzeburg) (Hymenoptera: Torymidae) from the United States, Europe and Australia. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 113(1), 193-198. [https://doi.org/10.1016/0305-0491\(95\)02049-7](https://doi.org/10.1016/0305-0491(95)02049-7)
- Gallardo, B. (1998). Potencial del rendimiento de madera sub-utilizada procedente de raleos

- forestales en *Pinus caribaea* var. *hondurensis* en la Reserva Forestal La Yeguada, Veraguas [Tesis de Maestría, Universidad de Panamá]. Panamá: Universidad.
- Garrido Torres, A. M. y Nieves-Aldrey, J. L. (1999). Pteromálidos de la comunidad de Madrid: faunística y catálogo (Hymenoptera, Chalcidoidea, Pteromalidae). *Graellsia*, 55, 9-147.
- Georgiev, G. y Stojanova, A. (2006). New pteromalid parasitoids (hymenoptera: Pteromalidae) of *Ips typographus* (L.) (Coleoptera: Scolytidae) in Bulgaria. *Silva Balcanica*, 7(1), 89-93.
- González, A., L. (1990). Evaluación financiera y económica de las plantaciones de *Pinus caribaea* en la Reserva Forestal La Yeguada. Panamá: Universidad.
- Guerra-Rodríguez, L. (2011). Las comunidades de Scolytinae (Coleoptera: Curculionidae) asociadas a cinco sitios con predominio de Pino en la República de Panamá. *Scientia*, 21(2), 85-94.
- Food and Agriculture Organization. (2006) Diagnostic protocols for regulated pests. Secretariat of the International Plant Protection Convention.
- Fernández, F. (Ed.). (2003). Introducción a las hormigas de la región Neotropical Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Hajek, A. E. y Eilenberg, J. (2018). Natural enemies: an introduction to biological control. Cambridge University Press.
- Hanson, P.E. y Gauld, I. D. (1995). The Hymenoptera of Costa Rica, London, Oxford University Press.
- He, S., Ivanova, N., Kirton, E., Allgaier, M., Bergin, C., Scheffrahn, R. H. y Hugenholtz, P. (2013). Comparative metagenomic and metatranscriptomic analysis of hindgut paunch microbiota in wood-and dung-feeding higher termites. *PloS one*, 8(4), e61126. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0061126>
- Herard, F. y Mercadier, G. (1996). Natural enemies of *Tomicus piniperda* and *Ips acuminatus* (Col., Scolytidae) on *Pinus sylvestris* near Orleans, France: temporal occurrence and relative abundance, and notes on eight predatory species. *Entomophaga*, 41(2), 183-210.
- Howell, J. H. (1972). Inventariación y demostraciones forestales-Panamá-Reforestación. Informe Técnico 11, FAO.
- Hulcr, J. y Smith, S. (2010). Xyleborini ambrosia beetles: an identification tool to the world genera. <https://idtools.org/id/xyleborini/index.htm>
- Instituto Nacional de Recursos Naturales Renovables. (2000). Plan de Manejo de La Yeguada 1998-2000. INRENARE-ANAM.
- Jaén Lara, B. A. (2012). Monitoreo de la dispersión de la población de los calligraphus en las plantaciones forestales de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* en el proyecto bosque siglo XXI, en Río Hato, provincia de Coclé, República de Panamá [Tesis de Maestría, Universidad de Panamá]. Vicerrectoría de Investigación y Posgrado, Universidad de Panamá.
- Jaén Lara, B. A. (2013). Monitoreo de la dispersión de la población de *Ips calligraphus* en las Plantaciones Forestales de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* en el Proyecto Bosque Siglo XXI, en Río Hato, Provincia de Coclé, República de Panamá. *Scientia*, 23(1), 87-102.
- Kenis, M., Hurley, B. P., Hajek, A. E. y Cock, M. J. (2017). Classical biological control of insect pests of trees: facts and figures. *Biological Invasions*, 19, 3401-3417.
- Kohnle, U. y Vité, J. P. (1984). Bark beetle predators: Strategies in the olfactory perception of prey species by clerid and trogositid beetles 1. *Zeitschrift für angewandte Entomologie*, 98(1-5), 504-508.
- Kolibáč, J. (2013). Trogossitidae: A review of the beetle family, with a catalogue and keys. *ZooKeys*, 366, 1. <https://doi.org/10.3897/zookeys.366.6172>
- Krishna, K., Grimaldi, D. A., Krishna, V. y Engel, M. S. (2013). Treatise on the Isoptera of the World: Termitidae, vol.5, Termitidae (part two). *Bulletin of the American Museum of Natural History*, 5, 1499-1987.
- Krokene, P. y Solheim, H. (1998). Pathogenicity of four blue-stain fungi associated with aggressive and nonaggressive bark beetles. *Phytopathology*, 88(1), 39-44.
- Leavengood, J. M. (2008). The checkered beetles (Coleoptera: Cleridae) of Florida [Tesis de

- Maestría, University of Florida]. http://etd.fcla.edu/UF/UFE0023794/leavengood_j.pdf
- Lima, D. B., Rezende-Puker, D., Mendonça, R. S., Tixier, M. S., Gondim, M. G., Melo, J. W. y Navia, D. (2018). Molecular and morphological characterization of the predatory mite *Amblyseius largoensis* (Acari: Phytoseiidae): surprising similarity between an Asian and American populations. *Experimental and Applied Acarology*, 76, 287-310.
- Lyon, S. W., Quesada-Pineda, H. y Smith, R. L. (2012). A case study to determine drivers and barriers of Appalachian Forest products in Central America. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 9(22), 40.
- Macedo-Reis, L. E., Novais, S. M. A. D., Monteiro, G. F., Flechtmann, C. A. H., Faria, M. L. D. y Neves, F. D. S. (2016). Spatio-temporal distribution of bark and ambrosia beetles in a Brazilian tropical dry forest. *Journal of Insect Science*, 16(1).
- Mendel, Z. y Halperin, J. (1981). Parasites of bark beetles [Col.: Scolytidae] on pine and cypress in Israel. *Entomophaga*, 26, 375-379.
- Meng, X. J., Lu, Q., Liu, X. W., Jiao, X. J., Liang, J. y Zhang, X. Y. (2015). The species specific associations between *Ips subelongatus* and ophiostomatoid fungi. *Acta Ecologica Sinica*, 35(2), 313-323.
- Mill, A. E. (1983). Generic keys to the soldier caste of New World Termitidae (Isoptera: Insecta). *Systematic Entomology*, 8(2), 179-190.
- Mills, N. J. (1983). The natural enemies of scolytids infesting conifer bark in Europe in relation to the biological control of *Dendroctonus* spp. in Canada. *Biocontrol News and Information*, 4(4), 303-326.
- Nebeker, T. E., Hackney, O. P., Hocking, R. R., Paz, M., y Lashomb, J. H. (1978). Methods for and comparison of sampling schemes for estimating within tree southern pine beetle populations (Coleoptera: Scolytidae) 1. The Canadian Entomologist, 110(10), 1015-1022.
- Nuorteva, M. (1956). Über den Fichtenstamm-Bastkafer *Hylurgops palliafus* Gyll., und seine Insektenfeinde", *Acta Entomologica Fennica*, 13, 1-118.
- Opitz, W. (1997). Classification, natural history, and evolution of the Epiphloeinae (Coleoptera: Cleridae). Part VI. The genera of *Epiphlaeus* Spinola and *Opitzius* Barr. *Annales Zoologici*, 58(1), 1-34.
- Opitz, W. (2014). Classification, natural history, and evolution of Epiphloeinae (Coleoptera, Cleridae). Part XI. Generic taxonomy, intergeneric phylogeny, and catalogue of the subfamily. *Acta Musei Moraviae, Scientiae biologicae*, 99(2), 5-94.
- Pérez De la Cruz, M., Hernández-May, M. A., la Cruz-Pérez, D y Sánchez-Soto, S. (2016). Scolytinae y Platypodinae (Coleoptera: Curculionidae) de dos áreas de conservación en Tabasco, México. *Revista de Biología Tropical*, 64(1), 319-326.
- Rangel, R., Pérez, M., Sánchez, S. y Capello, S. (2012). Fluctuación poblacional de *Xyleborus ferrugineus* y *X. affinis* (Coleoptera: Curculionidae) en ecosistemas de Tabasco, México. *Revista de Biología Tropical*, 60(4), 1577-1588.
- Rodríguez, P. A., Romero, B. y Rodriguez, E. J. (2011). Reporte del descortezador *Ips gradicollis* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) y de su parasitoide *Roptrocercus* (Hymenoptera: Pteromalidae) en plantaciones de *Pinus caribaea* en el proyecto de reforestación bosque siglo XXI, Coclé: Panamá. *Scientia*, 21(2), 135-138.
- Rodríguez-Flores, O. y Barrios, H. (2020). Scolytinae y Platypodinae (Coleoptera: Curculionidae) de la Isla Barro Colorado, Panamá. *Scientia*, 30(1), 15-52.
- Roversi, P. F. y Nannelli, R. (2012). Arthropods and Nematodes. En Blanco, J. A. y Y.-H. Lo (Eds) *Functional Biodiversity in Forest Ecosystems* (29-52). InTech. doi: 10.5772/31257
- Ryan, R. B. (1962). A device for measuring the oviposition potential of a bark beetle parasite. *The Canadian Entomologist*, 94(7), pp. 737-738.
- Samson, P. R. (1984). The biology of *Roptrocercus xylophagorum* (Hym.: Torymidae), with a note on its taxonomic status. *Entomophaga*, 29(3), 287-298.

- Samson, P. R. y Smibert, J. (1986). Preliminary studies on the efficacy and establishment of *Roptrocerus xylophagorum* [Hym.: Torymidae], a parasitoid of *Ips grandicollis* [Col.: Scolytidae], in Australia. *Entomophaga*, 31, 173-182.
- Smith, S. M. y Cognato, A. I. (2009). Occurrence of *Ips apache* Lanier (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) in Panama. *The Coleopterists Bulletin*, 63(4), 452-453.
- Sobel, L., Lucky, A., & Hulcr, J. (2015). An Ambrosia Beetle *Xyleborus affinis* Eichhoff, 1868 (Insecta: Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae). *Entomology and Nematology*, 627, 1-4.
- Stephen, F. M., & Dahlsten, D. L. (1976). The arrival sequence of the arthropod complex following attack by *Dendroctonus brevicomis* (Coleoptera: Scolytidae) in ponderosa pine. *The Canadian Entomologist*, 108(3), 283-304.
- Vasconcellos, A. y da Silva Moura, F. M. (2010). Wood litter consumption by three species of *Nasutitermes* termites in an area of the Atlantic Coastal Forest in northeastern Brazil. *Journal of Insect Science*, 10(1), 72.
- Villalaz-Pérez, J. A., Cerrud-Pérez, O., Villarreal-Núñez, J. E., Santo-Pineda, A. y Barahona-Amores, L. A. (2017). Comportamiento de especies maderables nativas y exóticas cultivadas en suelos ultisoles de Veraguas. *Ciencia Agropecuaria*, 26, 84-96.
- Wegensteiner, R., Wermelinger, B. y Herrmann, M. (2015). Natural enemies of bark beetles: predators, parasitoids, pathogens, and nematodes. In *Bark beetles* (pp. 247-304). Academic press.
- Zanuncio, J. C., Sossai, M. F., Couto, L. y Pinto, R. (2002). Occurrence of *Euplatypus parallelus*, *Euplatypus* sp. (Col.: Euplatypodidae) and *Xyleborus affinis* (Col.: Scolytidae) in *Pinus* sp. in Ribas do Rio Pardo, Mato Grosso do Sul, Brazil. *Revista Árvore*, 26, 387-389.



Revista MINERVA

Plataforma digital de la revista: <https://minerva.sic.ues.edu.sv>

Artículo Científico | Scientific Article

Efectividad de *Bacillus subtilis* Cohn (1872) y *Trichoderma harzianum* Rifai (1969) sobre *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Sacc.) Snyder & Hansen, en semillas de tomate (*Solanum lycopersicum* var. CENTA Cuscatlán)

Effectiveness of *Bacillus subtilis* Cohn (1872) and *Trichoderma harzianum* Rifai (1969) on *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Sacc.) Snyder & Hansen, in tomato seeds (*Solanum lycopersicum* var. CENTA Cuscatlan)

Judith Reyes-Bonilla¹, Carla Quintanilla-Villegas¹,
Zoila Guerrero-Mendoza² Moisés López-Torres³

Correspondencia
moisesuliseslopez@gmail.com

- 1 Escuela de Biología, Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Universidad de El Salvador.
- 2 Docente asesora interna, Escuela de Biología, Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Universidad de El Salvador.
- 3 Asesor externo, Gerente de Soporte Técnico, DIAGRI S.A de C.V, El Salvador, C.A.

RESUMEN

La marchitez vascular causada por *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Fol), disminuye la producción y calidad del cultivo de tomate. En la actualidad el biocontrol con *Trichoderma harzianum* (Th) y *Bacillus subtilis* (Bs) tiene gran potencial, pues su capacidad ha sido demostrada desde hace tiempo al inhibir fitopatógenos; por otra parte, el biocebado es una herramienta que mejora la germinación, vigor, emergencia homogénea y desarrollo de las plántulas. El objetivo de esta investigación fue determinar la efectividad de las cepas comerciales *Bacillus subtilis* y *Trichoderma harzianum* sobre un aislamiento de Fol en semillas de tomate var. CENTA CUSCATLAN a nivel *in vitro* e *in vivo*. Se evaluó el comportamiento de los biocontroladores a dos concentraciones y con biopolímeros para inhibir el crecimiento *in vitro* de Fol, estimular la germinación de

DOI:10.5377/revminerva.v7i3.18906

Enviado: 28 de octubre de 2023
Aceptado: 16 de enero de 2024

Palabras clave: marchitez, Fol, *Bacillus subtilis*, *Trichoderma harzianum*, biocebado.

Keywords: Wilt, Fol, *Bacillus subtilis*, *Trichoderma harzianum*, Biopriming.



Este contenido está protegido bajo la licencia CC BY
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

las semillas y el desarrollo de las plantas de tomate. Los resultados demostraron la capacidad antagonista de los biocontroladores. En el bioensayo *in vitro* se comprobó que T9 (*Th* 10^8 esp/ml⁻¹ + Al) incrementó el número de semillas germinadas, mientras que en el ensayo *in vivo* T6 (*Th* 10^6 esp/ml⁻¹ + Ga) destacó por tener mayor porcentaje de germinación, pero T8 (*Bs* 10^8 esp/ml⁻¹ + Ga) redujo el tiempo de germinación. Las variables fenológicas: largo de raíz, largo del tallo, largo total, peso fresco y peso seco fueron superiores con T5 (*Th* 10^6 esp/ml⁻¹ + Al), mientras que T4 (*Bs* 10^6 esp/ml⁻¹ + Ga) favoreció el aumento del diámetro del tallo. Este estudio es un esfuerzo por contribuir a la aplicación de tecnologías innovadoras y métodos de biocontrol para desarrollar un sistema de producción agrícola sostenible, estratégico frente a las actuales condiciones climáticas; además de ser la primera investigación y reporte de *Fol* en El Salvador.

ABSTRACT

Vascular wilt caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (*Fol*), decreases the production and quality of the tomato crop. Currently, biocontrol with *Trichoderma harzianum* (*Th*) and *Bacillus subtilis* (*Bs*) has great potential, since its capacity has been demonstrated for a long time to inhibit phytopathogens; on the other hand, biopriming is a tool that improves germination, vigor, homogeneous emergence and seedling development. The objective of this research was to determine the effectiveness of the commercial strains *Bacillus subtilis* and *Trichoderma harzianum* on a *Fol* isolate in tomato seeds var. CENTA CUSCATLAN at an *in vitro* and *in vivo* level. The behavior of the biocontrollers at two concentrations and with biopolymers to inhibit the *in vitro* growth of *Fol*, stimulate seed germination and the development of tomato plants was evaluated. The results demonstrated the antagonistic capacity of the biocontrollers. In the *in vitro* bioassay it was verified that T9 (*Th* 10^8 esp/ml⁻¹ + Al) increased the number of germinated seeds, while in the *in vivo* assay T6 (*Th* 10^6 esp/ml⁻¹ + Ga) stood out for having greater germination percentage, but T8 (*Bs* 10^8 esp/ml⁻¹ + Ga) reduced the germination time. The phenological variables: root length, stem length, total length, fresh weight and dry weight were higher with T5 (*Th* 10^6 esp/ml⁻¹ + Al), while T4 (*Bs* 10^6 esp/ml⁻¹ + Ga) favored the increase in stem diameter. This study is an effort to contribute to the application of innovative technologies and biocontrol methods to develop a sustainable agricultural

production system, strategic in the face of current climatic conditions; besides being the first investigation and report of *Fol* in El Salvador.

INTRODUCCIÓN

La marchitez vascular, producida por *Fol*, es una de las enfermedades más devastadoras en todas las regiones del mundo donde se cultiva el tomate (Marlatt et al., 1996), prospera en una diversidad de condiciones ambientales (Cai et al., 2003). Hasta el momento existen pocas investigaciones en cuanto a *Fol* y su manejo en el cultivo de tomate en Centro América. En el caso de El Salvador no hay registros sobre la existencia de este patógeno (CABI, 2021; CABI & EPPO, 2011). El control de la marchitez es muy difícil, sobre todo cuando las condiciones ambientales son favorables al hongo, pues se disemina por medio del agua de superficie, implementos agrícolas, insectos, plántulas contaminadas, semilla infectada entre otros (Dixon & Tilston, 2010). Debido a que se establece como endófito en células y tejidos vasculares, se dificulta su control (Hossain et al., 2013). Las plantas afectadas por la marchitez vascular muestran amarillamiento, que comienza por las hojas inferiores que, finalmente, mueren; la base del tallo adquiere un color oscuro y los haces vasculares se tornan de color pardo oscuro; la médula permanece sana y, la infección en el fruto, se detecta por la decoloración del tejido vascular (Jones, 1991).

En el desarrollo sostenible de la agricultura moderna, la utilización del biocontrol constituye una alternativa viable para asegurar la producción de alimentos sanos (Funes-Aguilar & Monzote, 2006; López-Bucio et al., 2015; López-Mondéjar et al., 2011). En este aspecto, se presentan microorganismos antagonistas como *Trichoderma* spp (Perniola et al., 2014), y bacterias del género *Bacillus* spp. (Martin & Travers, 1989; Meadows et al., 1992) numerosos estudios demuestran que estas bacterias poseen gran potencial como biocontroladoras de organismos patógenos (Castillo-Reyes et al., 2015; López & Pazos, 2005; Méndez-Úbeda, 2018).

Por otra parte, las semillas constituyen el punto de partida que marca el futuro de la cosecha por lo que su sanidad es cuestión de primer orden. La demanda

del mercado mundial de semillas recubiertas con tratamientos biológicos está en pleno auge (Markets and Markets, 2018). El biocebado es útil para el biocontrol de patógenos en cultivos ya que reduce los costos de los pesticidas, aumenta la productividad de las plantas e induce resistencia al estrés (Fernando et al., 2020). La inoculación de semillas es una forma rentable de administrar a gran escala microbios en campo (John et al., 2010; O'Callaghan, 2016) asegurando así la colonización del agente microbiano en la rizosfera de la planta promoviendo el crecimiento vegetal (Raj et al., 2004; Sarkar et al., 2020).

MATERIALES Y MÉTODOS

Aislamiento e identificación

Los aislamientos se obtuvieron de plantas de tomate afectadas por *Fusarium* spp, provenientes de parcelas en Estacion Experimental San Andres y Zapotitán, del CENTA, departamento de La Libertad. En seguida se trasladaron al Laboratorio de Parasitología Vegetal, donde se cultivaron en placas con PDA (Cardona-Piedrahita & Castaño-Zapata, 2019; Carrillo-Fasio et al., 2003; Reyes-Zambrano et al., 2020; Rojas, 2011). Al final de 7 días de incubación aparecieron colonias con crecimiento micelial algodonoso blanquecino, las cuales se identificaron según las claves de Barnett & Hunter (1998); Burgess & Trimboli (1986); Finch & Finch (1971); Leslie & Summerell (2006). Las cepas se identificaron con código FM1, FM2 y FM3; luego se purificaron mediante repiques sucesivos (Dickinson & Lucas, 1987; Santiago et al., 2017).

Cultivos puros de las cepas, se enviaron a identificar al Laboratorio de Biología Molecular "CENEM" de la empresa MICSA y a la Universidad de Florida. De forma análoga se conservaron en agua destilada tres veces esterilizada (ADTE), glicerol al 10 %, tubo inclinado y en papel filtro; también se reprodujeron en matrices de arroz para su posterior formulación siguiendo las metodologías de Fernández-Larrea (1997); Gómez et al. (2014); Michael-Aceves et al. (2005); Sandoval & Belesansky (2020); Sivila & Álvarez (2013); Troya & Vaca-Granda (2014).

Prueba de patogenicidad

La capacidad infectiva de los *Fusarium* spp. se evidenció, al ser inoculados en plántulas sanas de tomate (Córdova, 2003; Retana et al., 2018), para esto se aplicaron los métodos de inoculación de Carmona (2019) e Inami et al. (2012) que comprenden:

- A) Inmersión de puntas de raíz,
- B) Aplicación de una suspensión directa al suelo y
- C) Combinación de A y B (inmersión de raíz e inoculación directa en suelo).

La suspensión de conidios 10^5 con/ml⁻¹, se determinó con cámara de Neubauer ajustando la concentración final con la fórmula sugerida en Peña & Páez (2014): $C1V1 = C2V2$. Las plantas control se inocularon solo con Agua Destilada Estéril (ADE) (Carrillo-Fasio et al., 2003) y luego se fertilizaron a los 15 dds (días después de la siembra) con una solución de 1g/L⁻¹, 30-15-30 (NPK). Los tratamientos se asignaron al azar, con 3 repeticiones y mantuvieron a temperatura ambiente promedio de 27 °-30 °C. La respuesta de las plantas a la inoculación del patógeno se determinó en función de la escala de Marlatt et al. (1996) modificada por Gayosso et al. (2021):

- 1. Planta libre de síntomas,
- 2. Planta con clorosis leve en las hojas inferiores,
- 3. Clorosis moderada,
- 4. Clorosis severa y
- 5. Planta muerta.

Aplicación de los bioformulados

Los experimentos se realizaron con biopreparados comerciales, que son a base de esporas de *Trichoderma harzianum* "Rikoderma®" y de la bacteria *Bacillus subtilis* "Radicillus®", éstos se cultivaron en medios de cultivo PDA y Agar Nutriente, las placas se incubaron de forma invertida a temperatura ambiente durante siete días hasta el desarrollo de colonias fúngicas de color verdoso. En el caso de la bacteria después de 48 h con colonias de color crema mucoides (González, 2016; Guédez et al., 2012; López & Pazos, 2005; Santiago et al., 2017).

Antagonismo *in vitro*

Se realizaron cultivos duales enfrentando a *Fol* contra *Th* de acuerdo a García et al. (2006); González (2016); Martínez-Scott (2016); Rojas et al. (2011); Tejera-

Hernández (2011). El antagonismo de *Bs* se determinó por el método de contacto directo descrito por Pérez & García (2019), que consistió en ajustar a la concentración 10^8 UFC/ml⁻¹, en seguida se sembró en PDA, y se colocó un tapón de *Fol*. Como testigos se dispusieron placas Petri inoculadas en el centro con un tapón del hongo fitopatógeno sin la presencia de los antagonistas, posteriormente, los cultivos se dispusieron al azar con tres repeticiones. Se midió el crecimiento radial de *Fol* cada 24 h (Sánchez et al., 2015) para determinar el porcentaje de inhibición, aplicando la ecuación que aparece en Rojas-Badía et al. (2017).

$$\% \text{ de inhibición} = \frac{D.C.C - D.C.P}{D.C.C} \times 100$$

Dónde:

D.C.C: diámetro de la colonia control (cm).

D.C.P: diámetro de la colonia problema (hongo patógeno en presencia de los antagonistas) (cm).

La capacidad antagónica se evaluó aplicando la escala empleada por Ezziyani et al., (2004) y modificada por Morán-Quintero (2007).

La tasa de crecimiento micelial del patógeno se determinó mediante la expresión sugerida por Mead et al. (1993).

$$Tc = \frac{Cf - Ci}{Tf - Ti}$$

Donde:

Cf: es el crecimiento final.

Ci: es el crecimiento inicial (día uno) expresado en cm.

Tabla 1

Escala de evaluación de antagonismo *in vitro*, tomando en cuenta la invasión de la superficie, colonización y esporulación de *Th* sobre *Fol*

Grado	Capacidad Antagónica
0	Ninguna invasión de la superficie de la colonia del hongo patógeno.
1	Invasión del 25% de la superficie de la colonia del hongo patógeno.
2	Invasión del 50% de la superficie de la colonia del hongo patógeno.
3	Invasión del 75% del total de la superficie de la colonia del hongo patógeno.
4	Invasión del 100% de la superficie de la colonia del hongo patógeno y esporulación sobre ella.

Tf: es el tiempo final.

Ti: es el tiempo inicial (día uno).

El comportamiento de inhibición mostrado por los antagonistas se agrupó como recomienda Bautista (2000) en:

- Negativo: ausencia de zona de inhibición o un porcentaje menor de 10 % y crecimiento normal de la colonia fúngica, de forma similar al control.
- Baja: ausencia de zona de inhibición o con un porcentaje entre 10–39 % y con disminución en el crecimiento de la colonia fúngica.
- Media: ausencia de zona de inhibición o un porcentaje entre 40–69 % y con disminución en el crecimiento de la colonia fúngica.
- Positivo: presencia de zona de inhibición definida o en un porcentaje entre 70–100 %.

El tipo de interacción (Tabla 2) presentada por *Th* sobre el patógeno se evaluó, con la clasificación adaptada de Badalyan et al. (2004) y Molla et al. (2001).

Para evaluar la interacción a nivel del micelio, se realizaron preparados de la zona de contacto entre las colonias y se observó al microscopio compuesto con aumento de 100X (Corallo, 2012), donde se identificó la interacción de las hifas antagonistas de *Th* con las del patógeno (Guédez et al., 2012).

Bioensayo de la efectividad *in vitro*

Inóculos. Cultivos de *Fol* se recubrieron con 5 ml de ADE, luego se raspó la superficie con un asa. La suspensión se filtró con gasas estériles e introdujo en un Erlenmeyer con 100 ml de ADE, agregando 0.1 ml de Tween 20 al 0.1 %. La concentración de la suspensión se ajustó en cámara de Neubauer (Covacevich & Consolo, 2014); hasta 10^5 esp/ml⁻¹ con

Tabla 2

Características de los tipos de interacciones evaluados en enfrentamientos duales entre *Th* y *Fol*.

Identificación	Descripción
A	Inhibición en el punto de contacto (el crecimiento de ambos hongos se detiene en el punto de contacto).
B	Inhibición a la distancia (el crecimiento se detiene sin contacto micelial)
C	Reemplazo (uno de los hongos crece sobre el otro).
D	Entremezcla mutua (ninguno de los dos hongos detiene su crecimiento después del punto de contacto).

CIVI= C2V2, luego se sembró en placas con PDA. Mientras que las concentraciones de los antagonistas se obtuvieron de los bioformulados ajustando a las dosis 10^6 y 10^8 UFC/ml⁻¹ (González- Cárdenas et al., 2005; López, 2011; Müller, 2021; Rodríguez et al., 2005).

Desinfección de las semillas. Semillas de tomate var. CENTA CUSCATLÁN se desinfectaron superficialmente sumergiéndolas 3 min en alcohol 96 °, después 2 min en hipoclorito de sodio al 4 % luego se enjuagaron 5 veces con ADE, se filtraron con el colador y colocaron sobre una placa Petri con papel filtro absorbente (Rodríguez et al., 2008; Salinas-Ventura & Soriano-Bernilla, 2014).

Biocebado de semillas. Se aplicó recubrimiento con biopolímeros a base de almidón y goma arábiga al 25 % que se prepararon adaptando la metodología de Caballero et al. (2016) y Chin et al. (2021, 2022) con ciertas modificaciones. Se tomaron 6 ml de las suspensiones para mezclar con los respectivos biopolímeros, seguidamente las semillas de tomate estériles se recubrieron con la mezcla según la descripción de la Tabla 3.

Tratamientos del biocebado de semillas

Después se dejaron secar 30 min en cámara de flujo laminar, luego se distribuyeron 10 semillas por placa Petri de 9 cm con medio PDA previamente inoculado con 10^5 esp/ml⁻¹ de *Fol*. Se incubaron a temperatura ambiente en oscuridad dentro de una hielera de poliestireno (Müller, 2021). Se aplicó un DCA con tres repeticiones por tratamiento. El conteo de las plántulas se realizó todos los días a partir de la siembra hasta el término del día 7 y 15, en donde se obtuvo el porcentaje total de emergencia (ET) considerando como semillas germinadas aquellas en las que hubo protrusión radicular.

Bioensayo de la efectividad *in vivo*

Se efectuó en un invernadero ubicado dentro del CENTA contiguo a la Unidad Planta Sana. Las semillas de tomate se desinfectaron y biocebaron siguiendo el mismo protocolo descrito en el bioensayo *in vitro* (Pérez & García, 2019).

Inoculación del sustrato y semillas. Suelo estéril se inoculó con *Fol* 10^5 esporas/ml⁻¹, transcurridas 24 h se

biocebaron las semillas (Tabla 3). El testigo sano fueron 100 semillas sembradas en suelo estéril inoculadas con ADE. El testigo enfermo fue semillas en suelo infectado con el patógeno 10^5 esp/ml⁻¹. Finalmente se sembraron en las bandejas de germinación y llevaron al invernadero a una temperatura promedio de 27 °C (Eraso et al., 2014; Figueroa-Rivera et al., 2010; Gonzáles, 2016; Osorio & Guerrero, 2020). Los tratamientos se dispusieron en bloques completos al azar con 5 repeticiones. Se tomó como criterio la emergencia total de la plántula y se realizó el conteo diario hasta el día 10. A los 15 dds las plántulas se fertilizaron con una solución nutritiva (30 %N, 15 %P, 30 %K) a razón de 1g/L⁻¹. Los riegos se llevaron a cabo cada tercer día. A los 20 días de germinación las plántulas se trasplantaron en bolsas para almácigo de 15x23 cm y reinoculó el suelo estéril con una nueva suspensión de *Fol* 1×10^5 esp/ml⁻¹. Los tratamientos fueron 10 los cuales se dispusieron en un DCA con 3 repeticiones. Al término del décimo día, se obtuvo el porcentaje total de emergencia descrito por García et al. (2016).

$$\%E = \frac{\text{No. de plantas emergidas}}{\text{No. de semillas sembradas}} \times 100$$

El índice de velocidad de germinación (IVG) se calculó de acuerdo a la fórmula propuesta por Brown & Mayer (1988):

$$IVG = \frac{P_1}{T_1} + \frac{P_2}{T_2} + \dots + \frac{P_n}{T_n}$$

P = número de semillas germinadas

T = tiempo en que germinaron y

n = día del último control.

El tiempo medio de germinación (TMG) de acuerdo con García et al. (1982):

$$TMG = \frac{[(x1 d1) + (x2 d2) + \dots + (x10 d10)]}{X10}$$

donde: x1, x2, x10 son las semillas germinadas en el d 1, 2, ...10; d1, d2, ... d10 son los días de incubación, y

X10 es el número total de semillas germinadas en el día 10 cuando se realizó el conteo final de semillas germinadas.

A los 52 dds y 31 días después del trasplante se realizó un muestreo destructivo extrayendo el 50 % de cada repetición, para las respectivas evaluaciones de las variables fenológicas, longitud del tallo, longitud de la raíz, longitud total de la planta, diámetro del tallo, peso fresco y peso seco total. Las raíces se lavaron con agua para eliminar la tierra, seguidamente las plantas se secaron en un horno a 50 °C por 72 h y posteriormente se determinó su peso seco en una balanza analítica (Constanza-Corrales et al., 2010).

Análisis de datos

Con los datos obtenidos se comprobó las premisas de normalidad por el test de Shapiro Wilk o Francia y la homocedasticidad por la prueba de Levene o Barlett y se practicó un Análisis de Varianza de una vía (ANOVA) y cuando existieron diferencias significativas entre los tratamientos, las medias se compararon por el método de Tukey para una significancia de $P \leq 0.05$ y 95 % intervalo de confianza, usando el Programa Estadístico R.

RESULTADOS

Caracterización morfológica

El aislado FM1 mostró características típicas de *Fusarium oxysporum* (Fo). El cultivo en PDA presentó colonias con micelio de color blanco tornándose violeta pálido con la esporulación (Figura 1A), micelio delicado y disperso en algunos cultivos mientras que abundante en otros, y producción de micelio aéreo (Leslie & Summerell, 2006). En la morfología microscópica se observaron microconidias ovaladas, sin septos, unicelulares formadas sobre fiálides cortas, macroconidias en forma de hoz compuestas por 4-6 septos con células apicales cortas ligeramente curvas y células basales puntiagudas con forma de gancho. Formación abundante de clamidosporas intercaladas en las hifas, apareciendo solas o en pares con paredes de aspecto rugoso, se forman en cultivos viejos cuando se agotan los nutrientes en el medio (Figura 1B-F).

Los aislados FM2 y FM3 crecieron como cultivos

algodonosos de color blanquecino a marrón con abundante producción de esporodoquios de color crema (Figura 2). A nivel morfológico presentaron macroconidias con 3-4 septos muy anchas y robustas formadas sobre esporodoquios largos, con célula apical redonda, pie recto y ligeramente redondeado. Microconidios anchos de forma ovalada con un septo, presentes en el micelio aéreo. De acuerdo a Barnett & Hunter (2006) y Leslie & Summerell (2006) estos caracteres morfológicos corresponden a *Fusarium solani* (Fs) que es muy común aislarlo en plantas de tomate.

Pruebas de patogenicidad

Las plantas mostraron síntomas de marchitez al finalizar 30 ddi (días después de la inoculación) en

Figura 1

Estructuras propagativas de *Fo* producidas en medio de cultivo PDA. Cultivos color violeta pálido (A); macroconidias (40X) (B-C); fiálides (40X) (D); microconidias (10X) (E) y clamidosporas (40X) (F).

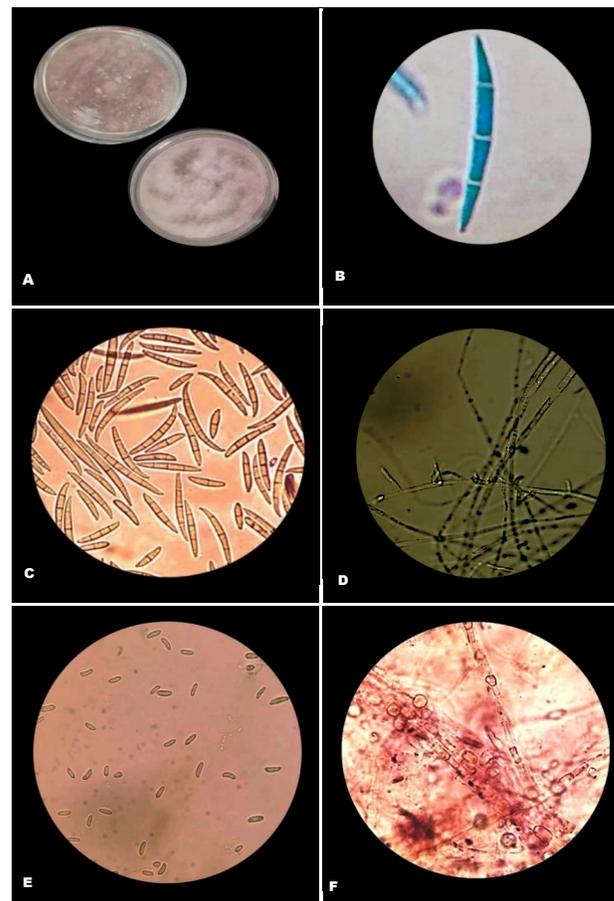
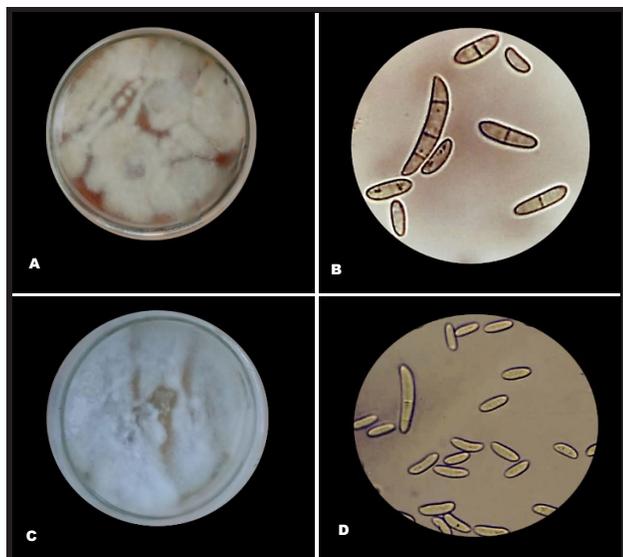


Figura 2

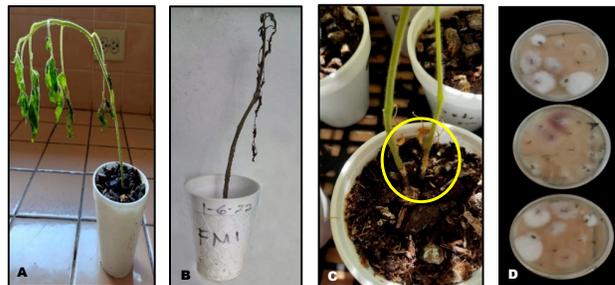
Estructuras propagativas de *Fusarium solani*. Cultivo de la cepa FM2 (A); macroconidias y microconidias (40X) (B); cultivo de la cepa FM3 (C); macroconidias y microconidias (40X) (D).



todos los métodos; por lo que en adelante se empleó la inoculación directa en el suelo por ser menos invasiva ya que no causa stress adicional a la planta y es igualmente eficiente. En la segunda prueba de patogenicidad, FM1 produjo los mismos síntomas de marchitez en donde la planta con el paso de los días presentó hojas inferiores amarillentas hasta que la marchitez se propagó hacia el ápice y hojas superiores ocasionando una marchitez general, las hojas infectadas se oscurecieron y la base del tallo mostró necrosis de color marrón causando finalmente la muerte de las plántulas a los 45 ddi. En la escala del 1 al 5 de Marlatt et al. (1996) modificada por Gayosso et al. (2021), las plantas presentaron escala 5 que corresponde a planta muerta. Con los postulados de Koch se confirmó que se trataba del *Fo* aislado de la muestra de San Andrés I codificada como FM1 (Figura 3) la sintomatología expresada exclusivamente en las plantas de tomate inoculadas con el aislamiento se asocia a la especificidad del hospedero, razón por la cual se define como *Fo*. Si bien es cierto que *Fo* tiene muchas formas especiales pero la forma especial “lycopersici”, afecta solo a plantas de tomate susceptibles a la marchitez vascular (Cardona-Piedrahita & Castaño-Zapata, 2019; Córdova-Zapata, 2003). Las cepas FM2 y FM3 no

Figura 3

A-B) Plantas con síntomas de marchitez vascular; C) Tallo con mancha marrón; D) Reaislamiento de *Fo*.



expresaron virulencia en ninguno de los ensayos por lo que fueron excluidas de los otros experimentos.

Identificación genética

El análisis realizado por el Laboratorio CENEM y la Universidad de Florida consistió en la extracción de ADN, amplificación por PCR, secuenciación y análisis de identidad del marcador ITS1-5.8S-ITS2. Para el análisis de identidad de la secuencia de ADN obtenida, se utilizó la base de datos de nucleótidos del NCBI aplicando la herramienta Basic Local Alignment Search Tool para nucleótidos – BLAST@N 2.8.0+ (National Center for Biotechnology Information, U.S. National Library of Medicine). La amplificación de la región ITS así como el factor de elongación de traducción 1-alfa (TEF-1 alfa) confirmaron que a nivel molecular el aislamiento FM1 se encuentra dentro de la especie *Fusarium oxysporum* con 100 % de similitud (Figura 4).

Conservación de *Fo*

Los métodos para la preservación del hongo fueron eficientes, ya que en el control de calidad el

Figura 4

Las secuencias del aislado FM1 codifican para *Fusarium oxysporum*.



hongo se desarrolló perfectamente en el medio de cultivo conservando las características del cultivo inicial. Respecto a la conservación y reproducción en matrices de arroz, solo se cosechó restos de micelio, de modo que el ingrediente activo del hongo se encontró dentro del polvo cosechado; porque al hacer la siembra en PDA el cultivo creció con abundante producción de macroconidios. Este método funciona para mantener activa la virulencia de *Fol* ya que en ensayos de patogenicidad se aplicó una suspensión de polvo cosechado, a plantas sanas de tomate causando marchitez más rápidamente y de mayor impacto que con una suspensión obtenida directamente de cultivos en placas Petri; siendo por lo tanto económica y viable esta forma para mantener activa la virulencia de *Fol* para pruebas de patogenicidad.

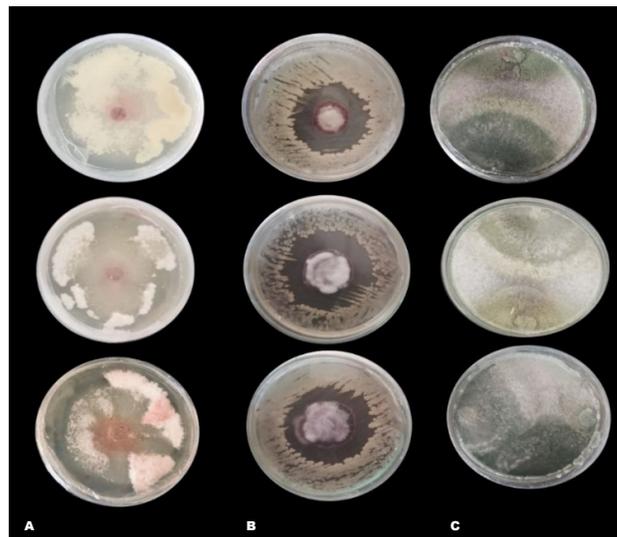
Antagonismo *in vitro*

Bs y *Th* fueron capaces de inhibir el crecimiento radial de *Fol* (Figura 5). El análisis de varianza detectó diferencias significativas entre los tratamientos ($P < 0.05$). El porcentaje de inhibición (PI) en los tres días de evaluación varió desde 0 en el testigo hasta 65.3 %, 70.3 % y 72.7 % en *Bs*, siendo éste el mayor porcentaje que en la escala de inhibición de Bautista (2000) se agrupa dentro de antagonismo positivo; mientras que *Th* varió de 30.4 %, 39.7 % a 52.9 % y se ubica en la escala como antagonismo medio. Así mismo, los PI obtenidos a los 2, 6 y 8 días de enfrentamiento indican que a medida avanza el tiempo de enfrentamiento, aumenta la capacidad de biocontrol del antagonista frente al patógeno en referencia (Tabla 4). La comparación de medias para la tasa de crecimiento micelial (TC) muestra que *Fol* creció 0.4 cm/día^{-1} , en el tratamiento con *Th* 0.2 cm/día^{-1} , el menor crecimiento se obtuvo con el tratamiento *Bs* del orden de 0.1 cm/día^{-1} , lo cual concuerda con el mayor porcentaje de inhibición presentado por este microorganismo.

Th presentó grado 4 de antagonismo donde las colonias crecieron y esporularon sobre el patógeno *Fol*, en cuanto al tipo interacción descritos por Badalyan et al. (2004) y Molla et al. (2001), predominó el tipo C reemplazo (Figura 6), este se asocia con el rápido crecimiento de *Trichoderma* spp. y con

Figura 5

Inhibición del crecimiento de *Fol* *in vitro*. A) Control; B) *Bs*; C) *Th*.



mecanismos de micoparasitismo y antibiosis, en los cuales principalmente mediante la producción de enzimas líticas, *Trichoderma* spp. tiene la capacidad de usar al patógeno como sustrato de crecimiento, creciendo inicialmente sobre su micelio y finalmente reemplazándolo progresivamente gracias a la degradación de este (Hoyos-Carvajal et al., 2009).

Bioensayo *in vitro*

En esta prueba se obtuvieron porcentajes de germinación muy bajos en los tratamientos, porque al sembrar las semillas en conjunto con *Fol* este colonizó completamente la caja de Petri cubriéndola con sus hifas e impidiendo la germinación de las semillas. A pesar de las circunstancias hubo diferencias entre algunos tratamientos. La gráfica (Figura 7) muestra que para el día 7 el menor porcentaje de germinación estuvo en T7 con solo 1 % y el mayor 60 % lo obtuvo

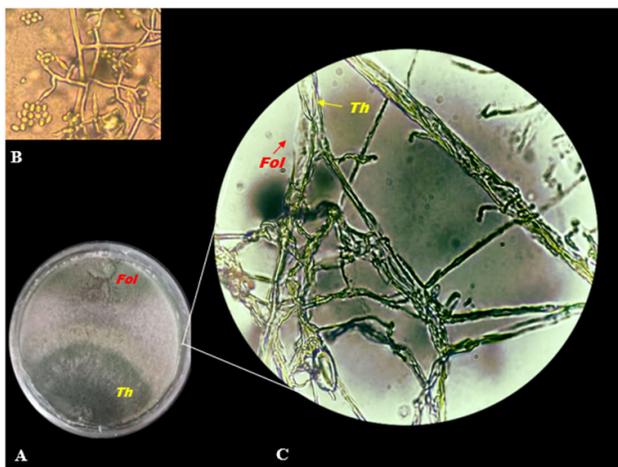
Tabla 4

Porcentaje de inhibición de *Th* y *Bs* sobre *Fol* ($\alpha = 0.05$; valor de $P = 4 \times 10^{-10}$, $F = 3994$) y tasa de crecimiento micelial por día en cm (TC). Medias con la misma literal entre columnas son iguales estadísticamente según Tukey ($P \leq 0.05$).

N°	TRATAMIENTOS (T) Descripción	Antagonismo <i>in vitro</i>			TC
		Día 2	Día 6	Día 8	
T1	<i>Fol</i>	0.0 a	0.0 a	0.0 a	0.4 c
T2	<i>Th</i>	30.4 b	39.7 b	52.9 b	0.2 b
T3	<i>Bs</i>	65.3 c	70.3 c	72.7 c	0.1 a

Figura 6

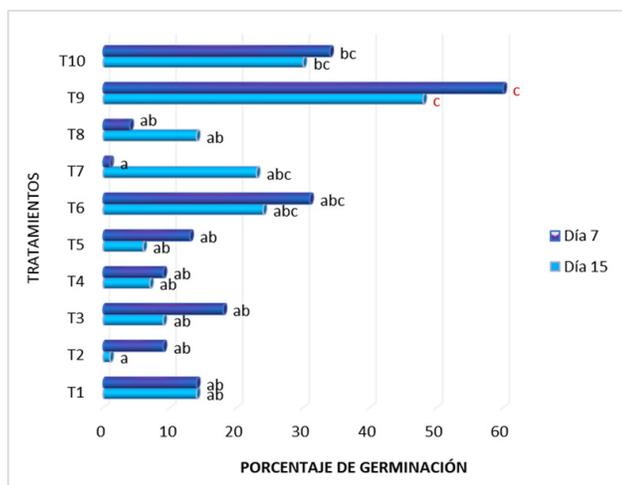
A) Interacción entre *Th* y *Fol*; esporulación (B); micoparasitismo (C). Las hifas de color verde de *Th* se enrollan sobre las hifas gruesas *Fol* (100X).



T9 que comparado al tratamiento testigo sano lo superó en 328 %. En el día 15 el número de plantas germinadas disminuye debido a que algunas plantas murieron por la resequead del medio, aun así, todos los tratamientos son similares entre sus medias a excepción de T2 y T9 con valores opuesto extremos (1 %, 48 %). Con el tratamiento T9 (*Th* 10⁸ + Almidón) algunas semillas lograron germinar porque *Th* 10⁸ esp/ml⁻¹ protegió la semilla de la invasión del patógeno por los metabolitos secundarios que este

Figura 7

Porcentaje de germinación *in vitro* de semillas de tomate biocebadas con biocontroladores y biopolímeros. Evaluación a los 7 y 15 días después de la siembra.



tipo de antagonista libera al competir en el medio.

Bioensayo *in vivo*

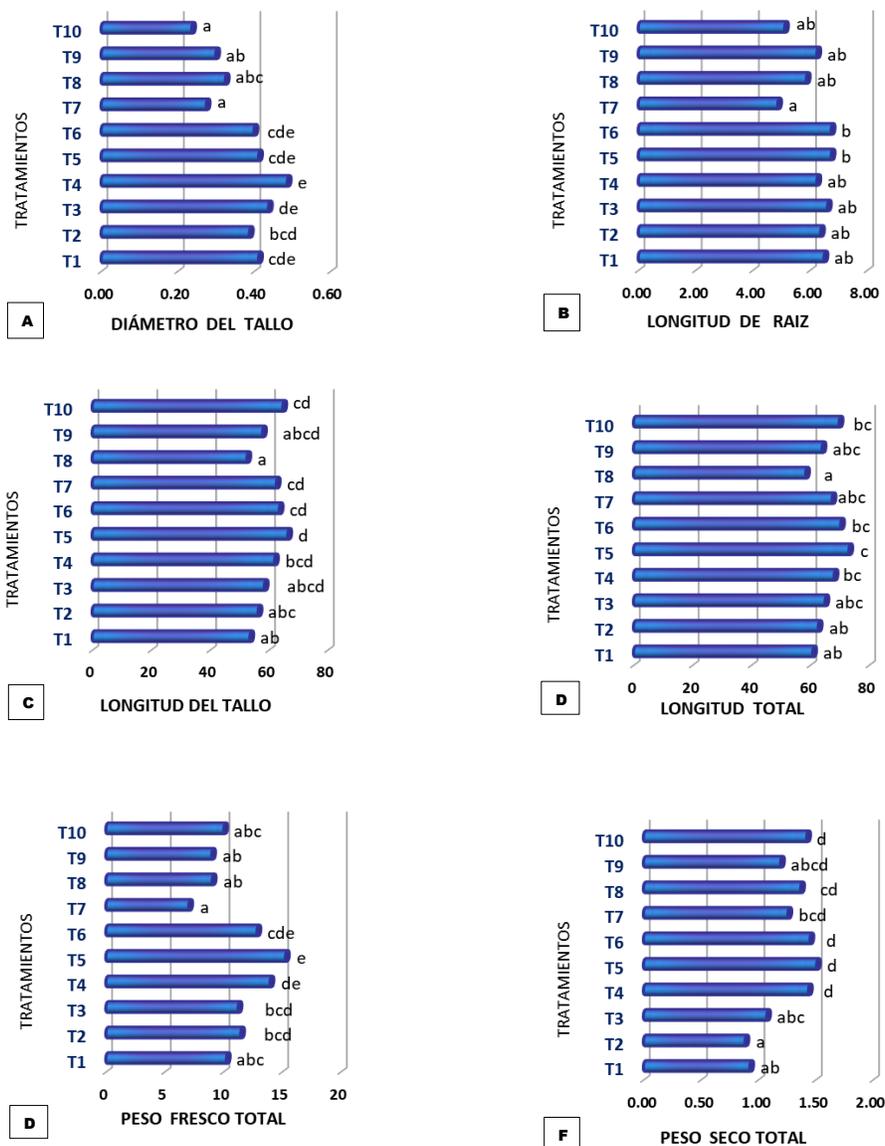
El análisis de varianza mostró efectos significativos entre tratamientos ($P < 0.05$). La prueba de Tukey, indicó que para el día 3 el T8 tuvo un 45 % de germinación y 125 % superior al testigo sano, la menor germinación se produjo en los tratamientos T5, T9 y T10 que no se diferencian de forma estadística. En el día 10 la situación cambia el mayor porcentaje de germinación lo obtiene T6 con el 100 % los demás tratamientos no difieren, pero con buenos porcentajes de 75 a 92 % (T3, T4, T5, T6, T9, T10), mientras que el menor se registró en T2 con 35 % y T1 con 56 %. Estos resultados demuestran que con T8 se alcanza mayor velocidad de germinación, pero T6 favorece un mayor número de semillas germinadas y que la combinación goma arábica más biocontroladores induce mayores porcentajes de germinación. Los valores del Índice de Velocidad de Germinación (IVG) fueron mayores en los tratamientos T3, T4, T5, T6, T7 y T10 con rangos que van desde 3.33-4.43 con respecto a Testigo enfermo que presenta un IVG muy bajo de 1.69. Con el tratamiento T8 se consigue un valor alto 5.12, esto demuestra que semillas de tomate var. CENTA CUSCATLÁN inoculadas con *Bs* 10⁸ esp/ml⁻¹ más goma arábica (T8) germinan a mayor velocidad con un aumento de 103 % en comparación al testigo sano con el IVG de 2.52 que no se diferencia de forma estadística del T2. El TMG indica el tiempo requerido para que germine el 50 % de las semillas. Los resultados demuestran que los tratamientos T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10 no presentan diferencias significativas entre ellos con valores de TMG de 4.44 – 6.21 (Tabla.5), únicamente el tratamiento T2 presentó diferencia significativa ($P \leq 0.05$), con el valor más alto 8.49. Esto demuestra que semillas infectadas con *Fol* tardan en germinar y se obtienen promedios bajos de germinación.

Variables fenológicas

El mayor diámetro del tallo lo consiguió T4 con 0.49 cm logrando aumentar en un 20 % el diámetro en comparación al testigo sano. Los diámetros de menor longitud estuvieron en T7 y T10 con 0.28-0.24 cm respectivamente (Figura 8). En la variable

Figura 8

Diámetro del tallo (A); longitud de raíz (B); longitud del tallo (C); longitud total (D); peso fresco (E); peso seco (F). Letras distintas indican que existen diferencias significativas ($p=0.05$) entre tratamientos por el test de Tukey



fenológica longitud de raíz T5 y T6, no difieren de forma estadística, pero presentan el valor más alto y un aumento de 3.8 % y la menor longitud estuvo en T7, los demás tratamientos no difieren estadísticamente. En cuanto a la longitud del tallo, la comparación de medias indica que T5 (66.5) presentó la mayor longitud de tallo superando un 24 % al testigo sano, no así T8 con el menor valor (52.6). Así también en la longitud total T5 (73.2 %) presentó la mayor longitud de las plantas de tomate logrando

un aumento del 20 %. Ocurre lo opuesto con T8 que tuvo el menor valor (58.5), seguido de T1 y T2. Todos los tratamientos mostraron efecto sobre la variable biométrica peso fresco, pero T5 estadísticamente tuvo el mayor promedio superando en 49 % al testigo sano, todo lo contrario, resultado con T7, T8 y T9 al tener el menor peso. Mientras que en la variable peso seco T4, T5, T6, T10 son estadísticamente similares en sus medias, al aumentar el contenido de biomasa en las plantas de tomate.

Tabla 5

Porcentaje de germinación *in vivo* en semillas de tomate biocebadas. Evaluación a los 10 días después de la siembra. ($\alpha=0.05$; valor de $p=6.91 \times 10^{-10}$; $F=18.3$). Letras distintas entre columnas indican diferencias significativas para Tukey ($P \leq 0.05$).

Nº	TRATAMIENTOS (T) Descripción	Germinación			
		Día 3	Día 10	IVG	TMG
T1	Testigo sano	20 b	56 ab	2.52 ab	6.48 ab
T2	Testigo enfermo	9 ab	35 a	1.69 a	8.49 b
T3	Bs 10 ⁶ + Almidón	9 ab	77 bc	3.55 abc	5.43 a
T4	Bs 10 ⁶ + Goma arábica	5 ab	82 bc	3.45 abc	6.11 a
T5	Th 10 ⁶ + Almidón	1 a	84 bc	3.33 abc	5.94 a
T6	Th 10 ⁶ + Goma arábica	2 ab	100 c	4.01 bc	5.87 a
T7	Bs 10 ⁸ + Almidón	18 ab	92 bc	4.43 bc	5.38 a
T8	Bs 10 ⁸ + Goma arábica	45 c	91 bc	5.12 c	4.44 a
T9	Th 10 ⁸ + Almidón	0 a	75 bc	2.94 ab	6.21 a
T10	Th 10 ⁸ + Goma arábica	0 a	81 bc	3.43 abc	6.02 a

DISCUSIÓN

En esta investigación se aislaron *Fusarium* spp. de plantas de tomate con síntomas de marchitez; la capacidad infectiva se determinó mediante pruebas de patogenicidad, las cuales evidenciaron que el aislado FM1 coincidió con los síntomas que expresa *Fol*, ya que de esta manera Córdova-Zapata (2003); Jamil et al. (2021); Maurya et al. (2020) y Srivastava et al. (2010) demostraron en sus investigaciones la forma especial "*lycopersici*". Un factor clave para el desarrollo de la enfermedad es la temperatura de incubación, algunos estudios reportan que la temperatura óptima en el suelo para que *Fol* exprese la virulencia es de 28 °C, hasta un máximo de 33 °C y mínimo de 20 °C (Boix-Ruiz et al., 2015; Clayton, 1923; Ibrahim & Baghdadi, 2003). En este caso la temperatura ambiental promedio de los ensayos fue de 27-30 °C valores adecuados para la expresión de los síntomas de la enfermedad en las plantas de tomate CENTA-CUSCATLÁN.

Mediante la prueba de antagonismo dual se evidenció la eficacia de *Bs* al reducir la tasa de crecimiento micelial e inhibir 72.7 % el crecimiento *in vitro* de *Fol* a los 8 días de enfrentamiento, de igual forma Ramyabharathi et al. (2016) evaluaron la capacidad de *Bs* EPCO16, al inhibir en un 44 % el crecimiento micelial de *Fol*, gracias a los antibióticos que la bacteria produce. La habilidad de las especies de *Bacillus* para inhibir a *Fo* se ha reportado en muchas ocasiones (Jangir et al., 2018; Ramírez-Cariño et al., 2020; Xu

et al., 2020; Zhao et al., 2014). Para Zhu et al. (2020), las altas tasas de inhibición son proporcionales a una mejor formulación que se traduce en una mayor densidad celular con la consecuente producción de metabolitos secundarios. Uno de los mecanismos antagonísticos empleados por estas bacterias es la liberación de compuestos volátiles, tal como se evidenció en De la Cruz-López et al. (2022); He et al. (2020); Ramírez et al. (2022); Zhang et al. (2020). *Th*, redujo 52.9 % el crecimiento de las hifas de *Fol* en cultivo dual, y mostró hiperparasitismo creciendo por encima del micelio del patógeno reemplazándolo progresivamente, aunque la inhibición con este tratamiento fue menor; este modo de acción es algo distinto a lo que la cepa *Bs* pudo realizar. Un efecto similar se obtuvo en Babychan & Simon (2017); Cubilla-Ríos et al. (2019); Maurya et al. (2020). En las interacciones antagonísticas de *Trichoderma* spp. los mecanismos principales se basan en la competencia por nutrientes y espacio, el micoparasitismo, la antibiosis, secreción de metabolitos secundarios para el crecimiento y defensa vegetal (de Aguiar et al., 2014; Hernández-Melchor et al., 2019; Sandle, 2014; Vargas-Hoyos & Gilchrist-Ramelli, 2015), siendo el micoparasitismo el modo de acción mayormente empleado por estas especies, el cual inicia cuando el antagonista reconoce al hospedante y se une a las hifas mediante apresorios, posteriormente degrada la pared celular mediante la secreción de enzimas, principalmente quitinasas, β -1,3-glucanasas, celulasas, proteasas y fosfatasa (Qualhato et al., 2013).

Los resultados de este estudio indican la efectividad del biocebado de semillas con agentes de control biológico. En el bioensayo *in vitro* el biocebado con *Th* 10⁸ esp/ml⁻¹ y Almidón (T9) estimuló un 60 % la germinación de semillas de tomate. Un resultado distinto fue en el bioensayo *in vivo* ya que *Th* 10⁶ esp/ml⁻¹ más Goma Arábica (T6) logró que el 100 % de semillas germinaran, esto indica que el éxito de la germinación depende del tipo de microorganismo más el biopolímero empleado durante el biocebado y que se obtienen óptimos resultados con concentraciones bajas de producto, tal como ocurrió en el caso de *Th* 10⁶ esp/ml⁻¹ y Almidón (T5) que logró incrementos en las variables fenológicas: diámetro del tallo, largo de raíz, longitud del tallo, longitud

total, peso fresco y peso seco. *Trichoderma* spp es un hongo ampliamente utilizado para el recubrimiento de semillas por sus múltiples beneficios para controlar agentes patógenos (Ayyandurai et al., 2021; Gravel et al., 2007; Gupta et al., 2014; Hoyos, 2011).

Es conocido que los agentes de biocontrol activan la resistencia sistémica inducida (ISR) en plantas infectadas (Abdelrahman et al., 2016), esto se logra al liberar metabolitos secundarios (Keswani et al., 2016). La producción de metabolitos secundarios mediada por este agente juega un papel crucial en la fisiología vegetal, por ejemplo, el mecanismo directo por el cual *Th* promueve el crecimiento de las raíces, tallos y área foliar en plantas de tomate es a través de la inducción en los niveles de AIA y GA3 (Cai et al., 2015; Olowe et al., 2022), induce el crecimiento temprano en las plantas (Eltlbany et al., 2019) e incrementa la germinación de semillas de tomate y produce ácido harzianico (Vinale et al., 2013). La mejora en el crecimiento y rendimiento también está influenciada por la producción de sustancias antifúngicas como *Trichodermina* (Balode, 2010), endoquitinasas, β -glucosidasa, α -1,3-glucanasa (Monteiro et al., 2011). Este microorganismo tiene la capacidad de entrar en las raíces de las plantas y vivir como endófito lo que mejora aspectos como el peso fresco y seco de las plantas de tomate (Kleifeld & Chet, 1992) y facilita la absorción de nutrientes de la planta huésped (Chaudhary & Shukla, 2018; Iqbal & Mukhtar, 2020; Li et al., 2018) lo cual se logra cuando *Th* suprime la patogenicidad de *Fol* por lo que la planta puede absorber sin ningún problema los nutrientes.

CONCLUSIÓN

Se aisló una cepa infectiva de marchitez vascular en plantas de tomate var. CENTA CUSCATLÁN identificada molecularmente y mediante pruebas de patogenicidad como *Fol*. *Bs* presentó mayor porcentaje de inhibición sobre *Fol* (65.3-72.7 %), a los 2, 6 y 8 días de enfrentamiento, por el contrario, *Th* tuvo menor antagonismo *in vitro* (30.4-52.9 %) a los 2, 6 y 8 días de evaluación. Los biocontroladores y biopolímeros fueron efectivos para la germinación de semillas de tomate var. CENTA CUSCATLÁN. Un 60 % de germinación *in vitro* se logró en T9 (*Th* 10⁶ esp/ml⁻¹ + Almidón) y el 100 % de la germinación *in vivo* con T6

(*Th* 10⁶ esp/ml⁻¹ + Goma arábica). Las variables largo de raíz, largo del tallo, longitud total, peso fresco y peso seco aumentaron con el tratamiento T5 (*Th* 10⁶ esp/ml⁻¹ + Almidón) y T4 (*Bs* 10⁶ esp/ml⁻¹ + Goma arábica) favoreció incremento en el diámetro del tallo.

AGRADECIMIENTO

Se agradece y reconoce el apoyo de CENTA en la facilitación de materiales, equipos, tiempo de asesores, semilla, etc., para el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

- Abdelrahman, M., Abdel-Motaal, F., El-Sayed, M., Jogaiah, S., Shigyo, M., Ito, S., & Tran, L.-S. P. (2016). Dissection of *Trichoderma longibrachiatum*-induced defense in onion (*Allium cepa* L.) against *Fusarium oxysporum* f. sp. *Cepa* by target metabolite profiling. *Plant Science*, 246, 128-138. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.02.008>
- Ayyandurai, M., Akila, R., Manonmani, K., Theradimani, M., & Vellaikumar, S. (2021). Phytostimulation and growth promotion activities of *Trichoderma* spp. On groundnut (*Arachis hypogaea* L.) crop. *Journal of Applied and Natural Science*, 13(4), 1172-1179. <https://doi.org/10.31018/jans.v13i4.2936>
- Babychan, M., & Simon, S. (2017). Efficacy of *Trichoderma* spp. Against *Fusarium oxysporum* f. sp. *Lycopersici*. (FOL) infecting pre-and post-seedling of tomato. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 6(4), 616-619.
- Badalyan, S. M., Innocenti, G., & Garibyan, N. G. (2004). Interactions between xylophilic mushrooms and mycoparasitic fungi in dual-culture experiments. *Phytopathologia Mediterranea*, 43(1), 44-48.
- Balode, A. (2010). Effect of trichodermin, biological product against *Botrytis* in horticultural crops. *Acta Horticulturae*, 877, 1583-1588. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2010.877.218>
- Barnett, H. L., & Hunter, B. B. (1998). *Illustrated Genera of Imperfect Fungi* (4th ed.). The American Phytopathological Society.

- Barnett, H. L., & Hunter, B. B. (2006). *Illustrated Genera of Imperfect Fungi* (4th ed.). The American Phytopathological Society Press.
- Bautista, G. (2000). *Determinación de la asociación y antagonismo contra R. solani de aislamientos nativos de Pseudomonas fluorescens en un cultivo de papa Solanum phuroja en condiciones de invernadero* [Maestría de inter facultades en Microbiología]. Universidad Nacional de Colombia.
- Boix-Ruiz, A., Gálvez-Patón, L., de Cara-García, M., Palmero-Llamas, D., Camacho-Ferre, F., & Tello-Marquina, J. C. (2015). Comparison of analytical techniques used to identify tomato-pathogenic strains of *Fusarium oxysporum*. *Phytoparasitica*, 43(4), 471-483. <https://doi.org/10.1007/s12600-014-0444-z>
- Brown, R. F., & Mayer, D. G. (1988). Representing cumulative germination.1. A critical analysis of single—Value germination indices. *Annals of Botany*, 61(2), 117-125. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a087534>
- Burgess, L. W., & Trimboli, D. (1986). Characterization and Distribution of *Fusarium nygamai*, sp. Nov. *Mycologia*, 78(2), 223. <https://doi.org/10.2307/3793167>
- Caballero, W. A., Senés, P. J., & Toumanián, A. G. (2016). "Evaluación de la capacidad biocontroladora de *Trichoderma atroviride* en el cultivo de garbanzo (*Cicer arietinum* L.)" [Tesis Ingeniería]. Universidad Nacional de Córdoba.
- CABI. (2021). *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici* (*Fusarium wilt of tomato*). *CABI Compendium*, *CABI Compendium*, 24660. <https://doi.org/10.1079/cabicompendium.24660>
- CABI & EPPO. (2011). *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici*. [Distribution map]. *Distribution Maps of Plant Diseases*, Map 1111 (Edition 1). <https://doi.org/10.1079/DMPD/20113314317>
- Cai, F., Chen, W., Wei, Z., Pang, G., Li, R., Ran, W., & Shen, Q. (2015). Colonization of *Trichoderma harzianum* strain SQR-T037 on tomato roots and its relationship to plant growth, nutrient availability and soil microflora. *Plant and Soil*, 388(1-2), 337-350. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2326-z>
- Cai, G., Rosewich, L., Schneider, R. W., Klister, H. C., Davis, R. M., Elias, K. S., & Miyao, E. M. (2003). Origin of race 3 of *Fusarium oxysporum* f. Sp. *lycopersici* at a single site in California. *Phytopathology. Ecology and Population Biology*, 93(8), 1014-1022.
- Cardona-Piedrahita, L. F., & Castaño-Zapata, J. (2019). Comparación de métodos de inoculación de *Fusarium oxysporum* f. Sp. *lycopersici* (Sacc.) Snyder & Hansen, causante del marchitamiento vascular del tomate. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 43(167), 227. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.854>
- Carmona, S. L. (2019). *Identificación de un aislamiento de Fusarium oxysporum f. Sp. Lycopersici y respuesta fisiológica en tomate durante la infección frente a dos elicitores fúngicos* [Tesis Maestría]. Universidad Nacional de Colombia.
- Carrillo-Fasio, J. A., Montoya-Rodríguez, T. de J., Saúl, R., Cruz-Ortega, J. E., Márquez-Zequera, I., & Sañudo-Barajas, J. (2003). Razas de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* Snyder y Hansen, en Tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en el Valle de Culiacán, Sinaloa, México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 21(2), 123-127.
- Castillo-Reyes, F., Hernández-Castillo, F. D., Gallegos-Morales, G., & Flores-Olivas, A. (2015). Efectividad in vitro de Bacillus y polifenoles de plantas nativas de México sobre Rhizoctonia-Solani*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(3), 549-562.
- Chaudhary, T., & Shukla, P. (2018). Bioinoculant capability enhancement through metabolomics and systems biology approaches. *Briefings in Functional Genomics*, 18(3), 159-168. <https://doi.org/10.1093/bfpg/elz011>
- Chin, J. M., Lim, Y. Y., & Ting, A. S. Y. (2021). Biopolymers

- for biopriming of *Brassica rapa* seeds: A study on coating efficacy, bioagent viability and seed germination. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 20(3), 198-207. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.01.006>
- Chin, J. M., Lim, Y. Y., & Ting, A. S. Y. (2022). Biopriming *Pseudomonas fluorescens* to vegetable seeds with biopolymers to promote coating efficacy, seed germination and disease suppression. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, S1658077X22000224. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2022.02.002>
- Clayton, E. E. (1923). The Relation of Temperature to the *Fusarium* Wilt of the Tomato. *American Journal of Botany*, 10(2), 71-88. <https://doi.org/10.2307/2435575>
- Constanza-Corrales, L., Consuelo Sánchez, L., Cuervo Andrade PhD, J. L., Bautista, D., Gonzáles, Lady, & Guevara, M. (2010). Evaluación del efecto biocontrolador de *Bacillus* spp., frente a *Fusarium* spp., bajo condiciones de invernadero en *Rosmarinus officinalis* L. *Nova*, 8(13), 63. <https://doi.org/10.22490/24629448.440>
- Corallo, B. (2012). *Selección de cepas de Trichoderma sp. Antagonistas del patógeno de sorgo* [Tesis de Grado, Universidad de la Republica (Uruguay)]. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/1392/1/uy24-16049.pdf>
- Córdova, I. M. (2003). *Biocontrol de Fusarium oxysporum f. Sp. Lycopersici por Trichozam® (Trichoderma harzianum) y Mycoral® (micorriza vesículo arbuscular) en el cultivo de tomate* [Tesis de Grado]. Universidad Zamorano.
- Córdova-Zapata, María. I. (2003). *Biocontrol de Fusarium oxysporum f. Sp. Lycopersici por Trichozam® (Trichoderma harzianum) y Mycoral® (micorriza vesículo arbuscular) en el cultivo de tomate* [Tesis de Grado]. Universidad Zamorano.
- Covacevich, F., & Consolo, F. (2014). *Herramientas para el estudio y manipulación de Hongos Micorrízicos Arbusculares y Trichoderma* (1ª). Universidad Nacional de Mar del Plata.
- Cubilla-Ríos, A. A., Ruíz-Díaz-Mendoza, D. D., Romero-Rodríguez, M. C., Flores-Giubi, M. E., & Barúa-Chamorro, J. E. (2019). Antibiosis de proteínas y metabolitos en especies de *Trichoderma* contra aislamientos paraguayos de *Macrophomina phaseolina*. *Agronomía Mesoamericana*, 30(1), 63-77. <https://doi.org/10.15517/am.v30i1.34423>
- de Aguiar, R. A., da Cunha, M. G., & Lobo Junior, M. (2014). Management of white mold in processing tomatoes by *Trichoderma* spp. And chemical fungicides applied by drip irrigation. *Biological Control*, 74, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2014.03.009>
- De la Cruz-López, N., Cruz-López, L., Holguin-Meléndez, F., Guillén-Navarro, G. K., & Huerta-Palacios, G. (2022). Volatile organic compounds produced by cacao endophytic bacteria and their inhibitory activity on *Moniliophthora roreri*. *Current Microbiology*. *Current Microbiology*, 79(2), 35. <https://doi.org/10.1007/s00284-021-02696-2>
- Dickinson, C. H., & Lucas, J. A. (1987). *Patología vegetal y patógenos de plantas* (1º). Limusa.
- Dixon, G. R., & Tilston, E. L. (2010). Soil-Borne Pathogens and Their Interactions with the Soil Environment. En G. R. Dixon & E. L. Tilston (Eds.), *Soil Microbiology and Sustainable Crop Production*. Dixon, G.R.; Tilston, E.L (pp. 197-271). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9479-7_6
- Domsh, K., Gams, W., & Anderson, T. (1980). *Compendium of soil fungi* (1-1 y 2). Academic Press.
- Dugan, F. M. (2006). *The Identification of Fungi: An Illustrated Introduction With Keys, Glossary, And Guide to Literature* (Spi Edición). The American Phytopathological Society.
- Eltlbany, N., Baklawa, M., Ding, G.-C., Nassal, D., Weber, N., Kandeler, E., Neumann, G., Ludewig, U., van Overbeek, L., & Smalla, K. (2019). Enhanced

- tomato plant growth in soil under reduced P supply through microbial inoculants and microbiome shifts. *FEMS Microbiology Ecology*, 95(9), fiz124. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiz124>
- Eraso, C., Acosta Rodríguez, J., Salazar González, C., & Betancourth García, C. (2014). Evaluación de cepas de *Trichoderma* spp. Para el manejo del amarillamiento de arveja causado por *Fusarium oxysporum*. *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria*, 15(2), 237-249.
- Ezziyiani, M., Sánchez, C. P., Requena, M. E., Rubio, L., & Candela, M. E. (2004). Biocontrol por *Streptomyces rochei* –Ziyani–, de la podredumbre del pimiento (*Capsicum annuum* L.) causada por *Phytophthora capsici*. *Anales de Biología*, 26, 69-78.
- Fernández-Larrea, O. V. (1997). *Microorganismos en el control fitosanitario en Cuba: Tecnologías de producción. III Encuentro Nacional de Agricultura Orgánica-ACAO*, Universidad Central de Las Villas.
- Fernando, B., Catara, V., Prohens, J., Yusen, S., Nigro, S., Hetforth, J., & Hamón, C. (2020). *BRESOV - Breeding for Resilient, Efficient and Sustainable Organic Vegetable production. D4.1*, 50.
- Figueroa-Rivera, M. G., Rodríguez-Guerra, R., Zulema, B., González-Chavira, M. M., & Pons-Hernández, J. L. (2010). Caracterización de Especies de *Fusarium* Asociadas a la Pudrición de Raíz de Maíz en Guanajuato, México. *REVISTA MEXICANA DE FITOPATOLOGÍA*, 28(2), 11.
- Finch, A. N., & Finch, H. C. (1971). *Los hongos comunes que atacan cultivos en América Latina* (Vol. 17). CEIBA.
- Funes-Aguilar, F., & Monzote, M. (2006). Sistemas agroecológicos y su papel en los países del Tercer Mundo. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 10(3), 5-28.
- García, J. I., Ruíz, N. A., Lira, R. H., Vera, I., & Méndez, B. (2016). *Técnicas Para Evaluar Germinación, Vigor y Calidad Fisiológica de Semillas Sometidas a Dosis de Nanopartículas*. 129-140.
- García, J., Monteith, L., & Squire, G. R. (1982). Time, Temperature and Germination of Pearl Millet (*Pennisetum typhoides* S. & H.). *Journal of Experimental Botany*, 33(133), 288-296.
- García, R., Riera, R., & Zambrano, C. (2006). Desarrollo de un fungicida biológico a base de una cepa del hongo *Trichoderma harzianum* proveniente de la región andina venezolana. *Fitosanidad*, 10(2), 115-121.
- Gayosso, O., Chávez-Aguilar, G., López-Benítez, A., Marroquín-Morales, J. Á., López-Aguilar, K., & Hidalgo-Ramos, D. M. (2021). Evaluación de la respuesta de diferentes genotipos de tomate a *Fusarium oxysporum* raza 3. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(3), 409-420. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i3.2284>
- Gómez, H., Zapata, A., Torres, E., & Tenorio, M. (2014). *Producción de hongos entomopatógenos*. Servicio Nacional de Sanidad Agraria.
- González, ángelica de la caridad. (2016). *Optimización del método de empleo del biopreparado cepa A-53 de Trichoderma harzianum Rifai, para el control de Phytophthora nicotianae Breda Haan, en el cultivo del tabaco* [Tesis de Diploma]. Universidad de La Habana.
- González-Cárdenas, J. C., Maruri-García, J. M., & González-Acosta, A. (2005). Evaluación de diferentes concentraciones de *Trichoderma* spp. Contra *Fusarium oxysporum* agente causal de la pudrición de plántulas en papaya (*Carica papaya* L.) en Tuxpan, Veracruz, México. *Revista UDO Agrícola*, 5(1), 45-47.
- Gravel, V., Antoun, H., & Tweddell, R. J. (2007). Growth stimulation and fruit yield improvement of greenhouse tomato plants by inoculation with *Pseudomonas putida* or *Trichoderma atroviride*: Possible role of indole acetic acid (IAA). *Soil Biology and Biochemistry*, 39(8), 1968-1977. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.02.015>
- Guédez, C., Cañizalez, L., Castillo, C., & Olivar, R. (2012). Evaluación in vitro de aislamientos de *Trichoderma harzianum* para el control de

- Rhizoctonia solani, Sclerotium rolfsii y Fusarium oxysporum en plantas de tomate. *Revista de la Sociedad Venezolana de Microbiología*, 32, 44-49.
- Gupta, Vijai. K., Schmoll, M., Herrera-Estrella, A., Upadhyay, R. S., Druzhinina, I., & Tuohy, María. G. (2014). *Biotechnology and Biology of Trichoderma*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-00434-6>
- He, C.-N., Ye, W.-Q., Zhu, Y.-Y., & Zhou, W.-W. (2020). Antifungal Activity of Volatile Organic Compounds Produced by *Bacillus methylotrophicus* and *Bacillus thuringiensis* against Five Common Spoilage Fungi on Loquats. *Molecules*, 25(15), 3360. <https://doi.org/10.3390/molecules25153360>
- Hernández-Melchor, D.J., Ferrera-Cerrato, R., & Alarcón, A. (2019). Trichoderma: Importancia agrícola, biotecnológica, y sistemas de fermentación para producir biomasa y enzimas de interés industrial. *Chilean journal of agricultural & animal sciences, ahead*, 0-0. <https://doi.org/10.4067/S0719-38902019005000205>
- Hossain, M. M., Hossain, N., Sultana, F., Islam, S. M., Islam, M. S., & Bhuiyan, M. K. A. (2013). Integrated management of Fusarium wilt of chickpea (*Cicer arietinum* L.) caused by *Fusarium oxysporum* f. Sp. *Ciceris* with microbial antagonist, botanical extract and fungicide. *African Journal of Biotechnology*, 12(29), 4699-4706. <https://doi.org/10.5897/AJB2013.12503>
- Hoyos, L. (2011). *Enfermedades de plantas: Control biológico*. Universidad Estatal de Colombia.
- Hoyos-Carvajal, L., Orduz, S., & Bissett, J. (2009). Genetic and metabolic biodiversity of *Trichoderma* from Colombia and adjacent neotropic regions. *Fungal Genetics and Biology*, 46(9), 615-631. <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2009.04.006>
- Ibrahim, A. M. A., & Baghdadi, A. M. (2003). *Investigations On Fusarium oxysporum f. Sp. Lycopersici The Casual Agent Of Tomato Wilt (Lycopersicon esculentum Mill)* [Degree Thesis]. University of Khartoum.
- Inami, K., Yoshioka-Akiyama, C., Morita, Y., Yamasaki, M., Teraoka, T., & Arie, T. (2012). A Genetic Mechanism for Emergence of Races in *Fusarium oxysporum* f. Sp. *Lycopersici*: Inactivation of Avirulence Gene AVR1 by Transposon Insertion. *PLOS ONE*, 7(8), 1-10. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0044101>
- Iqbal, U., & Mukhtar, T. (2020). Evaluation of Biocontrol Potential of Seven Indigenous *Trichoderma* Species against Charcoal Rot Causing Fungus, *Macrophomina phaseolina*. *Gesunde Pflanzen*, 72(2), 195-202. <https://doi.org/10.1007/s10343-020-00501-x>
- Jamil, A., Musheer, N., & Kumar, M. (2021). Evaluation of biocontrol agents for management of wilt disease of tomato incited by *Fusarium oxysporum* f. Sp. *Lycopersici*. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 54(19-20), 1722-1737. <https://doi.org/10.1080/03235408.2021.1938353>
- Jangir, M., Pathak, R., Sharma, S., & Sharma, S. (2018). Biocontrol mechanisms of *Bacillus* sp., isolated from tomato rhizosphere, against *Fusarium oxysporum* f. Sp. *Lycopersici*. *Biological Control*, 123, 60-70. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2018.04.018>
- John, R. P., Tyagi, R. D., Brar, S. K., & Prévost, D. (2010). Development of emulsion from rhizobial fermented starch industry wastewater for application as *Medicago sativa* seed coat. *Engineering in Life Sciences*, 10(3), 248-256. <https://doi.org/10.1002/elsc.201000002>
- Jones, J. P. (1991). Fusarium wilt. En *Compendium of Tomato Diseases*. J. B. Jones et al. (pp. 15-16). APS Press (The American Pathological Society Press).
- Keswani, C., Bisen, K., Singh, V., Sarma, B. K., & Singh, H. B. (2016). Formulation technology of biocontrol agents: Present status and future prospects. En N. Arora, S. Mehnaz, & R. Balestrini (Eds.), *Bioformulations: For Sustainable Agriculture* (pp. 35-52). Springer, New Delhi. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2779-3_2

- Kleifeld, O., & Chet, I. (1992). Trichoderma harzianum?interaction with plants and effect on growth response. *Plant and Soil*, 144(2), 267-272. <https://doi.org/10.1007/BF00012884>
- Leslie, J. F., & Summerell, B. A. (2006). *The fusarium laboratory manual* (1st ed). Blackwell Pub.
- Li, Y.-T., Hwang, S.-G., Huang, Y.-M., & Huang, C.-H. (2018). Effects of Trichoderma asperellum on nutrient uptake and Fusarium wilt of tomato. *Crop Protection*, 110, 275-282. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.03.021>
- López, A. I. S., & Pazos, V. (2005). Aislamiento y selección de bacterias pertenecientes al género Bacillus con potencialidades para el control biológico en semilleros de tabaco. *Centro Agrícola*, 32(3), 25-29.
- López, M. C. (2011). *Efecto antagónico de Bacillus spp. De la rizosfera de plantas del semidesierto Chihuahuense sobre hongos fitopatógenos de suelo y su efecto en el desarrollo del tomate (Solanum lycopersicum L.)* [Ingeniería en Agrobiología]. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- López-Bucio, J., Pelagio-Flores, R., & Herrera-Estrella, A. (2015). Trichoderma as biostimulant: Exploiting the multilevel properties of a plant beneficial fungus. *Scientia Horticulturae*, 196, 109-123. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.08.043>
- López-Mondéjar, R., Ros, M., & Pascual, J. A. (2011). Mycoparasitism-related genes expression of Trichoderma harzianum isolates to evaluate their efficacy as biological control agent. *Biological Control*, 56(1), 59-66. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2010.10.003>
- Markets and Markets. (2018). *Market reports biological seed treatment market*. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/nanophotonics-advanced-technologies-and-global-market-125.html>
- Marlatt, M. L., Correll, J. C., Kaufmann, P., & Cooper, P. E. (1996). Two genetically distinct populations of Fusarium oxysporum. F. Sp. Lycopersici race 3 in the United States. *Plant Disease*, 80(12), 1336-1342.
- Martin, P. A. W., & Travers, R. S. (1989). Worldwide Abundance and Distribution of Bacillus thuringiensis Isolates. *Applied and Environmental Microbiology*, 55(10), 2437-2442. <https://doi.org/10.1128/aem.55.10.2437-2442.1989>
- Martínez-Scott, M. M. (2016). Evaluación de aislados nativos de Trichoderma sp para el control de hongos fitopatógenos del suelo en tomate. *Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias*, 3(6), 32-42.
- Maurya, S., Rai, D., Dubey, S., Kumar, P. M., & Prajapati, S. (2020). In vitro bioefficacy of Trichoderma harzianum and chitosan compound against Fusarium oxysporum f. Sp. Lycopersici. *Indian Journal of Plant Protection*, 48(4), 447-450.
- Mead, G. C., Hudson, W. R., & Hinton, M. H. (1993). Microbiological survey of five poultry processing plants in the UK. *British Poultry Science*, 34(3), 497-503. <https://doi.org/10.1080/00071669308417605>
- Meadows, M. P., Ellis, D. J., Butt, J., Jarrett, P., & Burges, H. D. (1992). Distribution, Frequency, and Diversity of Bacillus thuringiensis in an Animal Feed Mill. *Applied and Environmental Microbiology*, 58(4), 1344-1350. <https://doi.org/10.1128/aem.58.4.1344-1350.1992>
- Méndez-Úbeda, J. M. (2018). *Desarrollo a nivel de laboratorio de un bioplaguicida a base de Bacillus subtilis, para el control de hongos fitopatógenos en cultivos de interés agrícola* [Tesis Maestría]. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Michael-Aceves, A. C., Reyes-De la Cruz, A. R., Otero-Sánchez, M. A., Rebolledo-Domínguez, O. R., & Lezama-Gutiérrez, R. (2005). Potencial antagónico de Trichoderma spp. Sobre Fusarium oxysporum Schlechtend.: Fr. F. Sp. Lycopersici (Sacc.) Snyder y Hansen y Sclerotium rolfsii (Sacc.) in vitro e invernadero. *Revista mexicana de fitopatología*, 23(3), 286-293.
- Molla, A. H., Fakhru'l-Razi, A., Abd-Aziz, S., Hanafi, M. M.,

- & Alam, Z. (2001). In-vitro compatibility evaluation of fungal mixed culture for bioconversion of domestic wastewater sludge. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 17(9), 849-856. <https://doi.org/10.1023/a:1013844306960>
- Monteiro, S., Grondona, L. M., Llobell, I., & Monte, A. (2011). In vitro antifungal activity of *Trichoderma harzianum*, *T. longibrachiatum*, *T. asperellum* and *T. atroviride* against *Botrytis cinerea* to strawberry. *Bull OILB/SROP*, 25, 253-256.
- Morán-Quintero, N. R. M. (2007). *Evaluación de cuatro cepas de Trichoderma harzianum para el control de Rhizoctonia solani en plántulas de pepino (Cucumis sativa)* [Tesis Ingeniería]. Universidad Zamorano.
- Müller, Román. G. (2021). *Trichoderma harzianum como herramienta en el manejo integrado de enfermedades de tomate* [Magister Scientiae, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales]. <https://doi.org/10.35537/10915/129788>
- O'Callaghan, M. (2016). Microbial inoculation of seed for improved crop performance: Issues and opportunities. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100(13), 5729-5746. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7590-9>
- Olowe, O. M., Nicola, L., Asemoloye, M. D., Akanmu, A. O., & Babalola, O. O. (2022). *Trichoderma*: Potential bio-resource for the management of tomato root rot diseases in Africa. *Microbiological Research*, 257, 126978. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.126978>
- Osorio, B. S., & Guerrero, G. A. T. (2020). *Evaluación de planes de manejo de Fusarium oxysporum f. Sp en plantas de tomate, bajo condiciones controladas* [Tesis de Grado]. Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD.
- Peña, R. R., & Páez, J. E. (2014). *Guía para el cálculo de la concentración de inóculo*. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. <https://virtual.uptc.edu.co/ova/fito/archivo/guia1.pdf>
- Pérez, D., & García, P. (2019). Identificación del agente causal del marchitamiento en *Caesalpinia spinosa* "tara" y el efecto antagónico del aislado de *Bacillus* spp. Y *Trichoderma* sp. *Ecología Aplicada*, 18(1), 51. <https://doi.org/10.21704/rea.v18i1.1306>
- Perniola, O. S., Staltari, S., Chorzempa, S. E., & Gassó, M. M. A. (2014). Control biológico de *Fusarium graminearum*: Utilización de *Trichoderma* spp. Y biofumigación con parte aérea de *Brassica juncea*. *Rev. FCA UNCUYO*, 46(X), XXX-XXX.
- Qualhato, T. F., Lopes, F. A. C., Steindorff, A. S., Brandão, R. S., Jesuino, R. S. A., & Ulhoa, C. J. (2013). Mycoparasitism studies of *Trichoderma* species against three phytopathogenic fungi: Evaluation of antagonism and hydrolytic enzyme production. *Biotechnology Letters*, 35(9), 1461-1468. <https://doi.org/10.1007/s10529-013-1225-3>
- Raj, S. N., Shetty, N., & Shetty, H. (2004). Seed bio-priming with *Pseudomonas fluorescens* isolates enhances growth of pearl millet plants and induces resistance against downy mildew. *International Journal of Pest Management*, 50(1), 41-48. <https://doi.org/10.1080/09670870310001626365>
- Ramírez, V., Martínez, J., Bustillos-Cristales, M. del R., Catañeda-Antonio, D., Munive, J., & Baez, A. (2022). *Bacillus cereus* MH778713 elicits tomato plant protection against *Fusarium oxysporum*. *Journal of Applied Microbiology*, 132(1), 470-482. <https://doi.org/10.1111/jam.15179>
- Ramírez-Cariño, H. F., Guadarrama-Mendoza, P. C., Sánchez-López, V., Cuervo-Parra, J. A., Ramírez-Reyes, T., Dunlap, C. A., & Valadez-Blanco, R. (2020). Biocontrol of *Alternaria alternata* and *Fusarium oxysporum* by *Trichoderma asperelloides* and *Bacillus paralicheniformis* in tomato plants. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 113(9), 1247-1261. <https://doi.org/10.1007/s10482-020-01433-2>
- Ramyabharathi, S., Rajendran, L., Karthikeyan, G., & Raguchander, T. (2016). Liquid formulation of endophytic *Bacillus* and its standardization for

- the management of Fusarium wilt in tomato. *Bangladesh Journal of Botany*, 45(2), 283-290.
- Retana, K., Ramírez-Coché, J. A., Castro, O., & Blanco-Meneses, M. (2018). Caracterización morfológica y molecular de *Fusarium oxysporum* f.sp. *Apii* asociado a la marchitez del apio en Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 42(1). <https://doi.org/10.15517/rac.v42i1.32199>
- Reyes-Zambrano, S. J., Lecona-Guzmán, C. A., Gutiérrez-Miceli, F. A., Santana-Buzzy, N., Islas-Flores, I., Tzec-Simá, M., Barredo-Pool, F. A., Ruiz-Lau, N., & Ávila-Miranda, M. E. (2020). Microscopía electrónica de barrido y análisis enzimático en *Agave americana* durante la infección con *Fusarium oxysporum*. *Revista Mexicana de Fitopatología, Mexican Journal of Phytopathology*, 38(3). <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2005-3>
- Rodríguez, M., González, L., Fernández, M., & González, G. (2008). Evaluación de cepas de *Trichoderma* spp. Contra patógenos en semillas de frijol, lechuga, girasol y arroz. *Centro Agrícola*, 35(1), 11-15.
- Rodríguez, M., González, L., Fernández, M., & González, G. (2005). Efectividad de *trichoderma* spp. Para el control de hongos patógenos de la semilla y el suelo en el cultivo del frijol. *FITOSANIDAD*, 9(1), 37-41.
- Rojas, A. (2011). *Conceptos y práctica de microbiología general*. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/8391/albertorojastrivino.2011.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rojas, M. M., Tejera, B., Larrea, J. A., & Heydrich, P. M. (2011). *Aislamiento y caracterización de cepas de Bacillus asociadas al cultivo del arroz (Oryza sativa L.)*. 10.
- Rojas-Badía, M. M., Sánchez-Castro, D., Rosales-Perdomo, K., & Lugo-Moya, D. (2017). *Antagonismo de Bacillus frente a hongos fitopatógenos de cultivos hortícolas*. 32(2), 9.
- Salinas-Ventura, R., & Soriano-Bernilla, B. (2014). Efecto de *Trichoderma viride* y *Bradyrhizobium yuanningense* en el crecimiento de *Capsicum Annuum* en condiciones de laboratorio. *REBIOLEST*, 2(2), 13.
- Sánchez, A. D., Barrera, V., Reybet, G., & Sosa, C. (2015). Biocontrol con *Trichoderma* spp. De *Fusarium oxysporum* causal del "mal de almácigos" en pre y post emergencia en cebolla. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*, 114(1), 61-70.
- Sandle, T. (2014). *Trichoderma*. En C. A. Batt & M. L. Tortorello (Eds.), *Encyclopedia of Food Microbiology* (2 nd, pp. 644-646).
- Sandoval, M. C., & Belesansky, C. (2020). Producción artesanal del hongo antagonico *Trichoderma* Persoon en sustrato sólido. *Revista de Divulgación Técnica Agropecuaria, Agroindustrial y Ambiental. Facultad de Ciencias Agrarias*, 7(3), 55-64.
- Santiago, E., Guerrero, D., Vilchis, R., Martínez, J., Trejo, L., & Leyva, S. (2017a). *Efectividad in vitro de fungicidas biológicos, químicos y alternativos contra Botrytis cinerea (Pers.) de fresa (Fragaria x ananassa Duch.)*. 7.
- Santiago, E., Guerrero, D., Vilchis, R., Martínez, J., Trejo, L., & Leyva, S. (2017b). Efectividad in vitro de fungicidas biológicos, químicos y alternativos contra *Botrytis cinerea* (Pers.) de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.). *Universidad Autónoma Chapingo, Depto. de Preparatoria Agrícola*, 7.
- Sarkar, D., Chattopadhyay, A., Singh, S., Devika, O. S., Pal, S., Parihar, M., Pal, S., Singh, H. B., & Rakshit, A. (2020). Modulation of Microbiome Through Seed Bio-priming. En C. Manoharachary, H. B. Singh, & A. Varma (Eds.), *Trichoderma: Agricultural Applications and Beyond* (pp. 209-218). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54758-5_10
- Sivila, N., & Álvarez, S. (2013). *Tecnologías agroecológicas para la agricultura familiar. Producción artesanal de Trichoderma* (1ª). Universidad Nacional de Jujuy. Universitaria de Jujuy. Facultad de Ciencias Agrarias.

- Srivastava, R., Khalid, A., Singh, U. S., & Sharma, A. K. (2010). Evaluation of arbuscular mycorrhizal fungus, fluorescent *Pseudomonas* and *Trichoderma harzianum* formulation against *Fusarium oxysporum* f. Sp. *Lycopersici* for the management of tomato wilt. *Biological Control*, 53(1), 24-31. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2009.11.012>
- Tejera-Hernández, B. (2011). Potencialidades del género *Bacillus* en la promoción del crecimiento vegetal y el control biológico de hongos fitopatógenos. *Revista CENIC.*, 42(3), 131-138.
- Troya, C., & Vaca-Granda, L. (2014). Protocolo para la reproducción de cepas nativas de *Trichoderma* spp. En laboratorios artesanales. *Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca, Proyecto De Innovación Tecnológica Participativa Y Productividad Agrícola PITPPA*, 42.
- Vargas-Hoyos, H. A., & Gilchrist-Ramelli, E. (2015). Producción de enzimas hidrolíticas y actividad antagónica de *Trichoderma asperellum* sobre dos cepas de *Fusarium* aisladas de cultivos de tomate (*Solanum lycopersicum*). *Revista Mexicana de Micología*, 42, 9-16.
- Vinale, F., Nigro, M., Sivasithamparam, K., Flematti, G., Ghisalberti, E. L., Ruocco, M., Varlese, R., Marra, R., Lanzuise, S., Eid, A., Woo, S. L., & Lorito, M. (2013). Harzianic acid: A novel siderophore from *Trichoderma harzianum*. *FEMS Microbiology Letters*, 347(2), 123-129. <https://doi.org/10.1111/1574-6968.12231>
- Xu, W., Wang, K., Wang, H., Liu, Z., Shi, Y., Gao, Z., & Wang, Z. (2020). Evaluation of the biocontrol potential of *Bacillus* sp. WB against *Fusarium oxysporum* f. Sp. *Niveum*. *Biological Control*, 147, 104288. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2020.104288>
- Zhang, D., Yu, S., Yang, Y., Zhang, J., Zhao, D., Pan, Y., Fan, S., Yang, Z., & Zhu, J. (2020). Antifungal Effects of Volatiles Produced by *Bacillus subtilis* Against *Alternaria solani* in Potato. *Frontiers in Microbiology*, 11, 1196. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01196>
- Zhao, Y., Selvaraj, J. N., Xing, F., Zhou, L., Wang, Y., Song, H., Tan, X., Sun, L., Sangare, L., Folly, Y. M. E., & Liu, Y. (2014). Antagonistic Action of *Bacillus subtilis* Strain SG6 on *Fusarium graminearum*. *PLoS ONE*, 9(3), e92486. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0092486>
- Zhu, J., Tan, T., Shen, A., Yang, X., Yu, Y., Gao, C., Li, Z., Cheng, Y., Chen, J., Guo, L., Sun, X., Yan, Z., Li, J., & Zeng, L. (2020). Biocontrol potential of *Bacillus subtilis* IBFCBF-4 against *Fusarium* wilt of watermelon. *Journal of Plant Pathology*, 102(2), 433-441. <https://doi.org/10.1007/s42161-019-00457-6>



Revista MINERVA

Plataforma digital de la revista: <https://minerva.sic.ues.edu.sv>

Artículo Científico | Scientific Article

Pensamiento complejo: el rizoma para caracterizar a los estudiantes de nutrición

Complex Thinking: The Rhizome to Characterize Nutrition Students

Brenda Iliana Gallegos-López^{1,2}

Correspondencia: brenda.gallegos@ues.edu.sv

- 1 Universidad de El Salvador
2 ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2519-4545>

RESUMEN

La formación universitaria constituye un proceso de interacción de diversos elementos en una unidad de múltiples dimensiones, la cual contribuye al desarrollo del pensamiento complejo. Debido a ello, se decidió explorar la manifestación del pensamiento complejo a partir de los discursos de los estudiantes de Nutrición de la Universidad de El Salvador durante el año 2022. Se consideró la metodología rizomática. Como resultado, se encontró una manifestación natural y recurrente de los principios: sistémico, autonomía-dependencia y dialógico. Otra importante valoración es la necesidad de enseñar los saberes: condición humana, la ceguera del conocimiento, la identidad terrenal, incertidumbre y la comprensión. Como conclusión existen insuficiencias de los estudiantes en cuanto al hecho de ser conscientes sobre los mecanismos que ponen en la escena pedagógica a dichos principios del pensamiento complejo, pese a su uso semántico, sistemático y reiterativo.

DOI: [10.5377/revminerva.v7i3.18907](https://doi.org/10.5377/revminerva.v7i3.18907)

Enviado: 23 de enero de 2024
Aceptado: 19 de abril de 2024

Palabras clave: pensamiento complejo, metodología rizomática, proceso formativo, universidad.

Keywords: complex thinking, rhizomatic methodology, training process, university.



Este contenido está protegido bajo la licencia CC BY
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

ABSTRACT

University education is a process of interaction of various elements in a multi-dimensional unit, which contributes to the development of complex thinking. Because of this, it was decided to explore the manifestation of complex thinking based on the speeches of nutrition students at the University of El Salvador during the year 2022. The rhizomatic methodology was considered. As a result, a natural and recurrent manifestation of the principles was found systemic, autonomy-dependency and dialogic. Another important assessment is the need to teach knowledge: the human condition, the blindness of knowledge, earthly identity, uncertainty and understanding. In conclusion, there are inadequacies of the students in terms of being aware of the mechanisms that put these principles of complex thinking on the pedagogical scene, despite their semantic, systematic, and repetitive use.

INTRODUCCIÓN

El pensamiento complejo, un paradigma que complementa el abordaje simplificador, que ha predominado en el contexto formativo. Para el caso, en la Universidad de El Salvador desde su fundación, la carrera de Nutrición ha tenido predominantemente una visión que Morin (1977) denominó paradigma de la simplicidad; la cual se ha evidenciado en una praxis pedagógica que refuerza la memorización, la linealidad en el abordaje de los problemas desde la monodisciplinaria, la exclusión de la incertidumbre, la compartimentación y singularización de los saberes, así como también las dificultades para la articulación entre saberes y de estos con los contextos. En 1997, la Carrera de Nutrición migró de las asignaturas a un modelo modular por objetos de transformación; el cual en su fundamento planteaba una pedagogía problematizadora; una didáctica crítica; un profesional que transforma la realidad; una perspectiva epidemiológica y socio-natural del proceso de salud enfermedad y una participación multidisciplinaria. Pese a esto, se siguió promoviendo una cultura del reduccionismo, lo cual poco contribuye al desarrollo del pensamiento articulado, sistémico y dialógico, paradigma que Morin desarrolló en su obra *El método* (Morin, 1977, 1980, 1986, 1991, 2001, 2003). La persistencia de dicho enfoque no sólo ha replicado explicaciones y soluciones insuficientes a la problemática alimentaria y nutricional como objeto de estudio de la Carrera de Nutrición, sino en la visión de los estudiantes de cara a su realidad, la cual ontológicamente es compleja.

Para la carrera de Nutrición estudiar nuevas apuestas epistémicas y experienciales constituye

una demostración de su democracia académica y su función renovadora acorde al contexto, esto le permite innovar el proceso de enseñanza y aprendizaje en el marco de los principios del pensamiento complejo, promoviendo el diálogo entre saberes, considerando los fenómenos desde una perspectiva de unidad con múltiples dimensiones e interdependencias; buscar conjuntamente soluciones en contexto a los problemas ya que los saberes y escenarios de aprendizaje cada día adquieren una dimensión escalar ubicándolos más allá del ámbito del aula, por lo que plantean a los estudiantes, docentes y directivos desafíos ante situaciones inciertas, caóticas y multidimensionales, es decir, complejas.

La carrera ha propendido a nuclear las extintas asignaturas en módulos, sin adoptar una actitud hacia la reflexión de problemas u objetos de transformación con otras disciplinas, demostrando con ello un trabajo eminentemente disciplinario; en este sentido el proceso formativo seguirá eludiendo el religare entre sus diversos elementos y perpetuando una educación bancaria, que tiende a la repetición, la fragmentación, la competencia, el individualismo y la deshumanización. Constituyendo este un escenario de ser legado no sólo a través del proceso de enseñanza-aprendizaje sino en las áreas de desempeño de los futuros nutricionistas. De allí la importancia de replantearse una epistemología que abogue por la comprensión dialógica, trabajo colaborativo-significativo y transdisciplinario a fin de desarrollar un pensamiento complejo-ecologizado.

De acuerdo con lo expuesto, la preocupación por el currículo es evidente pero faltan mayores reflexiones inter y transdisciplinares acerca de los fundamentos epistemológicos, pedagógicos y didácticos en la formación y tal como lo expresa Magendzo (1996) se construyan en función del contexto, aspecto que implicaría materializarse en un currículo integral e integrado a los territorios. En adición, Glower de Alvarado (2014) sostenía que “la política institucional debe reflejar los valores de la organización y ser una reflexión cultural de las creencias y filosofía institucional” (p.10). En este aspecto, la carrera debería consensuar la multidimensionalidad de saberes-posiciones-sentidos inter y transdisciplinares sobre lo educativo en la institución, sin embargo, las políticas y apuestas de cambio a menudo son diseñadas por equipos que apenas representan las necesidades reales de la comunidad educativa.

En este marco de acción reflexiva, la situación problemática radica en que el proceso de formación de los nutricionista se soporta predominantemente

en el paradigma de la simplificación, es decir, en consonancia con un modelo formativo lineal, bancario y reduccionista, de modo que el aprendizaje se orienta desde un marco comprensivo que fragmenta, reduce y simplifica los problemas alimentarios y nutricionales, propiciando a su vez, -en la mayoría de los casos- soluciones desde la disciplina sin contextualizar con los escenarios nacional, regional y planetario. En contraste, es viable considerar la necesidad de una formación en el marco del pensamiento complejo en donde sus principios sean operadores del trabajo transdisciplinar, que les permita tener una visión religada de los elementos y procesos de la realidad. Debido a ello, se considera pertinente explorar la coexistencia y puesta en práctica de los operadores del pensamiento complejo en los estudiantes de nutrición durante su proceso formativo.

En este aspecto, se considera como supuesto investigativo que los estudiantes como seres complejos manifiestan en sus discursos algunos de los principios del pensamiento complejo en el marco del proceso formativo, pese a la predominancia simplificadora (Solana, 2008). La información que se presente es parte de la tesis doctoral que busca caracterizar el pensamiento complejo en los estudiantes de Nutrición de la Universidad de El Salvador.

MATERIALES Y MÉTODOS

El método empleado combina enfoques teóricos y empíricos, ya sean el analítico-sintético, inductivo-deductivo, reflexivo-relacional; asumiendo la investigación relacional de Andrade, (2019), quien sostiene como fundamentos la complejidad, la transdisciplinariedad, y la metodología rizomática desde los procesos de mesetización, segmentización y desterritorialización a fin de poner a dialogar los diferentes elementos del problema en estudio o policentrismo problémico. Sumado a ello, Andrade (2021, 2023) plantea una red de relaciones semánticas derivadas de la información recolectada, en la cual el investigador construye un esquema o rizoma mediante tres reflexiones: reflexividad, en la que realiza una interpretación del fenómeno acorde a su marco referencial; la autorreflexividad, se crea conciencia de lo que sabe y no sabe del fenómeno, y la auto-eco-reflexividad, en donde se religa los saberes previos con los actuales y la variabilidad del entorno, provocando nuevas interpretaciones, relaciones y organizaciones del fenómeno (Andrade & Rivera, 2019).

En la metodología rizomática las categorías de análisis son a su vez —campos, escenarios asociativos— de modo que, el campo relacional de comprensión es el pensamiento complejo en el proceso formativo, entendido como:

“la configuración de saberes presente en los estudiantes entre y a través de la puesta en marcha de operadores del pensamiento complejo en el conjunto organizado, recurrente y reticulado de actividades teóricas y prácticas que permiten la comprensión científica-disciplinar de los problemas alimentarios y nutricionales para el mantenimiento de la salud.” (Gallegos-López, 2024, p.24).

El pensamiento complejo como paradigma, representa un marco conceptual de siete principios: sistémico u organizacional, hologramático, retroactivo, recursivo, dialógico, autonomía -dependencia-, y reintroducción del sujeto (Morin et al., 2002); así como ocho saberes necesarios para su desarrollo, los cuales son condición humana, ceguera del conocimiento, saberes pertinentes, identidad terrenal, incertidumbre, comprensión, ética del género humano e historia común (Morin, 1999; Morin et al., 2018).

El estudio se realizó en el campus central de la Universidad de El Salvador de San Salvador, en la Facultad de Medicina, carrera de Nutrición. Se aplicó una entrevista en profundidad, con empleo de una guía semiestructurada de veintitrés preguntas abiertas. Dicho instrumento fue sometido a juicio de dos expertos en complejidad, de Multiversidad Mundo Real Edgar Morin y del Instituto de Educación Superior del Oriente de Caldas. Se consideraron quince casos que cumplieran los aspectos: brindar la mayor información posible, estar de acuerdo en participar, estudiantes activos de los módulos del ciclo II del año 2022, de primera a tercera matrícula, siendo excluidos aquellos que desistieran participar una vez iniciada la entrevista. La información recolectada se organizó en matrices de Excel y representada en mapas conceptuales elaborados en la multiplataforma Cmap Tools versión 6.04 del Institute for Human & Machine Cognition, de la Universidad de West Florida, EUA.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para Morin (2019, 2020) la reforma del pensamiento precisa también de una reforma de las instituciones, mismas que requieren auto-transformarse, es decir, reformar, repensar, resignificar, en otras palabras,

(de)construir los modos en que se habitan y conciben los espacios -lineales, uniformes, homogeneizados-, tiempos -estrictos, limitantes, innegociables, relaciones -bancarias, pasivas, de sumisión-, sentidos -arbitrarios, impuestos, autoritarios-, contenidos -memorísticos, repetitivos, universalistas-, saberes -monodisciplinarios, compartimentados, fragmentarios-, por decir algunos elementos propios de la linealización de la formación y de los sistemas educativos. En adición, en la educación superior, por ejemplo, el modelo escalonado-escarpado de la malla curricular que resalta logros por sobre apropiación de contenidos y adquisición de saberes por sobre problematización en contexto, resulta en muchos sentidos lineal y plano.

A dichos aspectos se deben sumar según Luengo (2020) la monodisciplinaria o insularidad disciplinar propia de algunos programas de pregrado; la reducción de aspectos como la apropiación y contextualización de saberes al desarrollo y adquisición de competencias; y la tendencia a evaluar la calidad de dichos procesos y sistemas educativos a través de pruebas y rankings internacionales que simplifican en términos de producción investigativa, puntaje obtenido, estandarización de pruebas, contenidos memorizados, etc., la complejidad por se de los diseños curriculares y de los programas universitarios. En otras palabras, reformar la educación es a la vez reformar el pensamiento y las ideas, pero, tomando en cuenta que dicha apuesta requiere incluir la incertidumbre y en este sentido el riesgo y la estrategia. A propósito, de un posicionamiento epistemológico, la complejidad le apuesta al hecho de transitar hacia dimensiones ético-políticas con las que una reforma a la educación puede constituirse a través del trabajo transdisciplinario viable y factible. Cabe agregar, que las universidades a menudo se ven colonizadas por ideas universalistas que son la manifestación lineal de la influencia hegemónica de los gobiernos y las ideologías que predicán; no obstante, existen en dichos espacios rebeldías y resistencias que instalan luchas y promueven el pensamiento crítico y transformador.

Es preciso considerar que para Morin esta reforma está presente durante toda su obra cumbre: *El método*, y en ella se expresa abiertamente la idea de que el pensamiento complejo debe combatir toda simplificación y a la vez usarla para esta lucha, o sea, no denegarla, sino superarla relacionamente a través de propuestas que promuevan el intercambio y la cooperación transdisciplinar en el marco del diálogo de saberes y la construcción conjunta de conocimientos; esto en gran medida, a razón de

que las disposiciones cognitivas/lingüísticas propias de los educandos, mismos que renuevan y mejoran su operatividad asociativa entre y a través de los procesos de enseñanza y aprendizaje significativo-colaborativo. Dicha educación, puede ir más allá de contenidos y memorizaciones sino como un aporte histórico-cultural de la humanidad al desarrollo de las ideas, y como tal -a la vez- se ve influenciada/transformada por los contextos en que dichos saberes se complejizan entre, a través y más allá de la cultura y los sistemas sociopolíticos.

A través del proceso formativo, se ponen en juego saberes, experiencias, posturas interpretativas, contenidos académico-disciplinares, reflexiones, memorias, historias, resistencias etc., es decir, todo aquello que posibilite resignificar y otorgar nuevos sentidos y derroteros a las ideas. Cabe anotar, que el diálogo de saberes tal como lo señala Delgado (2010, 2012) tiene un trasfondo complejo porque conlleva la complejización y su reorganización consecuente, además de incluir en dicho proceso todo aquello que emergió desde dichos religares, es decir, nuevas nociones, constructos, reflexiones e ideas.

Es importante anotar que los principios del pensamiento complejo permiten una apertura distinta a lo que se plantea como currículum complejizante y dialógico, lo que involucra varios aspectos: el paradigma de la complejidad, la transdisciplinaria y el rizoma, mismos que de ser integrados de forma religada pueden propiciar nuevos diálogos y desterritorializaciones de lo que se concibe como planteamiento, diseño, malla o apuesta curricular de un programa académico en educación superior. A continuación, se desarrolla cada operador acorde a lo que los estudiantes perciben acerca de cada uno de dichos principios -aun sin saber de ellos- aspecto que dará luces sobre los procesos de enseñanza-aprendizaje, su eficiencia en términos de diálogos de saberes y de expresión directa e indirecta de la complejidad en el proceso formativo.

Para Morin (1977): *"la noción de sistema completa la noción de organización tanto como la noción de organización completa la noción de sistema"* (p.172). Esta idea, expresa que un sistema es dinámico, abierto, reorganizacional, retroalimentado, autoorganizado y de identidad relativa, lo que resulta difícil de comprender desde una visión reduccionista donde el sistema se resume a la suma de sus partes o a la linealidad de sus operaciones. De allí que se ha considerado denominar los principios del pensamiento complejo como operadores debido a que producen y se reproducen, en este aspecto los

aprendizajes son producto y productores del proceso de enseñanza-aprendizaje, no obstante, es oportuno señalar que existe una colonización epistémica y disciplinar de las ideas que a menudo difumina la oportunidad de integrar saberes, métodos, estrategias y nuevos conocimientos ya sean propios o del contexto inmediato académico y sociocultural (Caballuz, 2015).

En consecuencia, los estudiantes tienen una aproximación de la relación del proceso formativo como un todo y a la vez como partes, entendido como niveles y módulos. En este aspecto, las respuestas fueron recurrentes en cuanto a que desconocen cómo suceden esas conexiones. Acorde con el planteamiento de Piaget *“el aprendizaje como proceso continuo de construcción, en el que sujeto y objeto se relacionan activamente y se modifican mutuamente [...] como consecuencia de los procesos de asimilación y acomodación”* (citado por Navarro & Campo, 2015, p.98), los educandos van conectando los temas, módulos o niveles mediante la integración, reformulación y elaboración de estructuras de sentido para conseguir el estado de equilibrio teórico-práctico como respuestas a las perturbaciones -saberes nuevos, (de)constructivos, resistencias a integrar conocimientos, dudas emergentes soslayadas, procesos académicos que impiden el cumplimiento de objetivos de aprendizaje, etc.- que ocurren en el proceso formativo.

Del mismo modo, se reconoce el énfasis en el aprendizaje memorístico, lo que evidencia epistemológicamente la linealidad de la educación y la permanencia de la concepción bancaria en cuanto al proceso formativo. Esto conlleva a fortalecer saberes incuestionables, radicales y repetitivos; asimismo, la concepción exógena de la educación y enfoque en los contenidos más que en los aprendizajes, experiencias y sentidos significativos constituye otra de las barreras a la integración relacional y dialógica de los saberes. Cabe mencionar, que si dichos impedimentos no logran ser reorganizados a favor de un aprendizaje complejizante, crítico, dialógico y transformador, el proceso formativo, contrariamente a lo que se espera de este, pasaría a ser repetitivo y permanente de la linealización de la educación (Andrade Salazar, 2018). Al respecto, Carmen (los nombres son ficticios para efectos de confidencialidad inscritas en el consentimiento informado) mencionó:

“De cierta manera lo siento, que ha sido así como memorístico y como yo tengo problema con eso, entonces, si me ha afectado, porque no soy así de memorizar, a mí me gusta más actuar, siento

yo que así funciona mejor actuando, pero, también considero que el hecho de la virtualidad es uno de los casos que ha afectado, porque no hemos podido poner en práctica todo eso, todo lo anterior, [...]. Creo que es la metodología que está establecida, o la pedagogía, o sea, son seguir los lineamientos, pues de la institución, porque para hacer ese cambio este es de revolucionar todo, es de revolucionar la educación [...].

En este tenor, Londoño (2003), indica que el aprendizaje sucede debido a la capacidad de relacionarse con la vida, o sea, de llevar lo aprendido al contexto inmediato. De acuerdo con ello, el currículo desarrollado en la carrera de Nutrición, si bien conserva esa linealidad memorística y bancaria, su carácter flexible le otorga el espacio y la oportunidad para abrirse a otros enfoques emergentes como la complejidad y el pensamiento complejo. Dicho de otra manera, de lo que se trata tal como lo señala Arce Rojas (2020), de pensar sobre las posibilidades de cambios en el ecosistema socioeducativo atendiendo el contexto.

El operador recursivo se refiere a la autoorganización y autoproducción del conocimiento, en el que el efecto incide en la causa, misma que produce otro efecto en un proceso continuo (Morin, 1977, 1986; Morin et al., 2002). Esto interpretado en la formación, revela que el proceso se produce así mismo, a la vez que se regenera y se reorganiza entre y a través de mecanismos de auto actualización y auto reorganización; formando de esta manera un bucle continuo que permite la retroalimentación y la novedad emergente de nuevas propiedades y procesos pedagógicos.

Para la mayoría de los estudiantes los saberes se retroalimentan y son correspondientes, sin embargo, coinciden en la falta de actualización debido que los docentes dan por sentado que los estudiantes han adquirido los dominios conforme avanzan en el proceso. También, los estudiantes son conscientes de la falta de lectura, de las pocas habilidades para la búsqueda de información y espacios de práctica preprofesional, lo que no les ha permitido contextualizar adecuada y relacionalmente los aprendizajes. Al respecto Magdalena señala: *“Por ejemplo, en la Unidad de Cuidados Intensivos (UCI), [...] me estaban observando que usaba fórmulas un poquito desfasadas”*. La narrativa da cuenta que el proceso formativo como un todo se regenera conforme avanza el proceso teórico-práctico y en este los aprendizajes se reactualizan entre y a través de los diferentes momentos y contenidos de su

formación experimentando recursividades que dan lugar a la autoorganización de los saberes en relación con la multidimensionalidad del contexto.

El operador retroactivo consiste en que el efecto actúa sobre la causa, hasta modificar el origen dando paso a emergentes complejos o novedades que a su vez ingresan y dan forma a nuevas emergencias (Morin, 1977). En este sentido, se refiere a la capacidad de comprender la relación bidireccional entre el presente y pasado de manera que la realidad se constituye de momentos interconectados. De este modo, la mayoría de los estudiantes opinan que los saberes adquiridos se asocian entre sí para dar forma a saberes novedosos que se aplican a contextos pedagógico-formativos y sociales. Al respecto, María precisó: *“para la evaluación y el tratamiento nutricional de las mujeres embarazadas, lo que vemos en la Universidad es totalmente diferente a cómo se evalúan las embarazadas en el nivel público de salud”*. Esto destaca como las experiencias presentes impactan en la interpretación de las experiencias pasadas, y éstas retroalimentan la comprensión del presente.

El operador autonomía-dependencia alude a la autonomía relativa la cual es dada por la dependencia de las condiciones operativas del sistema (Morin, 1977; Morin et al., 2002). Respecto al proceso formativo, Moreno (2003) lo considera como un sistema abierto y a la vez complejo dado que se autoorganiza y acoge-integra la incertidumbre, por lo que su autonomía depende de las condiciones que lo generan. En este marco la formación como *“apertura sistémica, organizacional, ontológica y existencial”* (ICFES-UNESCO, 2003, p. 384) impregna de dinamismo un proceso que contribuye a formar estudiantes como pensadores críticos, autodirigidos y responsables de sus decisiones personales y profesionales. Es de mencionar, que las asociaciones y religare que dan forma a la relación autonomía-dependencia son propios de los estudiantes que lo hacen de manera natural e intuitiva, asimilando grandes cantidades de información y a la vez decodificando, reorganizando y seleccionando la información derivada del proceso formativo, mismo que suele promover la separación de las cosas al definir y establecer este funcionamiento operativo y fragmentario a modo de imprinting y dispositivo.

En opinión de la mayoría de los estudiantes se interpreta la relación entre la nutrición y otras disciplinas vinculadas a ella; sin embargo son notorias las deficiencias en el mecanismo de ocurrencia. Al respecto, Fátima señala:

“Sí, por ejemplo, la nutrición se relaciona con la estadística, la economía, la psicología, la política. [...] siento que la alimentación y nutrición tiene que ver con muchas cosas, [...] con la mayoría de las cosas que le competen al ser humano en general”.

Lo anterior, referencia que si bien hay influencias paradigmáticas en la disciplina, esta conserva gran parte de su identidad disciplinar por lo que existe dependencia a la variabilidad de los contextos educativos, además de resistencia al cambio -en estudiantes y docentes-. En otro aspecto, es fundamental reforzar la idea de que la nutrición como disciplina tiene su propia identidad, misma que está fundamentada en: (a) un enfoque de la salud biopsicosocial; (b) una pedagogía tradicional con matices problematizadores, es decir, una identidad dada por la dependencia con otras disciplinas, escuelas, facultades, universidades, país y región. Tal es así, que, al cuestionar acerca de la práctica específica de la nutrición, lo que significa, que la formación debe vincularse con el contexto y situaciones concretas que le sean significativas a los estudiantes, sin embargo estos tienden a polarizar su postura, ya que por una parte algunos piensan que la práctica debe ser acatada, seguida o interiorizada de forma indiscutible, y sin embargo, otros se inclinan por la flexibilidad influenciada fuertemente por el contexto. Al respecto, José y Ruth refieren respectivamente:

“Siento que sí, porque eso nos facilita hacer quizás con mayor precisión nuestro trabajo, por ejemplo, la nutrición tiene sus propios enfoques, los cuales se materializan en la familia, comunidad y sociedad”.

“No, considero que no, [...] se nos dan como las bases, pero uno tiene que saber cómo aplicarlas y en qué manera y en qué momento también, o sino reforzarse, como le digo. Por ejemplo, siento que la nutrición abarca muchos aspectos, en el aspecto comunitario, clínico, quizás también industrial, siento que no es muy específico, sino que abarca bastante”. [...].

De allí que los estudiantes opinan que en el proceso formativo debe haber flexibilidad para integrar diversos conocimientos y saberes, dado que ello permite generar la identidad y sentido de pertenencia respecto a los procedimientos, apuestas epistémicas y contexto. La relación dependencia-independencia es relativa y se contextualiza acorde a las variabilidades de las inter-retro-acciones entre

los sistemas y sus diversos componentes, mismo que a través del principio dialógico encuentran vías integrativas para robustecer sus relaciones (Morin, 1986). Cabe señalar, que dichos escenarios pedagógicos y transformacionales son vividos por los estudiantes de forma relacional y rizomática, o sea, en función de las relaciones de sentido teórico-prácticas-experienciales por lo que los saberes, las epistemes, las reacciones y bucles inter-retro-activos transforman la identidad de las ideas y las prácticas a medida que la variabilidad del contexto se percibe como relativo y en frecuente auto-eco-transformación.

En el operador hologramático se reconoce que el todo existe por la relación entre y a través de sus partes, donde cada parte es un todo en sí mismo que contiene la totalidad como principio; en este caso los “[...] sujetos contienen el todo del cual forman parte y que al mismo tiempo hacen parte del todo” (Morin, 1991, p.15). Para el caso en cuestión, el proceso formativo se constituye como el todo y los educandos como parte intrínseca de la totalidad; sin embargo, los estudiantes tienen dificultades para verse como parte y a la vez como todo, tal es el caso que al preguntarles acerca de la totalidad de saberes y su particularidad interpretativa, Inés y Lourdes expresaron respectivamente:

“Voy relacionando mi propia experiencia con la nutrición, [...] dejé de consumir algún alimento y esto me hizo mal a mi salud, entonces ya sé que debo tener una alimentación equilibrada para que esto tenga un beneficio en mi salud, pero si veo la nutrición como algo aislado o que los conocimientos solo los voy a poner en práctica en los pacientes creo que es menos enriquecedor que verme a mí misma como dentro del proceso”.

“Porque pienso que una de las cosas que quizás impacta bastante al ver diferentes tipos de pacientes, es que le ayuda a generar a uno bastante empatía con las diferentes situaciones de los pacientes”.

Acorde a la narrativa de los estudiantes, conforme avanza su proceso y ponen sus habilidades en función social, se adquiere la conciencia de ser parte del proceso formativo, pero difícilmente reconocen que dicha parte es referencia de la totalidad que los compone, esta condición puede afectar por ejemplo, la idea de cultura, pertenencia y adherencia institucional, llegando en algunos casos a suscitar la sensación de necesidad de escape o deseo de graduarse -a toda costa- dadas las condiciones

de dificultad presentadas a lo largo de su proceso formativo. Reconocer lo hologramático en este campo implicaría reconocer un sello identitario como refiere Mondino (2021): *“No solo cada parte hace al todo, sino que el todo está también inscrito en cada parte: la identidad es, a la vez, un todo institucional presente en cada parte, y esa totalidad —como tal— integra cada parte”* (p.46). En coherencia con ello, cada saber adquirido y transformado en la experiencia personal y teórico-práctica, tiene como imprinting la huella de la totalidad, o sea, las intenciones, contenidos, metodología, evaluaciones, por decir algunos elementos, de los que emergen diversos modos de comprender la formación, aspecto que podría estar presente de forma consciente o no en los educandos y maestros.

Cabe anotar, que cuando los estudiantes logran ser conscientes de su papel como parte, y a la vez como todo, en el proceso formativo, la claridad suele ser mayor en torno a la contribución del educando en el proceso educativo, aspecto que conlleva a que la educación los transforme y que ellos también se auto-eco-transformen en los lugares teórico-prácticos y a su vez en todos los entornos donde lo educativo se pone en escena. Es así, como los estudiantes no registran entre su acervo identitario y cognoscitivo su papel como parte-todo en la totalidad hologramática de su proceso formativo, esto porque se consideran exógenos del proceso educativo y reafirman con ello la prevalencia de saberes lineales a modo de enfoques pedagógicos tradicionales, modelos deductivos, enseñanza memorística, dependencia, baja autoestima y creatividad; ejemplo de esto se encuentra en la siguiente narrativa de Juan y Magdalena respectivamente:

“Es bastante de memoria y no mucho el aprendizaje, y siento que, es más, así como se dice, lo tengo que respetar y no puedo utilizar ciertos criterios propios porque no está muy cómo permitido, no es muy flexible en cuanto a ese aspecto. Siento que se debe a la estrategia pedagógica del docente, y que el docente tenga que respetar lineamientos generales que le hayan establecido en niveles superiores, y que quizás por eso se apegue a algo en específico”.

“El mismo docente te dice, así se tiene que hacer por obligación y uno le trae, mire, yo le traigo esta nueva propuesta que ha surgido y no la toman en cuenta y si hay docentes que como que les vale si tú aprendiste o no, y cada estudiante aprende de diferente manera y hay muchos docentes que no se toman el tiempo para cada

estudiante, sino que los toman como colectivo, y digamos, si una persona pasó el examen, ah, es que mi examen estuvo bien, porque ese grupo de personas lo pasaron, pero no se han ido a preguntar por qué sí lo pasaron y por qué el otro grupo no pasó, en el caso de si pasa módulo o no, no se cuestionan porqué lo han dejado, si es por la falta de interés del estudiante o es porque los docentes también a la hora de evaluar o sea, ya quieren como ponchar, ya quieren dejar en mala al estudiante, y no se preguntan porqué el estudiante es así, si no es que usted tiene que hacer así, porque así le estamos diciendo que sea”.

En el operador dialógico se constituye la posibilidad de religar los opuestos a través del antagonismo complementario y la lógica del tercero incluido (Morin, 1977). En este punto Morin advierte que en el proceso dialógico se abandonan las «cegueras e ilusiones» para acoger la incertidumbre, el cambio contextual, la interinfluencia entre sistemas, la irreversibilidad, la fluctuación y el caos. Una ceguera, conlleva ignorar otras formas de conocimiento, ciencia, saberes, perspectivas, procesos dimensiones, contextos, opuestos e incluso las propias ideas aludiendo a ideas lineales, disciplinares, universales y unidimensionales. Este fraccionamiento de la realidad en partes claramente definibles y descriptibles imposibilita la generación compleja de “[...] formas insospechadas de complementariedad” (Santos, 2010, p.27).

La mayoría de los estudiantes suele identificar las diferentes ideas, posturas, paradigmas o modelos explicativos desde una mirada específicamente disciplinar, otros no lo identifican y otros no entienden de qué se trata la disciplinariedad. En relación con esto, Auxiliadora comenta lo siguiente:

“Digamos en el módulo tres tuve un docente que se enfoca solo en el área biológica y no en el área social, [...] y solo se ponía a leer toda la presentación que había hecho, y no dejaba como que uno le cuestionara y decía, vaya a investigar, entonces no le podíamos cuestionar, y entonces de nada sirve que estuviéramos conectados a la clase sí, sólo a leer iba”.

En esta respuesta no solo es evidente la educación bancaria y lineal, sino también, la imposición de lineamientos analíticos inamovibles y restrictivos, o sea, en antagonismo perpetuo. Por ello, el proceso formativo como sistema complejo va a comportar antagonismos los cuales desde una perspectiva de complejidad resultan complementarios tal como lo

señala Morin (1977). Es de aclarar, que aunque en las respuestas dadas por los estudiantes se identifican diferentes posturas, incluso contradictorias, su presencia hace parte de la organización rizomática del currículo siendo esta una forma de representación de la relación entre caos-organización-orden. Empero, es de agregar que los educandos no se percatan de la necesidad de religare o de diálogo entre los saberes por lo que dicha condición revela la ausencia de orientaciones dialógicas bajo la lógica del tercero incluido. Esta disposición dialógica, constituye una actitud y a la vez la intención de reformar las ideas acogiendo el tercero incluido. De allí que, se pueda dudar de lo que se conoce, pero, que se escuche activamente al otro, incluso al opuesto con respeto y valoración de sus ideas (Morin, 2005; Nicolescu, 1996). Como ejemplo del diálogo articulado de las diferentes posturas en el proceso formativo, Andrés y Concepción expresan respectivamente:

“Sí siento necesario que haya ese diálogo, pero siempre debe de tratarse de hacer ese diálogo, porque a veces digamos algo un poco más de autoridad en el sentido de que una cosa se estipula como la correcta y la otra como incorrecta, pero claro que es necesario mantener eso, porque las diferencias de opiniones son los que al final terminan construyendo nuevos conocimientos y mejores”.

“Sí, sí es necesario, [...] una idea muy compartida no quiere decir que esté bien y entonces el hecho de que exista un contrapeso o una oposición genera la reflexión, genera el debate [...], me va a generar la duda”

Resulta interesante que, en la opinión, de los estudiantes, el hecho de reconocer la interacción de los opuestos en el proceso formativo favorece la construcción de conocimiento y el desarrollo del pensamiento, lo cual revela una inclinación natural hacia la comprensión de lo complejo. Por ello Morin (1999) recalca la necesidad de enseñar el conocimiento pertinente y con ello la responsabilidad sobre las ideas. Así como el trabajo colaborativo para la producción de conocimiento y resolución de problemas complejos, por el hecho que la mente humana es limitada (Morin, 2020), y en consecuencia precisa dialogar con otros sujetos en los que se otorguen roles y asignaciones. No cabe duda, que esa actitud pasa por tener oportunidades sin imposiciones o jerarquías. Empero, pese a esta aspiración, la mayoría de los estudiantes no tiene claridad de la articulación de las diferentes posturas o apuestas epistémicas-disciplinares en aras de la

generación de nuevo conocimiento.

En el operador reintroducción al sujeto se considera devolver la condición de sujeto, quien es «observador/conceptuador», ya que «interviene y es intervenido», construyendo conocimiento (Morin, 2005; Morin et al., 2002). Al respecto se les preguntó sobre la suficiencia y necesidad de saberes ante lo cual resaltó la tendencia a relacionar sujeto – objeto, escenario donde el observador es conceptuador, pero-, no logra ser conceptuador por otros. Lo anterior, quiere decir que los estudiantes perciben que el proceso de enseñanza-aprendizaje es bidireccional (educador-educando), pero, que el docente es quien desde una postura tradicional de lo educativo, se asienta en los conocimientos y los transmite a modo de información valorada como pertinente, de modo que es él quien le atribuye en todo sentido valor, pertenencia y calidad al acto educativo, los contenidos y los procedimientos pedagógicos. Al respecto Encarnación y Esperanza mencionaron respectivamente:

“Pero por la modalidad virtual cada estudiante está buscando un paciente en su casa y de ahí, el estudiante expone su caso frente a la clase, pero la retroalimentación de los docentes solamente es para decirnos aquí lo pudieron haber hecho mejor y aquí así, pero esa retroalimentación que yo esperaba, no, no la tuvimos, como le digo, tal vez más adelante eso si se mejora”.

“Tal vez al principio [...] por ejemplo, le hablé de anatomía, yo sentía ¿y para qué veo esto? ¿Qué tiene que ver con la nutrición? Pero, ya claro, es porque no tenía mucho conocimiento, ahora siento que me quedé corta cuando empecé ahí, tuve que haber puesto quizás más de mi parte para comprender mejor todo eso que nos estaban dando en el ciclo anterior”.

Esto demuestra, como los estudiantes siguen considerándose exógenos del proceso formativo, distanciándose del proceso formativo, siendo entes pasivos, dependientes de una visión reflectora de la realidad. En la Figura 1 se grafica la caracterización del pensamiento complejo identificada en los estudiantes de nutrición a partir de sus narrativas.

Realizada la reflexión sobre el pensamiento complejo en los estudiantes de nutrición de la Universidad de El Salvador, es pertinente enseñar los ocho saberes según Morin (1999; Morin et al., 2018). La condición humana, implica una postura antro-po-ética, para la conciencia de la relación entre las “autonomías individuales, participaciones comunitarias y sentido de pertenencia a la especie humana” ya que de ello

depende la sobrevivencia de la humanidad (Morin, 1999, p.54). Conforme a la opinión de los estudiantes, en el proceso formativo se tiende a enseñar sobre todo la dimensión individual y social, siendo ausente lo referido a la especie humana.

La ceguera del conocimiento, las cuales convocan a errores e ilusiones que obstaculizan la mente humana (Morin, 1999). Para el caso, una ceguera, es ignorar la multidimensionalidad, el desorden, la incertidumbre, las insuficiencias, las diversas formas de aprendizajes, por mencionar algunas, que se manifiestan durante el proceso formativo, y para lo cual debería estarse preparado si se tuviese una visión de complejidad. En adición, Soler Gil (2023) es de la idea que los problemas de suficiencia e insuficiencia que ocurren en el abordaje de la realidad, suceden al no reconocer las limitaciones humanas. Como ejemplo de ello, los estudiantes identificaron insuficiencias, carencias e incluso precisan de formas recurrentes de organización para reforzar conocimientos claves que en su ideario les otorgarían mayor seguridad educativa, práctica y profesionalidad. Sin embargo, los estudiantes se focalizan desde su disciplina, ideas, saberes y procedimientos; en este punto, se precisa cuestionar los enfoques, modelos o perspectivas de quienes enseñan.

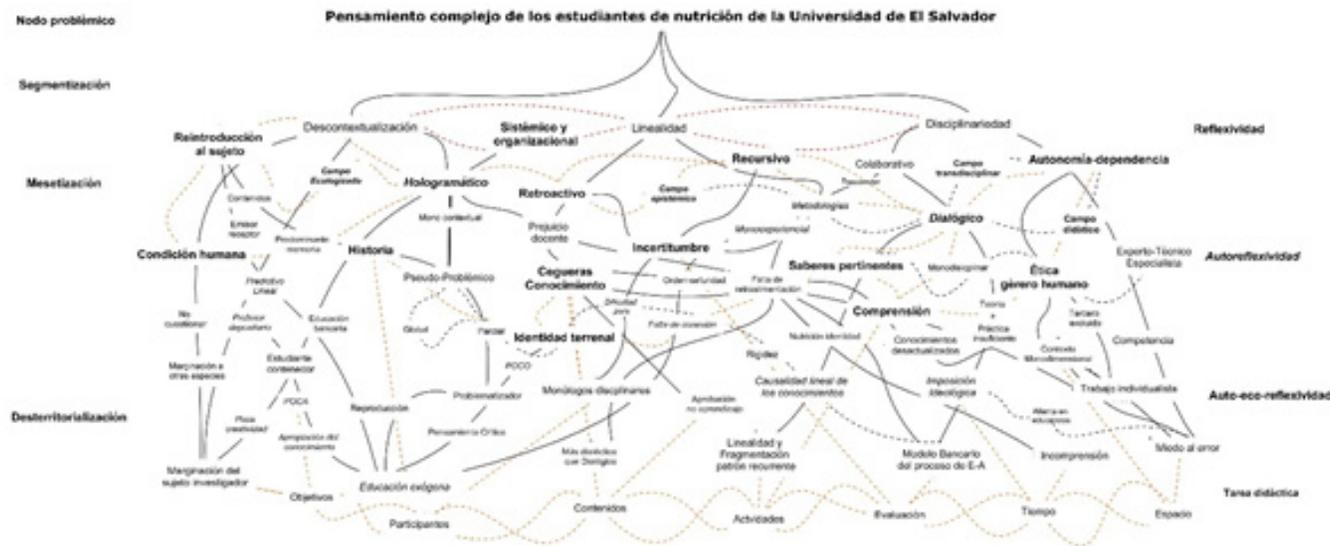
Sobre la identidad terrenal, se comprende el sentido de pertenencia que el ser humano tenga con el planeta, el otro, los otros, los ecosistemas y el colectivo, o sea, que entre y a través de este emerge y se hace manifiesta la necesidad de asumir, acoger y poner en práctica la responsabilidad individual y colectiva sobre la tierra-patria (Morin, 1999; Morin et al., 1993). En relación con la sensibilidad de la educación en lo que toca a la coexistencia y respeto por otras especies que cohabitan el planeta, los estudiantes coinciden en que se le enseña el respeto al otro y otros, pero no existe una visión antro-poética o de ética compleja en el proceso académico.

En cuanto a la incertidumbre, Morin es de la idea de “superar las certezas de la ciencia, acoger el azar, el ruido y la irreversibilidad” (Morin, 1999, p.39), en adición a ello, sostiene “toda acción escapa a la voluntad de su autor cuando entra en el juego de las inter-retro-acciones del medio donde interviene” (Morin, 1999, p.44), de modo que esas acciones más que predichas resultan emergentes y garantes de la actualización de los sistemas, de su cambio o mutabilidad. Como ejemplo Dolores manifestó:

“Si todo va de acuerdo con un orden, [...] en un proceso formativo no puede abordarse cosas que no sabe que van a suceder, por ejemplo, en

Figura 1

Rizoma del pensamiento complejo de los estudiantes de nutrición de la Universidad de El Salvador



el caso de la COVID 19, eso nadie lo sabía, de repente fue una emergencia y todo el mundo nos quedamos, así perplejos, y tuve miedo a equivocarme”.

Lo anterior, revela la necesidad de enseñar la incertidumbre en el proceso formativo y no pasarla por alto como algo que no tiene piso epistemológico o rigor comprobatorio. Por otra parte, al preguntar sobre las acciones realizadas por el estudiante, más allá de la exigencia académica; algunos refirieron realizar búsquedas en internet para clarificar dudas o dialogar con otros estudiantes. Respecto a ello, Morin (1999) plantea la idea que la «exigencia académica» no debe limitarse a la adquisición de conocimientos sino la formación de ciudadanos críticos, reflexivos, creativos y dialógicos con las comunidades, vinculando el saber científico y ordinario para pensar la complejidad del mundo que les rodea. De allí que el diálogo constituye una de las formas más ajustadas y privilegiadas de afrontar la incertidumbre, de acogerla y extraer de ella novedades y hallazgos. Idea que según Freire (2004) en el diálogo entre iguales se promueve el respeto, compromiso, responsabilidad, y la aptitud crítica para construir una sociedad justa y equitativa.

Respecto a la comprensión, Morin (1999) alude a la de tipo intelectual u objetiva y a la humana e intersubjetiva, este saber apoya el principio de reintroducción al sujeto, ya que las explicaciones objetivas son suficientes pero para la intersubjetiva, insuficiente. Dicho así, los estudiantes consideran que lo aprendido se analiza y se aplica en contextos

diversos y se hace casi siempre de forma rutinaria puesto que, aunque cambien las condiciones de presentación de los fenómenos la estrategia investigativa, de intervención o analítica se hará a través de protocolos incambiables y “científicamente comprobados; así, cuando los saberes teóricos y técnicos pasan al dominio de la praxis en el contexto profesional, se suelen demandar análisis ordenados y dispuestos a comprobar hipótesis, pero, también direccionados a contrastar teorías, pero, nunca a reticular, entretejerlos o rizomatizarlas dialógicamente.

La ética del género humano, indica la inevitabilidad de la “relación antropológica entre individuo/sociedad/especie” (Morin, 1999, p.54), relación que se sostiene en el imperativo de enseñar la condición humana, lo que supone asumir una postura antropológica, donde religuen las autonomías individuales, la hospitalidad, las participaciones comunitarias y el sentido de pertenencia a la especie humana. Acoger y enseñar la nueva ética, significa reconocer la sensibilidad hacia las especies, en un sistema considerado vivo y complejo (Morin, 2003). Por ello, pensar en la relación individuo/sociedad/especie, conlleva a aceptar que los individuos construyen el proceso reproductor de todos los elementos que dan forma y sentido a la especie humana, pero, a la vez este mismo proceso es producido por los individuos. Por tanto, pensar complejamente significa, comprender la unidad en la diversidad y su diversidad en la unidad, o sea, la unitas multiplex. En relación con ello, Pedro señala: “Realmente sí, porque cuando inicié, como que

ignoraba lo que estaba pasando, pero uno se queda asombrado de ver la cantidad de dimensiones que puede tener una persona”.

La mayoría de los estudiantes no reconocen la relación del individuo, sociedad y especie, reduciendo a una acción ecológica sus intenciones reparadoras y protectoras de los diversos ecosistemas, de allí que desconozcan la necesidad de desarrollar una nueva ecología del pensar que permita reorganizar las ideas, pensar críticamente y estar en apertura hacia la incertidumbre, la interacción dialógica y el diálogo de saberes. Esta información al igual que el estudio realizado por López-Calva (2022) en la cual el pensamiento complejo no está suficientemente presente en los programas de formación del profesorado, de manera que estas indagaciones constituyen aproximaciones empíricas y dan indicios de la necesidad de considerar la complejidad en la comprensión del mundo.

Con relación a la historia, este aborda las raíces, historia nacional, continental y global. La historia implica una alta sensibilidad en el sentido del tiempo y amplía la comprensión de los cambios en las diversas culturas que afectan y son afectadas en las múltiples interconexiones e interdependencias propias de una realidad compleja (Morin et al., 2018). Al cuestionar sobre los aportes de los aspectos históricos de la disciplina y de su propia historia personal en el proceso formativo los estudiantes no logran comprender del todo la importancia de la historia en su proceso formativo. Como ejemplo, Andrés comentó:

“Recuerdo escuchar historias [...] de las cortas de café, nada más les daban como tortillas diarias y que comían con frijoles, imagínese las largas jornadas de trabajo [...] y el grado de desnutrición que eso podía llevar a esos pobres trabajadores, entonces, debido a esto, de esas condiciones, que esos trabajadores sufrieron ahora se ha podido como regular, aunque no es lo ideal, pero esa es la historia”.

Sobre la pertinencia y necesidad de enseñar la historia, las opiniones son divididas e incluso hay quienes externaron poca importancia, por no considerarla parte de la disciplina o en su defecto referirse a un aspecto de “cultura general”, y no como algo específico o esencial de la formación del nutricionista. En tal caso, si para Morin et al.,(2018) la historia amplía la comprensión de los cambios en las diversas culturas, para Soto (2023) enseñar historia en el aula genera tensión debido a que se

compite con otros escenarios reales y virtuales, tanto escalares (mundial, regional, nacional, etc.) como interseccionales (clase social, religión, género, etc.), por lo que sugiere ampliarse el concepto de escuela.

CONCLUSIONES

Se identificó el uso semántico y reiterativo de los principios sistémico, autonomía-dependencia, dialógico de manera natural y recurrente, sin embargo no existe conciencia de su operatividad. Otra importante valoración es la necesidad de enseñar la condición humana, la ceguera del conocimiento, la identidad terrenal, incertidumbre, la comprensión como saberes necesarios para comprender los mecanismos que ponen en marcha los principios del pensamiento complejo. De allí que el rizoma de los estudiantes de nutrición se caracteriza por una formación predominantemente simplificadora, pedagógicamente bancaria, de causalidad lineal, aprendizaje contextual disciplinar, saberes fragmentados; por lo que logran perpetuar el modelo lineal de la formación, con la adición que este se traslada en sus ámbitos de desempeño y de la sociedad en general.

AGRADECIMIENTOS

A los estudiantes de segundo a quinto año de la Carrera de Nutrición de la Universidad de El Salvador y al Director de Tesis Dr. José Alonso Andrade Salazar, profesor e investigador de la Universidad Cooperativa, Colombia.

REFERENCIAS

- Andrade Salazar, J. A. (2018). ¿Es la violencia lineal? Linealidades y no-linealidades de la violencia (E. Borja & A. Insuasty, Eds.).
- Andrade Salazar, J. A. (2019). La investigación relacional y sus pilares: Complejidad, rizoma y transdisciplina. En R. Rivera Pérez & J. A. Andrade Salazar (Eds.), Reflexiones sobre investigación integrativa: Una perspectiva inter y transdisciplinar (pp. 65-89). Editorial Kavilando-Redipaz.
- Andrade Salazar, J. A. (2021). Investigación relacional y rizoma investigativo: Apuntes para su aplicación metodológica (D. Palacios Gómez, Ed.). Bonaventuriana.
- Andrade Salazar, J. A. (2023). Apuntes sobre rizoma investigativo, transmétodo y educación complejizante. Revista Diálogo Interdisciplinario sobre Educación - REDISED,

- 33-40. <https://revistas.ues.edu.sv/index.php/redised/article/view/2774>
- Andrade Salazar, J. A., & Rivera Pérez, R. (2019). La investigación relacional y sus pilares: complejidad, rizoma y transdisciplina. En J. A. Andrade Salazar (Ed.), *Reflexiones sobre investigación integrativa: Una perspectiva inter y transdisciplinar* (Primera, p. 125). Editorial Kavilando-Redipaz.
- Arce Rojas, R. S. (2020). Convergencias y diferencias entre el pensamiento complejo y la ecología de saberes. *Sophía*, 29, 69-91. <https://doi.org/10.17163/soph.n29.2020.02>
- Cabaluz, F. (2015). *Entramando Pedagogías Críticas Latinoamericanas*. Editorial Quimantú. www.quimantu.cl
- Delgado, C. (2010). Diálogo de saberes para una reforma del pensamiento y la enseñanza en América Latina: Morin, Potter, Freire. *Estudios* 93, VIII, 23-44. <https://doi.org/10.5347/01856383.0093.000174747>
- Delgado, C. (2012). Conocimiento, conocimientos, diálogo de saberes. *RUTH*, 10, 159-180. http://www.academia.edu/3628902/Conocimiento_conocimientos_diálogo_de_-_Carlos_Jesus_Delgado_Diaz
- Freire, P. (2004). *Pedagogía de la autonomía*. En Paz e Terra SA. Terra SA.
- Gallegos-López, B.-I. (2024). *Pensamiento complejo en el proceso formativo de los estudiantes de nutrición de la Universidad de El Salvador [Tesis doctoral inédita]*. Universidad de El Salvador.
- Glower de Alvarado, A. M. (2014). Modelo Educativo y Políticas y lineamientos curriculares de la. En *Universitaria* (Ed.), Secretaria de Planificación (1a., p. 108). <https://secplan.ues.edu.sv/estrategico>
- ICFES-UNESCO. (2003). *Manual de iniciación pedagógica al pensamiento complejo*.
- Londoño, S. L. (2003). Educación Superior y Complejidad: Apuntes sobre el principio de flexibilización curricular. En *Manual de Iniciación Pedagógica al Pensamiento Complejo* (pp. 325-337). UNESCO.
- López-Calva, J. M. (2022). *Pensamiento complejo, ética planetaria y transformación social en la formación del profesorado*. *Revista Digital de Investigación en Docencia Universitaria*, 16(1), e1568. <https://doi.org/10.19083/ridu.2022.1568>
- Luengo González, E. (2020). *La metamorfosis de la universidad: Homenaje a Edgar Morin* (Universidad Jesuita de Guadalajara ITESO, Ed.; Vol. 0, Número 10). Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente. https://www.researchgate.net/publication/357796021_La_Metamorfosis_de_la_Universidad
- Magendzo, A. (1996). *Currículum, educación para la democracia en la modernidad*. (I. para el D. de la D. L. C. Galán, Ed.). <https://bibliotecadigital.uchile.cl/discovery/fulldisplay/alma991005002159703936/>
- Mondino, G. M. (2021). Contribuciones para un análisis de la universidad desde el pensamiento complejo. *Enfoques*, 33(1), 41-63. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=25967826003>
- Moreno, J. C. (2003). Fuentes, autores y corrientes que trabajan en la complejidad. En *Manual de iniciación pedagógica al pensamiento complejo* (pp. 19-38). UNESCO. <http://www.multiversidadreal.edu.mx/que-es-el-pensamiento-complejo.html>
- Morin, E. (1977). *El Método I: La naturaleza de la naturaleza* (6a ed.). Cátedra. Colección Teorema Serie Mayor. <https://edgarmorinmultiversidad.org/index.php/descarga-el-metodo-i-edgar-morin.html>
- Morin, E. (1980). *El Método II: La Vida de la Vida* (Cátedra. Colección Teorema Serie mayor., Ed.). Cátedra. Colección Teorema Serie Mayor. <https://www.edgarmorinmultiversidad.org/index.php/descarga-libro-metodo-ii-al-iv.html>
- Morin, E. (1986). *El Método III: El conocimiento del conocimiento* (Cátedra. Colección Teorema Serie mayor., Ed.). Cátedra. Colección Teorema Serie Mayor. <https://www.edgarmorinmultiversidad.org/index.php/descarga-libro-metodo-ii-al-iv.html>
- Morin, E. (1991). *El Método IV: Las ideas* (Cátedra. Colección Teorema Serie mayor., Ed.). Cátedra. Colección Teorema Serie Mayor. <https://www.edgarmorinmultiversidad.org/index.php/descarga-libro-metodo-ii-al-iv.html>

- Morin, E. (1999). Los siete saberes necesarios para la educación del futuro. En UNESCO (Vol. 3). <https://doi.org/10.37354/riee.2003.033>
- Morin, E. (2001). El Método V: La humanidad de la humanidad. En Cátedra. Colección Teorema Serie mayor. (Ed.), Multiversidad. Cátedra. Colección Teorema Serie Mayor. <https://www.edgarmorinmultiversidad.org/index.php/descarga-libro-metodo-ii-al-iv.html>
- Morin, E. (2003). El Método VI: La ética (Cátedra. Colección Teorema Serie, Ed.). Cátedra. Colección Teorema Serie Mayor. <https://www.edgarmorinmultiversidad.org/index.php/descarga-libro-metodo-ii-al-iv.html>
- Morin, E. (2005). Introducción al pensamiento complejo. (M. Pakman, Ed.). Gedisa. <http://www.gedisa.com>
- Morin, E. (2019). Por una reforma del pensamiento. UNESCO. <https://courier.unesco.org/es/articles/por-una-reforma-del-pensamiento>
- Morin, E. (2020). La mente bien ordenada: Repensar la reforma, reformar el pensamiento. En Siglo XXI (Ed.), Google Play Libros. https://play.google.com/books/reader?id=e7LnDwAAQBAJ&pg=GBS.PT3&hl=es_419
- Morin, E., Kern, A. B., & Serrat, M. (1993). Tierra-Patria. https://books.google.com/books/about/Tierra_patria.html?hl=es&id=nQtgb3w6c0QC
- Morin, E., Ciurana, E. R., & Motta, R. D. (2002). Educar en la era planetaria: El pensamiento complejo como método de aprendizaje en el error y la incertidumbre humana (IV). Universidad de Valladolid. <https://edgarmorinmultiversidad.org/index.php/descarga-educar-en-la-era-planetaria.html>
- Morin, E., Domínguez, E., & Delgado, C. (2018). El octavo saber. En C. Delgado (Ed.), Diálogo con Edgar Morin. <https://www.edgarmorinmultiversidad.org/index.php/libros-sin-coste/692-el-octavo-saber.html>
- Navarro, A., & Campo, M. L. del. (2015). El Proceso de enseñanza y aprendizaje. En C. Encuentro (Ed.), Hacia una didáctica de la nutrición: Herramientas pedagógicas para la educación alimentaria nutricional (pp. 75-135). E Libro. <https://elibro.net/es/ereader/biblioues/78177?page=1>
- Nicolescu, B. (1996). La transdisciplinariedad Manifiesto (J.-P. Bertrand, Ed.). Multiversidad Mundo Real Edgar Morin, A.C. www.multiversidadreal.org
- Santos, B. D. S. (2010). Descolonizar el saber, reinventar el poder. *Development and Change*, 44(3).
- Solana Ruiz, J. (2008). El pensamiento complejo como alternativa al neopositivismo y al posmodernismo en antropología. *Synergies monde*, 4, 235-244.
- Soler Gil, R. A. (2023). El método científico y el pensamiento complejo para la investigación en la educación superior actual. *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, 15(2), 147-160. <https://doi.org/10.22335/rict.v15i2.1780>
- Soto Yonhson, A. (2023). Tendiendo puentes didácticos entre las narrativas autobiográficas, el pensamiento histórico disciplinar y los procesos de subjetivación: Una propuesta teórica. *Revista de Estudios y Experiencias en Educación*, 22(48), 327-343. <https://doi.org/10.21703/0718-5162.v22.n48.2023.019>

Esta página está dejada intencionalmente en blanco



Revista MINERVA

Plataforma digital de la revista: <https://minerva.sic.ues.edu.sv>

Artículo Científico | Scientific Article

Factores vinculados a la mortalidad de tilapia (*Oreochromis niloticus*) por estreptococosis causada por contaminación con *Streptococcus agalactiae* en granjas acuícolas del Distrito de Riego de Atiocoyo, El Salvador

Factors associated with the mortality of tilapia (*Oreochromis niloticus*) due to streptococosis produced by *Streptococcus agalactiae* in aquaculture farms in the Atiocoyo Irrigation District, El Salvador

M. Polio-Martínez¹, C. Buendía², M. Vasquez-Jandres², M. Romero-Rivera¹, J. Palacios-Valladares¹, K. Vásquez-Hernández¹, Y. Perdomo-Ramírez¹

Correspondencia: carmen.polio@ues.edu.sv

1 Facultad de Química y Farmacia, Universidad de El Salvador

2 Centro de Investigación y Desarrollo en Salud (CENSALUD), Universidad de El Salvador

RESUMEN

Las enfermedades causadas por bacterias y parásitos representan un serio problema para el cultivo de tilapia. Una de las causas principales de mortalidad de tilapia (*Oreochromis niloticus*) en los estanques de cultivo es la contaminación de los peces con la bacteria *Streptococcus agalactiae*. La presente investigación tuvo como objetivo identificar los factores vinculados a la mortalidad de tilapia debida a estreptococosis producidas por *S. agalactiae*, en granjas acuícolas del Distrito de Riego de Atiocoyo, El Salvador, durante el periodo de marzo a junio, 2022. Se realizó muestreo de tilapia, agua y alimento en 28 estanques del referido distrito, para identificar en dichas matrices, la presencia de *S. agalactiae* y su correspondiente serotipo. Como resultado, se encontró que la bacteria responsable de la estreptococosis es *S. agalactiae* y que

DOI: [10.5377/revminerva.v7i3.18908](https://doi.org/10.5377/revminerva.v7i3.18908)

Enviado: 28 de febrero de 2024

Aceptado: 31 de mayo de 2024

Palabras clave: Cultivo de tilapia, estreptococcus agalactiae, oreochromis niloticus, mortalidad de tilapia, El Salvador

Keywords: Tilapia farming, streptococcus agalactiae, oreochromis niloticus, tilapia mortality, El Salvador



Este contenido está protegido bajo la licencia CC BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

está presente únicamente en la tilapia, siendo los serotipos Ia y III pertenecientes al gen *cps1aH* y *cps1a/2/3I* de la región del Polisacarido Capsular (CPS). Adicionalmente, se evaluaron algunos parámetros fisicoquímicos del agua en los estanques. Los resultados revelaron una relación entre la presencia de *S. agalactiae* y niveles bajos de oxígeno disuelto en el agua, altas temperaturas y elevadas concentraciones de iones fosfato y amonio por encima de niveles permitidos.

ABSTRACT

Fish diseases caused by bacteria or parasite infection are important problems hindering tilapia (*Oreochromis niloticus*) culture. Streptococcosis, due to *Streptococcus spp.* infection, is one of the main cause of tilapia mortality in tilapia farms. The objective was to identify the factors associated with tilapia mortality due to *Streptococcus agalactiae* in artisan tilapia farms in the Atiocoyo irrigation district, El Salvador, during march–June, 2022. The presence of *S. agalactiae* was investigated in fish, water and feed of 28 culture ponds. The serotype of the infecting bacteria was also determined. The bacteria was present only in the fish and not detected in water or feed. PCR analysis indicated that the serotypes responsible for the streptococosis were Ia and III belonging to genes *cps 1 aH* y *cps1a/2/3I* in the Polysaccharide Capsule (CPS). Physicochemical pond water parameters were also evaluated. Results of these analyses revealed a relationship between the presence *S. agalactiae* and dissolved water oxygen, high water temperature and elevated levels of phosphate and ammonia.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de tilapia (*Oreochromis spp.*) es una industria que empezó una rápida expansión en el mundo desde mediados de la década de los años 80, gracias a la investigación en nutrición y sistemas de cultivo, junto con el desarrollo del mercado y avances de procesamiento. Actualmente se cultivan diversas especies de tilapia a nivel comercial, pero la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) es la predominante mundialmente (FAO, 2009). A pesar que la tilapia es una especie con una amplia tolerancia a la baja calidad del agua y a las enfermedades, en años recientes su cultivo ha enfrentado problemas vinculados con la infección por bacterias, como *Flavobacterium columnare*, *Edwardsiella tarda*, *Aeromonas spp.*, *Vibrio spp.*, *Francisella spp.*, y principalmente con

Streptococcus agalactiae y *Streptococcus iniae*, que causan mortalidades que van desde 15% hasta el 90% de la producción mundial. Entre 2009 y 2011 se produjeron continuamente brotes de estreptococos a gran escala con una elevada mortalidad (30-80%) y provocaron pérdidas de alrededor de 400 millones de dólares en 2011 (Chen et al., 2012). Esta incidencia de enfermedades bacterianas está vinculada principalmente a malas prácticas de manejo, un conocimiento mínimo del control de enfermedades por parte de los acuicultores, y el uso de altas densidades de siembra de la tilapia en los estanques (Huicab-Pech et al., 2016).

S. agalactiae es un patógeno Gram-positivo emergente en cultivos de peces, tanto marinos como dulceacuícola, que se asocia frecuentemente con septicemia y meningoencefalitis en peces, y ha causado pérdidas económicas significativas a nivel mundial (Zhang et al., 2013). La enfermedad causada por este patógeno recibe el nombre de estreptococosis. La posibilidad de casos de estreptococosis en aguas cálidas asociada con *S. agalactiae* con múltiples complicaciones bacterianas requiere un seguimiento continuo a largo plazo para el desarrollo sostenible de la acuicultura (Najiah et al., 2012).

En altas concentraciones en los cultivos de tilapia, *S. agalactiae* puede llegar a causar una mortalidad hasta del 100% (Hernández et al., 2009); pero además se sabe que la bacteria reduce la eficiencia alimenticia y la ganancia de peso, lo que afecta el desempeño productivo de los peces infectados (Ye et al., 2011).

La identificación del serotipo específico de *S. agalactiae* presente en cultivos de tilapia, es fundamental para la selección de antibióticos que ayuden a controlar los brotes de estreptococosis, y para prevenir la aparición generalizada de resistencia a los antibióticos (Deng et al., 2019). Aunque también existen alternativas como la utilización de extractos de plantas medicinales; por ejemplo, el tratamiento con 0.5% orégano, demostró mejorar la resistencia a la infección de *S. agalactiae* en tilapia, reduciendo la mortalidad a un 7%; y la frecuencia y severidad de úlceras dérmicas, siendo la úlcera tipo S la más predominante en tilapias inmuoestimuladas (Marroquin et al., 2016).

Se tiene conocimiento que análisis moleculares de tejidos infectados taxonómicamente colocó a *S. agalactiae* dentro del grupo piógeno, proporcionando identidad molecular. La presencia de genes de resistencia a la tetraciclina de tejidos de tilapia identificados con ADN de *S. agalactiae* fue registrado en Costa Rica (Oviedo, 2021).

En cuanto a los métodos tradicionales de diagnóstico confirmatorio se incluyen el cultivo microbiológico en agares selectivos y diferenciales y la identificación por PCR (Marroquin et al., 2016). Cabe mencionar que el uso de pescado congelado puede resultar una alternativa útil al pescado fresco para recuperar estreptococos patógenos en los casos en que los análisis de diagnóstico del pescado fresco no están disponibles o no sean prácticos (Evans et al., 2004).

En El Salvador, en el periodo de enero a diciembre de 2020, se reporta que la tilapia representó el 87.55% de la producción acuícola nacional, siendo el departamento de La Libertad donde se desarrollaron más proyectos productivos de cultivo de tilapia. En el municipio de San Pablo Tacachico, el volumen de producción de tilapia en estanques es de 4,316,305 Kg lo cual representa un 68.8% de la producción nacional y un monto aproximado de \$ 13,930,887 (US) (CENDEPESCA, 2020).

En ese sentido, es importante abordar la problemática que generan las enfermedades causadas por bacterias y parásitos para la producción de tilapias en cultivo, ya que por el desconocimiento local de estas enfermedades se dificulta su tratamiento y prevención. En el sector de Atiocoyo se ha reportado que durante la época lluviosa ocurren brotes de mortalidad en los estanques, los cuales generan pérdidas en la producción que oscilan entre 5-30% (A. Santos, comunicación personal, marzo 2022, técnico del Laboratorio de alevines de Atiocoyo S.A. de C.V.). Es por ello que, la presente investigación se enmarcó en la determinación de los factores vinculados a la mortalidad de tilapia (*Oreochromis niloticus*) debido a estreptococosis producida por *Streptococcus agalactiae*, en granjas acuícolas del Distrito de Riego de Atiocoyo, Municipio de San Pablo Tacachico, Departamento de La Libertad, El Salvador, C.A.

METODOLOGÍA

El área de estudio fue el distrito de riego y avenamiento Atiocoyo sur, ubicado en la zona Norte-Occidental de la República de El Salvador, al Norte del departamento de la Libertad y al Sur del departamento de Chalatenango. Está enmarcada por los paralelos 13° 58' y 14° 06' latitud Norte y entre 89° 21' y 89° 15', longitud Oeste del meridiano de Greenwich (MAG, 2012).

La investigación es de tipo descriptiva y de corte transversal. Se realizó la identificación del serotipo de *Streptococcus agalactiae* encontrado en las tilapias y en alevines; además se estableció de manera general los factores fisicoquímicos y prácticas de manejo vinculados a la mortalidad de tilapia. El estudio es de corte transversal debido a que se realizó en un punto específico del tiempo (marzo a junio de 2022).

Según registros del personal técnico del Laboratorio de Alevines de Atiocoyo, hasta marzo 2020, en el Distrito de Riego de Atiocoyo Sur, se encuentran 150 granjas. Cada granja tiene entre uno y ocho estanques de aproximadamente 3500m² con densidad de siembra estimada de cuatro alevines/m² (A. Santos, comunicación personal, marzo 2022).

El cálculo del tamaño de muestra se realizó considerando un nivel de confianza del 95%, prevalencia mínima esperada del 10% y 150 granjas como población, obteniéndose como resultado un tamaño mínimo de muestra igual a 26 (Perdomo, & Vasquez, 2023).

El muestreo se llevo a cabo en coordinación con personal técnico de la Asociación de Regantes de Atiocoyo Sur (ARAS) y del Centro de Desarrollo de la Pesca y la Acuicultura (CENDEPESCA, Ministerio de Agricultura y Ganadería). En total fueron 28 estanques seleccionados mediante muestreo dirigido considerando los casos con presencia presuntiva de estreptococosis como prioritarios.

Se investigaron las siguientes matrices: agua de los estanques donde se producen las tilapias, los alevines, las tilapias y el alimento de dichos peces.

En cada una de las granjas, se seleccionó un

estanque con cultivo de tilapias y se muestrearon de cuatro a seis tilapias con signos de enfermedad o moribundas (preferiblemente). Se tomó además una muestra de 500 mL de agua del estanque para análisis microbiológico, una muestra de 1 L de agua para análisis fisicoquímico y 50 g de muestra de alimento de las tilapias.

La presencia de *S. agalactiae* en las muestras se realizó según el procedimiento de aislamiento del Manual de Análisis Bacteriológico (BAM) de la FDA, 2018. La identificación de *S. agalactiae* en tilapia, se realizó por PCR convencional utilizando los cebadores universales 27f y 1492r (Dogan, 2005). Los productos de la PCR se purificaron utilizando el kit de purificación de ADN en gel agarosa al 2%; los serotipos de *S. agalactiae* se confirmaron mediante el ensayo de PCR convencional como describe Poyart *et al.* (2007).

Adicionalmente, se evaluaron los siguientes parámetros fisicoquímicos del agua de los estanques: Temperatura, pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y sólidos totales, mediante medición *in situ* con sonda multiparámetro. Los valores de alcalinidad, dureza, concentración de iones amonio, nitrato, nitrito y fosfato, se determinaron siguiendo las metodologías descritas por APHA, 2017. Asimismo, se registraron las características de los estanques y prácticas de manejo.

Debido a la naturaleza del estudio y resultados obtenidos, se aplicó estadística descriptiva únicamente a las mediciones fisicoquímicas del agua de los estanques.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

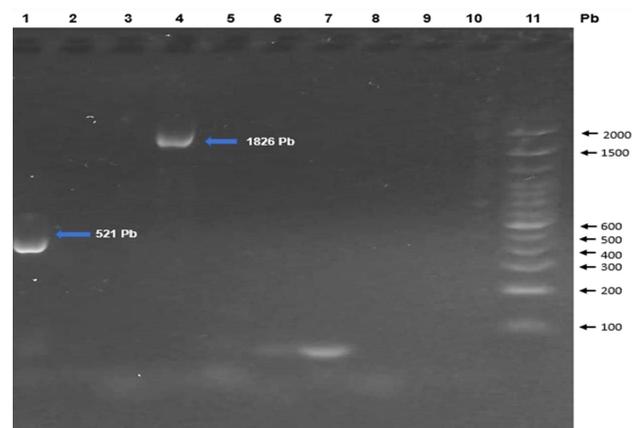
No fue posible detectar, aislar o identificar la bacteria, *Streptococcus agalactiae*, en las muestras de agua de los estanques por medio del método de dilución y extendido en placa. Tampoco se encontró colonias bacterianas características de *Streptococcus agalactiae* en las muestras de alimentos. Sin embargo, en una de las muestras de alimento se observó crecimiento de colonias filamentosas mientras que, en otra, la presencia de colonias características de bacterias aerobias mesófilas.

El análisis microbiológico de muestras de tilapia y alevines, reveló que dos de las muestras tomadas el once de mayo y dos más muestreadas el veinticinco del mismo mes, resultaron con presencia presuntiva de *S. agalactiae*. La cual fue confirmada al observar coincidencia entre las características macroscópicas de las colonias del control positivo *S. agalactiae* ATCC 12386 y las colonias correspondientes a las muestras purificadas. Es decir, en todos los casos las colonias fueron puntiformes, color beige, con presencia de beta hemólisis.

En las 28 granjas muestreadas, únicamente en una muestra de cerebro de alevín y tres muestras de cerebro de tilapia, se encontró la presencia de *S. agalactiae*. Amplificando el DNA por medio de PCR se determinó que la bacteria encontrada corresponde a los serotipos III y 1a, pertenecientes respectivamente al gen *cps1aH* y *cps1a/2/3I*, de la región del Polisacárido Capsular (CPS) (Figura 1). Esta información es importante porque ayudará al manejo apropiado y efectivo de antibióticos en el tratamiento de la enfermedad, y a la puesta en marcha de medidas preventivas. En aislamientos clínicos de *S. agalactiae* (EGB) se ha encontrado la presencia de, por lo menos, un gen de virulencia y una resistencia discretamente elevada a macrólidos de 48,4% (Pulido *et al.*, 2022). Estos hallazgos muestran la necesidad de implementar estrategias terapéuticas y de prevención contra estas infecciones.

Figura 1

Identificación de *S. agalactiae* de colonias características aisladas de muestras de cerebro de alevín de tilapia (*O. niloticus*).



Comparando los resultados obtenidos con los valores óptimos de calidad del agua en el cultivo y manejo de tilapia (Saavedra, 2006), se puede concluir que todas las muestras cumplen con los límites permitidos de concentración de nitritos inferiores o iguales a 0.1 ppm y temperaturas entre 25.0 a 32.0°C. Sin embargo, las muestras de agua mostraron concentraciones de fosfatos fuera del rango de 0.15-0.20 ppm, y una dureza y alcalinidad mayor a lo recomendado (110 ppm y 150 ppm, respectivamente) (Tabla 1).

Una muestra de agua tuvo un pH ligeramente mayor al límite 9.0. Sin embargo, el 39% de las muestras tuvo concentraciones menores o iguales a 0.1 ppm de amonio mientras que el 28.6% de las muestras mostraron concentraciones de nitrato dentro del rango 1.5-2.0 ppm.

El parámetro oxígeno disuelto se encontró dentro del rango recomendado (5.0-9.0 mg/L) en el 32.1% de las muestras, siendo la tendencia a valores menores a 5.0 mg/L en el resto de los resultados.

Los resultados de los parámetros fisicoquímicos evaluados en el agua de los cuatro estanques con presencia de *S. agalactiae* en tilapia y alevín sugieren que existe una relación entre la presencia de *S. agalactiae*, las altas temperaturas y las concentraciones altas de iones fosfato y amonio (Tabla 1). Estos resultados están en concordancia con los resultados de Oviedo-Bolaños et al. (2021), en cuanto

a la temperatura, ya que fue el principal parámetro fisicoquímico correlacionado positivamente con la presencia de *S. agalactiae* en estanques de cultivo de tilapia, debido a que este factor podría causar estrés y afectar la respuesta inmune, además de afectar el perfil metabólico del pez, aumentando la susceptibilidad a patógenos oportunistas. Asimismo, se ha reportado que el oxígeno en una concentración de 5-6,5 mg/L y una temperatura > 31°C promueve la incidencia de *Streptococcus spp.* de tilapia cultivados en jaulas flotantes.

Con relación a los niveles de fosfatos superiores a 0.2ppm, existen investigaciones que demuestran que cantidades en exceso de fósforo pueden provenir principalmente del alimento para tilapia (50-61%) y del agua de entrada (17-27%); acumulándose en el fondo de los estanques en forma de sedimento y biomasa de peces. Dicho excedente de fosforo puede provocar la muerte de los organismos acuáticos por hipoxia debido a la eutrofización, la cual aumenta la demanda bioquímica de oxígeno y, en consecuencia, reduce la disponibilidad de oxígeno en el ambiente (Bueno et al., 2019)

En el caso de Amonio, los valores de este compuesto deben fluctuar entre 0.01 a 0.1 ppm (valores cercanos a 2 ppm son críticos) (Saavedra, 2006). El amonio es tóxico y se hace más nocivo cuando el pH y la temperatura del agua están demasiado elevados. Los niveles tolerables de amonio para tilapia van de 0.6

Tabla 1

Resultados de los parámetros fisicoquímicos de agua de estanque con presencia de *S. agalactiae* en tilapia y alevín.

Fecha de muestreo	Temp (°C)	pH	OD (mg/L)	AMONIO (ppm)	FOSFATO (ppm)	NITRITO (ppm)	NITRATOS (ppm)	ALCALINIDAD TOTAL (ppm)	DUREZA TOTAL (ppm)
11/05/2022	30.9	8.84	6.15	0.51	2.70	0.00	0.70	235.2	275.28
11/05/2022	32.8	9.11	8.12	0.16	0.73	0.00	0.77	214.2	230.64
24/5/2022	29.51	8.87	4.28	0.09	2.41	0.02	0.07	260.4	264.12
24/5/2022	31.1	9.00	7.61	0.14	2.70	0.00	0.07	247.8	252.96
Desviacion estandar	1.35	0.12	1.72	0.19	0.94	0.01	0.39	19.70	19.06
Valores optimos (Saavedra, 2006)	25.0-32.0	6.0-9.0	5-9 mg/L	≤0.1ppm	0.15-0.2ppm	≤0.1ppm	1.5 - 2.0 ppm	50 - 150 ppm	80 - 110 ppr

Nota. OD: Oxígeno Disuelto

a 2 ppm. Las concentraciones de amonio elevadas en el agua causan bloqueo del metabolismo, daños en branquias, balance de sales, producción de lesiones en órganos internos e inmunosupresión, susceptibilidad a enfermedades y reducción de crecimiento (Nicovita, 2014).

CONCLUSIONES

En la presente investigación, las muestras de agua para cultivo de tilapia resultaron con ausencia de crecimiento característico de *S. agalactiae*, por lo que no fue posible su identificación en esa matriz.

Por otra parte, mediante la prueba PCR se determinó que los serotipos Ia y III, pertenecientes al gen *cpsIaH* y *cpsIa/2/3I* de la región del Polisacrido Capsular (CPS), son los responsables de la estreptococosis de las tilapias evaluadas.

En cuanto a los parámetros fisicoquímicos cabe resaltar que el oxígeno disuelto (OD) es menor a 5 mg/L en más del 50% de los estanques, y la concentración de iones fosfato y amonio se encontró por arriba del rango máximo tolerable en la totalidad de estanques. Además, en los cuatro estanques donde se muestrearon las tilapias con *Streptococcus agalactiae*, las concentraciones de iones fosfato y amonio fueron altas, pudiendo considerarse como potenciales factores de estrés metabólico para las tilapias que ahí se cultivan.

El análisis estadístico descriptivo aplicado a los resultados sugiere que existe relación entre la presencia de *S. agalactiae* y los niveles bajos de oxígeno disuelto, altas temperaturas y concentraciones altas de iones fosfato y amonio.

En términos generales, las prácticas de manejo de los estanques de cultivo de *O. niloticus* en el Distrito de Atiocoyo sur, no son adecuadas, en particular la calidad del agua. Además de lo anteriormente descrito, por el uso indiscriminado de antibióticos y la alta densidad de siembra de los peces en los estanques. Estos son factores muy importantes que deben continuarse investigando con el fin de optimizar la producción de tilapia y su respectiva inocuidad para su consumo.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue realizada con el apoyo financiero de la Universidad de El Salvador, Centro América. También, se agradece a la Asociación de Regantes de Atiocoyo Sur (ARAS), el personal técnico del Laboratorio de alevines de Atiocoyo S.A. de C.V. y del Centro de Desarrollo de la Pesca y la Acuicultura (CENDEPESCA) del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). Al Dr. Luis A. Mejía de la Universidad de Illinois, EE.UU., por su asesoramiento y apoyo editorial.

REFERENCIAS

- APHA, (2017). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23^a ed. American Public Health Association. www.standardmethods.org
- Bueno, G. W., Mattos, B. O. D., Neu, D. H., David, F. S., Feiden, A. & Boscolo, W. R. (2019). Stability and phosphorus leaching of tilapia feed in water. *Ciência Rural*, 49.
- CENDEPESCA. (2020). Anuario de estadísticas pesqueras El Salvador. Ministerio de Agricultura y Ganadería. San Salvador. 97 p.
- Chen, M., Li, L. P., Wang, R., Liang, W. W., Huang, Y., Li, J. & Gan, X. (2012). PCR detection and PFGE genotype analyses of streptococcal clinical isolates from tilapia in China. *Veterinary microbiology*, 159(3-4), 526-530.
- Deng, L., Li, Y., Geng, Y., Zheng, L., Rehman, T., Zhao, R. & Lai, W. (2019). Molecular serotyping and antimicrobial susceptibility of *Streptococcus agalactiae* isolated from fish in China. *Aquaculture*, 510, 84-89.
- Dogan, B., Schukken, Y. H., Santisteban, C., & Boor, K. J. (2005). Distribution of serotypes and antimicrobial resistance genes among *Streptococcus agalactiae* isolates from bovine and human hosts. *Journal of clinical microbiology*, 43(12), 5899-5906.
- FAO. (2009) *Oreochromis niloticus*. In Cultured

- aquatic species fact sheets. https://www.fao.org/fishery/docs/DOCUMENT/aquaculture/CulturedSpecies/file/es/es_niletilapia.htm
- FDA. (2018). Manual Bacteriologico Analitico. Enumeración de Escherichia coli y las bacterias coliformes. Obtenido de <https://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/bam-chapter-4-enumeration-escherichia-coli-and-coliform-bacteria>
- Hernández, E., Figueroa, J. & Iregui, C. (2009). Streptococcosis on a red tilapia, *Oreochromis sp.*, farm: a case study. *Journal of fish diseases*, 32(3), 247-252.
- Huicab-Pech, Z. G., Landeros-Sánchez, C., Castañeda-Chávez, M. R., Lango-Reynoso, F., López-Collado, C. J., & Platas Rosado, D. E. (2016). Current state of bacteria pathogenicity and their relationship with host and environment in tilapia *Oreochromis niloticus*. *Journal of aquaculture research and development*, 7(5), 1-10.
- Evans, J. J., Wiedenmayer, A. A., Klesius, P. H., & Shoemaker, C. A. (2004). Survival of *Streptococcus agalactiae* from frozen fish following natural and experimental infections. *Aquaculture*, 233(1-4), 15-21.
- MAG. (2012). Caracterización de la cadena productiva de Acuicultura – Tilapia. IICA. San Salvador. 63 p.
- Marroquín-Mora, C., & García-Pérez, J. (2016). Aplicación de inmunoestimulantes de origen natural en el cultivo de tilapia para la prevención de Estreptococosis en Guatemala. *Informe*, 4(26.2), 46.
- Najiah, M., Aqilah, N. I., Lee, K. L., Khairulbariyyah, Z., Mithun, S., Jalal, K. C. A., & Nadirah, M. (2012). Massive mortality associated with *Streptococcus agalactiae* infection in cage-cultured red hybrid tilapia *Oreochromis niloticus* in Como River, Kenyir Lake, Malaysia. *Journal of Biological Sciences*, 12(8), 438-442.
- NICOVITA Alicorp. 2014. Manual de crianza de tilapia. Condiciones y parámetros de cultivo. 3, 6-15 p. Lima, Perú (en línea). Consultado el 11 de marzo 2023. Disponible en: <http://www.industriaacuicola.com/biblioteca/Tilapia/Manual%20de%20crianza%20de%20tilapia.pdf>
- Oviedo Bolaños, K., Rodríguez-Rodríguez, J. A., Sancho-Blanco, C., Barquero-Chanto, J. E., Peña-Navarro, N., Escobedo-Bonilla, C. M., & Umaña-Castro, R. (2021). Molecular identification of *Streptococcus sp.* and antibiotic resistance genes present in Tilapia farms (*Oreochromis niloticus*) from the Northern Pacific region, Costa Rica. *Aquaculture International*, 29(5), 2337-2355.
- Perdomo, Y., & Vasquez, K. (2023) Determinaciones fisicoquímicas y presencia de *Streptococcus agalactiae* en granjas de tilapia (*Oreochromis niloticus*) del Distrito de riego de Atiocoyo sur. [Tesis. Universidad de El Salvador, 2023]. Universidad de El Salvador. <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/31282/>
- Poyart, C., Tazi, A., Réglie-Poupet, H., Billoët, A., Tavares, N., Raymond, J., & Trieu-Cuot, P. (2007). Multiplex PCR assay for rapid and accurate capsular typing of group B streptococci. *Journal of clinical microbiology*, 45(6), 1985-1988.
- Pulido-Colina, A., Pastrana, J. S., Valencia-Bazalar, E., & Apestegui, M. Z. (2022). Caracterización molecular de genes de virulencia (*lmb*, *bca* y *rib*) y de resistencia a macrólidos (*ermB*, *ermTR* y *mefA*) en aislamientos clínicos de *Streptococcus agalactiae*. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica*, 38, 615-620.
- Saavedra, M. (2006). Manejo del Cultivo de Tilapia. USAID Managua. 13p.
- Ye, X., Li, J., Lu, M., Deng, G., Jiang, X., Tian, Y. & Jian, Q. (2011). Identification and molecular typing of *Streptococcus agalactiae* isolated from pond-cultured tilapia in China. *Fisheries Science*, 77, 623-632.

Zhang, D., Li, A., Guo, Y., Zhang, Q., Chen, X. & Gong, X. (2013). Molecular characterization of *Streptococcus agalactiae* in diseased farmed tilapia in China. *Aquaculture*, 412, 64-69.



Revista MINERVA

Plataforma digital de la revista: <https://minerva.sic.ues.edu.sv>

Nota Técnica | Technical Report

Elementos explicativos del tratamiento mediático de feminicidios en El Salvador

Explanatory elements of the media treatment of femicides in El Salvador

Ivette Rocío Araujo Velásquez¹, Luis Enrique Portillo López¹, Marta Martí-Barrachina²

Correspondencia: rocioaraujo@ugb.edu.sv

- 1 Universidad Gerardo Barrios
- 2 Consultora de investigación en Criminología

RESUMEN

La literatura comparada ha mostrado ampliamente que el tratamiento que los medios de comunicación hacen de un tema, tiene capacidad para modular la forma en la que la opinión pública lo percibe. Por ello, numerosas autoras a nivel internacional han analizado el tratamiento que los medios de comunicación hacen de la violencia de género y, en particular, de los feminicidios. Este artículo consiste en una primera aproximación cualitativa de este fenómeno en El Salvador y describe los factores que influyen en el tratamiento de las noticias de feminicidios por parte de medios de comunicación digitales en el país según los propios periodistas. En concreto, se realizaron entrevistas a 12 periodistas de 7 medios de comunicación y a 2 expertas en perspectiva de género. Los resultados señalan que algunos elementos que influyen en la forma de presentación mediática de la violencia feminicida son los tipos de enfoque periodístico, la presencia de mujeres

DOI: [10.5377/revminerva.v7i3.18909](https://doi.org/10.5377/revminerva.v7i3.18909)

Enviado: 10 de mayo de 2023
Aceptado: 19 de enero de 2024

Palabras clave: tratamiento mediático, feminicidios, periodismo, El Salvador.

Keywords: media treatment, femicides, journalism, El Salvador.



Este contenido está protegido bajo la licencia CC BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

con perspectiva de género en posiciones de poder y la capacitación de las(os) periodistas. El artículo concluye con la propuesta de medidas a adoptar para asegurar un tratamiento mediático de la violencia desde una perspectiva de género.

ABSTRACT

Comparative literature has amply shown that the media's treatment of an issue has the capacity to modulate the way in which public opinion perceives it. For this reason, numerous authors at the international level have analyzed the media's treatment of gender violence and, in particular, of femicides. This article consists of a first qualitative approach to this phenomenon in El Salvador and describes the factors that influence the treatment of news of femicides by digital media in the country according to the journalists themselves. Specifically, interviews were conducted with 12 journalists from 7 media outlets and 2 experts in gender perspective. The results indicate that some elements that influence the way in which femicidal violence is presented in the media are the types of journalistic approach, the presence of women with a gender perspective in positions of power and the training of journalists. The article concludes with a proposal of measures to be adopted to ensure a media treatment of violence from a gender perspective.

INTRODUCCIÓN

Al revisar la literatura sobre el tratamiento que los medios de comunicación escritos y digitales hacen de un tema o noticia, se demuestra que los medios tienen la capacidad para modular la forma en la que la opinión pública lo percibe. Por ello, numerosas autoras a nivel internacional han analizado el tratamiento que los medios de comunicación hacen de la violencia de género y, en particular, de los feminicidios (p.ej. Taylor, 2009, en Estados Unidos y Vayá et al., 2020, en España). Estos trabajos ponen de relieve diferentes problemáticas en el tratamiento de las noticias, como el hecho de presentar los casos de feminicidio como hechos aislados, y no como producto de un problema estructural, al contrario, se muestran como un espectáculo y su contenido apunta a la reproducción de estereotipos de género (Aguilar y Rodríguez-Hidalgo, 2018; Spies, 2020; Segato, 2019; Taylor, 2009).

Los estudios señalan una serie de factores que son relevantes en el tratamiento que se realiza de este tipo de noticias, como la relación entre la víctima y el agresor, la edad de las víctimas, en ocasiones, sin profundizar en las causas ni contextualizar los hechos. Además, la cobertura se centra en las mujeres como víctimas y no en el problema de la violencia por razón de género. Por lo tanto, hay medios que se focalizan

más en el hecho concreto que en la problemática que lo causa.

En El Salvador, el análisis del tratamiento que realizan los medios de comunicación es escaso. Este artículo constituye una primera aproximación a este tema y revisa los factores explicativos del tratamiento mediático del feminicidio desde la perspectiva de los propios periodistas. La investigación: «El tratamiento del feminicidio por los medios de comunicación digital escritos en El Salvador» realizada por la Universidad Gerardo Barrios entre el año 2020 y 2021 contó con el auspicio de la Iniciativa Spotlight de Naciones Unidas. En la fase de campo se entrevistaron a 12 periodistas y 2 expertas en género, además, se analizó cuantitativamente 2 154 noticias sobre feminicidios publicadas por medios salvadoreños (Martí, y Araujo, 2021).

En el marco de este proyecto, siguiendo el planteamiento de Martí y Araujo (2021, pág. 37), se realizó una aproximación cualitativa a los factores que influyen en los medios de comunicación salvadoreños, específicamente de la prensa escrita, al momento de tratar hechos noticiosos donde se comunican feminicidios y violencia contra las mujeres.

MARCO DE REFERENCIA

En el desarrollo de la investigación, se realizó una fundamentación doctrinaria sobre los distintos elementos, tanto endógenos como exógenos que inciden en cómo un medio de comunicación, en este caso la prensa escrita, trata y traslada la información sobre la violencia de género, específicamente la violencia hacia las mujeres; conforme a Martí y Araujo (2021, pág. 13) se mencionan la ideología, la configuración/naturaleza, que hace énfasis en sí son medios de índole público, y de cobertura nacional; los medios privados, que implican la concesión del Estado para poder comunicar con base al ejercicio de la libertad de prensa y de expresión información preponderante, y los comunitarios que desarrollan la función noticiosa y que pertenecen a la Asociación de Radiodifusión Participativa de El Salvador, siendo su ámbito de impacto más reducido, aunado a ello se hace mención de los intereses económicos de determinados medios.

Ejemplo de esto, Martí y Araujo (2021) retoman las ideas de Ramos y Guzmán (2000, citado previamente por Aguilar y Rodríguez-Hidalgo, 2017, p. 17) afirmando que los medios ofrecen una imagen distorsionada de la delincuencia y que ello se vincula con la presencia de intereses económicos, políticos

y muchas veces ideológicos de los medios, que definen estrategias de acción de acuerdo con estos elementos. De lo anterior puede establecerse que los medios de comunicación, a partir de la facilidad de transmitir un mensaje y conforme al nivel de control que desean ejercer en el contexto social, visualizarán el tema de la violencia hacia las mujeres de forma tal que produzcan una situación de indefensión y de potencializar su rol represor, caso contrario de los medios autodenominados «independientes» desarrollarán su línea editorial en una perspectiva más incisiva y crítica a las políticas estatales relacionadas a la temática de la violencia de género, específicamente en el contexto de la violencia hacia las mujeres.

Otros aspectos que según Martí y Araujo (2021, pág. 13) se consideran importantes en el tratamiento de las noticias sobre violencia de género es el alcance geográfico (si son medios locales, nacionales o regionales) determinándose el nivel de impacto que tiene en el territorio en vista que, hay noticias sobre violencia ejercida hacia mujeres que no trasciende a escala nacional. En ese orden de ideas y siguiendo el planteamiento del Grupo de Monitoreo Global de Medios en su informe regional de 2010 se establece que un factor determinante es el género de las(os) periodistas, debido a que, según el referido informe: «Cuarenta y nueve por ciento de las notas informativas en la televisión, la radio y la prensa escrita cubren noticias nacionales, 7 % son noticias subregionales/ regionales y el restante 45 % abordan por igual noticias nacionales e internacionales» (GMMP, 2010, Pág. 55).

Es importante mencionar que se ha convertido en una necesidad de carácter urgente la creación de un manual para la cobertura de violencia contra las mujeres y feminicidios; sus primeros pasos se han producido en México, ya que según Martí y Araujo (2021, pág. 13) quienes citan a Casillas et al., (2021, pág. 6), la tendencia a la *“digitalización de los contenidos y el surgimiento de medios nativos digitales, el periodismo con perspectiva de género ha encontrado lugares más seguros para existir y desarrollarse”*. Es a partir de esta necesidad, y ante algunos cambios de paradigma tanto en el ámbito socio cultural y como parte de la preocupación política ante las altas tasas de violencia en contra de las mujeres, que es necesario contar con medios de comunicación que cuiden más el contenido y utilicen un enfoque de género que respete a las víctimas y sus familias.

Con respecto a esta última cuestión, según lo plantean Martí y Araujo (2021) precisamente por

la responsabilidad que se considera que tienen los medios de comunicación en relación con el mundo que los rodea, existen los denominados materiales deontológicos o éticos dirigidos a ofrecer indicaciones a la comunidad periodística para un desempeño éticamente adecuado. Un ejemplo de esta situación es lo que acontece en el contexto social, como la violencia en razón del género, donde al momento de abordar el hecho periodístico, ya sea en el ámbito escrito (sector de interés) o en el ámbito televisivo debe ser un requisito insoslayable el evitar la revictimización de las presuntas víctimas, ya que estas han ido en una escalada de abuso por parte de los agresores y de las autoridades para que, de paso, los medios de comunicación sigan cuestionando la veracidad de los argumentos dados por las víctimas. Es por ello que los materiales deontológicos pueden contener indicaciones relacionadas con las fotografías o las imágenes que se pueden usar, el tipo de fuentes a consultar o expresiones que deban evitarse; y es relevante hacer hincapié que en el contexto nacional el manejo por parte del área del periodismo de los materiales deontológicos es de carácter limitado debido a las líneas de investigación enmarcadas en invisibilizar el fenómeno de la violencia basada en el género.

A partir de estudios doctrinarios especializados en la materia, Martí y Araujo (2021) retoman la necesidad que la existencia de materiales deontológicos no siempre es sinónimo de implementación o en su defecto en el uso adecuado por parte de los profesionales de la comunicación; en palabras más sencillas, la existencia de un código de conducta ética por parte de los periodistas no es garantía suficiente de que cumplirán al pie de la letra lo que este establezca ya sea porque están obligados a tomarse ciertas libertades por la línea editorial del medio en el que se desenvuelvan o por razones netamente intrínsecas del referido profesional, evidenciándose en el fenómeno de la violencia por razón del género. Esta postura se compagina con lo establecido por Edo y Zurbano (2019), en el cual, a partir del análisis de varios estudios se ha llegado a demostrar la falta de pericia y el cometimiento de errores en el uso e implementación de los materiales deontológicos y, en este orden de ideas los autores antes mencionados establecen una serie de factores que afectan la aplicación correcta de tales materiales, entre los que se puede mencionar:

- a) El carácter voluntario de los materiales
- b) Una excesiva ambigüedad de algunas normas donde existe una línea tenue entre lo permitido

y obtenido de manera «incorrecta» ya que según lo planteado por (Ramírez Ludeña, 2015, pág. 67) quien cita a Carrio los problemas de la ambigüedad se producen fundamentalmente porque las palabras no se usan en todos los contextos lingüísticos y situaciones humanas para connotar las mismas propiedades, es decir, se le dan distintas connotaciones.

c) Las condiciones de urgencia y rapidez con las que trabajan muchos(as) periodistas, esto debido a que para que la nota periodística tenga el impacto o visualizar el fenómeno, los profesionales de la comunicación en algún momento inaplican los criterios que permitan establecer la veracidad total de su investigación.

d) La falta de formación académica y profesional específica en el tema, al no estar transversalizada la formación con perspectiva de género y la falta de conocimiento de los documentos deontológicos por parte de los(as) periodistas, en el contexto latinoamericano puede percatarse de algunos comunicadores de carácter empírico, y esto en algún momento impide la implementación de todos los protocolos adecuados para el tratamiento de la noticia y en el contexto de los fenómenos en razón del género pueden tender a invisibilizar elementos relevantes dándole una cobertura muy débil. ,

e) La percepción de ineficacia y falta de legitimidad, que provoca que, a pesar de que algunas(os) periodistas puedan conocer los materiales, rechacen incorporarlos en su práctica, especialmente si los perciben como una forma de controlar su actividad y limitar su libertad profesional.

Por este motivo, Martí y Araujo (2021, pág. 14) retomando las ideas de Edo y Zurbano (2019, p. 267) donde se destaca la necesidad de que los decálogos se elaboren de forma consensuada entre las personas que deben aplicarlos, y evitar así la publicación de manuales de buenas prácticas que simplemente reproducen el contenido deontológico ya existente. La producción de decálogos, en ocasiones, se queda en una mera demostración política de los medios para lograr una cobertura ética, pero se ha llegado a demostrar que el nivel de compromiso de los decálogos en su aplicación es mayor cuando lo realizan hombres y mujeres conjuntamente o solo mujeres.

Por otra parte, existen otros factores, como los intereses económicos mencionados anteriormente que también influyen en la producción y cumplimiento de los códigos deontológicos. Es por

tal razón que Martí y Araujo (2021, pág. 15) que cita a Zurbano y García-Gordillo (2017, p. 74) *“defienden que los intereses económicos, ideológicos y laborales-profesionales afectan a la posibilidad de veracidad, contraste, coherencia y equidad, los cuales son los principios deontológicos que definen la calidad periodística”*. Así, los medios pueden recibir presiones para no publicar una información que perjudica a sus anunciantes o ideológicamente pueden no reconocer la violencia de género y, por lo tanto, rechazar el uso de determinados términos e incorporar una perspectiva de género en sus noticias.

Por ejemplo, en México, *“Existen empresas con grandes medios nacionales con ejemplares de prestigio y con otros de bajo costo donde está más que normalizado el revictimizar, criminalizar y sexualizar a las mujeres; es decir, donde la vieja tradición de la nota roja persiste y es fomentada”* (Casillas et al., 2021, p.5). Ello indicaría que se está ante una situación donde intencionalmente se tratan las noticias de violencia de género para ganar vistas y clics, pese a lo perjudicial que resulta para las víctimas y la sociedad.

Al respecto, es importante determinar qué es una línea editorial. Aznar (1999) esta debe ser entendida como la orientación permanente de las publicaciones de noticias y reportes: la intencionalidad de sus editoriales, la selección de sus columnistas, los personajes que se entrevistan o que se silencian, los hechos que se destacan o que se omiten, y el enfoque habitual de las noticias.

En este sentido, Rebollo Martínez (2012) destaca: *“Las noticias no son un producto neutral sino un artificio cultural; una secuencia del acontecer, producto de la interpretación contextual de un periodista que aplica criterios socialmente variables, que contiene, de forma más o menos intensa, unos factores que la convierten útil para las personas”* p.164. En otras palabras, el desarrollo generado por el medio de comunicación no es la noticia en su estado puro, por el contrario, van inmiscuidos los estereotipos creados por el mismo sistema, el prejuicio ante los hechos y la carga ideológica y cultural del mismo medio.

La violencia hacia las mujeres debe ser considerado un acto lesivo contra la dignidad de la misma como persona, ya que atenta contra un cúmulo de derechos que por su condición humana le son inherentes, es por ello que cuando se evidencia o trata de darse a conocer un hecho donde las mujeres han sido sujeto de actos atentatorios a tales derechos, los medios de comunicación deben tener un perfil ético en cuanto

a la información proporcionada al público general, que no padezca de ningún sesgo que genere condiciones de vulnerabilidad y revictimización.

Es por esta condición que, según Salazar Rebolledo & Garza Castro (2020), las noticias son consideradas como ventanas cuyos marcos delimitan la realidad a la que se tiene acceso, que centran la atención en fragmentos específicos y limitan la percepción de otras realidades. En consecuencia, los problemas públicos se interpretan en gran medida a partir de lo que las noticias resaltan y de lo que soslayan.

En ese orden de ideas, según Hasan et al. (2016) que fue retomado por Martí y Araujo (2021) las agencias de noticias funcionan como el lugar para la construcción de un periodismo no sexista y visibilizador de las mujeres, las grandes ausentes del discurso informativo y es que siguiendo la línea discursiva de las autoras, el tratamiento periodístico recae en una serie de sentidos comunes y estereotipos de género que, finalmente, no contribuyen a modificar la estructura de las relaciones desiguales de género que posibilitan que estas situaciones sucedan casi a diario.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo tiene como objetivo analizar los factores que influyen en el tratamiento que los medios de comunicación digitales escritos realizaron del feminicidio en El Salvador en el periodo 2019-2020, basándose principalmente en el análisis de entrevistas a periodistas y personas expertas en género y derechos humanos.

Se revisó la literatura sobre los factores explicativos del tratamiento de las noticias, sobre violencia de género, por parte de los medios de comunicación, y se realizaron 14 entrevistas semiestructuradas a periodistas de El Salvador y personas expertas en género y derechos humanos. Se entrevistó a periodistas de medios nacionales y locales: El País, Periódico Digital al Minuto, El Diario de Hoy, La Prensa Gráfica, El Mundo, Diario El Salvador y Revista Factum, El Faro, Revista Alharaca, Equilibrium, Canal 33 y de la Asociación de Periodistas de El Salvador (APES).

Se seleccionaron los medios por su tipo de periodismo y perspectiva. Para este efecto, se optó por gestionar entrevistas de periodistas de medios tradicionales, progresistas y feministas. De esa forma se obtuvo una amplia perspectiva del tratamiento de las noticias y los factores que influyen en ese tratamiento.

Estas entrevistas, que tuvieron una duración aproximada de una hora, se realizaron mediante videollamada en diferentes plataformas virtuales debido al confinamiento por el covid-19 entre noviembre del 2020 y enero del 2021. Se incluyeron preguntas sobre cinco cuestiones principales: la experiencia de la persona entrevistada y los medios en los que había trabajado (incluyendo la participación en capacitaciones sobre género y violencia), las características del medio en el que trabaja actualmente, su visión acerca de la cobertura mediática sobre la violencia contra las mujeres en El Salvador, los factores que explican las diferentes coberturas de los medios y las posibles medidas a adoptar para asegurar un tratamiento mediático de la violencia desde una perspectiva de género, Martí y Araujo (2021).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las entrevistas a periodistas y especialistas en derechos humanos y violencia de género en El Salvador, se cuestionó sobre las razones que explican cómo los medios de comunicación tratan los feminicidios (y también los homicidios) y en qué medida se abordan desde una perspectiva de género. Además, se cuestionó qué medidas podrían mejorar la cobertura mediática del feminicidio en el país.

En las siguientes páginas se presenta una síntesis con base en los resultados obtenidos por categorías y que se desprende de una primera reflexión expuesta en Martí y Araujo (2021).

Tipo de periodismo y perspectiva

La perspectiva de los distintos medios y el tipo de periodismo que realizan es uno de los primeros factores que varias(os) periodistas relacionan con el tratamiento que se hace de los feminicidios, así como de los homicidios en general. Los medios suelen ser categorizados como “*tradicionales*” (por ejemplo, La Prensa Gráfica, El Mundo o el Diario de Hoy), “*progresistas*” (por ejemplo, Revista Factum o El Faro) y “*feministas*” (por ejemplo, Alharaca).

Los medios llamados tradicionales, que suelen ser más convencionales, se enfocan principalmente en las notas de acontecer cotidiano, aunque algunos también ofrecen una sección para noticias más detalladas de investigación o reportajes, como La Prensa Gráfica. La mayoría de los medios progresistas y feministas realizan periodismo de investigación. La distinción entre los medios progresistas y feministas radica en que los primeros no siempre adoptan una

perspectiva de género, mientras que los segundos la utilizan como punto de vista principal desde el cual realizan investigaciones y publicaciones.

Tanto los medios progresistas como los feministas, sin embargo, abordan la violencia desde una perspectiva más sociológica o criminológica, destacando los factores estructurales y explicando las causas y el contexto de los homicidios y feminicidios. El propósito no es informar a la población sobre los hechos de violencia más recientes en el país (como lo hacen las notas informativas de actualidad de los medios tradicionales), sino aclarar en qué contexto ocurre la violencia y cuáles son sus causas.

Tipo de periodismo y perspectiva

La libertad financiera de cada medio es otro factor que, de acuerdo con resultados de las entrevistas, es crucial para explicar cómo las empresas dedicadas a la cobertura mediática tratan las noticias sobre feminicidios. Por lo tanto, tiene un impacto en el pensamiento y los intereses de las personas que poseen o dirigen las corporaciones de las personas que se anuncian en él.

Tal como lo describe una periodista de un medio catalogado como progresista

“[Ahora] Tenemos la libertad de que no estamos amarrados a patrocinios nacionales, ni empresas ni consorcios. Nosotros estamos financiados por organizaciones internacionales. Hay una cosa que no es negociable: los enfoques. No nos dicen qué podemos escribir. Prevalece el criterio periodístico” (Martí y Araujo, 2021 p.38).

Ello es indicativo para comprender que durante su trabajo como periodista en un medio de comunicación conocido en el país, había sido sometido a modificaciones o censuras motivadas por intereses publicitarios.

De la misma forma, otra entrevistada señala: *“La mayoría de medios de comunicación son empresas que buscan cómo su noticia capta la atención para trasladar rápidamente a otros ámbitos de consumo y de publicidad que maneja el medio”* (Martí y Araujo, 2021 p.38). Este planteamiento está en consonancia con lo que otras personas entrevistadas dijeron acerca de que el trato amarillista y el uso de fotografías y titulares sensacionalistas se explican por la aplicación de clickbait, que es el diseño de contenido que busca atraer la atención de los lectores para que hagan clic en la publicación, tal como lo afirma

“Se dejó de ver la noticia como un principio de servicio a la ciudadanía, se empezó a ver como un producto, una mercancía que se vende por la publicidad. Prima tener muchos seguidores, generar atracción de audiencia. Se quiere ser el primero en colocar el video, etc. Inmediatez no equivale a calidad. Este modelo de trabajo está precarizando la información” (Periodista APES, como se citó en Martí y Araujo, 2021 p.38).

En cuanto a la publicidad, uno de los periodistas con experiencia en los medios tradicionales salvadoreños explicó que, el propósito era ocupar el espacio disponible para la pauta publicitaria. De esta manera, en situaciones en las que no se tenían suficientes noticias y había espacio libre, se requería publicar cualquier información, lo que resultaba en notas menos elaboradas y con un nivel bajo de profundidad.

Capacitación de periodistas y editoras(es)

De las personas que fueron entrevistadas, una gran mayoría expresaron que el poco o no existente programa de formación-capacitación en diversas temáticas explica que el tratamiento mediático de temas de violencia, en especial de género, no tenga la perspectiva más apropiada.

“Hay diarios que se dedican a la actualidad, a lo que ocurre día a día. Hay poca formación en los medios sobre esta cuestión. Requiere un nivel de empatía mucho mayor, los periodistas nos especializamos en este tipo de temas. Requiere un cambio de mentalidad, no es lo mismo que ocuparse de temas políticos. Se hace a veces una cobertura más sencilla, porque no se sabe cómo abordarse” (Periodista de El Faro, como se citó en Martí y Araujo, 2021, p.39).

La mayoría de las periodistas participantes que sí tenían formación en perspectiva de género, dijeron que fue una decisión autónoma de unirse a cursos y programas de capacitación, y que el medio en el que trabajan nunca les había obligado a hacerlo.

De las personas entrevistadas, algunas tomaron el curso después de que su jefatura inmediata lo sugiriera como una oportunidad de formación, de tal suerte que su involucramiento fue a raíz de una invitación, pero otras participantes dijeron que lo tomaron por ser un tema de interés y completamente personal.

“Una vez recibí un curso a cargo de SerMujer (hace 6 o 7 años) y otro a cargo de Unicef (a finales de 2019). Uno era sobre cómo referirse a

los feminicidios y cómo no revictimizar, y el otro tenía que ver con cómo se había aplicado la Ley Especial para una Vida Libre de Violencia, la historia de cómo se había logrado. No era obligatorio ni fue a través del medio. Yo conozco a los comunicadores de las organizaciones que lo organizaban y me invitaron, pero fue personal" (Periodista del canal 33, como se citó en Martí y Araujo, 2021, p.39).

En términos generales, las personas entrevistadas creen que los profesionales del periodismo están llamados a unirse a programas de capacitación sobre violencias de género y cómo abordar estos temas para mejorar la cobertura que reciben en este momento. Pero, varias personas destacan que las condiciones laborales de muchas compañeras(os) impiden tener tiempo suficiente para dedicarlo a la capacitación.

Además, se destaca la importancia de capacitar a las editoriales de los medios, ya que son quienes garantizan que las noticias sean abordadas desde una perspectiva de género sin utilizar estereotipos y revictimizaciones en sus narrativas. Esto se considera especialmente crucial en los medios tradicionales, donde es menos común que los periodistas se especialicen en perspectiva de género. Esto es importante en los medios más pequeños o locales, donde los periodistas deben cubrir una mayor variedad de temas.

La capacitación desde una perspectiva de género es un tema fundamental en la agenda global. Según ONU MUJERES (2018), es necesario robustecer el trabajo con profesionales que educan y comunican, fomentar el uso de un lenguaje inclusivo y no sexista y analizar cómo el uso del lenguaje y los medios de comunicación pueden reproducir la violencia contra las mujeres y otros grupos que son blancos de ataques.

Finalmente, una de las expertas en género enfatizó la importancia de la capacitación en perspectiva de género que se extienda no solo a los periodistas que ya trabajan en este campo, sino que se incorpore desde el principio en las universidades: *"Yo creo que también las universidades ahí deben jugar un papel activo, y en esto el Ministerio de Educación podría dar las pautas a las universidades, en las carreras de comunicaciones de periodismo, etcétera; se debería de fomentar este sentido crítico y desarrollar estas capacidades y estas habilidades para una adecuada y justo manejo de la información"* (Martí y Araujo, 2021 p.40).

Apertura al cambio

La mayor o menor disposición de los periodistas y medios al cambio también es un tema recurrente en las entrevistas. Según un informante, algunos periodistas se resisten a incorporar una perspectiva de género en sus reportajes y se oponen a ciertos cambios en las noticias sobre feminicidios: *"Cada día más, los medios tienen una preocupación. Pero sobre todo los periodistas de la vieja escuela no permiten que sus textos vayan así. 'Así no se hace el periodismo', 'un muerto es un muerto, sea una mujer o un hombre'. Son muy contados, pero todavía sigue existiendo cierta resistencia"* (Martí y Araujo, 2021 p.40). De forma similar, otra informante dijo *"todavía hay mucha resistencia, sobre todo entre el periodismo de la vieja escuela, en identificar las diferencias en los homicidios de hombres y mujeres"* y que esta resistencia no se observa solamente en quienes hacen las noticias sino también en quienes las consumen, aludiendo que *"hay gente que, si ve la palabra feminicidio, se aleja de esa noticia"* (Martí y Araujo, 2021, p.40).

Además de esta resistencia al vocablo feminicidio que algunas personas podrían manifestar según el periodista entrevistado, otra de las informantes afirma que algunos periodistas, especialmente hombres, también expresan objeciones a adoptar una perspectiva feminista porque temen perder la objetividad: *"Falta conciencia de que muchos medios sepan porqué es importante. En El Salvador todos los medios tienen miedo de que por incluir a personas feministas les digan que ya no hacen periodismo sino activismo. Muchos periodistas hombres tienen miedo a esto, a que se les critique la objetividad periodista"* (Martí y Araujo, 2021 p.41).

Presencia de mujeres con perspectiva de género

Varios periodistas entrevistados sostienen que la presencia de mujeres con perspectiva de género en las redacciones, particularmente en puestos de liderazgo, marca una diferencia significativa en cómo se tratan las noticias sobre violencia por razón de género y feminicidios:

"La diferencia es sobre todo si hay o no hay mujeres en estos medios y qué tipo de mujeres, y cómo están llevando estos temas. Los temas fuertes y los que han ganado algunos premios en los medios progresistas han sido liderados por mujeres. En La Prensa Gráfica, [una periodista] lideró investigaciones muy buenas, a pesar

de que es un medio tradicional y de corte conservador. Para mí la clave es que haya mujeres que luchan en estos medios para tratar estos temas" (Periodista Alharaca, como se citó en Martí y Araujo, 2021, p.41).

Por ejemplo, en La Prensa Gráfica se ha avanzado en la participación de programas de formación en perspectiva de género y eso ha transformado poco a poco el enfoque de la cobertura de noticias. Adicionalmente, se afirma que la incorporación de mujeres con autonomía y con perspectiva de género coadyuva a que otros (as) colaboradores (as) también tomen conciencia del tema:

"Es un proceso de sensibilización para nuestros compañeros porque de alguna manera ellos están más cerca de esto y ha sido mucho más fácil, pero creo que a todo eso ha ayudado un montón tener como dos o tres elementos muy comprometidos con el tema que empezaron a empujar porque nos cuidáramos todavía más de lo que estábamos haciendo sobre los feminicidios" (Periodista La Prensa Gráfica, como se citó en Martí y Araujo, 2021, p.41).

En definitiva, la incorporación de más mujeres con perspectiva de género en las redacciones y, especialmente, en puestos de dirección es una de las medidas que consideran vitales para mejorar aún más el tratamiento mediático de los feminicidios y la violencia de género. Esto, junto con otras formas de acción, podría ayudar a ampliar el enfoque de género en el medio y en el contexto. Es crucial que estas acciones no se limite a ciertos periodistas, ya que, según una de las personas entrevistadas, si estos se van a trabajar a otro sitio, "el medio entero perderá su perspectiva":

"La forma en la que puede cambiar es la formación de los periodistas y de los editores, y que se asuman estos temas como apuestas de los medios. Hay periodistas que luchan por ciertos temas, pero luego si ese periodista se va, ese medio pierde esa visión. Es decir, hay que lograr que haya una mirada sostenida. Hay que entender que el machismo es de raíz sistémica, que los problemas son estructurales. En la medida en que la gente tiene esa información, lo empieza a incluir en su cobertura" (Periodista El Faro, como se citó en Martí y Araujo, 2021 p.41).

Existencia de lineamientos

Todas las personas entrevistadas dijeron que no tenían instrucciones escritas o manuales sobre cómo

cubrir noticias sobre la violencia de género y los feminicidios en sus medios. Pero, la Revista Alharaca (el único de los medios entrevistados que se reconoce como feminista) tiene un manual de cobertura que ofrece algunos lineamientos sobre cómo tratar a las víctimas de violencia, algunos de los cuales pueden aplicarse a la cobertura del feminicidio.

Aunque no hay lineamientos escritos, los medios especializados en periodismo de investigación (El Faro, Revista Factum, Revista Alharaca) enfatizaron que el proceso de creación de todas sus publicaciones requiere un trabajo previo con el equipo, periodistas y la jefatura de edición, que abarca el tono de la pieza y el enfoque a utilizar. Según los periodistas, tanto el planteamiento como el proceso de edición incluyen la consideración de varias cuestiones relacionadas con una cobertura ética de la violencia, como el esfuerzo consciente para evitar la revictimización o el tratamiento de la violencia como una problemática social estructural.

"Tenemos una mesa de redacción donde se discuten los enfoques. [...] Para nosotros es importante debatir. Antes de empezar, lo hablo con el editor y ahí intercambiamos y acordamos el enfoque. Es decir, no tienen un documento o manual, pero tienen un enfoque y una preocupación por este tema" (Periodista Revista Factum, como se citó en Martí y Araujo, 2021, p.42).

Es importante señalar que este enfoque no garantiza por sí solo un tratamiento del feminicidio desde una perspectiva de género, aunque los medios feministas pueden considerarse una excepción, ya que están incorporadas personas capacitadas específicamente en estudios de género y sus publicaciones parten desde una perspectiva enfocada en ese tema transversal que forma parte de su tipo de periodismo.

Este enfoque en el planteamiento de las noticias solo se utilizó en los medios tradicionales en casos en los que el periodismo de investigación también es importante, como La Prensa Gráfica, aunque se limitó a un número reducido de publicaciones. A pesar de que algunos entrevistados mencionaron que los periodistas cumplen con una serie de indicaciones éticas generales, en el resto de los medios no se observaron lineamientos informales para cubrir específicamente noticias sobre feminicidios y violencia de género.

"El Diario de Hoy no tiene un manual de estilo o una directriz clara al momento de cubrir temas de feminicidio. Sin embargo, sí hay una especie de orden ético que todos estamos sobre

el entendido de las reglas mínimas al publicar noticias de este tipo, como no revictimizar, no publicar fotografías de nombres, direcciones, corroborar como mínimo con dos instituciones de seguridad pública antes de publicar y cuidar la identidad de la edad de familiares directas de la víctima” (Periodista el Diario de Hoy, como se citó en Martí y Araujo, 2021, p.42).

Aunque Los medios de comunicación carecen de directrices o guías escritas para abordar el tema del feminicidio, así como la violencia de género y los homicidios en general. No obstante, el periodismo de investigación parece brindar una visión más apropiada (menos estereotipado y revictimizante) que el periodismo centrado en las notas de actualidad. Aunque los lineamientos escritos son cruciales para todos los medios, son especialmente necesarios para aquellos enfocados en el periodismo de noticias de actualidad, ya que este tipo de noticias no incluye procesos de cobertura ética de la violencia que puedan sustituir (de alguna manera) dichos lineamientos.

Todas las personas entrevistadas coincidieron en que sería recomendable contar con guías escritas sobre cómo documentar y tratar la violencia de género y, en particular, los feminicidios. Pero, algunos periodistas dijeron que más allá de la adopción de lineamientos, también es importante tomar medidas para asegurarse de que estos se aplican en la práctica y no funcionan como simples «tapaderas», como se ha puesto de relieve en la literatura mencionada en la primera parte de este trabajo.

Existen recursos importantes como manuales para la cobertura de violencia contra las mujeres donde se citan algunas de las malas prácticas que han cometido los medios de comunicación en el tratamiento de noticias, esto con el afán de aprender de ellas y no repetir las (Casillas et al., 2021) Además, se hace énfasis en que el camino a elaborar contenido informativo con perspectiva de género de forma consciente es reciente y de ahí la importancia de la autocrítica para realizar un mejor trabajo periodístico.

De esta forma, se puede afirmar que la perspectiva de género a veces no se aprende en las carreras de comunicaciones, en las redacciones o en el trabajo de campo. En muchos casos, se aprende de forma autónoma, con un poco de sentido común y con la ética profesional de cada persona.

CONCLUSIONES

En primer lugar, se puede observar en los medios de comunicación salvadoreños, con un enfoque más progresista, un interés que ha aumentado tanto en el tema de los feminicidios como en incorporar una perspectiva de género en la cobertura de los hechos de violencia contra las mujeres en relación al pasado. Esto se debe a que los medios de comunicación salvadoreños están adoptando una perspectiva más progresista. En las entrevistas realizadas a los periodistas del país se puede observar esta cuestión, quienes coinciden en que los medios han aumentado la conciencia y el interés sobre el tema en los últimos años. No obstante, los medios de comunicación tradicionales, que se enfocan en notas de actualidad, cubren las noticias sin explicar las raíces del problema y tampoco incorporan una perspectiva de género en sus narrativas, lo cual, exitosamente aporta a la normalización de la violencia contra las mujeres y hace más difícil que el público pueda profundizar en el análisis de las causas que generan la violencia y posibles medidas a tomar. Además, es relevante destacar la necesidad de elevar el papel vigilante del Estado sobre la forma que se abordan los feminicidios en la prensa, dando espacio a la libertad de expresión, pero alentando a una cobertura menos revictimizante.

Finalmente, la presencia de mujeres con perspectiva de género, particularmente en puestos de dirección, así como la formación de las(os) periodistas son clave para observar mejoras en el tratamiento de noticias de feminicidios. Para avanzar en el abordaje de los medios de comunicación de violencia de género, en particular de la violencia feminicida, sería recomendable que se realicen investigaciones que den seguimiento a estos temas, ya que su profundización es fundamental para acabar con la violencia contra las mujeres.

AGRADECIMIENTOS

La investigación para este artículo ha sido posible gracias al apoyo financiero de la Iniciativa Spotlight El Salvador, un socio entre la Unión Europea y las Naciones Unidas para eliminar todas las formas de violencia contra las mujeres y las niñas. El contenido de la misma es de exclusiva responsabilidad de sus autoras, y no reflejan necesariamente las opiniones ni puntos de vista de los organismos que integran la Iniciativa Spotlight.

REFERENCIAS

- Aguilar, D; Rodríguez-Hidalgo, C. (2018). El feminicidio en la prensa ecuatoriana: análisis de contenido de los diarios El Universo y El Comercio, *Estudios sobre el Mensaje Periodístico*, 24(1), 13-32.
- Aznar, H. (1999). *Comunicación Responsable*. Ariel Comunicación. Barcelona.
- Casillas Bermúdez, K; Carrión Rivera, L; Montoya Ramos, I. (2021). Manual urgente para la cobertura de violencia contra las mujeres y feminicidios en México. México: ONU MUJERES. Obtenido de <https://www.onu.org.mx/wp-content/uploads/2021/08/manual-periodistas-spotlight.pdf>
- Edo, A; Zurbano, B. (2019). Deontología periodística en materia de violencias contra las mujeres. ¿Quién elabora los documentos? Un estudio longitudinal desagregado por sexo sobre la autoría. *Doxa Comunicación*, 28, 261-284.
- GMMP. Proyecto de Monitoreo Global de Medios (2010;2015). Disponible en <https://www.fundea.org/es/blog/GMMP%202015mujeresenlosmedios>.
- Hasan, V.F; Gil, A.S. (2016). La comunicación con enfoque de género, herramienta teórica y acción política. Medios, agenda feminista y prácticas comunicacionales. El caso de Argentina. La ventana. *Revista de estudios de género*, 5(43), 246-280.
- Ludeña Ramírez, L. (2015). Vaguedad, ambigüedad y cadenas de comunicación. *Revista de Teoría del Derecho de la Universidad de Palermo*. ISSN, 2362(3667), 65-82.
- Martí, M; Araujo, I. (coords.) (2021). El tratamiento del feminicidio por los medios de comunicación digitales escritos en El Salvador (2019-2020). Universidad Gerardo Barrios. San Miguel, El Salvador.
- ONU MUJERES. (2018). El Sexagésimo segundo período de sesiones de la Comisión de la Condición Jurídica y Social de la Mujer. Nueva York: ONU. Obtenido de <https://www.unwomen.org/es/csw/csw62-2018>.
- Ramos, M; Guzmán, J. (2000). *La Guerra y la Paz Ciudadana*. Santiago, LOM.
- Rebollo Martínez, M. (2012). *Teoría del periodismo*. México: Eduardo Durán Valdivieso.
- Salazar Rebolledo, M. G; de la Garza Castro, P. (2020). La cobertura periodística de los feminicidios en México. Heterogeneidad y variación. *Revista Mexicana de Opinión Pública*, (29), 111-125. ISSN: 1870-7300. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=487464181007>
- Segato, R. (2019). Entrevista. Rita Segato: “Los feminicidios se repiten porque se muestran como un espectáculo”. Obtenido de <https://www.lmneuquen.com/rita-segato-los-femicidios-se-repiten-porque-se-muestran-como-un-espectaculo-n649114>
- Spies, A. (2020). The portrayal of victims of intimate femicide in the South African media', *Journal of African Media Studies*, 12:1, 41-59.
- Taylor, R. (2009). Slain and Slandered. A Content Analysis of the Portrayal of Femicide in Crime News. *Homicide Studies*, 13(1), 21-49.
- Vayá, I.L; Zurbano-Berenguer, B; Edo, A. (2020). Femicides in native digital news outlets: greater and better coverage? A study of violence against women in the Spanish media. *Observatorio*, 14(1), 45-44.
- Zurbano, B; García-Gordillo, M. (2017). Propuesta metodológica para la evaluación de la calidad deontológica de las noticias sobre violencias contra las mujeres. *Communication & Society*, 30(1), 73-85.



Revista MINERVA

Plataforma digital de la revista: <https://minerva.sic.ues.edu.sv>

Nota Técnica | Technical Report

Estudio de cobertura radial para la implementación de una red de sensores con tecnología de radios de largo alcance (LoRa)

Radial coverage study for the implementation of a sensor network with long range radio technology (LoRa)

Ernesto Alonso Arias-Argueta¹, David Isaí Orozco-Mejía¹, Werner David Meléndez-Valle¹

Correspondencia: aa17001@ues.edu.sv

¹ Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de El Salvador

RESUMEN

La tecnología Long Range (LoRa), mediante el protocolo LoRaWAN, permite la transmisión eficiente de datos a largas distancias con mínimos recursos, funcionando así por un tiempo más prolongado. Esta tecnología es utilizada mayormente para la monitorización y puede ser utilizada en una gran cantidad de áreas que van desde la meteorología hasta aplicaciones médicas. Se realizó un estudio de cobertura en algunos sectores de la Universidad de El Salvador entre los meses de noviembre y diciembre, donde se buscó establecer una metodología para predecir el nivel de recepción en diversas condiciones geográficas dentro de esta. Para ello, se utilizaron diversos recursos como softwares de simulación, modelos matemáticos, mediciones de campo con el analizador de espectro RSA306B de la marca Tektronix y la placa TTGO LoRa 32,

DOI: [10.5377/revminerva.v7i3.18910](https://doi.org/10.5377/revminerva.v7i3.18910)

Enviado: 17 de enero 2024
Aceptado: 22 de febrero de 2024

Palabras clave: Gateway, UIT, factor de ensanchamiento, atenuación, propagación, frecuencia.

Keywords: Gateway, ITU, spreading factor, attenuation, propagation, frequency.



Este contenido está protegido bajo la licencia CC BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

para determinar su eficacia bajo condiciones específicas. Los datos se tabulan, comparan y se elige la metodología de predicción más adecuada de acuerdo con el entorno, los cuales van desde zonas con gran presencia de edificaciones a zonas con densa vegetación.

ABSTRACT

Long Range (LoRa) technology, through the LoRaWAN protocol, allows efficient transmission of data over long distances with minimal resources, thus operating for a longer time. This technology is used mostly for monitoring and can be used in a large number of areas ranging from meteorology to medical applications. A coverage study was carried out in some sectors of the University of El Salvador between the months of November and December, where it sought to establish a methodology to predict the level of reception in various geographical conditions within it. To do this, various resources were used such as simulation software, mathematical models, field measurements with the Tektronix brand RSA306B spectrum analyzer and the TTGO LoRa 32 board, to determine its effectiveness under specific conditions. The data is tabulated, compared and the most appropriate tool is chosen according to the environment, which ranges from areas with a large presence of buildings to areas with dense vegetation.

INTRODUCCIÓN

El acrónimo LoRa proviene del inglés *Long Range* y es una tecnología de comunicación aplicada (principalmente) para la interconexión de nodos en redes de internet de las cosas (IoT). Una de sus características fundamentales es que utiliza técnicas de modulación basadas en Chirp Spread Spectrum (CSS). Este tipo de modulación es relativamente reciente y es utilizada por distintos tipos de dispositivos para lograr una cobertura de largo alcance y que no requiera consumos muy altos de potencia y energía. Esta tecnología pertenece en la actualidad a la compañía Semtech y corresponde a la primera capa o capa física del modelo OSI. (Becolve Digital, 2022)

El inicio de esta tecnología se considera desde 2009 cuando Nicolas Sornin y Olivier Sellaer comienzan a desarrollar los primeros prototipos. Luego en 2010 se une a la investigación François Sforza y los

3 juntos fundan la empresa Cycleo que no mucho tiempo después es adquirida por Semtech. 5 años después se funda LoRa Alliance y el protocolo de red desarrollado se estableció como LoRaWAN; donde los objetivos principales de esta alianza son promover la interconectividad y la globalización. (Bassi, 2019)

Actualmente esta tecnología es ampliamente utilizada en diversos sectores como la agricultura y ganadería, en la creación de ciudades inteligentes, monitoreo de generación y consumo de energía eléctrica, en el campo de la medicina, etc. Y se plantea que, con el paso del tiempo, su uso crezca aún más dado su potencial y la reducción de costos que su uso implica.

En El Salvador, esta tecnología ha sido poco explorada; su uso se limita mayormente a pruebas de aplicaciones en la banda ISM (902-928 MHz). Un ejemplo de esto es la instalación de una antena y Gateway en la zona de San Benito para que los dispositivos dentro de la zona de cobertura pudiesen hacer pruebas de envío de datos a esta para motivar a las personas a utilizar esta tecnología. (Ibarra, 2019)

El presente estudio se realiza con el objetivo de determinar un método eficiente para la predicción de cobertura en los diferentes escenarios y condiciones geográficas dentro de la Universidad de El Salvador, utilizando diferentes herramientas de predicción de cobertura como softwares de simulación de cobertura, modelos matemáticos de propagación de señal; así como también mediciones de campo con el analizador de espectro RSA306B de la marca Tektronix y un módulo receptor realizado a partir de la placa TTGO LoRa 32. Además, también se busca determinar los parámetros de comunicación que optimicen la calidad de la comunicación entre dispositivos.

Fundamentación teórica de funcionamiento

Modulación

LoRa es una tecnología que se basa en la modulación Chirp Spread Spectrum (CSS), la cual posee características similares a la modulación Phase Shift Keying (PSK); que busca minimizar los recursos necesarios para su óptimo funcionamiento

y también aumentar el rango de comunicación. Esta modulación ha sido utilizada anteriormente en comunicaciones de origen militar y espacial (ITU-T, 2021). La técnica de modulación CSS depende de ciertos parámetros que pueden modificarse y que determinan las propiedades del enlace, estos parámetros son enlistados a continuación:

Frecuencia portadora: define la frecuencia portadora del medio utilizado para la transmisión y recepción, donde, según la recomendación internacional ITU-T Y.4480 (2021), esta se establece entre los 902 y los 928 MHz en USA y América Latina.

Ancho de banda de la señal: este ancho de banda está definido por lo general el 125 KHz, aunque es posible aumentarlo a 250 KHz y hasta 500 KHz según las necesidades que la aplicación requiera. Se toma en consideración que a mayor ancho de banda la recepción de la señal se ve reducida, pero aumenta la resistencia a interferencias.

Coding Rate: este parámetro define la tasa de corrección de errores delantera (FEC), es utilizado por los transmisores y receptores LoRa para reducir las afectaciones producidas por las interferencias de RF.

Factor de propagación (SF): este parámetro representa la cantidad de chirps que se envían por segundo. El valor de este se encuentra entre 7 y 12; donde un valor más grande de SF aumenta el rango de comunicación, pero también aumenta la cantidad de energía utilizada y disminuye la velocidad de transmisión de datos y el tamaño de los paquetes que pueden ser enviados. A su vez, entre menos sea el valor de SF, el rango se ve reducido, pero el gasto de energía es menor y la velocidad y el tamaño de datos que pueden ser transmitidos no se ven afectados.

Potencia de transmisión: se refiere a la medida de la energía que irradia la antena del nodo LoRa.

Polaridad Chirp: este parámetro delimita la polaridad de los chirp transmitidos. Los Gateway LoRaWAN utilizan polaridad invertida para la transmisión de paquetes a los nodos y los dispositivos finales, por el contrario, utilizan polaridad no invertida para la transmisión de paquetes.

Sync Word: este parámetro está definido por el valor de un byte que corresponde a los dos últimos chirps ascendentes del preámbulo y cuya importancia radica en que es con este que se diferencian redes LoRa que utilizan bandas de frecuencia iguales (Electrodaddy, 2021).

Regionalización

Las frecuencias utilizadas por LoRa son frecuencias libres no licenciadas y en su mayoría se utilizan para procesos industriales, científicos y médicos (Banda ISM); es de destacar que cada país o región cuenta con su propia banda de frecuencia. Según la recomendación ITU-TY.4480, En la Tabla 1 se muestra la asignación de frecuencias.

La banda utilizada en USA es conocida como la banda ISM, que corresponde a aplicaciones industriales, médicas y científicas. Esta misma banda es utilizada por la mayor parte de países de América Latina como El Salvador.

Protocolo LoRaWAN

LoRaWAN es un protocolo de comunicación a Nivel de red (Capa OSI Nivel 2,3). Este va sobre la capa física de LoRa. Este protocolo de comunicación LoRaWAN es abierto, por tanto, es factible para una multitud de fabricantes poder desarrollar dispositivos y de esta forma abaratar los costes de estos (Becolve Digital, 2022).

Las redes creadas a partir del protocolo LoRaWAN utilizan una técnica de modulación adaptativa con transceptor multicanal multi-módem en una

Tabla 1

Cuadro de distribución de frecuencias para comunicación LoRa.

País o región	Frecuencias
Europa	863-870 MHz 433 MHz
USA y América Latina	902-928 MHz
China	470-510 MHz 779-787 MHz
Australia	915-928 MHz
India	865-867 MHz
Asia	433 MHz

estación, esto es lo que le permite recibir una cantidad considerable de señales desde diferentes canales; estas señales pueden ser recibidas por todas las estaciones base en un determinado rango. Esta recepción redundante mejora la tasa de mensajes recibidos. Sin embargo, el despliegue de múltiples accesos a la red con el fin de aumentar la cobertura implica en algunos casos una inversión mayor.

La tasa de bit de esta modulación se relaciona con la tasa chirp y la tasa de símbolo, en (Bullian y Urbina, 2018) se indica la relación matemática (1).

$$R_b = SF * \frac{1}{\left[\frac{2^{SF}}{BW}\right]} \frac{\text{bits}}{s} \quad (1)$$

donde:

R: tasa de datos.

SF: factor de ensanchamiento.

BW: ancho de banda.

De forma general se puede decir que LoRa son los cables que conectan los dispositivos en una red Ethernet y LoRaWAN se refiere al proceso de comunicación entre los dispositivos a nivel de la dirección MAC y de la dirección IP de red de los dispositivos en la red Ethernet.

Elementos que componen una red LoRaWAN

Nodos (End points): son los dispositivos finales, para este tipo de redes usualmente estos son sensores, aunque también pueden ser actuadores o trackers. Estos dispositivos son los encargados de recibir o enviar información.

Gateway: es el dispositivo al cual se conectan los nodos por medio de LoRaWAN y que también es el que permite la comunicación de los nodos con el servidor de red.

Servidor de red: software utilizado para controlar la red y definir la lógica de comunicaciones entre los nodos y el Gateway; esta lógica es la que previene el envío de paquetes duplicados y delimita el acceso de los dispositivos.

Servidor de aplicación: es el software que se encarga de tratar los datos que se comunican a través de LoRaWAN. Es completamente independiente de la red LoRaWAN y dependiendo del servidor de red puede comunicarse con MQTT, Modbus TCP, API REST, etc (Becolve digital, 2022).

Clasificación de los dispositivos LoRaWAN (nodos)

Los dispositivos finales empleados en una red LoRaWAN se clasifican en tres categorías: clase A, clase B y clase C. Según la recomendación establecida por Unión Internacional de Telecomunicaciones, todos los dispositivos LoRaWAN deben implementar la clase A; y las clases B y C son extensiones de los dispositivos clase A. Esta clasificación entre los dispositivos define el comportamiento de estos en cuanto a la transmisión de paquetes, así como también brinda información acerca del gasto energético de cada uno.

Para realizar la transmisión y recepción de datos a través de la red LoRAWAN, deben registrarse y habilitarse los nodos en el proveedor del servidor de aplicaciones, que es quien administra las puertas de enlace de la red abierta. Por tanto, el dispositivo LoRaWAN puede unirse a la red por medio de dos métodos: uno, a través de una activación por aire (OTAA), que requiere un procedimiento de comunicación de protocolo de enlace con la puerta de enlace para el intercambio de claves; dos, con un método de activación por personalización, que permite una configuración manual de una clave de cifrado.

Valores representativos de operabilidad en los dispositivos LoRa

Existen Parámetros que delimitan el funcionamiento de los dispositivos LoRa, es decir, el rango que puede cubrir la transmisión, la velocidad, la cantidad de paquetes, etc.; dichos valores se ven afectados en gran medida por el factor de propagación (SF por sus siglas en inglés), que define la duración del tiempo de emisión del chirp. El valor puede oscilar entre 7 y 12. Entre mayor sea, mayor será la distancia cubierta por la señal, pero tiene como consecuencia que la tasa de datos transmitida es más baja y también aumenta el consumo de energía.

También es importante hacer mención a otro parámetro condicionado por el valor del SF, el cual es la carga máxima de paquetes, cuyo funcionamiento cambia drásticamente según sea el valor de SF utilizado. A mayor SF, la carga máxima de paquetes es menor, esto además afecta en cierta medida el dato promedio de la sensibilidad de los dispositivos a determinadas distancias para entornos sin obstáculos (Electrodaddy, 2021).

En la Tabla 2 se muestra el resumen de los cambios experimentados por los dispositivos según el factor de propagación.

Metodologías para predicción de cobertura

Para la presente investigación, se evaluaron las siguientes opciones: a) Software de simulación (de uso libre y licenciado), b) Modelos matemáticos y c) Instrumentos para medición en campo.

Software de simulación (de uso libre y licenciado)

Para poder establecer una comparativa entre los diferentes métodos posibles de análisis de cobertura es fundamental contar con un simulador, pues este permite realizar un análisis en una zona definida de forma más rápida y automatizada, por tanto, se realiza una exploración de diferentes opciones existentes en el mercado que permitan realizar un análisis y con base a los resultados observados, se determina cual es el que presenta las mejores características. Los simuladores probados son los siguientes: Radio Mobile, XIRIO, TowerCoverage, CloudRF.

Para poder probar su funcionamiento se realiza una prueba tomando como punto de referencia el edificio principal de la Facultad de Medicina, en el cual, se coloca un Gateway teórico y se realiza la simulación. Para ello, se delimitan algunos parámetros, los cuales son: Frecuencia de trabajo entre los 902-928 MHz, Potencia de la antena emisora de 20 dBm, Umbral de recepción de -148 dBm, Polarización vertical, La antena emisora se coloca a 30 metro sobre el nivel del suelo, mientras que la receptora se coloca a 1.5 metros, La antena es de tipo omnidireccional y La ganancia de la antena es de 2dB.

Estos parámetros son delimitados de acuerdo con las especificaciones de funcionamiento del chip SX1276, que es utilizado por la placa TTGO LoRa 32 V1 para llevar a cabo las transmisiones de este tipo. Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 1-3.

Radio Mobile posee la capacidad de exportar los mapas a Google Earth, que es una mejor opción para visualizar los mapas de cobertura generados. Visto en esta plataforma, el mapa es el mostrado en la Figura 2.

De esta imagen se puede resaltar que el rango de cobertura es demasiado amplio y que la recepción es óptima en toda el área de estudio, sin embargo, no son resultados que puedan considerarse reales, ya que no se toman en cuenta las pérdidas debidas a obstáculos en la línea de visión. Es posible obtener un mapa que muestra estas pérdidas, pero no muestra el nivel de recepción bajo esta configuración.

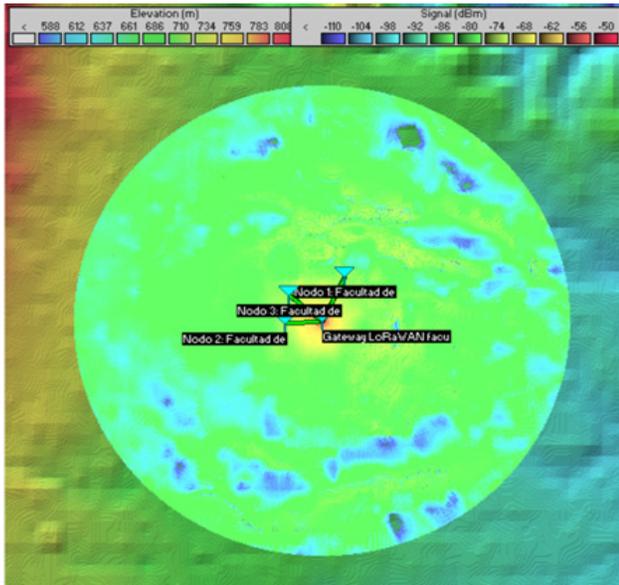
Tabla 2

Factores de propagación en envíos de datos.

Factor de propagación	Tasa de transferencia de datos	Velocidad de bits [bits/s]	Rango [km]	Sensibilidad Rx [dBm]	Carga máxima de paquetes [Bytes]
12	0	290	12	-136	51
11	1	440	10	-133	51
10	2	980	8	-132	51
9	3	1760	6	-129	115
8	4	3125	4	-126	222
7	5	5470	2	-123	222

Figura 1

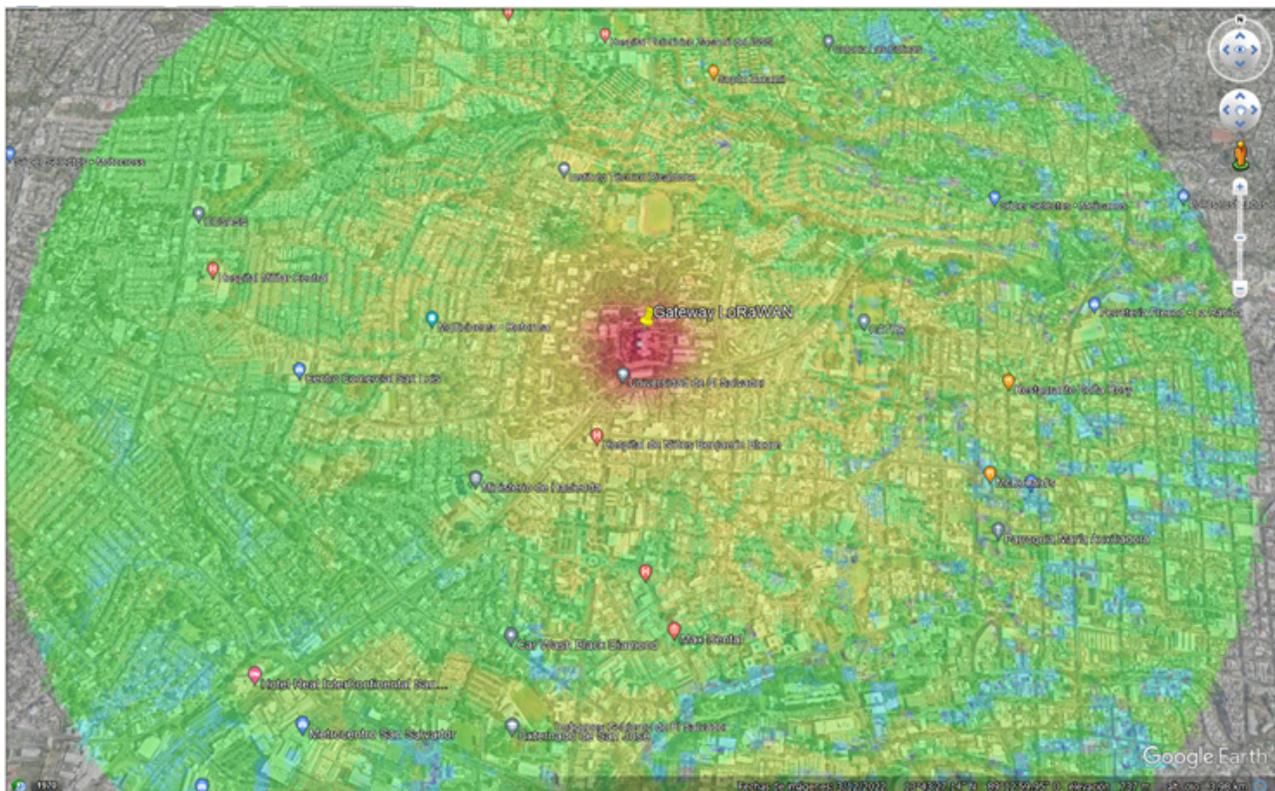
Nivel de señal de cobertura.



Además de esto, otra desventaja de este programa es que no permite delimitar el tipo de modelo que se desea aplicar al análisis.

Figura 2

Cobertura de Radio Mobile compatible con Google Earth.



Simulación en XIRIO

La herramienta XIRIO presenta algunas ventajas en comparación con Radio Mobile, ya que cuenta con una mejor resolución en las imágenes, permite modificar el tipo de modelo a ser empleado, las pérdidas por obstáculos se encuentran mejor calculadas y además, permite delimitar de mejor forma el área de estudio. El mapa de cobertura obtenido se muestra en las Figuras 4-6.

También, es una herramienta compatible con tecnología satelital, por lo que se pueden visualizar las imágenes de esta forma.

La desventaja de este programa es que, si bien los resultados se aproximan más a un análisis real de cobertura, no llegan a ser del todo concluyentes. Es posible mejorar la resolución y el cálculo de cobertura, pero el programa presenta el inconveniente que para ello la herramienta solicita un pago para cada uno.

Figura 3

Simulación de cobertura en Radio Mobile compatible con Google Earth.

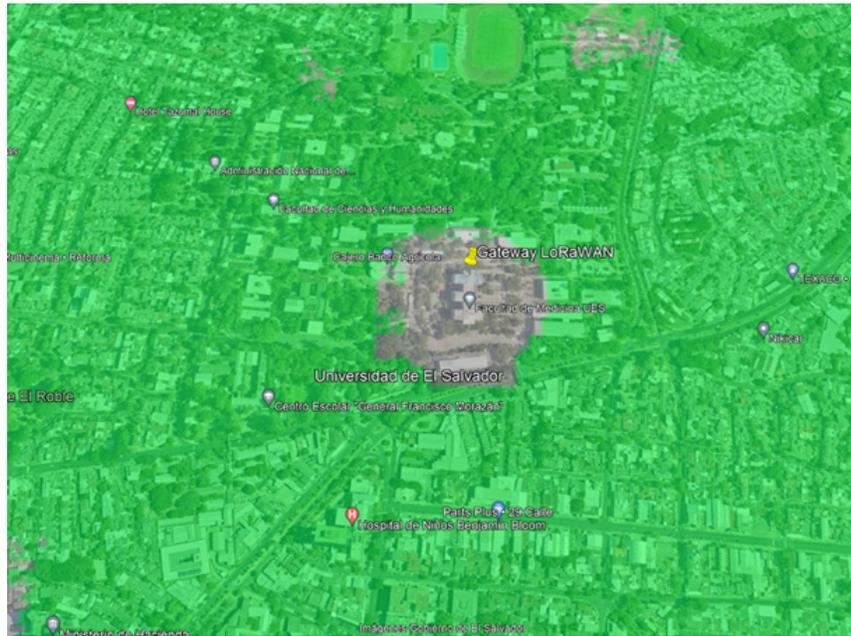
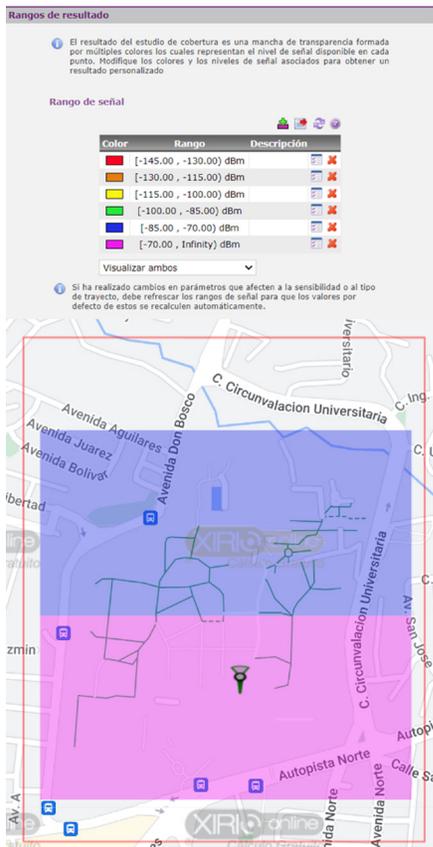


Figura 4

Simulador XIRIO para predicción de cobertura.



Simulación en Tower Coverage

Como se puede observar de la Figura 6, el resultado obtenido de este programa es bastante real y calcula de mejor forma las pérdidas debidas al terreno, aunque el área de cobertura continúa siendo

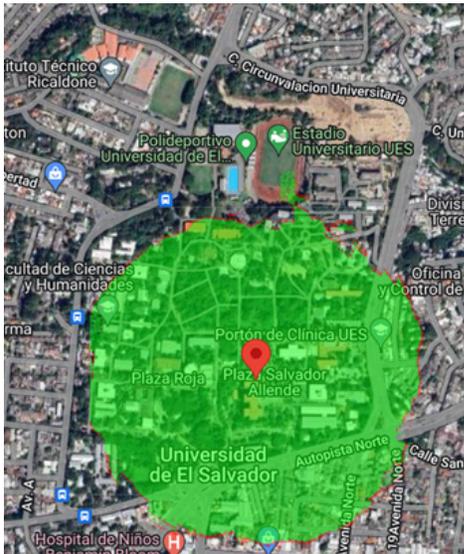
Figura 5

Análisis de resultados de simulación de cobertura.



Figura 6

Análisis de resultados de cobertura en simulador Tower Coverage.



bastante amplia y al realizar un cálculo de la cantidad de componentes a ser utilizados para una red LoRa, podría no ser adecuado.

Simulación en Cloud RF

Este simulador gratuito realiza cálculos bastante precisos de las pérdidas debidas a obstáculos, además de esto, permite personalizar la zona de estudio ya que permite agregar elementos que no se encuentren en los mapas o que no se encuentren bien definidos, esta herramienta permite agregar obstrucciones como edificios, bosques, elementos metálicos, etc. y configurar su incidencia en la recepción. Como extra, permite obtener además del mapa de recepción, un mapa de pérdidas (Figuras 7-8).

Síntesis de la prueba de simuladores

De acuerdo con las pruebas realizadas, se determina que el programa más compatible para poder realizar una comparación con los otros métodos a ser utilizados es CloudRF, ya que es el que realiza cálculos de forma exacta, de acuerdo con el modelo de propagación seleccionado para el análisis, el cual es el COST231 Walfisch-Ikegami. Permite, además, agregar obstáculos de diferente tipo a la zona de estudio en caso de ser necesarios, lo que garantiza

una simulación más aproximada a la real. Este programa es utilizado también para estudios de gran envergadura como por ejemplo el “Estudio de los modelos de propagación en banda de TV abierta ISDB-T con base a las condiciones atmosféricas de la gran Caracas” (Salazar & Buonanno, 2012).

Modelos matemáticos

Como otra alternativa al estudio hecho por simuladores para predecir la intensidad de la señal en un área determinada, se tienen los cálculos matemáticos. Estos calculan las pérdidas de

Figura 7

Análisis de resultados de simulación de cobertura en simulador Cloud RF

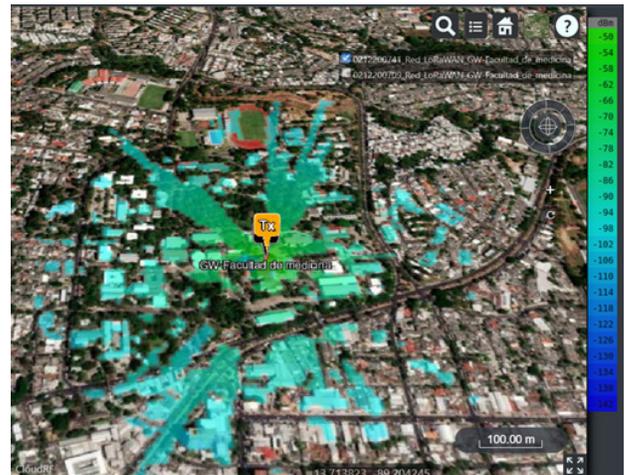
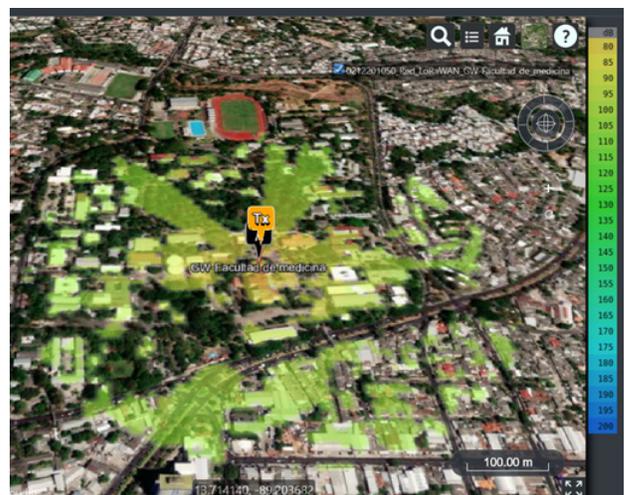


Figura 8

Prueba de cobertura en Cloud RF con modelo COST231.



propagación en una trayectoria, los métodos de propagación básicos según (XIRIO, 2023a, 2023b) son los siguientes:

Okumura-Hata: es un método empírico válido para las frecuencias de 150 MHz a 2 GHz. Recomendado para servicios móviles y de acceso de banda ancha en entornos rurales y urbanos cuando no se disponga de cartografía de alta resolución. (XIRIO, 2023b)

Rec. UIT-R P.528: método de cálculo empírico válido en la gama de frecuencias de 125 MHz - 15.5 GHz. Recomendado para servicios móvil aeronáutico y de radionavegación aeronáutica (XIRIO, 2023b).

Rec. UIT-R P.1147: método empírico de predicción destinado a la gama de frecuencias comprendidas entre 150 y 1700 kHz aproximadamente, para longitudes de trayecto entre 50 y 12000 km (XIRIO, 2023b).

COST 231, Walfisch-Ikegami: método determinístico válido en la gama de frecuencias de 800 MHz a 2 GHz. Recomendado para entornos urbanos en servicios móviles y acceso de banda ancha. Requiere cartografía urbana con información de edificios (XIRIO, 2023b).

En este estudio se utilizará el modelo COST 231, Walfisch-Ikegami. Este modelo es el que mejor se adapta a las condiciones del escenario de prueba pues, se basa en parámetros como densidad de edificios en ambientes urbanos, altura promedio de los edificios, altura de las antenas, anchura de las calles, separación entre los edificios, dirección de la calle con respecto a la trayectoria directa de la antena transmisora y receptora (Figuras 9 y 10). En general, las restricciones para el modelo son las siguientes:

- $F = 800 - 2000$ MHz
- $H_b = 4 - 50$ m (altura de transmisor)
- $H_m = 1-3$ m (altura de receptor)
- $d = 0.02 - 50$ Km (distancia entre transmisor y receptor)
- $\Delta h_b > 0$ m (altura relativa del transmisor respecto a los edificios)

Los parámetros definidos en el modelo COST 231 (XIRIO, 2023c) son los siguientes:

- h_r : altura media de los edificios (m)
- w : anchura de la calle (m)
- b : separación media entre edificios (m)
- ϕ : ángulo formado por la dirección de propagación y el eje la calle (grados)
- h_b : altura de la antena de la estación base (m)
- h_m : altura de la antena del dispositivo móvil (m)
- $\Delta h_m = h_r - h_m$ (m)
- $\Delta h_b = h_b - h_r$ (m)
- l : distancia total entre el primer y el último edificio del trayecto (m)
- d : distancia entre estación base y dispositivo móvil (km)
- f : frecuencia (MHz)

Figura 9

Parámetros para el cálculo de pérdidas del modelo COST 231.

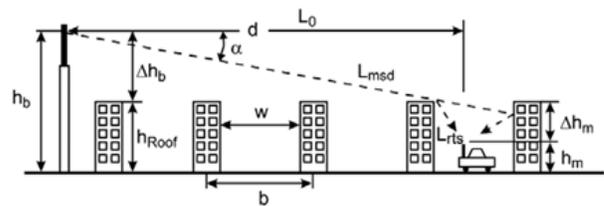
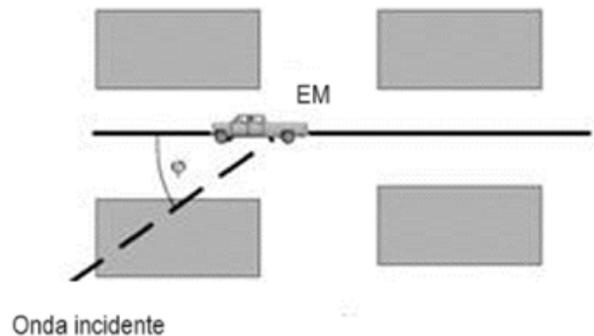


Figura 10

Vista superior entre edificios usando el modelo COST 231.



Las pérdidas en trayectos sin visibilidad directa se modelan con las ecuaciones 2-9.

$$L_b = L_{bf} + L_{rts} + L_{msd} \quad (2)$$

L_{bf} = son las pérdidas en condiciones de espacio libre.

$$L_{bf} = 32.45 + 20\log_{10}f(\text{MHz}) + 20\log_{10}d \quad (3)$$

L_{rts} = pérdida por difracción terraza-calle "entre la terraza de los edificios y el móvil."

$$L_{rts} = -8.2 - 10\log w + 10\log_{10}f + 20\log_{10}\Delta h_R + L_{ori} \quad (4)$$

si $L_{rts} \leq 0$, se toma $L_{rts} = 0$

El valor de l_{ori} se obtiene de la siguiente manera:

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0.354\varphi, & 0 < \varphi < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\varphi - 35^\circ), & 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \\ 4 - 0.114(\varphi - 55^\circ), & 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases} \quad (5)$$

L_{msd} = es una estimación de la "difracción multiobstáculo entre Tx y el edificio próximo al Rx."

$$L_{msd} = L_{bsh} + K_a + K_d * \log_{10} d + k_f * \log_{10} f - 9\log_{10} b \quad (6)$$

Donde:

$$L_{bsh} = -18 \log_{10}(1 + \Delta h_b)$$

Si $\Delta h_b < 0$ entonces $L_{bsh} = 0$

$$K_a = \begin{cases} 54, & \Delta h_b \geq 0 \\ 54 - 0.8\Delta h_b, & \Delta h_b < 0 \text{ y } d \geq 0.5 \\ 54 - 0.8\Delta h_b \cdot \frac{d}{0.5}, & \Delta h_b < 0 \text{ y } d < 0.5 \end{cases} \quad (7)$$

$$K_d = \begin{cases} 18, & \Delta h_b \geq 0 \\ 18 - 15 * \frac{\Delta h_b}{h_r}, & \Delta h_b < 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$K_f = \begin{cases} -4 + 0.7 \frac{f}{925 - 1}, & \text{ciudades de tamaño medio} \\ -4 + 1.5 \frac{f}{925 - 1}, & \text{grandes centros metropolitanos} \end{cases} \quad (9)$$

Al sustituir las ecuaciones (3), (4) y (6) en (2) se calculan las pérdidas en la trayectoria entre el transmisor y receptor.

Aplicación del modelo de propagación UIT-R P.833-2

Aunque el modelo COST 231 es muy útil en ambientes urbanos, la mayoría de los sistemas de

comunicaciones terrestres requieren que las señales pasen a través de follajes o campos de vegetación en algún punto, particularmente cerca del receptor (Zamora, 2015). El modelo COST 231 no contempla las pérdidas por vegetación que se encuentran en el lugar por lo cual a la ecuación (2) se le deben de sumar las pérdidas por la vegetación.

Para calcular dichas pérdidas se utilizará el modelo de obstrucción vegetal (UIT R P.833-2) el cual considera 3 casos de aplicación (Zamora, 2015).

Caso 1: variante aplicable a frecuencias entre 30MHz y 60 GHz.

Considera que un extremo (Tx o Rx) y parte de la trayectoria LOS está dentro de la vegetación o zonas arboladas (Figura 11).

Caso 2a: variante aplicable a frecuencias hasta 3 GHz Considera que ninguno de los extremos de Transmisor y receptor está en zonas arboladas, pero hay vegetación en alguna parte de la trayectoria.

Caso 2b: útil para frecuencias mayores de 3GHz Cuando ni el transmisor ni el receptor están en zonas arboladas, pero hay vegetación en alguna parte de la trayectoria, medida en metros.

Para escoger qué caso usar, se debe de tomar en consideración la trayectoria que la señal va a recorrer, en este caso se escoge el Caso 1 debido a que es la que se adapta mejor al ambiente de pruebas. Para el cálculo de las pérdidas en el Caso 1 se tienen las ecuaciones 10 y 11 según (Zamora, 2015):

$$A_{veg} = A_m (1 - e^{-\frac{d_{veg} \gamma}{A_m}}) \quad (10)$$

$$A_m = A_1 f^\alpha \quad (11)$$

Donde:

A_{veg} : pérdidas en exceso de vegetación.

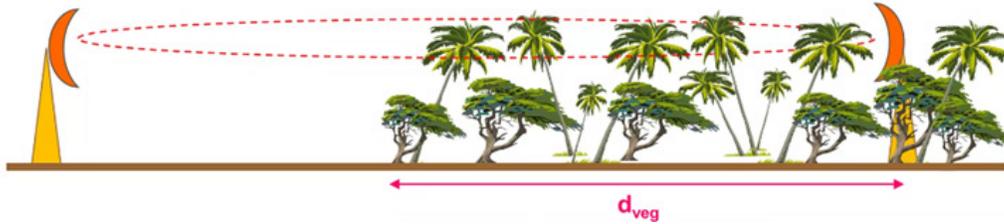
A_m : es la pérdida máxima para un terminal dentro de un tipo y profundidad específica de vegetación. (dB)

d_{veg} : es la parte de la trayectoria afectada el bosque(m)

γ : atenuación específica para un trayecto muy corto de vegetación (dB/m)

Figura 11

Caso 1 con vegetación parcial (Israel M. Zamora).



Para una frecuencia que oscile entre los 900 – 1900 MHz: $A_1 = 1.15 \text{ dB}$ y $\gamma = 0.43$, para árboles con altura media de 15 metros, antena de receptor a una altura de 1.6 metros y una antena transmisora a una altura de 25 metros. Al incluir las pérdidas de la fórmula (10) en (2) se obtiene un valor más real de las pérdidas de propagación en la trayectoria que llegaría a experimentar la señal.

Este modelo permitirá calcular las pérdidas en la trayectoria, si se desea saber la intensidad de la señal recibida en el receptor, se deberá seguir la ecuación 12 (Aida, 2014).

$$RSL = \text{Potencia transmitida} - \text{Pérdidas de propagación} \quad (12)$$

Donde:

La “potencia transmitida” es la potencia de la señal en el punto de transmisión.

Las “pérdidas de propagación” son las pérdidas que experimenta la señal al propagarse a través del entorno.

Al implementar la ecuación 12 se obtiene la intensidad de la señal en un punto determinado, al repetir el proceso para x cantidad de puntos, se puede estimar una cobertura del dispositivo en la zona seleccionada y estudiar cómo se comportaría la señal en los diferentes vanos y poder así predecir un comportamiento de la señal.

Instrumentos para medición en campo

Se muestran en este apartado los equipos seleccionados para la realización de las mediciones de campo de entre todos los explorados.

Analizador RSA306B

El dispositivo analizador de espectro (Figura 12) posee la propiedad de poder observar el espectro en tiempo real a 40 MHz. Destaca por su portabilidad y por su compatibilidad con dispositivos portátiles como computadoras portátiles para la visualización de resultados, alimentándose a través de estas utilizando únicamente un cable USB 3.0 que viene incluido con el instrumento. Puede utilizarse para distintas aplicaciones, por ejemplo: para fines educativos, mantenimiento, instalación y reparación de equipos, diseño y manufactura o también para detección de interferencias.

Entre sus características fundamentales de acuerdo con (Tektronix, 2021) se encuentran:

Puede operar en un rango de frecuencias que va desde los 9 kHz a los 6.2 GHz.

Trabaja de acuerdo con Especificaciones militares Mil-Std 28800, que habla acerca de las recomendaciones de uso para el testeo y la operación de dispositivos eléctricos o electrónicos. Estas recomendaciones son relativas al medio ambiente, impactos y vibraciones para operación en condiciones hostiles.

Figura 12

Analizador de espectro Tektronix RSA 306B.



Posee un ancho de banda de adquisición de señales de 40MHz para efectuar el análisis de vector de banda ancha y en tiempo real de banda ancha.

Es posible la visualización de resultados con el software signalVU-PC que cuenta con 17 modos de análisis. Esta aplicación permite además la personalización de la configuración según las necesidades que el estudio requiera.

Cuenta con diferentes opciones de mapeo, reproducción de señales grabadas, sondeo/ clasificación de señales.

Trabaja con una variedad de señales del tipo LTE, Bluetooth, APCO 25 WLAN.

Capacidad de almacenamiento de resultados en disco para el estudio de eventos de larga duración.

Rango de temperatura de operación de -10°C a 55°C .

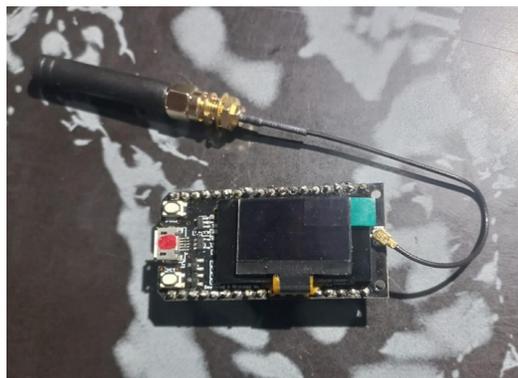
Más de 15 opciones para mapeado, análisis de modulación, soporte estándar, pulso, reproducción de archivos guardados y más. Pequeño y ligero (0,75kg) con consumo de energía inferior a 4,5W

TTGO LoRa32

La placa OLED TTGO LoRa32 es una placa de desarrollo ESP32 que incluye el chip SX 1276 conectado de forma interna para la comunicación LoRa y una pantalla OLED SSD1306 para mostrar información de los paquetes recibidos teniendo mayor control de los datos recibidos y enviados (Figura 13). Esta placa posee una comunicación que puede ser mayor a 1 km de distancia entre dispositivos, alta inmunidad a interferencias y bajo consumo de energía, además de ser compatible con las frecuencias sin licencia disponibles en el mundo. Esta placa puede utilizarse para una gran variedad de aplicaciones dada su compatibilidad con la tecnología LoRa y algunos ejemplos realizados con ella pueden ser: sistemas de monitorización remotos de determinados fenómenos físicos como el volumen de líquidos en depósitos, estaciones meteorológicas o sistemas de alerta para desborde de ríos como la realizada por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. (Cornelio, 2019)

Figura 13

Placa OLED TTGO ESP32 para envío de datos por LoRa.



El chip SX1276 basado en ESP32 posee una alta sensibilidad de hasta -148 dBm , potencia de salida de $+20\text{ dBm}$, circuito de carga con batería de 3.3 a 7V, velocidad de datos de 150 Mbps, rango de temperatura de funcionamiento de -40°C a 90°C y conexión Wi-Fi (Cameron, 2023).

Metodología de mediciones de campo

Definición de la zona de medición

En primer lugar, se identifican dos zonas dentro de la Universidad de El Salvador a las cuales se les realizan las pruebas de recepción de señal, estas son la Facultad de Ingeniería y Arquitectura y la Facultad de Ciencias Económicas. Con esto se busca comprobar la incidencia del terreno en los valores de señal recibidos. Estas zonas se eligieron debido a que cuentan con lugares con una altura adecuada para la realización de pruebas de transmisión y recepción y además, permiten obtener una referencia adecuada de modo que se puedan generalizar los resultados para otras zonas dentro de la misma Universidad.

Las pruebas realizadas poseen una distancia de cobertura no mayor a los 200 metros, esto debido a que lo que se busca es obtener una señal no menor a los -110 dBm ya que, a partir de este punto, cualquier interferencia debida al clima u otros factores asociados, puede afectar el funcionamiento de los equipos (Figuras 14 y 15).

Puntos de prueba

Una vez delimitadas las zonas de prueba, se procede

a seleccionar una cantidad significativa de puntos de medición ubicados en localizaciones con diferentes características geográficas, así, por ejemplo: en zonas con línea de visión sin obstáculos, zonas con pocos obstáculos, detrás de edificaciones, lugares con mucha vegetación. Además, se identifican las características de los vanos entre el emisor y el receptor, luego, contrastar esa información con la medición obtenida.

Para cada prueba se tomaron 20 mediciones que se realizaron alrededor del Gateway. Los puntos seleccionados fueron los siguientes:

Geolocalización

Para obtener el dato exacto del lugar de medición se programó el módulo NEO-6M-0-001 el cual es un módulo GPS cuyo funcionamiento se basa en la comunicación con diferentes satélites que, al establecer un enlace con el módulo, calculan su posición (Figura 16).

Selección del rango de frecuencias de medición

En El Salvador, no existe ninguna ley que regule las comunicaciones realizadas mediante el protocolo LoRaWAN o la tecnología LoRa. Sin embargo, el

Figura 14

Ubicación de Gateway (azul) en cuarta planta del edificio B y puntos de prueba (rojo) en Facultad de Ingeniería y Arquitectura en QGIS.



Figura 15

Ubicación de Gateway (azul) en cuarta planta de edificio "Rafael Menjívar" y puntos de prueba (rojo) en Facultad de Ciencias Económicas en QGIS.

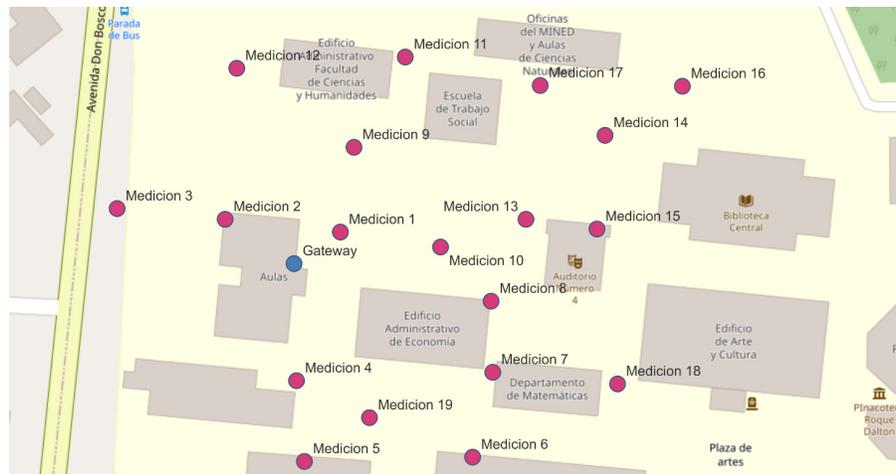


Figura 16

Módulo GPS NEO-6M-0-001 para ubicación de puntos de medición.



ente encargado de regular las telecomunicaciones a nivel general es la Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones (SIGET, 2017), y establece que: la porción del espectro 902-928 MHz, en El Salvador, conforme a la resolución clasificada con el número No. T-446-2002, del cinco de julio del dos mil dos; la banda 902-914 MHz está atribuida a título primario al servicio móvil terrestre, cuyo espectro es de uso regulado, y requiere concesión. Quedando la parte alta de esta banda (914-928 MHz) disponible para ser utilizada por tecnologías SPREAD SPECTRUM; como el caso de las transmisiones LoRa (Figura 17).

Dadas estas recomendaciones, se puede utilizar el ancho de banda de 914-928 MHz, no obstante, como se menciona anteriormente, la banda de 915

a 928 MHz es una banda libre conocida como banda ISM, que es utilizada para aplicaciones industriales, médicas y científicas y por tanto, no existe una regulación en su uso, esto causa que se perciba una gran cantidad de interferencias en esta banda como se muestra a continuación:

Por ende, se utiliza para la medición la frecuencia de 914 MHz, lo cual permite ver de mejor manera el comportamiento de la señal emitida por el dispositivo transmisor.

Parámetros establecidos de transmisión y recepción

- Factor de ensanchamiento: 7
- Ancho de banda utilizado: 125 kHz
- Tasa de transferencia de datos: 5
- Potencia de transmisión: 20 dBm

Los valores son definidos de tal forma debido a que se busca priorizar la calidad del enlace antes que la distancia, ya que como se muestra en la tabla – estos parámetros aumentan la transmisión de datos sacrificando el área de cobertura.

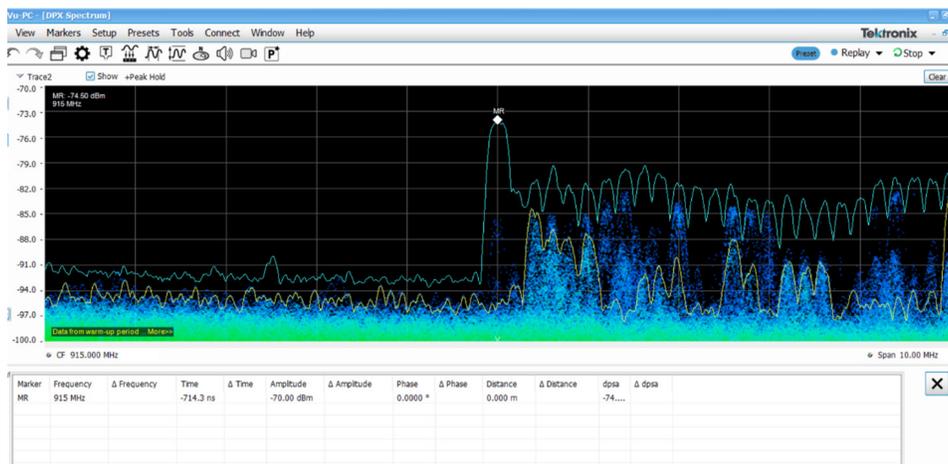
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Materiales de construcción

Luego del estudio de cobertura se procede a la implementación de un prototipo utilizando tecnología de radio alcance, con el que se analizará la cobertura de la red y su comparativa con la

Figura 17

Software SignalVU-PC



simulación y cálculos obtenidos para su predicción de cobertura. Para este prototipo se utilizará la tecnología LoRaWAN explicada en las secciones anteriores.

Para la implementación de este prototipo se usarán 2 placas TTGO ESP32 (LiLYGO), una será configurada como transmisor, que enviará una cadena de texto al nodo receptor, que tendrá un contador de mensajes recibidos y un indicador de intensidad de potencia recibida (Figuras 18 y 19). Cada placa cuenta con una batería de 5 voltios como fuente de alimentación. La placa utiliza el lenguaje de programación Arduino, lo que la hace muy versátil al momento de programar. Para poder establecer una comunicación entre placas, se utiliza la librería *lora.h*, la cual configura y envía los paquetes que se deseen por su antena.

En el lado del receptor, se utilizó además el analizador de espectro RSA306B (Tektronix, 2021, 2022) de la marca Tektronix. Este dispositivo se conecta a un ordenador, que cumple la doble función de mostrar los resultados y también funciona como fuente de alimentación. Este equipo al ser propiedad de la universidad se encuentra disponible para la realización de estos estudios. Una ventaja al usar este equipo es su portabilidad, lo que permite poder desplazarse con él a diferentes sectores mientras este esté conectado a la PC.

Condiciones de las pruebas

Las condiciones de prueba en las diferentes facultades se especifican en las Tablas 3 y 4.

Figura 18

Placa transmisor y receptor modelo TTGO ESP32.



Figura 19

Ubicación física de prototipo para envío de datos.



Tabla 3

Condiciones de medición en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura con prototipo LoRa.

Condiciones de medición en Facultad de Ingeniería y Arquitectura	
Parámetros de medición en RSA	Frecuencia central= 914 Mhz, span 1 MHz, RBW= 5 KHz
Distancias entre Tx y Rx	25 a 125 metros
Altura de la antena transmisora	12 metros
Altura de antena receptora	1.5 metros
Equipos de medición	Tektronix RSA306 B
Escenarios	Línea vista, sin línea vista (obstáculos: edificios y árboles)

Tabla 4

Condiciones de medición en Facultad de Ciencias Económicas con prototipo LoRa.

Condiciones de medición en Facultad de Ciencias Económicas	
Parámetros de medición en RSA	Frecuencia central= 914 Mhz, span 1 MHz, RBW= 5 KHz
Distancias entre Tx y Rx	15 a 122 metros
Altura de la antena transmisora	16 metros
Altura de antena receptora	1.5 metros
Equipos de medición	Tektronix RSA306 B
Escenarios	Línea vista, sin línea vista (obstáculos: edificios y árboles)

Al realizar la medición de cobertura en ambas zonas de estudio, se tabularon los datos para cada una de ellas y con base a estas tablas, se realizó una comparativa para determinar cuál es la metodología adecuada para ser implementada según las condiciones geográficas que presentan dichas zonas.

Análisis de resultados

De los resultados se puede observar que la simulación realizada en el software Cloud RF presenta valores más cercanos a los medidos con el RSA en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, en la cual no hay zonas boscosas densas y es un área suburbana, determinando así que la simulación hecha en este software es una buena opción para zonas urbanas y suburbanas donde la vegetación no sea demasiado densa, por ejemplo, la medición realizada en el punto 7, donde el RSA306B mostró un valor de -91.80 dBm y la simulación un valor de -90 dBm, a diferencia de la predicción matemática que mostró un resultado de -74.66 dBm.

Para zonas donde hay una vegetación densa, como ciertos sectores de la Facultad de Ciencias Económicas, se recomienda usar el modelo matemático ya que el software no puede estimar a detalle las pérdidas debidas a la vegetación presente en el lugar. Estas zonas boscosas densas representan una pérdida de señal muy significativa, pérdidas que, a pesar de que el software permita recrearlas mediante la herramienta de creación de obstáculos, no se reflejan a cabalidad. Para estos casos presentados en este tipo de condiciones geográficas, Los cálculos matemáticos se asemejaron más a los medidos por el RSA siendo este una buena opción para lugares que tengan zonas boscosas densas. Como mejor ejemplo se pueden tomar los valores de la medición 8 en esta zona, ya que el RSA306B mostró una medición de -91.53 dBm, mientras que los valores obtenidos de la simulación y del cálculo matemático fueron de -80 dBm y -85 dBm, respectivamente, pudiéndose notar una mayor cercanía del valor del cálculo matemático. También, como se menciona anteriormente, en las zonas de la Facultad de Ciencias Económicas donde existe mayor presencia de edificaciones, los resultados de la simulación se apegan más a los valores percibidos en las mediciones, como en el

caso de la medición 9, donde el vano atraviesa una pequeña edificación y aquí, el RSA306B percibe un nivel de señal de -86.27 dBm, que se asemeja más al valor de -80 dBm, de la simulación, que al valor de -64 dBm del cálculo matemático.

Asimismo, se recomienda que, para aquellas zonas cercanas a los Gateway, la mejor manera de poder observar la señal es la realización de mediciones mediante el RSA306B directamente, pues tanto el modelo matemático como la simulación dan valores demasiado bajos de recepción a comparación a los obtenidos de las mediciones. Esto es sugerido principalmente para zonas cercanas que no presenten obstáculos de por medio entre el transmisor y receptor; tal es el caso de la medición 13 efectuada en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, donde el valor medido con el analizador de espectro es de -81.10 dBm y en la simulación y en los cálculos los valores obtenidos son de -50 dBm y -46.07 dBm respectivamente.

Las mediciones realizadas con el receptor realizado a partir de la placa TTGO ESP32 no son tomadas en cuenta debido a que, presentan valores de recepción demasiado bajos, esto quiere decir que las pérdidas entre placas son bastante significativas. Este receptor cuenta con la ventaja que permite la recepción de datos a mayor distancia en relación con el RSA306B, pero si se toman en cuenta estos valores, se corre el riesgo de que, al ser colocados los nodos de la red, se seleccionen ubicaciones donde estos sean susceptibles a presentar pérdidas de conectividad debido a interferencias producidas por fenómenos naturales o por otras redes de comunicación.

Finalmente, es importante destacar que, para aquellas zonas ubicadas detrás de edificios de longitud considerable, no aplican los análisis obtenidos mediante simulación y los resultados obtenidos de los cálculos, pues, estos sitios presentan pérdidas demasiado significativas como para poder tener una buena recepción, por tanto, en estos casos se recomienda la instalación de otro Gateway que tenga una mejor posición para poder establecer comunicación en ese punto.

La selección del método para la predicción de

cobertura de la placa TTGO ESP32 dependerá mucho de las características del lugar, las características de los edificios, la densidad de árboles y la ubicación de los nodos. Pero el comportamiento real de la cobertura de los nodos se verá afectado por otros factores como fenómenos hidrometeorológicos como pérdidas causadas por vapores, gases y lluvias. Siendo solo una predicción que se asemeja al valor real de cobertura.

CONCLUSIONES

Se determinó que, para las condiciones geográficas presentes en los diferentes escenarios de prueba seleccionados dentro de la Universidad de El Salvador, los parámetros de comunicación que deben utilizarse son, factor de ensanchamiento de 7, ancho de banda utilizado de 125 kHz, tasa de transferencia de datos ajustada en 5, potencia de transmisión establecida en 20 dBm. Esta selección se debe a que, en las zonas de estudio seleccionadas, así como en la gran mayoría de zonas dentro de la Universidad, existe una amplia presencia de obstáculos que pueden ocasionar pérdidas en los enlaces entre los gateways y los nodos sensores al implementar la red. Si bien el enlace aún es posible cambiando los valores de los parámetros seleccionados, a aumentar el factor de ensanchamiento, el ancho de banda o la tasa de transmisión de información, se corre el riesgo de aumentar las pérdidas de señal entre los enlaces, pues, valores más altos de estos, solo se recomiendan para zonas donde la presencia de obstáculos sea mínima.

Según las pruebas realizadas, se concluye que la frecuencia ideal para ser utilizada es la de 914 MHz. La selección de esta frecuencia se debe a que, como tal, el uso de la tecnología LoRa no está normado en El Salvador, pero se asocia a las tecnologías del tipo spread spectrum, que operativamente pueden ser utilizadas en la banda de 902-928 MHz; pero que según el cuadro nacional de distribución de frecuencias pueden ser utilizadas en la banda de 914-928 MHz. De acuerdo con las mediciones realizadas, se comprobó que, en la frecuencia de los 915 MHz en adelante, existe una gran cantidad de interferencias debido a que es una banda "libre", pero que la frecuencia de 914 MHz es menos utilizada, por lo

tanto, es idónea para este tipo de pruebas.

De acuerdo a las características de la zona de estudio, se eligió el modelo COST 231 (Ikegami et al., 1991), debido a que éste toma en consideración parámetros como altura de edificios, distancia entre edificios, ángulo de señal recibida, distancia entre el transmisor y receptor a una distancia de 20 metros o más; pues de acuerdo con estas, es el modelo que mejor se adapta a los entornos de prueba de nuestro prototipo. Aunque el modelo Okumura-Hata presente similitudes, no es posible implementarlo en este estudio debido a que este solo admite valores de distancia superiores a 1 kilómetro. Sin embargo, no puede describirse la cobertura de la zona únicamente con este modelo, ya que hay zonas donde la señal recorre árboles. En estas, el modelo Walfisch-Ikegami no contempla estas pérdidas de vegetación, siendo necesario anexar estas pérdidas por medio del modelo UIT R P.833-2 teniendo así un cálculo más exacto y valores más cercanos a los registrados por el medidor RSA306B.

Para distancias entre transmisor y receptor que sean menores a 20 metros, es necesario utilizar un analizador de espectro para la medición de la intensidad de señal, debido a que los valores obtenidos para estas distancias tanto de simuladores como aquellos obtenidos por cálculos matemáticos difieren mucho de los valores reales.

RECOMENDACIONES

En la actualidad, no existen simuladores asequibles que proporcionen información exacta acerca de las características de propagación de acuerdo con las condiciones geográficas de la Universidad de El Salvador y en general del territorio nacional. Por tanto, para obtener mejores resultados, se recomienda utilizar versiones superiores de estos simuladores ya que brindan acceso a imágenes de mayor resolución u otras herramientas de simulación más especializadas, aunque impliquen un costo significativo.

Este estudio se realizó con condiciones climáticas ideales. Para una investigación más amplia, se recomienda realizar mediciones en condiciones

atmosféricas diversas como pueden ser la presencia de lluvia, vientos, tormentas eléctricas, etc. Así también, se sugiere diseñar un dispositivo que sea capaz de soportar estas condiciones sin sufrir daños a su estructura a fin de poder realizar este tipo de pruebas.

El estudio de cobertura se realizó a partir de los datos obtenidos de un transmisor programado con una placa TTGO LoRa 32, la cual es asequible y cuyas capacidades son aceptables para este tipo de estudios, pues como emisor puede ajustarse a una potencia máxima de 20 dBm y con un alcance de alrededor de 1 km y como receptor posee un umbral de sensibilidad de hasta -148 dBm. Sin embargo, si se desea implementar un sistema más profesional es necesario explorar otras opciones en el mercado que cuenten con la tecnología LoRa, tanto para gateways como para nodos, pues esto implicaría una mejoría en la calidad de los enlaces, ya que pueden ser configurados a mayor potencia, un mayor umbral de recepción, algunos poseen una mejor antena, mayor capacidad de memoria, mejor procesador, etc.

REFERENCIAS

- Bassi, A. (03 de junio de 2021). *Intro a la tecnología LoRa*. Recuperado el 18 de noviembre de 2023, de gotoiot: https://www.gotoiot.com/pages/articles/lora_intro/content.html#:~:text=La%20historia%20de%20LoRa%20comenzó,convertir%20la%20idea%20en%20realidad
- Becolve digital. (2022). *Conceptos técnicos básicos que te ayudarán a entender LoRa y LoRaWAN (Low Power Wide Area Network) en pocos minutos*. Obtenido de Becolve Digital: <https://becolve.com/blog/conceptos-tecnicos-basicos-que-te-ayudaran-a-entender-lora-y-lorawan-low-power-wide-area-network-en-pocos-minutos/>
- Cornelio, E. R. (2019). *Prototipo de alerta temprana para desborde de ríos*. UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTONOMA DE TABASCO . Tabasco, Mexico: DAIS. Recuperado el 20 de Diciembre de 2023
- ElectroDaddy. (2021). *LoRaWAN e Internet de las cosas*. *ElectroDaddy*. Recuperado el 20 de octubre de 2023, de <https://www.electrodaddy.com/lorawan-internet-de-las-cosas/>
- Ibarra, L. (7 de julio de 2019). (l. p. grafica, Editor). Recuperado el 22 de noviembre de 2023. Obtenido de la prensa grafica: <https://blogs.laprensagrafica.com/litoibarra/?p=5002>
- Zamora, I. M. (2015). *Lecture 4: Análisis de radiopropagación* [Presentación de Slideshare]. <https://es.slideshare.net/nica2009/lecture-4-analisis-radioprop-p2>
- Cameron, N. (2023). *ESP32 Microcontroller*. En N. Cameron (Ed.), *ESP32 Formats and Communication: Application of Communication Protocols with ESP32 Microcontroller* (pp. 1-54). Apress. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-9376-8_1
- Quistial, A., Lupera Mortillo, p., Tipantuña, C., & Carvajal, J. (2018). *Modelo Matemático Adaptado para el Cálculo de Pérdidas de propagación en la banda de 900 MHz para Microceldas en la Ciudad de Quito*. Escuela Politecnica Nacional , Departamento de Electronica . Quito: Revista Politecnica. Recuperado el 15 de noviembre de 2023
- Tektronix. (2021). *Spectrum Analyzer RSA306B USB Real Time Spectrum Analyzer Datasheet*. <https://www.tek.com/en/datasheet/spectrum-analyzer-0>
- Tektronix. (2022). *SignalVu-PC Vector Signal Analysis Software* [Software]. Tektronix. <https://www.tek.com/en/support/software/application/signalvupc-vector-signal-analysis-software-v450093>
- ITU-T. (2021). *Y.4480: Low power protocol for wide area wireless networks* (Serie Y: Global information infrastructure, internet protocol aspects, next-generation networks, internet of things and smart cities). ¹ <https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=14818>
- XIRIO. (2023a). *Métodos de Cálculo de Rec. UIT-R*

P.1147. https://www.XIRIO-online.com/web/help/es/rec_1147.htm

XIRIO. (2023b). *OKUMURA-HATA: Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services*. <https://www.XIRIO-online.com/web/help/es/okumura-hata.htm>

XIRIO. (2023c). *Modelo COST 231*. https://www.xirio-online.com/web/help/es/cost_231.htm

Ikegami, F., Takeuchi, T., & Yoshida, S. (1991). Theoretical prediction of mean field strength for urban mobile radio. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 39(3), 299-302. doi:10.1109/8.76325

Salazar, A., & Buonanno, N. (2012). *ESTUDIO DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN EN BANDA DE TV ABIERTA ISDB-T CON BASE A LAS CONDICIONES ATMOSFÉRICAS DE LA GRAN CARACAS*. Universidad Católica Andrés Bello.

Bullian, L.; Urbina, C. (2018). *Implementación de una red LoRa en el ámbito de la Universidad Nacional de San Martín*. Universidad Nacional de San Martín. Buenos Aires, Argentina. Recuperado el 10 de octubre de 2023

SIGET. (2017). *Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias*. Obtenido de Portal de Transparencia- El Salvador : <https://www.transparencia.gob.sv/institutions/siget/documents/314524/download>

Esta página está dejada intencionalmente en blanco



Revista MINERVA

Plataforma digital de la revista: <https://minerva.sic.ues.edu.sv>

Nota Técnica | Technical Report

Estudio de calidad del aire presente en el área metropolitana y su estado respecto a los índices centroamericanos en el contorno de la Universidad de El Salvador

Study of air quality in the metropolitan area and its status with respect to Central American indices in the area of University of El Salvador

Boris Andrés Castillo-Rosales¹, Lyan Donovan Segovia-López¹, Carlos Pocasangre^{1,3}, Omar Otoniel Flores^{1,2}, Fernando Arevalo-Navas¹

Correspondencia: carlos.pocasangre@ues.edu.sv

- 1 Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador
- 2 Universidad Tecnológica de El Salvador
- 3 <https://orcid.org/0000-0002-7463-9873>

RESUMEN

El presente proyecto es una continuación de la fabricación de un medidor de calidad de aire a bajo costo. Para ello se realizaron modificaciones tales como la incorporación de GPS para recorrer diferentes áreas de San Salvador, almacenamiento de datos mediante memoria micro SD, pantalla para la interacción del usuario con los datos que se están generando en el momento, incorporación de botoneras con diferentes funciones, LED indicadores para una mejor interacción del usuario y la incorporación de nuevas variables. El medidor, actualmente, calcula valores de material particulado de 1.0 μm , 2.5 μm , 10 μm , temperatura, humedad, formaldehído, fecha, hora, latitud, longitud, altura m s. n. m., hora satelital, cantidad de satélites trackeados, dilución de posición horizontal, índice ICCA y calidad de aire 2.5 y 10 (18 variables). A esto

DOI: [10.5377/revminerva.v7i3.18911](https://doi.org/10.5377/revminerva.v7i3.18911)

Enviado: 31 de enero de 2024

Aceptado: 22 de abril de 2024

Palabras clave: calidad el aire, material particulado, emisión, inmisión, concentración, índice centroamericano, QGIS.

Keywords: Air quality; particulate matter; emission; immission; concentration; Central American index; QGIS.



Este contenido está protegido bajo la licencia CC BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

se agregan valores de incertidumbres y tiempo de toma de muestras (25 datos en total). Los contaminantes medidos se encuentran en el aire ambiente y son el resultado de una serie de factores: la actividad del hombre o de procesos naturales, crecimiento de la población, aumento vehicular, quema agrícola y desechos sólidos, por lo que a partir de la recolección de estos datos es posible obtener un sistema de información geográfica GIS (por sus siglas en inglés) que permite presentar una nueva perspectiva a partir de la forma en que se interpreta y se socializa este tema para influir en la toma de decisiones. Este estudio se enfoca en el área de la capital de El Salvador, San Salvador, en los alrededores de la Universidad de El Salvador, debido a que es una área céntrica y muy poblada.

ABSTRACT

This project is a continuation of the fabrication of a low-cost air quality meter. For this purpose, modifications were made such as the incorporation of GPS to cover different areas of San Salvador, data storage through micro SD memory, screen for user interaction with the data being generated at the moment, incorporation of button panels with different functions, LED's indicators for better user interaction and the incorporation of new variables. The meter currently measures values of particulate matter of 1.0 μm , 2.5 μm , 10 μm , temperature, humidity, formaldehyde, date, time, latitude, longitude, height above sea level, satellite time, number of satellites tracked, horizontal position dilution, ICCA index and air quality 2.5 and 10 (18 variables). To this, uncertainty values and sampling time are added (25 data in total). The pollutants measured are found in the ambient air by human activity or natural processes, population growth, vehicular increase, agricultural burning and solid waste, so from the collection of these data it is possible to obtain a geographic information system GIS (for its acronym in English) that allows to present a new perspective from the way in which it is interpreted and understood about this issue and influence decision making. This study focuses on the area of the capital of El Salvador, San Salvador, in the area of University of El Salvador, due to this location is central and highly populated area.

INTRODUCCIÓN

La importancia del monitoreo de la calidad del aire, en los últimos años, ha ido aumentando debido al gran crecimiento de las ciudades y del parque vehicular

cada año; solo en 2023 el Registro Público de Vehículos Automotores reflejó un incremento del 8 %; esto supone un gran factor de riesgo para la población a corto y largo plazo, pues un aire contaminado es un factor de riesgo para afecciones en la salud, que van desde congestión, dificultades respiratorias hasta afecciones cardíacas graves.

La Organización Panamericana de la Salud (OPS) ha catalogado a El Salvador como uno de los países que no tiene los medios para monitorear su calidad del aire, pues solamente consta de 3 estaciones concentradas en el departamento de San Salvador, además de que estas solo monitorean una de las variables de interés de las 6 establecidas en el Índice Centroamericano de Calidad de Aire (ICCA). El alto costo de adquisición, mantenimiento y falta de personal especializado son aspectos que contribuyen a que el monitoreo de calidad del aire sea dejado de lado en la agenda pública.

Debido a estas problemáticas se han hecho múltiples esfuerzos para el monitoreo de la calidad de aire. En el año 2023 se presentó una propuesta de una estación de monitoreo de bajo costo y con gran fiabilidad en los datos, dicho trabajo mostró un buen desempeño, además de la lectura de 2 contaminantes de los 6 establecidos por el Índice Centroamericano de Calidad de Aire, el presente trabajo muestra mejoras a dicho dispositivo, entre ellas pretende que sea móvil, ya que se podrán realizar monitoreos en zonas específicas y de gran interés debido a la carga vehicular y las cantidades de transeúntes que se movilizan por esas calles.

Adaptación de nuevas funcionalidades

A comienzos del año 2023 se implementó el primer medidor de bajo costo para monitoreo de calidad del aire, contando con las siguientes características:

- Envío de datos mediante GSM a hoja de Google sheet.
- Uso de RTC (Real time clock) para la fecha y hora.
- Medición de material particulado de 1.0 μm , 2.5 μm , 10 μm , temperatura, humedad y formaldehído.
- Datos generados: material particulado de 1.0 μm , 2.5 μm , 10 μm , temperatura, humedad,

formaldehído, fecha, hora y nombre de la estación (9 variables).

A partir del mes de abril del 2023 se realizaron modificaciones con el fin de mejorar la experiencia del usuario, introduciendo cambios que incluyen: Incorporación de GPS para recorrer diferentes áreas de San Salvador, Almacenamiento de datos mediante memoria micro SD, Pantalla para la interacción del usuario con los datos que se están generando en el momento, Incorporación de botoneras con diferentes funciones y LED indicadores para una mejor interacción del usuario. Datos generados: material particulado de 1.0 μm , 2.5 μm , 10 μm , temperatura, humedad, formaldehído, fecha, hora, latitud, longitud, Altura ms. n. m., hora satelital, cantidad de satélites trackeados, dilución de posición horizontal, índice ICCA y calidad de aire 2.5 y 10 (18 variables) a estos se le añaden 7 valores más con las incertidumbres y tiempo de toma de muestras (25 datos en total).

Funcionamiento de botones e indicadores LED

El dispositivo cuenta con 3 indicadores LED, y 3 botones con diferentes funciones.

Botón Config: permite la modificación del espaciado para toma de muestras; cuando es activado se

enciende el LED rojo, para saber que nos encontramos en el bucle de configuración.

Botón (+): dentro del bucle de configuración (Config activado), permite aumentar el tiempo de toma de muestras hasta un máximo de 5 minutos, fuera del bucle de configuración nos permite omitir el tiempo de espera para una lectura de datos en caso de la corrupción de datos.

Botón (-): dentro del bucle de configuración (Config activado), permite reducir el tiempo de toma de muestras hasta un mínimo de 30 segundos, fuera del bucle de configuración nos permite visualizar en pantalla los datos de la lectura anterior: PM 1.0, PM 2.5, PM 10, latitud, longitud y altura.

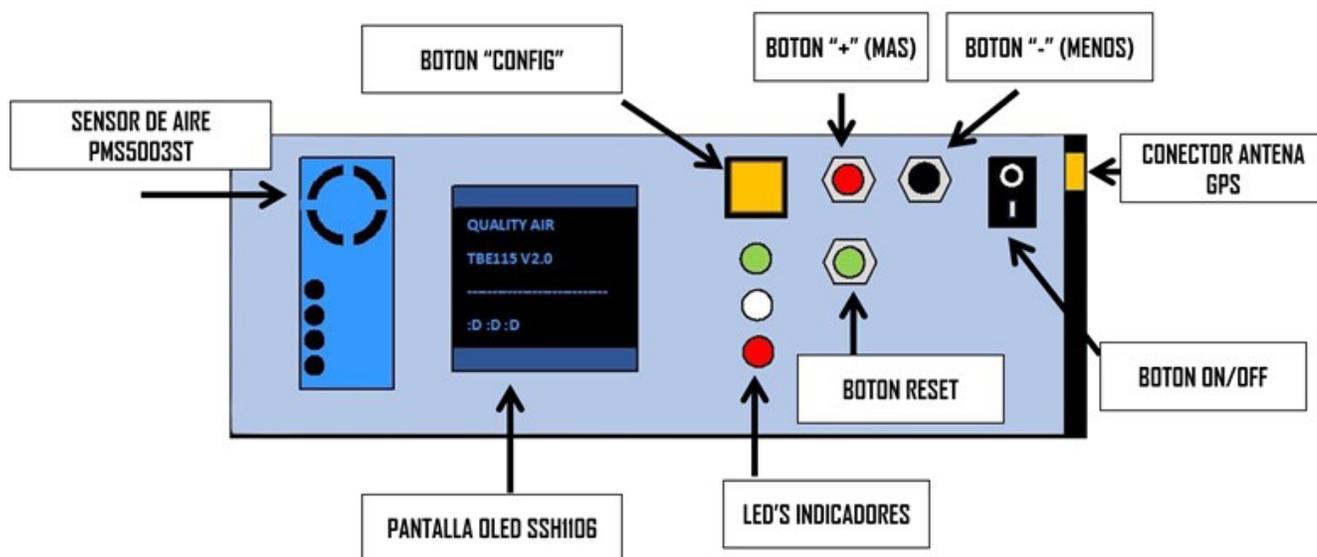
LED blanco: este indicador se enciende cada vez que se va a hacer una lectura de datos, y se apaga cuando se termina la medición.

LED verde: nos muestra el estado de recepción GPS, cuando no hay señal o el dispositivo no ha logrado determinar su posición se encontrará apagado, al tener recepción parpadeará cada segundo.

LED rojo: solo enciende cuando hemos presionado el botón config, para indicarnos que estamos en modo configuración en este bucle no se ejecutaran lecturas.

Figura 1

Botoneras de la estación móvil a bajo costo para la medición de la calidad del aire.



Área de estudio

San Salvador es la ciudad más grande y poblada de El Salvador, ubicada en el departamento de San Salvador. Esta ciudad representa el centro político, económico, cultural y social del país. Debido a que es una de las áreas urbanas más grandes y concurridas de El Salvador lo convierte en una ciudad con índices de mala calidad del aire, siento principalmente como origen, el congestionamiento vehicular.

Actualmente, el Ministerio de Medio Ambiente efectúa el monitoreo de partículas inhalables (PM_{2.5}) en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) mediante la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire (REDCA). Las estaciones se encuentran ubicadas en el Centro de Gobierno, denominada estación CGOB; otra en la Universidad Don Bosco, denominada estación UDB y otra en la actual Escuela Militar, denominada estación EM. Esta última, a la fecha, se encuentra en mantenimiento.

Recolección de datos

Haciendo uso de la estación móvil a bajo costo para la medición de la calidad del aire, se toman mediciones de las concentraciones del material particulado PM_{1.0}, PM_{2.5}, PM₁₀; formaldehído, valores de humedad y temperatura en diferentes áreas del municipio de San Salvador en horas de la mañana. Los días y la hora en que se realizaron las mediciones de la calidad del aire se muestran en la Tabla 1.

Índice Centroamericano de Calidad del Aire

Para la interpretación de las concentraciones del material particulado se hace uso de la guía de la Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo con el título de *Calidad del aire ambiental, inmisiones atmosféricas*. Dentro de ella se encuentran los valores de los índices de calidad del aire, donde se rige en un rango de 0 a 500 divididas en 6 segmentos, siendo el valor mínimo el que nos indica un valor de pureza alto mientras que el valor más alto indica un preocupante nivel de contaminación atmosférica y por lo tanto un peligro en la salud (Tabla 2).

Las concentraciones de material particulado PM_{2.5} y PM₁₀ se transforma a valores del ICCA mediante

Tabla 1

Día y hora de toma de datos.

Día	Hora
11/8/2023	6:31:27 a. m. - 8:04:32 a. m.
14/8/2023	6:22:49 a. m. - 8:41:31 a. m.
15/8/2023	6:14:54 a. m. - 8:40:16 a. m.
17/8/2023	6:06:03 a. m. - 8:47:03 a. m.
18/8/2023	6:10:30 a. m. - 8:16:31 a. m.
5/10/2023	6:52:02 a. m. - 8:41:26 a. m.
6/10/2023	7:00:01 a. m. - 8:33:02 a. m.
10/10/2023	6:05:01 a. m. - 7:29:37 a. m.
11/10/2023	7:35:50 a. m. - 8:56:12 a. m.
12/10/2023	6:10:11 a. m. - 7:53:33 a. m.
16/10/2023	8:15:33 a. m. - 9:12:44 a. m.
17/10/2023	7:21:30 a. m. - 8:17:19 a. m.
18/10/2023	6:57:17 a. m. - 7:50:45 a. m.
19/10/2023	6:51:22 a. m. - 7:57:32 a. m.
20/10/2023	5:51:15 a. m. - 6:58:25 a. m.

Nota. A partir de datos de ICCA (2019).

la Ecuación 1, de tal manera que sea más fácil de comprender e identificar rápidamente su conexión con el riesgo de afectación a la salud por la contaminación atmosférica de material particulado.

$$ICCA = \frac{ICCA_{Hi} - ICCA_{Lo}}{PM_{Hi} - PM_{Lo}} * (PM_X - PM_{Lo}) + ICCA_{Lo} \quad (1)$$

Donde:

ICCA: índice del contaminante X

PM_x: concentración obtenida de la medición del contaminante X

PM_{Hi}: límite del segmento del valor de concentración mayor o igual a X

PM_{Lo}: límite del segmento del valor de concentración menor o igual a X

ICCA_{Hi}: límite superior del segmento de valores ICCA correspondiente al X

ICCA_{Lo}: límite inferior del segmento de valores ICCA correspondiente al X

Para una concentración de 54.8 µg/m³ (PM_{2.5}), el

Tabla 2

Índice Centroamericano de Calidad del Aire

ICCA	Calidad del aire	Efectos
0-50	Buena	No se anticipan impactos a la salud cuando la calidad del aire se encuentra en este rango.
51-100	Satisfactoria	No se anticipan impactos a la salud cuando la calidad del aire se encuentra en este rango.
101-150	No satisfactoria	Los niños y adultos activos, y personas con enfermedades respiratorias tales como el asma, deben evitar los esfuerzos físicos excesivos y prolongados al aire libre.
151-200	Dañina para la salud	La gente con las enfermedades respiratorias tal como asma, debe evitar el esfuerzo al aire libre; todos los demás, especialmente los mayores y los niños, deben limitar el esfuerzo prolongado al aire libre.
201-300	Muy Dañina para la salud	La gente con las enfermedades respiratorias tal como asma, debe evitar todo el esfuerzo al aire libre; especialmente los mayores y los niños, deben limitar el esfuerzo prolongado al aire libre.
300-500	Peligroso	Todos deben evitar el esfuerzo al aire libre; gente con enfermedad respiratoria tal como asma, debe permanecer dentro.

rango de concentración se encuentra entre 40.5-65, por lo cual los valores del Índice Centroamericano de la Calidad del Aire (ICCA) se encuentran entre 101-150.

Al sustituir los valores en (1), se obtienen los resultados siguientes:

$$ICCA = \frac{150 - 101}{65.4 - 40.5} * (54.8 - 40.5) + 101$$

$$ICCA = 129.14$$

El valor obtenido de 129.14 corresponde al grupo de NO SALUDABLE PARA GRUPOS SENSIBLES. Esto nos indica que, para los niños, personas con enfermedades respiratorias, adultos que realizan ejercicio y actividad física, deben de evitar largos tiempos al aire libre. Para el público general no representa ningún efecto, según lo representado en la Tabla 3.

Procesamiento de datos obtenidos con el medidor

La parte de procesar datos desempeña un papel crucial en la transformación de datos crudos en información valiosa y utilizable, logrando obtener

información más clara y detallada, lo que facilita la toma de decisiones.

La primera herramienta que nos ayuda a procesar los datos obtenidos con el medidor es el software gratuito QGIS que proporciona herramientas como Heatmap que permite visualizar la densidad espacial de un conjunto de puntos mediante la creación de un mapa de calor (Figura 2). Gracias a ello visualizamos la calidad del aire de los principales contaminantes (PM2.5 y PM10), ya que se poseen todos los puntos

Tabla 3

Rango de concentraciones a partir de los valores ICCA.

ICCA	Calidad del aire Material particulado (PM)	Rango a partir de su concentración	
		PM _{2,5}	PM ₁₀
0-50	Bueno	0-15.3	0-54
51-100	Moderar	15.4-40.4	55-154
101-150	No saludable para grupos sensibles	40.5-65	155-254
151-200	Insalubre	66-159	255-354
201-300	Muy poco saludable	160-250	355-424
301-500	Peligroso	251-500	425-604

Nota. A partir de datos de ICCA (2019).

recolectados y así asignar el grado de contaminación con respecto al Índice Centroamericano de Calidad del Aire.

La segunda herramienta, desempeña un papel crucial es la elaboración de gráficas interactivas utilizando LookerStudio que permite convertir los datos en informes y dashboard claros totalmente personalizados. A partir de menús desplegables podemos consultar el estado de la calidad del aire de una fecha de interés (Figura 3).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de las mediciones realizadas, la gráfica de la Figura 4 muestran los valores máximos de la calidad del aire del material particulado PM2.5 y PM10. Se visualiza valores máximos el día 5 de octubre del 2023 a las 7:32:59 a. m.

Durante el lapso de las 6:52:02 a. m. hasta 8:41:26 a. m. de ese mismo día, los valores promedios de la calidad del aire para PM2.5 y PM10 son de 159.57 (Figura 5) y 75.18 (Figura 6) respectivamente. El valor obtenido del material particulado PM2.5 nos indica que el estado de la calidad del aire se encontraba en el segmento “Dañina para la salud” lo que implicaba que para aquellas personas que padecen de enfermedades respiratorias debían de evitar realizar esfuerzos al aire libre y adultos que realizan ejercicio o actividades físicas al aire libre debían de evitar tiempos prolongados. En el caso del material particulado PM10, el valor nos indicaba una calidad del aire en el segmento de “satisfactoria” lo que significaba que no se esperaban problemas en la salud.

Si observamos con detalle y haciendo uso de la herramienta de Street View dentro del dashboard

Figura 2

Presentación de mapas 2D y 3D utilizando QGIS.

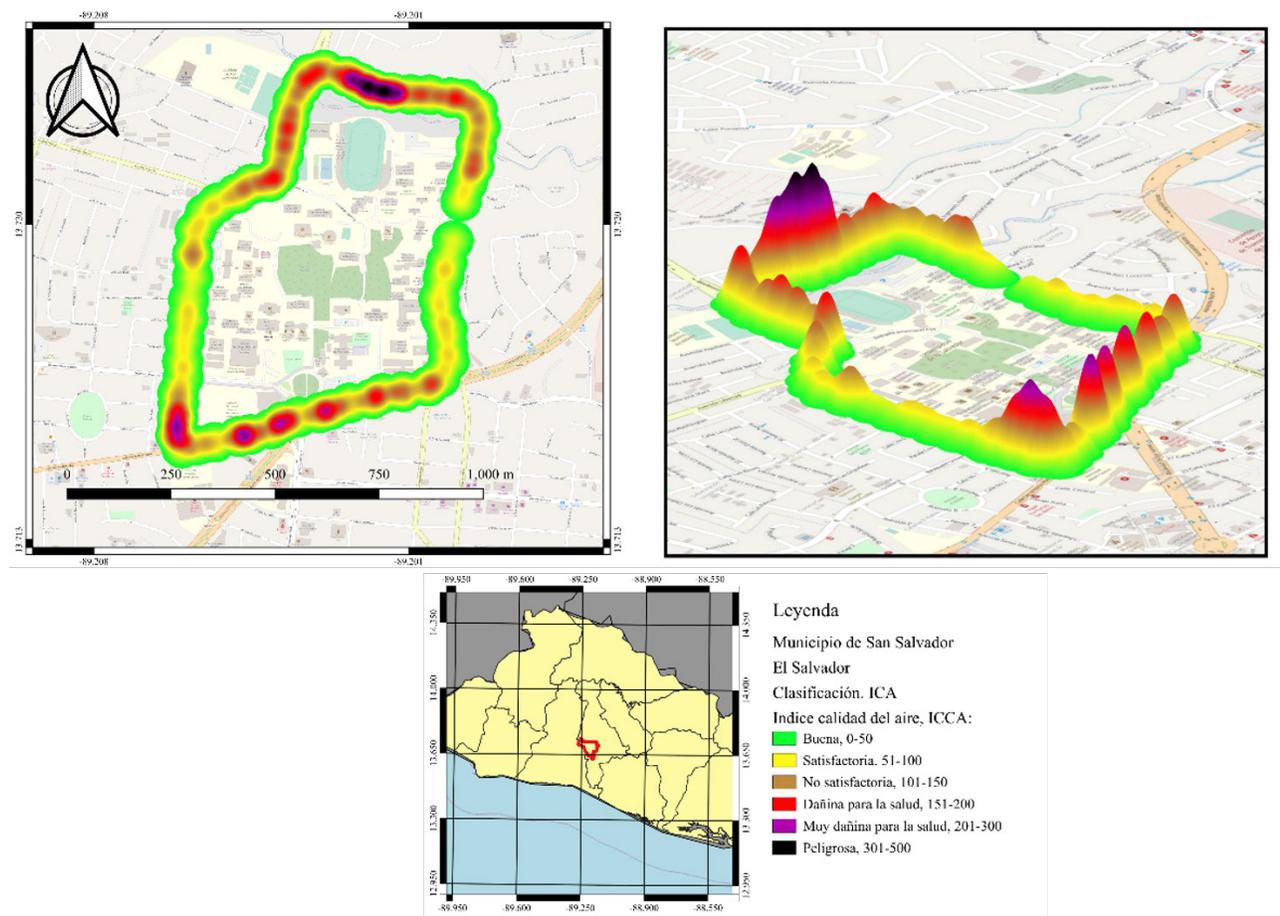


Figura 3

Dashboard de la calidad del aire en San Salvador para material particulado PM2.5 del día 20/10/2023 (UES, 2023)

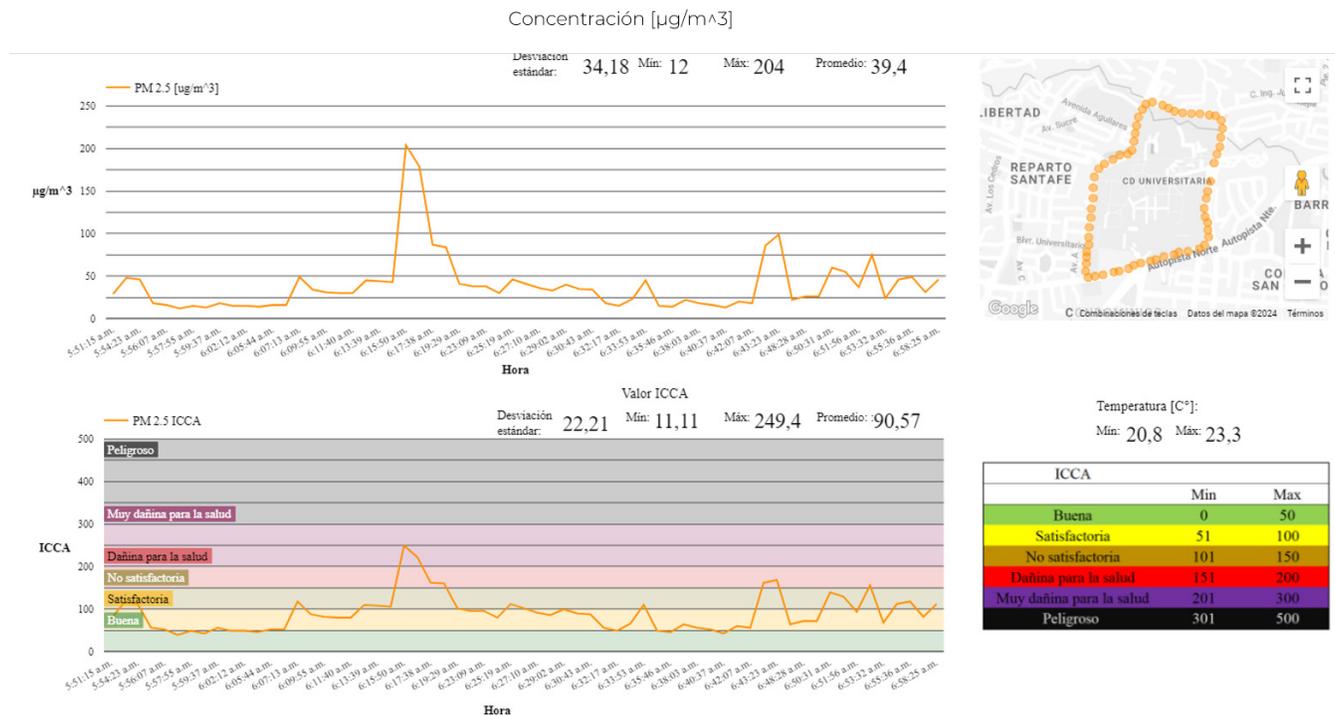
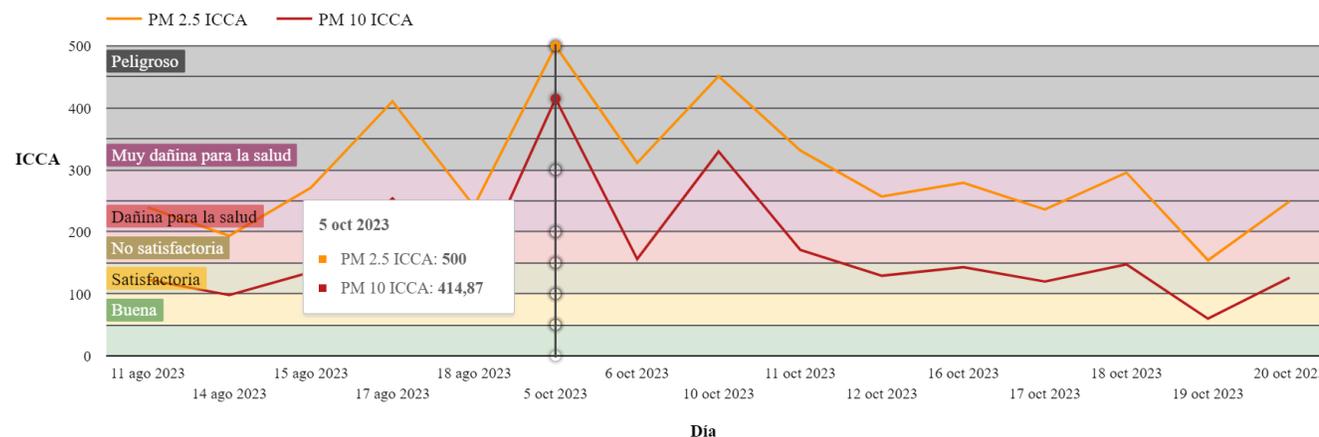


Figura 4

Valores máximos de calidad del aire para PM2.5 y PM10.



de la calidad del aire en San Salvador, el valor máximo proviene de la medición tomada sobre la 1ª Calle Pte. En esta calle siempre se encuentra congestionamiento de automóviles lo que significa una fuente significativa de contaminación atmosférica (Figuras 7 y 8). Los automóviles emiten gases contaminantes, como el monóxido de carbono, el dióxido de nitrógeno y partículas finas, que pueden

tener efectos adversos en la salud respiratoria.

A largo plazo, la inmisión de este contaminante puede llegar a ocasionar problemas respiratorios crónicos, enfermedades cardiovasculares ya que las partículas finas pueden ingresar al torrente sanguíneo a través de los pulmones, afectación del desarrollo pulmonar en niños debido a que aún están en desarrollo,

Figura 5

Valores promedios de calidad del aire para PM2.5

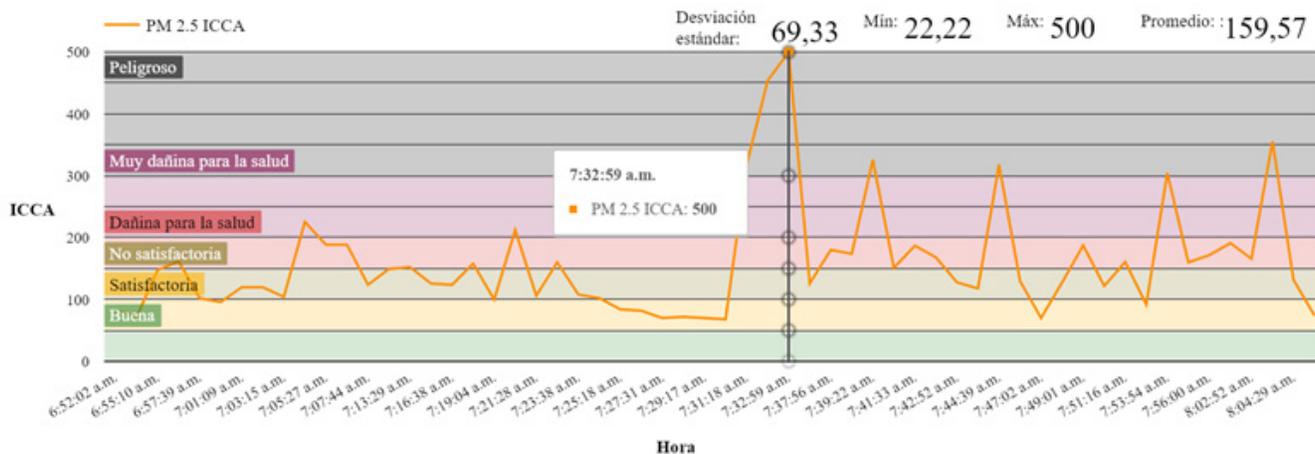


Figura 6

Valores promedios de calidad del aire para PM10

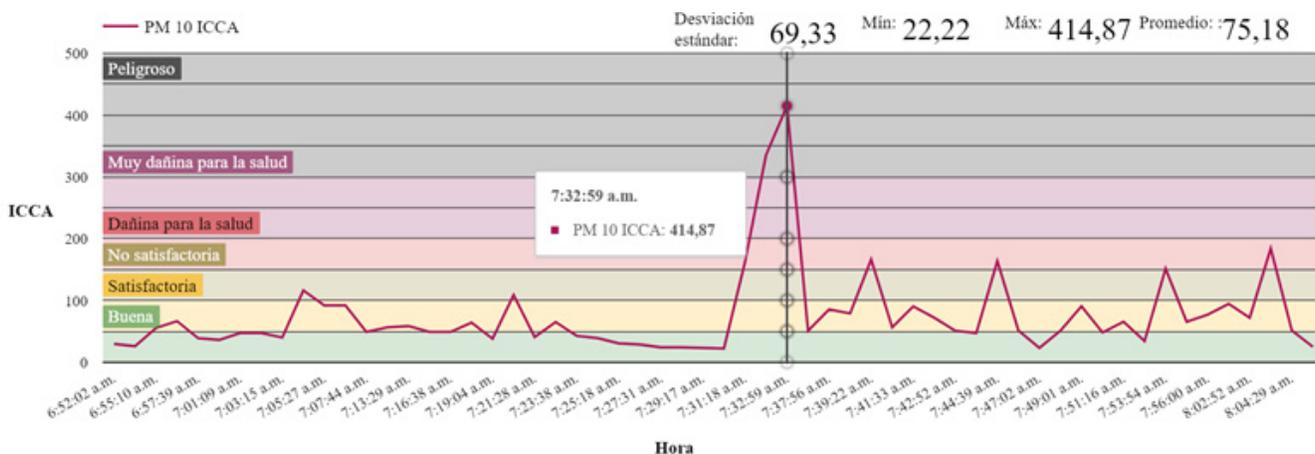


Figura 7

Foco de emisión del valor máximo de la calidad del aire tanto para PM2.5 y PM10 del día 5 de octubre 2023.



Figura 8.

Google Street View del foco de emisión



impacto en el sistema inmunológico causando la incapacidad para que el cuerpo pueda protegerse de infecciones y enfermedades, efectos adversos en la salud cerebral como el deterioro cognitivo. Además de los efectos en la salud humana, las partículas finas también pueden tener impactos negativos en el medioambiente contribuyendo a la acidificación del suelo y del agua, dañar la vegetación y afectar a los ecosistemas acuáticos.

Conocer el estado de la calidad del aire permite proteger la salud humana, prevenir enfermedades, tomar decisiones informadas sobre políticas ambientales y reducir el impacto negativo en el medioambiente.

CONCLUSIONES

Durante el periodo de mediciones que comprende desde el día 11 de agosto del 2023 hasta el 20 de octubre del mismo año, el día con mayor valor ICCA se presenta el 5 de octubre en las horas de la mañana (7:33a. m.) sobre la 1ª Calle Pte. El promedio diario del material particulado PM2.5 se obtuvo un estado de calidad del aire DAÑINA PARA LA SALUD con un valor de concentración de $100.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lo que corresponde a un valor ICCA de 159.57. El promedio diario del material particulado PM10 obtuvo un estado de calidad del aire SATISFACTORIA con un valor de concentración de $102.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lo que corresponde a un valor ICCA de 75.18. No obstante, se tiene que mencionar que para ese día el valor de concentración máximo fue de $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM2.5 y $527 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10 lo que a largo plazo daña la salud del ser humano. Ya que el punto de lectura se encuentra sobre una calle principal podemos decir que el foco de emisión es generado por los gases de escape de vehículos a motor, especialmente aquellos que funcionan con combustibles fósiles como la gasolina y el diésel.

Las mediciones realizadas alrededor de la Universidad Nacional de El Salvador en las horas de la mañana (7:40 a. m.) muestran que la Circunvalación Universitaria posee uno de los puntos con mayor valor de concentración de PM2.5. Esto indica que el aire que respiramos es muy dañino para la salud logrando obtener una lectura de concentración

máxima de $246 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lo que corresponde a un valor ICCA de 295.6. El resultado nos indica que a largo plazo pueden presentarse síntomas como dificultad para respirar, desarrollo o aumento de problemas respiratorios como el asma y la bronquitis, problemas en el corazón, entre otros.

La mala calidad del aire y la presencia de material particulado son factores críticos que impactan la salud humana y el medioambiente, por lo cual requieren de atención y acciones coordinadas a nivel local, nacional e internacional. Altos niveles de material particulado en el aire, especialmente partículas finas (PM2.5), están asociados con una serie de problemas de salud, incluyendo enfermedades respiratorias, cardiovasculares y problemas en el sistema nervioso. La calidad del aire deficiente puede agravar condiciones preexistentes y afectar la calidad de vida.

La implementación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire es fundamental para comprender la magnitud del problema y tomar medidas correctivas. La concientización a la población sobre los peligros que acarrea la contaminación del aire es clave para promover cambios en el comportamiento y en las políticas. Compartir información, tecnologías y mejores prácticas puede ayudar a abordar los problemas de calidad del aire de manera más efectiva.

Como reflexión, este estudio científico proporciona una base sólida para futuras investigaciones en el campo de la calidad del aire en el Área Metropolitana de San Salvador. Las áreas en las que se pueden direccionar investigaciones adicionales y que podrían contribuir a la comprensión del problema y apoyar la implementación de medidas efectivas para mejorar la calidad del aire y proteger la salud humana podrían ser las siguientes: investigación en salud pública, identificación de fuentes de emisión, evaluación de estrategias de mitigación, monitoreo continuo de la calidad del aire, evaluación de políticas y regulaciones, etc. También, para aumentar la confianza en los resultados, se podría considerar para futura implementación lo siguiente:

1. Calibración, validación cruzada y verificación del dispositivo de medición ya que se trata de un diseño

y desarrollo local. Esto implica que antes de su uso se deberían comparar las lecturas del dispositivo con mediciones de referencia o equipos de medición confiables. 2. Control de calidad interno: implementa un protocolo de control de calidad interno para verificar la precisión y la estabilidad del dispositivo de medición. Esto puede incluir mediciones de control periódicas utilizando estándares conocidos o simulaciones de condiciones de referencia. 3. Evaluación de la incertidumbre: podría tratar de estimar y documentar la incertidumbre asociada con las mediciones realizadas por este dispositivo. Esto implica identificar y cuantificar los posibles errores o variaciones en las mediciones, considerando factores como la precisión del dispositivo y las condiciones ambientales.

REFERENCIAS

- Castillo, E. (2015). La contaminación del aire ocasionada por el transporte público en la ciudad de San Salvador. San Salvador: Universidad de El Salvador.
- Chávez, F., & Salamanca, L. (2007). Gestión ambiental pública: Historia, estado y desafíos. 62(701-702), 263-280: <https://doi.org/10.51378/eca.v62i701-702.5014>
- EPA. (2023). Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. Obtenido de <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente>
- Flores, O. (2019). Sistema telemático de monitoreo de calidad del aire en zonas remotas, utilizando técnicas IoT y big data. San Salvador: Universidad Tecnológica de El Salvador.
- ICCA. (2019). MARN. Obtenido de Comisión centroamericana de ambiente y desarrollo: https://appsdec.marn.gob.sv/docs/1.1.4a%20CCAD_Guia%20para%20Calidad%20Del%20Aire%20Ambiental_Inmisiones%20Atmosfericas.pdf
- López, R. (2023). Monitoreo de calidad de aire ambiental en marco de prevención de riesgos laborales dentro del campus central de la universidad de el salvador. San Salvador: Universidad Nacional de El Salvador.
- MARN. (2018). Reglamento Especial de Normas Técnicas de Calidad Ambiental. El Salvador: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- MINSAL. (2017). Emisiones atmosféricas por fuentes fijas. El Salvador: Ministerio de salud.
- Nevers, N. (1998). Ingeniería de control de la contaminación del aire. México: McGRAW-HILL.
- NODAL. (2016). OMS: San Salvador es la tercera capital de la región que tiene el aire más contaminado. Obtenido de <https://www.nodal.am/2016/05/el-salvador-entre-la-contaminacion-del-aire-enfermedades-y-buses-viejos/>
- SNET. (2023). Ministerio de Medio Ambiente. Obtenido de <https://www.snet.gob.sv/ver/meteorologia/monitoreo/calidad+del+aire/>
- UES, B. L. (Diciembre de 2023). *Dashboard*. Obtenido de Calidad del aire en AMSS: https://lookerstudio.google.com/u/0/reporting/8cf46dd6-eadc-4836-9967-0cf66a96fb25/page/p_367t34dzad
- Zambrano, O. (2016). Caracterización de material particulado, plomo y arsénico para la evaluación de la calidad del aire en el distrito de islaymatarani. Arequipa-Perú: Universidad Nacional de San Agustín.



Revista MINERVA

Plataforma digital de la revista: <https://minerva.sic.ues.edu.sv>

Nota Técnica | Technical Report

Estudio del impacto del tratamiento térmico en los Indicadores de Desempeño Energético (IDE) en edificios municipales

Study of the impact of thermal treatment on Energy Performance Indicators (EPI) in municipal buildings

Gerardo Guerrero¹, Julio Flores¹

Correspondencia:
gb17002@ues.edu.sv

¹ Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador

RESUMEN

se aborda la mejora de los Indicadores de Desempeño Energético (IDE) en los edificios municipales de El Salvador. Se describe la comparativa de los IDE actuales con los proyectados, analizando el consumo de energía y las emisiones en relación con el área y el personal de los edificios. Se presentan cifras promedio y gráficos que ilustran la evolución de los IDE anuales de energía consumida por área y por persona en diferentes municipios, permitiendo identificar áreas de mejora. Además, se destacan las medidas propuestas para reducir el consumo energético y mejorar la gestión de la energía en los edificios municipales, enfocándose en la actualización de sistemas de iluminación, la optimización de equipos, la gestión inteligente de energía y el aislamiento térmico. Estas acciones se fundamentan

DOI: [10.5377/revminerva.v7i3.18912](https://doi.org/10.5377/revminerva.v7i3.18912)

Enviado: 3 de marzo de 2024
Aceptado: 20 de marzo de 2024

Palabras clave: IDE, consumo de energía, emisiones de carbono, eficiencia energética, estrategias de mejora.

Keywords: EnPI, energy consumption, carbon emissions, energy efficiency, improvement strategies.



Este contenido está protegido bajo la licencia CC BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

en estándares reconocidos internacionalmente, como las normas ISO 50000, garantizando la alineación con prácticas efectivas para impulsar la eficiencia energética y la reducción de emisiones de carbono.

ABSTRACT

This paper addresses the improvement of Energy Performance Indicators (EnPI) in municipal buildings in El Salvador. It describes the comparison between current EnPIs and projected ones, analyzing energy consumption and emissions in relation to building area and personnel. Average figures and graphs illustrating the evolution of annual EnPIs of energy consumed per area and per person in different municipalities are presented. Additionally, proposed measures to reduce energy consumption and improve energy management in municipal buildings are highlighted, focusing on updating lighting systems, optimizing equipment, smart energy management, and thermal insulation. These actions are based on internationally recognized standards such as ISO 50000, ensuring alignment with effective practices to promote energy efficiency and reduction carbon emission.

INTRODUCCIÓN

La eficiencia energética se refiere a la capacidad de obtener los mejores resultados en cualquier actividad utilizando la menor cantidad posible de recursos energéticos. Implica reducir el consumo de energía y los posibles impactos ambientales asociados a su uso. Por otro lado, el desempeño energético se define como los resultados medibles relacionados con la eficiencia energética, el uso de la energía y el consumo de energía en instalaciones, sistemas, procesos y equipos. Es una medida cuantitativa que evalúa el rendimiento energético de una organización y se utiliza como indicador de su eficiencia en el uso de la energía.

La Norma Técnica Salvadoreña NTS ISO 50001:2011, que se basa en la Norma Internacional ISO 50001 sobre Sistemas de Gestión de la Energía, fue difundida por el Organismo Salvadoreño de Normalización (OSN) el 27 de febrero de 2014 en El Salvador. Esta normativa establece los requisitos y directrices para implementar un Sistema de Gestión de la Energía en organizaciones salvadoreñas, con el objetivo de

mejorar la eficiencia energética y promover prácticas sostenibles en el uso de la energía.

El estudio consiste en un análisis comparativo del consumo de energía eléctrica en edificios municipales específicos, centrándose en la propuesta de alternativas para mejorar la eficiencia energética. Las limitaciones del estudio se relacionan con la poca disponibilidad de información durante el levantamiento de datos, lo que impidió la elaboración de un diagrama detallado de las instalaciones y la consideración exhaustiva de todas las cargas necesarias.

Las propuestas de mejora tienen como objetivo principal reducir el consumo de energía y mejorar la eficiencia energética en los edificios municipales. Esto se lograría mediante la actualización de sistemas de iluminación a tecnología LED, la optimización de equipos para un mayor rendimiento energético, la implementación de una gestión inteligente de la energía, el aislamiento térmico para mitigar pérdidas de energía, la integración de fuentes de energía renovable y la realización de programas de concientización sobre el uso eficiente de la energía.

Estas medidas no solo contribuirían a un ahorro económico para las alcaldías, sino que también ayudarían a reducir las emisiones de CO₂ y promover prácticas más sostenibles en el uso de la energía.

El aislamiento térmico se considera una de las mejores propuestas de mejora en eficiencia energética debido a su capacidad para reducir las pérdidas de energía a través de las paredes, techos y ventanas de un edificio.

Durante el estudio se realizó una simulación utilizando el software 'CYPETHERM HE Plus'. En este proceso, se desarrolló un modelo arquitectónico representativo de un edificio de oficinas, se definieron las características térmicas de los materiales constructivos y se agregaron los sistemas de aire acondicionado. El software utilizó 'Energy Plus' como motor de cálculo para determinar el impacto del aislamiento térmico en la demanda energética del sistema de aire acondicionado.

Se presentan los resultados obtenidos tras la

implementación de medidas de mejora del desempeño energético en los edificios municipales. Se destacan los siguientes puntos clave: identificación de oportunidades de mejora, estimación de consumo de energía ajustado y análisis de indicadores de desempeño energético. Se destaca la importancia del aislamiento térmico y otras medidas de eficiencia energética en la optimización del consumo de energía en los edificios municipales, evidenciando los beneficios tanto económicos como ambientales de estas acciones.

Fundamentación Teórica

Normas ISO 50000

Conjunto de normas internacionales que proporcionan un marco sólido para abordar eficientemente la gestión de la energía, asegurando que las medidas propuestas estén alineadas con estándares reconocidos a nivel mundial en el ámbito de la eficiencia energética.

Sistemas de gestión de energía

Un Sistema de Gestión de Energía (SGE) es un conjunto de procesos y procedimientos que una organización implementa para gestionar de manera eficiente su consumo energético y promover la mejora continua en este aspecto. El SGE se basa en la norma ISO 50001, la cual establece los requisitos para establecer, implementar, mantener y mejorar un sistema de gestión de energía.

Algunos de los objetivos principales de un SGE son:

- Identificar y controlar los aspectos energéticos significativos de la organización.
- Establecer metas y objetivos de mejora en el desempeño energético.
- Implementar acciones para optimizar el uso de la energía y reducir los costos asociados.
- Monitorear y medir el desempeño energético de forma regular.
- Realizar auditorías energéticas para identificar oportunidades de mejora.
- Promover la concienciación y capacitación del personal en temas de eficiencia energética.

Sistema de Aislamiento Térmico por el Exterior (SATE)

Es una técnica utilizada en la mejora de la eficiencia energética de edificaciones. Consiste en la aplicación de un aislamiento térmico en la envolvente exterior de un edificio, lo que contribuye a reducir las pérdidas de calor en invierno y a mantener una temperatura interior confortable en verano.

El SATE puede lograr ahorros significativos en el consumo de energía para calefacción y refrigeración, mejorando así el desempeño energético de la edificación. Además, este sistema puede proporcionar beneficios adicionales como la protección contra la humedad y la mejora del confort térmico en el interior de los espacios habitables.

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

En el estudio anterior "Línea de consumo base de electricidad en edificios administrativos municipales en El Salvador" se recolectaron datos relacionados con el consumo de energía, la eficiencia energética y el desempeño energético de los edificios municipales, es decir, el edificio administrativo de las alcaldías. Estos datos incluyeron información sobre el consumo energético y las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), los indicadores de desempeño energético y las oportunidades de mejora identificadas en los edificios municipales.

En cuanto a las alcaldías que se retoman en el actual estudio se consideran los edificios administrativos municipales de Tejutla, San Martín, Sensuntepeque, Guazapa y Verapaz. Cada alcaldía representaba un caso de estudio para evaluar su consumo de energía, identificar oportunidades de mejora y proponer medidas específicas para aumentar la eficiencia energética en sus edificios.

Para ello, se realizó la solicitud de visitar las instalaciones de las alcaldías municipales y realizar un levantamiento de carga. Este proceso implicó recopilar información detallada sobre la potencia de los equipos eléctricos, de los sistemas de iluminación, aire acondicionado, equipos de oficina y otros dispositivos eléctricos presentes en los edificios. En ninguno de los casos fue posible realizar ningún tipo

de medición debido al tiempo limitado de las visitas y a no poder suspender el servicio eléctrico.

En conjunto con los datos de las facturas eléctricas, este levantamiento de carga proporciona una base sólida para evaluar el consumo de energía, identificar posibles áreas de mejora y desarrollar estrategias efectivas para optimizar el desempeño energético de las alcaldías municipales.

Debido a la utilización de las facturas como referencia del consumo de energía, se consideran las cargas aguas abajo del medidor de energía o dentro de los edificios administrativos de las municipalidades. Debido a la imposibilidad de realizar un diagrama unifilar e identificar la precedencia de los alimentadores que llegan a las cargas, solo se tomaron en cuenta las cargas instaladas dentro de los edificios, por tanto, no se puede asegurar que se han considerado la totalidad de cargas.

Para poder comparar y evaluar el desempeño energético actual de los edificios municipales, es fundamental obtener y calcular los indicadores de desempeño energético de la situación actual. Estos indicadores proporcionarán información clave sobre el consumo de energía, las emisiones de CO₂ y la eficiencia energética.

Algunos de los indicadores de desempeño energético que se pueden calcular incluyen:

Consumo de energía por área (kWh/m²): este indicador permite evaluar la eficiencia energética de un edificio en función de su tamaño, mostrando cuánta energía se consume por unidad de superficie.

Emisiones de CO₂ por área: este indicador muestra la cantidad de emisiones de dióxido de carbono asociadas al consumo de energía en un edificio, lo que permite evaluar el impacto ambiental de las operaciones.

Para evaluar el impacto que tendría la implementación del tratamiento térmico, en este caso, como la propuesta con mayor impacto en la eficiencia energética de los edificios municipales, se llevó a cabo una simulación. Esta simulación permite medir, de manera virtual, cómo afectaría la eficiencia

energética de los edificios la aplicación de esta medida específica.

Una vez realizada la simulación y obtenidos los resultados, se procede a comparar la situación actual de los edificios municipales con la situación posterior, en la cual se ha implementado el tratamiento térmico. Esta comparación se basa en los indicadores de desempeño energético calculados previamente, como el consumo de energía por área y las emisiones de CO₂.

Para realizar la simulación del impacto que tendría la implementación del tratamiento térmico, se utilizó el software CYPETHERM HE Plus. Este software permite realizar cálculos detallados de la demanda energética de los edificios, considerando diferentes escenarios y medidas de eficiencia energética.

El proceso de simulación implicó los siguientes pasos:

- Desarrollo de un modelo arquitectónico representativo de los edificios municipales.
- Carga del modelo arquitectónico en formato IFC (formato de archivo 3D) en el software CYPETHERM HE Plus.
- Definición de las características térmicas de los materiales constructivos y agregado de los sistemas de aire acondicionado en el software.
- Cálculo de los indicadores energéticos a través del software que utiliza Energy Plus como motor de cálculo.
- Importación de materiales desde librerías para analizar su desempeño y realizar la simulación.

Mediante esta simulación con el software CYPETHERM HE Plus, se pudo evaluar de manera precisa el impacto que tendría la implementación del tratamiento térmico en los edificios municipales, permitiendo calcular el ahorro energético esperado y comparar los resultados con la situación actual para determinar la eficacia de la medida propuesta.

RESULTADOS

Durante las visitas de campo realizadas en las distintas alcaldías se extrajeron datos del área total de la edificación, cantidad de personas que hacen uso de las instalaciones, carga eléctrica, datos eléctricos de equipos instalados, horarios de atención de los edificios y horarios de funcionamiento de los equipos relevantes (Tabla 1). Todos estos datos sirven para estimar la energía consumida por la edificación y calcular indicadores de desempeño energético. También en el cálculo de energía consumida por las cargas se utilizaron factores de diversidad y factores de demanda según el IEC 60439 (International Electrotechnical Commission) y el NEC 2008 (National Electric Code).

Potencia demandada y consumo energético

La Tabla 2 presenta la carga segmentada en iluminación, puestos de trabajo (computadoras de escritorio), aire acondicionado y cargas varias (donde se incluyen refrigeradoras, microondas y otros electrodomésticos). Se presenta también un estimado de consumo de energía anual por tipo de carga (Tabla 3).

Para el cálculo de energía se consideran los factores de diversidad correspondientes, para iluminación '0.9', para carga variada '0.2' que corresponde a equipos de carga discontinua, para puestos de

Tabla 1

Valores promedio de las alcaldías

Valores promedio	
Área promedio	948.46 m ²
Cantidad de personas promedio	74
Carga diversificada promedio	65 kW

Tabla 2

Carga promedio de las alcaldías por tipo de carga

Tipo de carga	kW
Carga de Iluminación	3.64
Carga de Puestos de Trabajo	9.40
Carga de Aire Acondicionado	40.81
Carga Varía	11.16

Tabla 3

Consumo de energía promedio de las alcaldías por tipo de carga situación actual

Tipo de carga	kWh
Energía de iluminación	6151
Energía de puestos de trabajo	9452
Energía de aire acondicionado	33519
Energía varía	2511

trabajo '0.6' y para equipos de aire acondicionado '0.7' respectivamente, así como jornadas laborales de 8 horas.

En las Figuras 1 y 2 se muestra la distribución porcentual de carga y energía, se puede observar que el 62.78 % de la carga total corresponde al aire acondicionado, siendo así, la carga más significativa. Una reducción en el consumo de aire acondicionado tendría un impacto considerable en el consumo total de la edificación.

Emisiones de dióxido de carbono (CO₂)

A partir de los datos de consumo de energía mostrados en el literal anterior se pueden estimar las emisiones de CO₂ de las alcaldías, utilizando el software RETScreen se obtiene un factor de 0.262kgCO₂/kWh emisiones para la electricidad en El Salvador (Tabla 4).

Figura 1

Distribución de carga promedio de alcaldías

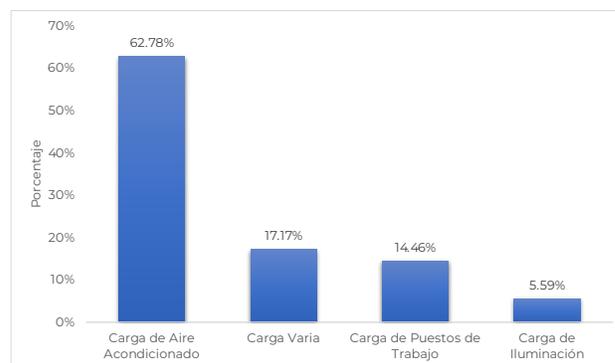


Figura 2

Distribución de consumo de energía promedio de alcaldías situación actual

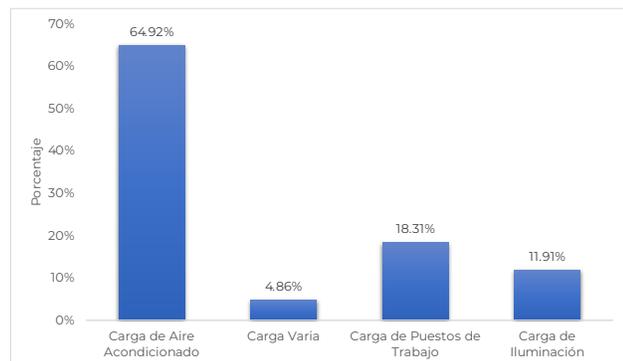


Tabla 4

Consumo de energía y emisiones de CO2 promedio por tipo de carga situación actual

Tipo de carga	kWh	kgCO2
Energía de iluminación	6151	1611.56
Energía de puestos de trabajo	9452	2476.42
Energía de aire acondicionado	33519	8781.98
Energía varía	2511	657.88

IDE de los edificios municipales

Para analizar el desempeño energético de los edificios municipales que forman parte del estudio se definen los siguientes indicadores:

Densidad de energía consumida (DEC): es la proporción entre la cantidad de energía eléctrica que se consume en el edificio durante un año y el área total de la edificación, se mide en kWh/m².

Densidad de emisiones de dióxido de carbono (DECO₂): es la proporción entre la cantidad total de emisiones de dióxido de carbono producto del consumo de electricidad del edificio durante un año y el área total de la edificación, se mide en kgCO₂/m².

La DEC promedio en los edificios municipales es de 53.86kWh/m², en el caso de la densidad de emisiones la DECO₂ es de 14.11 kgCO₂/m².

Oportunidades de mejora del desempeño energético

El enfoque óptimo para mejorar el desempeño energético en los edificios municipales conlleva

la mejora de la eficiencia energética, así que para reducir el consumo de energía de los edificios se deben adoptar medidas que ayuden a reducir dicho consumo, sin perjudicar las actividades diarias ni el personal ni los visitantes.

Para ello se observó que los sistemas que tienen un mayor impacto en el consumo de energía son los sistemas de iluminación y sobre todo en los sistemas de aire acondicionado. Para obtener los mejores resultados estos deberían contar con un mantenimiento regular, ser instalados según las condiciones del fabricante y siguiendo las pautas de las normativas correspondientes.

El sistema que tendrá mayor impacto es el de aire acondicionado, ya que es el que presenta más consumo de energía y ninguno de los edificios municipales visitado tenía un sistema de aislamiento térmico, por lo que los edificios tienen puntos donde hay fugas térmicas y los equipos de aire acondicionado trabajan más tiempo del necesario.

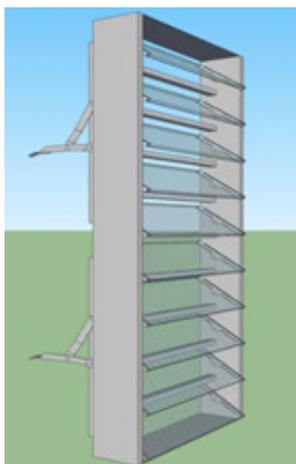
Oportunidades de mejora en edificios municipales

Las paredes, pisos y techos sin tratamiento térmico conllevan a pérdidas de energía, para mitigar las pérdidas estos elementos deben recibir un tratamiento térmico, por lo menos la envolvente del edificio. Un punto importante para solventar este problema es cambiar las ventanas celosía (Figura 3), ya que representan un puente térmico, por tanto, se recomienda cambiarlas por ventanas de cámara de vacío, que ofrecen un buen nivel de aislamiento y permiten el ingreso de luz natural. Adicionalmente se recomienda la instalación de planchas de poliestireno extruido (EPS) en conjunto con el sistema SATE.

El sistema de aislamiento que se propone implementar es el sistema SATE, ya que, si se instala en exteriores, se puede reducir el consumo de energía hasta un 30 % del total de energía consumido, dependiendo de las instalaciones existentes. Este porcentaje de ahorro energético se puso a prueba utilizando el módulo de CYPETHERM HE Plus para el cálculo de la demanda energética por el sistema de aire acondicionado. El flujo de trabajo fue el siguiente:

Figura 3

Referencia de ventanas de celosía



Se desarrolló un modelo arquitectónico representativo de los edificios municipales.

En CYPETHERM HE Plus se carga el modelo arquitectónico en formato IFC, se importa el archivo de clima que utilizará el software (en este caso se usó el Ilopango 2003-2017).

En CYPETHERM HE Plus se definen las características térmicas de los materiales constructivos y se agregan los sistemas de aires acondicionados. El programa tiene un apartado para realizar el cálculo de indicadores energéticos (el software utiliza Energy Plus como motor de cálculo).

Desde el programa se pueden importar materiales que los proveedores incluyen en librerías para analizar

el desempeño de los mismos, para el caso particular de la simulación se agregó 10 cm de Grafipol TR-SATE de Grupo Valero como aislamiento exterior en todas paredes y 5 cm de EPS directamente en la parte interior de la losa del techo.

Se exportan hacia CYPETHERM Improvement Plus dos archivos: uno con la condición actual de la edificación y otra considerando el aislamiento térmico.

Los resultados muestran en la Figura 4, el consumo de energía primaria pasa de 63.61kW/m² a 50.82kW/m², esto representa una disminución del 20 % de la cantidad de energía que se consume por metro cuadrado.

En el caso específico del consumo de energía en refrigeración el consumo inicial de energía es de 43.10kW/m² y luego de aplicar el aislamiento se reduce a 30.31kW/m²; esto representa una reducción del 29.67 %. Este valor coincide con el propuesto por proveedores locales. Por consiguiente, al aplicar este método de aislamiento en los edificios municipales, se considerará una disminución del 25 % en el consumo de energía eléctrica en los sistemas de aire acondicionado.

Consumo de energía ajustado e IDEs

Se calcula nuevamente el consumo de energía de las instalaciones bajo la suposición que los edificios municipales no han cambiado su carga instalada y se

Figura 4

IDES de remodelación de un local de ejemplo CYPETHERM Plus situación actual contra implementación de SATE + EPS

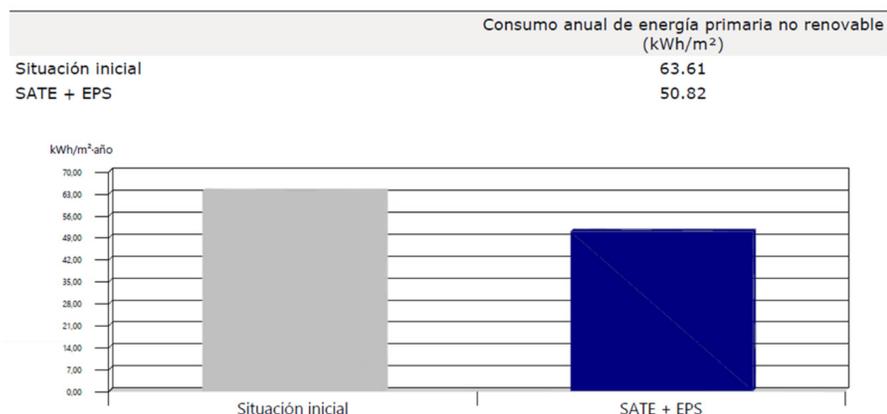
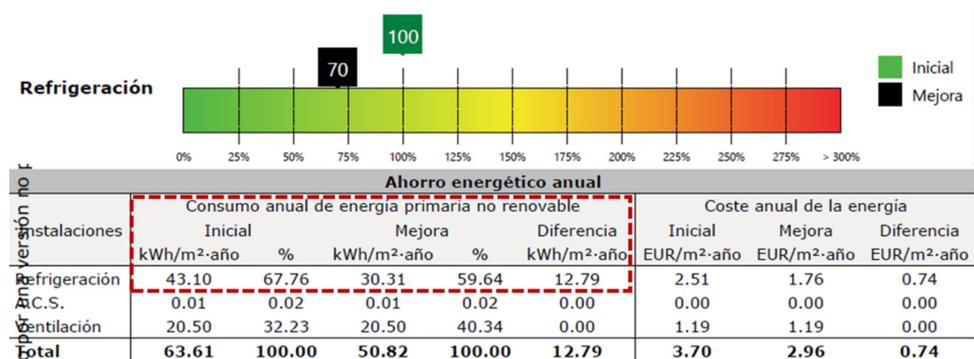


Figura 5

Comparativa del consumo de energía (kWh/m²) en condición actual y aplicando aislamiento térmico en paredes y techos



realizó el tratamiento térmico necesario para reducir el consumo de energía del sistema de aire en un 25 %. Teniendo eso en cuenta se muestran los nuevos porcentajes de consumo de energía según el tipo de carga para cada uno de los edificios municipales (Figura 6).

La nueva DEC promedio simulada en los edificios municipales es de 45.21kWh/m², en el caso de la densidad de emisiones la DECO₂ es de 11.85 kgCO₂/m² (Tabla 5).

Figura 6

Distribución de consumo de energía promedio de alcaldías simulada

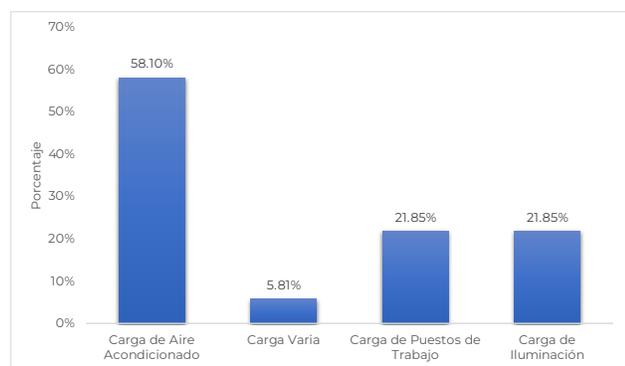


Tabla 5

Consumo de energía y emisiones de CO₂ promedio por tipo de carga posterior al tratamiento

Consumo	kWh	kgCO ₂
Energía de iluminación	6151	1611.56
Energía de puestos de trabajo	9452	2476.42
Energía de aire acondicionado	25139	6586.48
Energía varía	2511	657.88

CONCLUSIONES

Las estimaciones basadas en los datos recolectados revelan que, en promedio, el 62.78 % del consumo total de energía eléctrica en las alcaldías corresponde a cargas de aire acondicionado, un 5.59 % se destina a la iluminación, mientras que un 14.46 % se utiliza para equipos como computadoras en puestos de trabajo y el restante 17.17 % se distribuye en diversos equipos y electrodomésticos.

Las propuestas presentadas se centran en mejorar la eficiencia energética de los edificios municipales, buscando no perjudicar a los ocupantes. Se llevó a cabo un análisis exhaustivo del tratamiento térmico de los edificios, ya que se identificó que este aspecto tendría el mayor impacto en el consumo energético. Además, este enfoque permite un diseño posterior que cumpla con los requisitos propuestos, asegurando una mejora significativa en la eficiencia.

Al aplicar un tratamiento térmico a las paredes exteriores con el sistema SATE, la densidad de energía total consumida por metro cuadrado se reduce de 53.86kWh/m² a 45.21kWh/m², lo que representa una disminución del 16 % de este indicador de desempeño energético.

RECOMENDACIONES

Para obtener un análisis detallado de los resultados individuales de las alcaldías consideradas en el estudio, se recomienda revisar la tesis titulada "Plan de mejora del desempeño energético en edificios

municipales”.

Incluir un mayor número de edificios municipales en el análisis para obtener una visión más completa del panorama energético y poder identificar tendencias y patrones en el consumo de energía.

Solicitar un permiso para ingresar a las instalaciones que permita elaborar un diagrama unifilar del lugar y ubicar un analizador de redes para obtener datos detallados del consumo de energía y horas pico de consumo.

Establecer sistemas de gestión energética en los edificios municipales para monitorear y controlar de manera eficiente el consumo de energía, identificar áreas de mejora y optimizar el rendimiento energético.

Considerar la integración de fuentes de energía renovable, como paneles solares o sistemas de energía eólica, para reducir la dependencia de combustibles fósiles y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Evaluar el retorno de inversión de las medidas de eficiencia energética implementadas para demostrar los beneficios económicos a largo plazo y justificar nuevas inversiones en este ámbito.

REFERENCIAS

- Organización Internacional de Normalización. (2011). *Sistemas de gestión de la energía — Requisitos con orientación para su uso (ISO 50001:2011(es))*. El Salvador. Disponible en: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:50001:ed-1:v1:es>
- Organización Internacional de Normalización. (2018). *Sistemas de gestión de la energía — Requisitos con orientación para su uso (ISO 50001:2018(es))*. El Salvador. Disponible en: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:50001:ed-2:v1:es>
- CYPE Software. (2023). *CYPETHERM HE Plus (software)*. CYPE; CYPE Ingenieros, S.A. El Salvador. Disponible en: <https://info.cype.com/es/software/cypetherm-he-plus/>
- NREL, DOE National Laboratories, academic institutions, and private firms. (2023). *EnergyPlus (software)*. U.S. Department of Energy's. El Salvador. Disponible en: <https://energyplus.net/downloads>
- CNE, GEF, & PNUD. (2017). *Dirección de Eficiencia Energética Programa de Eficiencia Energética en Edificios Públicos*. El Salvador. Disponible en: <https://estadisticas.cne.gob.sv/wp-content/uploads/2017/09/manual-sobreinforme-de-diagnosticos-energticos-en-hospitales.pdf>
- CNE. (2017). *Manual de recomendaciones para el uso eficiente de la energía en el gobierno central*. El Salvador. Disponible en: <https://estadisticas.cne.gob.sv/wp-content/uploads/2017/09/manualrecomendaciones-para-el-uso-eficiente-de-la-energa-en-el-gobierno.pdf>
- International Electrotechnical Commission. (2009). *IEC 60439-1:1999 Low-voltage switchgear and controlgear assemblies - Part 1: Type-tested and partially type-tested assemblies*. El Salvador. Disponible en: <https://webstore.iec.ch/publication/16182>
- National Fire Protection Association. (2008). *NFPA 70 – National Electric Code (NEC 2008)*. El Salvador. Disponible en: <https://www.nfpa.org/es/product/codigo-nfpa-70/p0070code/nfpa-70-national-electrical-code-nec-2008/7008sbpdf>
- Cortez Martínez, K. K., González Nolasco, S. J., Guillén Ramírez, E. A., & Pereira Peña, B. A. (2023). *Línea de consumo base de electricidad en edificios administrativos municipales en El Salvador (tesis)*. Universidad de El Salvador. San Salvador, El Salvador. Disponible en: <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/30059/1/LINEA%20DE%20CONSUMO%20BASE%20DE%20ELECTRICIDAD%20EN%20EDIFICIOS%20ADMINISTRATIVOS%20MUNICIPALES%20DE%20EL%20SALVADOR.pdf>
- The RETScreen Clean Energy Management Software platform. (2023). *RETScreen (software)*.

RETScreen Innovation Labs. El Salvador.
Disponible en: [https://natural-resources.
canada.ca/maps-tools-and-publications/
tools/modelling-tools/retscreen/7465](https://natural-resources.canada.ca/maps-tools-and-publications/tools/modelling-tools/retscreen/7465)

CYPE Software. (2023). CYPETHERM Improvements
Plus (software). CYPE; CYPE Ingenieros, S.A.
El Salvador. Disponible en: [https://info.cype.
com/es/software/cypetherm-improvements-
plus/](https://info.cype.com/es/software/cypetherm-improvements-plus/)

Esta página está dejada intencionalmente en blanco



Universidad de El Salvador

Secretaría de Investigaciones Científicas. Final Avenida Héroes y Mártires del 30 de Julio de 1975,
Ciudad Universitaria "Dr. Fabio Castillo Figueroa", San Salvador, El Salvador.
Correo electrónico: revista.minerva@ues.edu.sv



Revista Minerva ISSN 2521-8794