

ESTUDIOS DE LA CIÉNEGA

enero-junio 2024

07

ISSN : 2992-6963

Transdisciplinary Journal for Development

Tercera época | Año 03

metrópoli
gobernanza
contaminación ambiental
cambio climático
sostenibilidad
tratamiento térmico
políticas públicas
riego por gravedad
Agua limpia
sustentabilidad
Saneamiento
Tecnología ambiental
composta
contingencia
baño
Río Santiago
educación
salud
Cuenca Lerma-Chapala
Composición química



www.revistaestudiosdelacienega.com

La foto de portada fue generada con la inteligencia artificial de Adobe FireFly. Por Fidel Romero

ESTUDIOS DE LA CIÉNEGA

Transdisciplinary Journal for Development

Tercera época

Año 03, Núm. 07
Enero-Junio de 2024

DIRECTORIO

Dr. Ricardo Villanueva Lomelí
Rector General

Dr. Héctor Raúl Solís Gadea
Vicerrector

Mtro. Guillermo Arturo Mata
Secretario General

Dr. Edgar Eloy Torres Orozco
Rector de Centro



UNIVERSIDAD DE
GUADALAJARA
Red Universitaria de Jalisco

DIRECTORIO

Dr. Ricardo Villanueva Lomelí
Rector General de la Universidad de Guadalajara

Dr. Héctor Raúl Solís Gadea
Vicerrector General de la Universidad de Guadalajara

Mtro. Guillermo Arturo Gómez Mata
Secretaría General de la Universidad de Guadalajara

Dr. Edgar Eloy Torres Orozco
Rector del Centro Universitario de la Ciénega

DIRECCIÓN EDITORIAL

Mtro. Luis Arturo Macías García

CONSEJO EDITORIAL

Durruty J. de Alba Martínez (UdeG), Kleophe Alfaro Castellanos (UdeG), José Luis Alvaro (Universidad Complutense de Madrid), Luis Janny Amaya Trujillo (UdeG), Alberto Arellano Ríos (ColJal), Roberto Arias de la Mora (ColJal), Maximiliano Bron (Universidad Nacional de Córdoba y Universidad Nacional de Rioja), Felipe Cabrales Barajas (UdeG), Ma. Soledad Castellanos Villarruel (UdeG), Jesús Enrique Caldera Ynfante (Universidad de la Gran Colombia), Salvador F. Capuz Rizo (Universidad Politécnica de Valencia), Ma. del Rocío Castillo Aja (UdeG), César Castillo Quevedo (UdeG), Ana Tztzqui Chávez Bárcenas (Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo), Angélica Contreras Cueva (UdeG), José Héctor Cortés Fregoso (UdeG), Stefano Di Gennaro (University of L'Aquila), Colin Fraser (University of Cambridge), Luz María Galán Briseño (UdeG), Dominique Gay-Sylvestre (U. de Limoges), Carlos Gómez Chiñas (UAM, Azcapotzalco), Magdiel Gómez Muñiz (UdeG), Cándido González Pérez (UdeG), Adriana Hernández García (UdeG), Jaime Inclan (New York University), Stan Ingman (University of North Texas), Juan Luis Linares (Universidad Autónoma de Barcelona), Alfonso Luna Vázquez (UNAM), Luis A. Macías García (UdeG), Ma. del Carmen Macías Huerta (UdeG), Pedro Méndez Guardado (UdeG), Norma Bautista Rangel (UdeG), Daniel Morales Ruvalcaba (Universidad de Guanajuato), Alejandro César Moreno Salazar (UdeG), Alfonso Moreno Salazar (UdeG), Jorge Padilla Álvarez (UdeG), María Teresa Rentería Rodríguez (UdeG), Pedro Hugo Rangel Torrijos (U. de G.), Javier Rentería Vargas (UdeG), Ramón Reyes Rodríguez (UdeG), Daniel Rojas Bravo (UdeG), Pedro Hugo Rangel Torrijos (UdeG), José Juan Pablo Rojas Ramírez (UdeG), Rebecca Danielle Strickland (Ciesas), María Suárez Castellanos (UdeG), José de Jesús Torres Contreras (UdeG), Edgar Eloy Torres Orozco (UdeG), Claudia Carolina Vaca García (UdeG), Luis Valdivia Ornelas (UdeG), Alberto Julián Valencia Botín (UdeG) y José Vicente Villalobos Antúnez (Universidad de Zulia).

ESTUDIOS DE LA CIÉNEGA

Transdisciplinary Journal for Development

Enfoque y alcance

Estudios de la Ciénega es una revista electrónica multidisciplinar con periodicidad semestral (enero-junio, julio-diciembre), editada por el Centro Universitario de la Ciénega de la Universidad de Guadalajara, de estricto arbitraje y de acceso total y gratuito. La revista tiene como objetivo la generación y difusión del conocimiento a través de la publicación de artículos originales de investigación realizados por investigadores y académicos nacionales e internacionales, vinculados a las siguientes áreas:

- a) Sociedad, cultura y comunicación
- b) Ingeniería y biotecnología
- c) Economía y gestión

Política de evaluación por pares

Toda propuesta de publicación será sometida a evaluación doble ciego de los dictaminadores. Los expertos serán académicos con prestigio en su disciplina y deberán contar con publicaciones relacionadas a la temática que corresponda con el documento del que emitirá dictamen. Las evaluaciones realizadas podrán emitirse en los siguientes términos: Publicable, Publicable Condicionado y No Publicable. Cuando el dictamen se emita como Publicable o Publicable Condicionado, se considerará como dictamen favorable. Se necesitarán dos de tres dictámenes favorables para que una obra pueda ser publicada.

Política de acceso abierto

Estudios de la Ciénega es una revista de acceso total libre y gratuito

Secciones

Sociedad, Cultura y Comunicación

El espacio de Sociedad, Cultura y Comunicación dentro de la revista Estudios de la Ciénega está pensado para la publicación de textos científicos sociales, lo que abarca un enorme espectro que incluye a diferentes disciplinas de las ciencias sociales, como la antropología, la sociología, el derecho, las ciencias de la comunicación, la psicología, ciencias políticas, filosofía e historia. Dentro de estas disciplinas, se incluyen muchas subdisciplinas y enfoques transdisciplinarios, siempre teniendo como referencia la pertinencia de las investigaciones para el campo social, ya sean que aporten conocimiento sobre temas sociales o que se trate de investigaciones aplicadas que puedan representar algún cambio en la sociedad.

Economía y Gestión del Desarrollo

La sección de Economía y Gestión de la Revista Estudios de la Ciénega tiene como objetivo contribuir a la difusión del conocimiento en las disciplinas económicas y administrativas

a través de la publicación de artículos inéditos y originales en español que sean resultado del trabajo de investigación teórica o aplicada.

Dentro de las diferentes disciplinas que son de interés están: Economía, Administración, Agronegocios, Finanzas, Mercadotecnia, Recursos Humanos, Contaduría, Negocios Internacionales, Tecnología de la Información.

Ingenierías y Biotecnología

La sección de Ingeniería y Biotecnología publica artículos en español de resultados originales e inéditos de investigación, así como de desarrollos científicos y tecnológicos de diversas áreas relacionadas con la Ingeniería y Biotecnología.

En el área de Ingenierías los temas de interés son: a) Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Computación y Telecomunicaciones; b) Ingeniería Mecánica, Industrial, Mecatrónica y Sistemas Biomédicos; c) Ingeniería Química; d) Nuevos Materiales y Nanomateriales; e) Ingeniería Ambiental.

En el área de Biotecnología, los temas de interés son: i) Biología molecular; b) Biotecnología animal y vegetal; c) Química de las proteínas; d) Procesos biotecnológicos; e) Biotecnología alimentaria.

Estudios de la Ciénega Año 3, No.5, julio-diciembre 2023, es una publicación semestral editada por la Universidad de Guadalajara, a través de la Coordinación de Investigación, por la Secretaría Académica, del CUCIÉNEGA. Av. Universidad # 1115, Col. Linda Vista, C.P. 47860. Ocotlán, Jalisco. México, 3929259400, <https://revistaestudiosdelacienega.com>, estudiosdelacienega@gmail.com y larturo.macias@academicos.udg.mx, Editor responsable: Luis Arturo Macías García. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo 04-2023-021210461100-102, ISSN: 2992-6963, otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: Coordinación de Investigación, Secretaría Académica del centro Universitario de la Ciénega. Av. Universidad # 1115 Col. Linda Vista, Ocotlán, Jalisco. México. C.P. 47860. Diseño, maquetación y sitio web: Fidel Romero, fidelromeromx@gmail.com, <https://www.movendesign.com/>. Diseño portada: Fidel Romero. Fecha de la última modificación 12 de diciembre de 2023.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Universidad de Guadalajara.

ESTUDIOS DE LA CIÉNEGA

CONTENIDO

Año 03, núm. 07, enero-junio de 2024

7

Editorial

SOCIEDAD, POLÍTICA, CULTURA Y COMUNICACIÓN

9

De las inundaciones a la crisis hídrica en la Cuenca Baja del Río Lerma en México: Una mirada desde la Agenda 2030

César Alejandro Barajas Valadez y Adriana Hernández García

DESARROLLO URBANO, METROPOLIZACIÓN Y EL MEDIO AMBIENTE

33

Ciudad y Metrópoli: aproximaciones desde el Objetivo de Desarrollo Sostenible 6. Agua limpia y saneamiento para la población de las grandes ciudades para 2030

Magdiel Gómez Muñiz

43

Descontaminación del agua residual de un centro universitario utilizando humedales artificiales: estudio a escala piloto

Khirbet López Velázquez, Yahir Murakawa Guzmán, Carlos Gómez de León, Andrés G.

Suárez Santizo, Linnet Roque Romero, Cesar Castillo Quevedo, Edwin R. Hoil Canul, José Luis Cabellos Quiroz

53

Técnicas para el mejoramiento en la eficiencia de un sistema de baño compostero de dos cámaras

Adrián R. Maldonado-Martínez

61

Baños secos, como una estrategia de conservación del agua

Ana María Alfaro Espinosa

65

Crisis Mundial del Agua: un tema prioritario para atender en la Zona Metropolitana de Ocotlán en proceso de consolidación

Luis Arturo Macías García, José de Jesús Quintana Contreras y Paloma Elizabeth Macías Ruíz

81

Caracterización hidráulica de suelos mediante experimentos de infiltrómetro de disco

Manuel Zavala-Trejo

ECONOMÍA Y GESTIÓN DEL DESARROLLO

93

El rol de la Universidad en el Desarrollo Sostenible: caso del Centro Universitario del Norte, CUNorte, de la Universidad de Guadalajara

Elba González Aguayo, Itzel Celeste Romero Soto, Irma Robles Rodríguez y María de los Ángeles Camacho Ruíz

103

Evaluación longitudinal de la dinámica de la calidad del agua en el Río Santiago

Aida Alejandra Guerrero de León, Alberto Daniel Rocha Muñoz, Gualberto Iglesias Gonzalez y Valerie Natalia Salazar Zepeda

INGENIERÍAS Y BIOTECNOLOGÍA

119

Eliminación de Sólidos en Agua Pluvial captada mediante un Sistema de Electrocoagulación Energizado con paneles fotovoltaicos

Maria Angeles Camacho Ruiz, Ernesto Villegas Márquez, Norma Guadalupe González Montoya, Elba González Aguayo, Celestino García Gómez, Filiberto Briseño Aguilar e Itzel Celeste Romero Soto

129

Estudio de la influencia del agua en la citosina mediante métodos DFT

Francisco E. Rojas González, César Castillo Quevedo, Edgar Paredes Sotelo, Eduardo Robles Chaparro, Ana María Mendoza Wilson, Anned de León Flores, Khirbet López Velázquez, Edwin Hoil Canul, Adolfo López Sánchez, Jesús Cob Cantu, Luis Maldonado López, Gerardo Martínez Guajardo, y José Luis Cabellos Quiroz

153

Influencia del CHClF₂ durante el proceso de activación de celdas solares de películas delgadas basadas en CdTe

Adolfo López Sánchez, Ricardo Mis Fernández y José Luis Cabellos Quiroz

165

Contaminantes emergentes: Problemática, impacto y su tratamiento por procesos de oxidación avanzada

Daryl Rafael Osuna-Laveaga, Edgar David Moreno-Medrano

171

Descripción petrográfica y composición química de rocas del Soconusco, Chiapas

Alexa Rocío Zamora Martínez, Khirbet López Velázquez, Keren Cruz Andrade, Kevin Gerardo Duque Olivera, Edwin Hoil Canul y Luis Maldonado López

El editorial que nos ocupa es el correspondiente al primer semestre del año 2024, y es importante señalar la satisfacción que se tiene por dedicar este número al tema del agua y los recursos naturales, aspecto que seguramente los lectores encontrarán de gran interés. En efecto, la casi totalidad de artículos, trabajos de investigación, que en este caso están disponibles en este número para su lectura, abordan en general el tema del agua, producto del interés que las universidades observan por el cuidado del medio ambiente.

Dicho lo anterior, debemos señalar que los trabajos que en este número se presentan tienen su origen en la celebración del Segundo Simposium y Congreso Nacional del Agua y otros recursos Naturales; evento académico que reunió a profesores investigadores de importantes instituciones de enseñanza superior del país, los días 02 y 03 de mayo del año en curso, 2024, teniendo como sede al Centro Universitario del Norte de la Universidad de Guadalajara.

El congreso estuvo dirigido al sector público y privado que está relacionado con el estudio, uso y manejo del agua y en concordancia con los programas nacionales y estrategias de PRONACES, agua, salud y energía del CONAHCYT, así como los objetivos de desarrollo Sostenibles (ODS) de la ONU; específicamente con las ODS números 6 y 11. Además, guarda coherencia con el cumplimiento de la Ley General en materia de Humanidades, Ciencias, Tecnologías e Innovación (LGHCTI), para dar cumplimiento con la retribución social requerida dentro de los programas de posgrados por el CONAHCYT.

El Simposium y Congreso contó con la presencia de alumnos de los diversos programas de posgrados de centros universitarios, universidades politécnicas, unidades científicas y tecnológicas, así como estudiantes egresados de las mismas, profesores e investigadores, comunidades académicas, asociaciones universitarias y público en general; lo que implica la iniciativa pública y privada; además de la participación del H. Ayuntamiento del Municipio de Colotlán, Jalisco y miembros del Consejo de Administración del Organismo Público Descentralizado Municipal, *Sistema de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento del Municipio de Colotlán*, Jalisco (SAPASCO), además de la *Junta Intermunicipal del Medio Ambiente para la Gestión Integral de la Región Norte del Estado de Jalisco* (JINOR) y de la dirección de *Gestión Ambiental del gobierno municipal de Colotlán*.

Se tuvo la presencia y participación de cinco universidades incluida la nuestra, Universidad de Guadalajara, con los centros universitarios de: CUNorte, CUTonalá y CUCiénega; además de con la presencia de los Profesores e Investigadores, de Unidades Científicas y Tecnológicas, Universidades Politécnicas. como ponentes en conferencias y talleres. A este respecto, las instituciones participantes fueron:

- Universidad Politécnica de Tapachula, UPTap;
- *Universidad Autónoma De Zacatecas (Uaz), Unidad Académica De Ciencia Y Tecnología De La Luz Y La Materia (Lumat);*
- *Universidad De La Ciénega Del Estado De Michoacán De Ocampo. Genómica Alimentaria;*
- *Instituto Tecnológico De Roque, de Celaya, Estado de Guanajuato, México, integrante de la red del Tecnológico Nacional de México.*
- Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca. Facultad de Sistemas Biológicos e Innovación Tecnología, FASBIT.

Y por supuesto, como ya se mencionó, la participación de tres centros universitarios de la Benemérita Universidad de Guadalajara:

- CUtonalá, CUCiénega y CUNorte.

Por último, es relevante mencionar que dicho congreso fue organizado bajo responsabilidad, y a través, del Comité de Sostenibilidad y del Seminario Transdisciplinar de Posgrados del CUNorte, en la ciudad de Colotlán, Jalisco.

Por todo lo anterior y con la seguridad del gran interés que provocarán las lecturas contenidas en este número, no nos queda más que desear la continuidad en trabajos de investigación relativos a nuestros recursos naturales.

Editores Invitados de la Revista

José Luis Cabellos Quiróz

César Castillo Quevedo

Director Editorial de la Revista

Luis Arturo Macías García

De las inundaciones a la crisis hídrica en la Cuenca Baja del Río Lerma en México: Una mirada desde la Agenda 2030

From floods to the water crisis in the Lower Lerma River Basin in Mexico: A look from the 2030 Agenda

César Alejandro Barajas Valadez^a y Adriana Hernández García^b

Resumen / Abstract

La Agenda 2030 firmada por países miembros de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) así como los Objetivos de Desarrollo Sostenible, partió de la necesidad e interés de la humanidad por superar el sistema de vida predatorio actual, que causa impactos como el cambio climático. La era de ebullición implica una nueva revisión de los fenómenos naturales a partir de la intervención del hombre sobre el territorio y las acciones que implementa; además, la falta de aplicación de políticas públicas por parte de los gobiernos locales por combatir dicho cambio climático, en particular en las cuencas y su conformación original. En México la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), ha creado y ordenado en 13 regiones hidrológicas-administrativas todo el territorio nacional. Una de ellas es la región hidrológica-administrativa Lerma-Santiago-Pacífico, localizada en el centro occidente del país. Hacia la cuenca baja el río Lerma entre Michoacán y Jalisco se encuentra con el río Duero y la presa Barraje de Ibarra para descargar sus aguas al lago de Chapala. El objetivo del trabajo es presentar un panorama actual en la cuenca baja del río Lerma y Duero, así como los impactos ambientales y sociales en las poblaciones locales. Y entre los resultados del estudio en la cuenca baja del río Lerma la conurbación se han realizado transformaciones sociales desde principios del siglo XX, en que se desecó una tercera parte de Chapala y cambiando los cauces de los ríos. El trabajo se centra en un análisis de la conurbación Briseñas-La Barca, desde un enfoque mixto, a partir del método deductivo, estudiando fenómenos del cambio climático, como las inundaciones y las sequías en el contexto urbano y rural, que ha sufrido desde el siglo XX hasta tiempos recientes.

Palabras clave: Cuenca Lerma- Chapala, Agenda 2030, sequía, inundación.

The 2030 Agenda signed by member countries of the United Nations (UN) as well as the Sustainable Development Goals (SDGs), stemmed from the need and interest of humanity to overcome the current predatory system of life, which causes

a. Doctor en Ciencia Política por la Universidad de Guadalajara. Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento: Gobierno y políticas públicas. Correo electrónico: alejandro.baraj@gmail.com.

b. Profesora investigadora en el Centro Universitario de la Ciénega de la Universidad de Guadalajara desde el año 2001. Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento: Desarrollo regional y medio ambiente. Correo electrónico: adrianahg@hotmail.com; adriana.hernandezg@academicos.udg.mx.

impacts such as climate change. The boiling era implies a new review of natural phenomena based on man's intervention on the territory and the actions he implements; in addition, the lack of application of public policies by local governments to combat climate change, particularly in watersheds and their original conformation. In Mexico, the National Water Commission (CONAGUA) has created and organized the entire national territory into 13 hydrological-administrative regions. One of them is the Lerma-Santiago-Pacific hydrological-administrative region, located in the center-west of the country. Towards the lower basin, the Lerma River between Michoacán and Jalisco meets the Duero River and the Barraje de Ibarra dam to discharge its waters into Lake Chapala. The objective of the work is to present the current situation in the lower basin of the Lerma and Duero rivers, as well as the environmental and social impacts on local populations. And among the results of the study in the lower basin of the Lerma River conurbation social transformations have been made since the early twentieth century, when a third of Chapala was drained and changing the riverbeds. The work focuses on an analysis of the Briseñas-La Barca conurbation, from a mixed approach, from the deductive method, studying climate change phenomena, such as floods and droughts in the urban and rural context, which has suffered since the twentieth century until recent times.

Keywords: Lerma-Chapala Basin, Agenda 2030, drought, flood.

Introducción

Las cuencas hidrográficas son elementos de gran interés para estudiosos por las particularidades que representan, debido a los distintos sistemas y procesos que se llevan a cabo, como los procesos políticos-administrativos, socioeconómicos, además de factores ecológicos, por mencionar algunos; los cuales en ocasiones se ven afectados por fenómenos climatológicos como las inundaciones y las sequías. Según Rodríguez (2006) estos cuerpos imaginarios deben ser entes importantes para la planeación, en la búsqueda de generar políticas públicas que contribuyan a mejorar sus condiciones. La Organización de las Naciones Unidas (ONU-2015) en la Agenda 2030 a fijado una serie de mecanismos que contribuyen a combatir, revertir y mejorar las condiciones del planeta tierra, mediante diversos objetivos, que contribuyan a la vida y especies; como los objetivos del desarrollo sostenibles; conformada por 17, los cuales se enfocan, por mencionar algunos ejemplos, a lograr un acceso universal al agua (O-6), lograr que las ciudades sean resilientes (O-11), implementar acciones benéficas para el clima (O-13), implementar acciones para mejorar las condiciones de vida en los ecosistemas terrestres, entre otros.

México es un territorio que, debido a su topografía, alberga diferentes tipos de cuencas determinadas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en términos políticos-administrativos; entre ellas, para este trabajo, destaca la cuenca Lerma-Chapala, localizada en el centro del territorio nacional; en ella se encuentra el río Lerma y Duero, dos afluentes muy importantes en el lugar. En el área académica, para su estudio, diversos autores la han dividido en tres partes como: Alto Lerma, Medio Lerma y Bajo Lerma; cada una de sus partes corresponde a interés particulares del

investigador, por ejemplo: Albores (1995) dice que diversos autores han determinado y afirmando que el Alto Lerma termina a media presa Solís y otros fijan otro punto de conclusión.

Autores como Santos (2005) señala que el Medio Lerma ha resultado más complejo determinar su terminación, pero concluye como “referencias los municipios de Celaya, Irapuato, Pénjamo y La Piedad. Mientras que el Bajo Lerma [...]” (p. 45), para algunos inicia desde el municipio de Yurecuaro, Michoacán, y para otros, como Cuevas (1941) es a partir del municipio de La Barca, Jalisco. Para este trabajo como la cuenca baja del río Lerma, en la que está inmersa los ríos Lerma y Duero, es considerada en los municipios de La Barca, Jalisco y Briseñas, Michoacán de Ocampo, por los rasgos particulares que presenta la zona de estudio (conurbación Briseñas-La Barca) en cuanto a inundaciones y sequías que han afectado al sitio desde antaño, impactando directamente a su sociedad y su medio ambiente; además, la delimitación fue en base a lo propuesto por Horton-Strahler (citado por Vega, 2020) donde el río Lerma siendo de segundo orden se alimenta del río Duero de primer orden y desemboca en la laguna de Chapala.

El presente artículo, aborda desde un enfoque mixto y la utilización del método deductivo, tiene como objetivo presentar un panorama actual en la cuenca baja del río Lerma y Duero, así como los impactos ambientales y sociales en las poblaciones ribereñas; se analiza la cuenca baja del río Lerma haciendo uso de los objetivos de desarrollo sostenibles: 6 (Agua limpia y saneamiento); 11 (Ciudades y comunidades sostenibles); 13 (Acción por el clima); y, 15 (Vida de ecosistemas terrestres) implementados en la Agenda 2030 debido a los fenómenos como la inundación y la sequías que ha sufrido el área de estudio desde mediados del siglo pasado hasta tiempos recientes (2024) para tratar de comprender los efectos provocados por ambos fenómenos climatológicos en la conurbación Briseñas-La Barca.

Existen diversos organismos de distinto carácter, ya sea internacional, nacional o local, cada uno con sus respectivas temáticas y estructuras para atender temas como las inundaciones y/o sequías, entre otros. Para efectos de carácter internacional al que los gobiernos que integran la ONU, desde una manera escalonada de lo nacional a lo local, tratan de implementar acciones que contribuyan a contrarrestar los efectos que provocan estos dos fenómenos naturales. La Agenda 2030 presenta una serie de objetivos encaminados a contrarrestar los efectos que provocan los fenómenos naturales mediante la aplicación de estrategias y acciones, estas deben estar destinadas en la concordancia de un esfuerzo internacional ya que los estragos que generan las inundaciones y las sequías son cada vez más severos y por ende llegan a abarcar áreas más extensas en comparación como ocurría antaño.

Los objetivos fijados y para hacer aplicados por todos los gobiernos que integran dicha organización y dicha agenda son 17, de los cuales para realizar este trabajo se tomaron los Objetivos de Desarrollo Sostenible 6, 11, 13, y 15.

El objetivo 6 hace referencia, según datos destacados por el mismo organismo, a atender la demanda de las personas un uso razonable del agua en actividades del campo; generar propuestas para combatir las inundaciones, ya que son las causantes de gran número de pérdidas humanas en comparación por los fenómenos naturales. Algunos de las metas sugeridas son: generar el uso adecuado del agua; cuidar y restablecer los ecosistemas del lugar; involucrar a las comunidades del lugar a participar para que hagan suyas las estrategias; generar el uso eficiente del agua, según va-

rias de sus metas. Ante estas recomendaciones y situaciones es conveniente que la participación de la población local se involucre con el propósito de evitar inundaciones y contrarrestar las sequías en cualquiera de su tipología.

El objetivo 11 está enfocado a las ciudades y comunidades a promover para que sean sostenibles. Según datos de la propia ONU la población es cada vez más urbana que rural, debido a que habita zonas con las características más urbanas que rurales, claro en diferentes proporciones; “las ciudades en el mundo representan tan solo el 3% de la tierra [...], pero llegan a consumir hasta un 80% de la energía generada y provocan un 75% de dióxido de carbono” (ONU-2015). Ante dichas acciones, los gobiernos deben promover acciones para revertir los efectos negativos; que decir de los que causan las inundaciones y las sequías tanto al ámbito urbano como lo rural. Según la meta 11.5 pretende reducir las pérdidas causadas por los “desastres, incluidos los relacionados con el agua, y de personas afectadas por ellos, y reducir considerablemente las pérdidas económicas directas provocadas por los desastres” así como otras metas que están encaminadas a combatir los fenómenos climáticos como las inundaciones y la sequía.

El objetivo 13 enfocado a acción por el clima debido al incremento de la temperatura terrestre lo que afecta directamente a la vida; dentro de sus metas está el “13.1 Fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales en todos los países”; “13.3 Mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional respecto de la mitigación del cambio climático, la adaptación a él, la reducción de sus efectos y la alerta temprana” (ONU-2015). Se estipula la participación de los integrantes de dicho órgano por alcanzar dichas metas para beneficio de los seres vivos incluyendo al ser humano.

El objetivo 15 enfocado en la creación de gestionar la sostenibilidad, cuidado y reforestación de los bosques, para evitar de desolación y la pérdida de dichos espacios verdes que contribuyen a una mejor vida; así como la disminución y pérdida de la vida en muchas especies por la importancia que representan. En ese contexto algunas de las metas que presenta son: “La respuesta del PNUMA se ocupa de cuatro áreas: 1 Ayudar a las naciones a gestionar los desechos médicos de la COVID-19. 2 producir un cambio transformativo para la naturaleza y las personas. 3 trabajar para garantizar que los paquetes de recuperación económica creen resiliencia para crisis futuras. 4 modernizar la gobernanza ambiental a nivel mundial. La estrategia 15.5 Adoptar medidas urgentes y significativas para reducir la degradación de los hábitats naturales, detener la pérdida de la diversidad biológica y, para 2020, proteger las especies amenazadas y evitar su extinción” (ONU-2015). En el presente artículo se abordará un estudio de caso para el análisis de la aplicación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y su impacto en México.

El artículo está estructurado de la siguiente forma: En el primer apartado se aborda la historia de sequía e inundaciones desde los estudios sociales reciente. En el segundo apartado se abordan los fenómenos de inundación y sequía en el mundo. En el tercer apartado se presenta el contexto histórico en México, así como los cambios de las últimas décadas. El cuarto apartado presentar un panorama actual sobre la cuenca baja del río Lerma y Duero, así como los impactos ambientales y sociales en las poblaciones ribereñas. Y el quinto apartado se analiza la cuenca baja del río Lerma desde el enfoque de los objetivos de desarrollo sostenibles: 6 (Agua limpia y saneamiento); 11 (Ciudades y comunidades sostenibles); 13 (Acción por el clima); y, 15 (Vida de ecosistemas

terrestres) implementados en la Agenda 2030. Para concluir con reflexiones preliminares sobre los efectos que generan tanto las inundaciones como las sequías; y la falta de políticas públicas por parte de los gobiernos locales para combatir dichos fenómenos naturales.

1. El proceso natural del agua en el planeta tierra: un bien natural propenso a inundaciones

El agua es un elemento esencial para la vida en el planeta tierra; este elemento extraordinario se encuentra tanto en la atmósfera, como en la superficie y el subsuelo terrestre; para efectos superficiales, por mencionar algunos ejemplos, se encuentra en ríos y cuencas como contenedores de la misma, a diferentes escalas; comúnmente, estas escalas suelen depender directamente del llamado ciclo hidrológico (ciclo del agua) en el que el agua es el principal factor. Cuando se habla del ciclo hidrológico se hace alusión a todo un proceso natural al que es sometido este elemento hídrico; para entender un poco más sobre este proceso el CENAPRED¹, *et al.* (2007) afirma que “el agua que tomamos ahora es la misma que durante millones de años se ha mantenido en cualquiera de sus tres estados: líquido, gas (vapor) o sólido (hielo) reciclándose constantemente [...] La continuidad del agua en la tierra es lo que conocemos como El ciclo hidrológico”; entonces, el agua en este proceso natural tiende a sufrir los tres estados mencionados con la intervención de la tierra, el sol y el aire (*ibidem*), que depende mucho de su geolocalización, por ejemplo, en el ecuador terrestre se suele observar en estado líquido y gaseoso conocido como vapor (nubes), mientras en los polos tanto norte y sur suele verse en estado sólido.

La ONU-HABITAT (2009) enfatiza que las inundaciones suelen ocurrir en lugares como los asentamientos humanos debido a los cambios “de la superficie terrestre” por materiales impermeables como los distintos concretos o asfaltos que suelen ser utilizados de manera mecánica para mejorar las condiciones de transitabilidad del terreno como las vialidades, provocando el agua, que comúnmente era filtrada al subsuelo, ahora tiende a continuar en un nuevo cauce superficial provocando la acumulación de la misma en la parte más baja, generando un incremento del nivel de agua hasta llegar posiblemente a generar una inundación precoz en áreas que no solían inundarse. Existen diversos sitios en los que no era común se suscitaban inundaciones en el lugar, pero debido a la acción del ser humano que ha transformado dichos sitios a una escala alarmante, los motivos por lo que lo hace son diversos, como la urbanización de áreas bajas, la tala y eliminación de vegetación para la implementación de la agricultura, la construcción de viviendas en cuencas propensas a inundarse (CENAPRED, 2009), como algunos autores señalan “el agua comúnmente suele reconocer su cauce”. Existen algunos tipos de inundaciones como: pluviales, fluviales y costeras (*ibidem*); las primeras son causadas por el exceso de lluvia en sitio; mientras que la segunda es causada por el desbordamiento de algún cuerpo de agua como los ríos; por último, las costeras que son provocadas por algún tsunami u olas que por la altura y fuerza que tienen se adentran más

¹ CENAPRED: Centro Nacional de Prevención de Desastres. El cual tiene como objetivo: “estudiar, desarrollar, aplicar y coordinar tecnologías para la prevención y mitigación de desastres, promover la capacitación profesional y técnica sobre la materia [...]”: consultado el 04-06-2023, de: http://www.proteccioncivil.gob.mx/work/models/ProteccionCivil/Resource/7/1/images/lamina_exp_cenapred.pdf

de lo debido a tierra adentro, provocando el aumento del agua en lugares que no la había o aumentando los niveles de los cauces del lugar.

Las inundaciones son fenómenos hidrometeorológicos en el que está implicada como único elemento el agua, la cual aumenta su nivel en comparación a su cauce natural, rebasando su contenedor, como los ríos o cunecas, por mencionar algunos; además, como ejemplo sucede comúnmente en cuencas en las que su topografía es irregular y sirven como contenedores; el CENAPRED (2007) señala “aquel evento que debido a la precipitación, oleaje, marea de tormenta, o falla de alguna estructura hidráulica provoca un incremento en el nivel de la superficie libre del agua de los ríos o el mar mismo, generando invasión o penetración de agua en sitios donde usualmente no la hay y, generalmente, daños en la población, agricultura, ganadería e infraestructura” (p. 5). Entonces, las inundaciones son fenómenos que afectan de manera directa y negativa a lo que se encuentra en el área afectada invadida por el agua a una altura que a partir de ella causa afectaciones, de lo que en el lugar se encuentra. Suelen ocurrir principalmente en temporada de lluvias, o en ocasiones atípicas; por su parte, Vergara *et al.* (2011) señalan “las inundaciones, las cuales son producto de las fuertes lluvias, tormentas tropicales y/o huracanes que generan un exceso de agua en los ríos que sobrepasa su límite provocando el desbordamiento” (p. 46); esto también suele ocurrir con otros tipos de cuerpos lacustres como: arroyos, lagunas, entre otros vasos lacustres que sirven como contenedores.

Ante la presentación del significado de inundación y de algunos tipos de la misma, a continuación, se presenta: qué son las sequías y qué las causan; fenómeno meteorológico que afecta a gran parte del globo terráqueo a distintas escalas o niveles de sequía. En ese orden de ideas se procede con el concepto de sequías.

La tierra en los últimos años “La mitad de los daños humanos y económicos causados por catástrofes en los últimos cincuenta años están relacionados con el agua y el clima, [...]” (ONU, 2021)². Las inundaciones y las sequías han afectado drásticamente a varios países de distintas latitudes, a tal grado que en ocasiones superan gastos que van más allá de su Producto Interno Bruto o lo que suelen obtener de sus ingresos anuales. Por su parte, el Banco Mundial (BM) encuentra a estos dos fenómenos como los peores en cuanto al daño que suelen ocasionar, por la gran cantidad de personas que suelen ser afectadas e incluso a perder la vida; “el aumento de la humedad que la atmósfera puede contener, dando como resultado tormentas y lluvias torrenciales, pero paradójicamente también periodos de sequía más intensos a medida que más agua se evapora del suelo y cambian los patrones climáticos mundiales” (BM, 2019). Es sabido que las cuencas, independientemente si en ellas están la presencia de asentamientos humanos, grupos de vegetación de cualquier tipo o ecosistemas suelen ser afectadas tanto por inundaciones como por sequías, dejando al sitio en situaciones convalecientes y deplorables.

Los estudios recientes acerca de los fenómenos naturales como las inundaciones señalan que éstas son cada vez más recurrentes o frecuentes en la tierra, y con ello llegan a afectar a uno varios países, en los que repercuten drásticamente tanto en la vida misma de las personas como en su

2 Consultado en: <https://onuhabitat.org.mx/index.php/sequias-tormentas-e-inundaciones-el-agua-y-el-cambio-climatico-dominan-la-lista-de-desastres>

economía; según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE, s-f) “las inundaciones causan daños valorados en más de 38 000 millones de euros en todo el mundo cada año”; tan solo en el país de Norteamérica ha sufrido en tiempos recientes pérdidas humanas que rebasan más de una centena cada año; en ese contexto dejan afectaciones por más de 8,000 millones de dólares (National Geographic, 2022)³. Las inundaciones ocurridas en tiempos recientes en el país de Perú dan cuenta de ello (ver figura 3), hecho que ha afectado drásticamente a esa región andina, deteriorando tanto el medio ambiente como la vida cotidiana de su población teniendo un impacto negativo en mucho de los rubros, tanto psicológicos, económico, de salud, entre otros elementos ante estos hechos ocurrido en dicho país ver figura 3.

Figura 3. Inundaciones en Perú 2023



Fuente: Recuperado del Informador (2023), en: <https://www.informador.mx/internacional/El-Nino-La-ONU-anuncia-nuevas-ayudas-a-Peru-ante-las-lluvias-vinculadas-al-fenomeno-natural-20230609-0097.html>.

2. La sequía en el mundo: un fenómeno cada vez más catastrófico y devastador

Las sequías están presentes en gran parte del globo terráqueo y en tiempos recientes se presentan en cualquier temporal. Así como diversos sitios de la tierra, han sufrido inundaciones a lo largo de la historia, ha ocurrido con el fenómeno meteorológico de la sequía, caracterizándose

3

Consultado en: <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/inundaciones>

principalmente por la ausencia o falta de agua en cualquiera de sus estados en el sitio; ante estas circunstancias el hombre ha sabido afrontar este fenómeno mediante la implementación de nuevas tecnologías para llevar el agua donde antes no la había. Velasco *et al.* (2005) señalan “Desde tiempos inmemoriales, la sequía y la falta de agua han sido factores determinantes del desarrollo humano; [...], la sequía ha sido el motor del desarrollo tecnológico, al impulsar los avances científicos para mejorar la gestión y uso del agua” (p. 35). Por otra parte, Marcos (2001) señala que definir el concepto sequía sería fácil en el sentido de entender lo que representa, pero no tendría los alcances en una investigación científica dado que no se cuenta con los parámetros o variables a usar, como el tiempo en sus variadas mediciones, como “horario, diario, mensual, estacional, anual, decenal” (p. 60). Por su parte, Campos señala “La sequía es un lapso caracterizado por un prolongado y anormal déficit de humedad”, asumiendo que en conclusión se carece de agua en cualquiera de sus estados, ya sea líquido, sólido o gaseoso (vapor).

Para su estudio y comprensión la sequía ha sido clasificada en cuatro tipos, según Marcos (2001, citando a Wilhite y Glantz, 1985) son: “sequía meteorológica; sequía agrícola; sequía hidrológica; y, sequía socioeconómica”, cada una con sus respectivas características y factores. La primera se caracteriza por constar de datos meteorológicos, donde hay la ausencia de agua en un sitio en específico; la segunda se caracteriza por que el capo es el principal afectado por la ausencia de agua en el lugar, lo que impide se desarrollen la vegetación o plantaciones; la tercera se refiere al déficit o pérdida del volumen de agua de algún cuerpo lacustre superficial o subterráneo; la cuarta y última, hace énfasis a la afectación económica que se presenta ante la ausencia del agua en algún punto de la economía o sociedad del lugar, lo que el autor dice “Para hablar de sequía socioeconómica no es necesario que se produzca una restricción del suministro de agua, sino que basta con que algún sector económico se vea afectado por la escasez hídrica” (Marcos, 2001, p. 63).

Asumiendo que la sequía es un fenómeno que afecta a los sitios que la padecen por la ausencia del agua, repercutiendo de manera directa a todos aquellos organismos que dependen tanto directa como indirectamente de la misma. Dos elementos que están implícitos en este fenómeno son la caracterización por la unidad de tiempo y espacio, estando implícitos cualquiera de las unidades del tiempo como minutos, días, meses, entre otros, al igual que al sitio que afecta durante ese determinado lapso de tiempo (Marcos, 2001), los cuales son fundamentales para realizar estudios más afondo y comprensibles.

La UNESCO (1979) en un estudio realizado a diversas partes del mundo llegó a la conclusión de que cada vez más parte del mundo están en constante sequía y por ende afecta a lo que en el lugar se encuentra; y la frecuencia de las mismas es cada vez más continuas; además, llegan a cubrir nuevas áreas. En comparación con las inundaciones que suelen darse por tiempos más cortos y llegar a cubrir las partes más bajas de la cuenca, las sequías son por tiempos cada vez más prolongados y abarcan más cuencas, alterando el contexto del lugar de una manera violenta (CENAPRED, 2014). En una entrevista realizada por Sarmenti (2019) del noticiario de CNN al Ing. Agrónomo Miguel Taboada⁴ hablando de Argentina, dice que “la sequía es más grave que las inundaciones [...] estas

4 Para más información consultar la siguiente liga: <https://cnnespanol.cnn.com/video/inundacion-sequia-ingeniero-agronomo-miguel-taboada-perspectivas-buenos-aires/>

terminan generando la falta de agua para los animales, muerte de plantas, fenómeno de salinización, y se extiende mucha más geográficamente; y las inundaciones en general afecta áreas que ya están cubiertas por suelos que de alguna forma uno puede prever que esto va a suceder”. Ante lo dicho, las sequías son más perjudiciales en comparación con las inundaciones, ya que cada vez más afectan a más áreas geográficas del mundo.

La fundación AQUAE (2022)⁵ menciona que en los últimos años varios países o regiones del mundo se están enfrentando a sequías que llegan a durar más tiempo de lo que comúnmente solían durar; estos hechos de largos periodos duros sin agua las regiones o países se han enfrentado a situaciones drásticas en temas como lo económico, lo agrícola, entre otros. El lugar que más ha sufrido este fenómeno climatológico es el continente africano y europeo. Las sequías no tienen límites geográficos en cuanto a regiones terrestres se refiere, por decir, superan con demasías el área de una cuenca superficial e incluso llegan a cubrir varias cuencas en las que dejan afectaciones. España, así como Australia, Sudáfrica, China entre otros países han sufrido sus peores sequías en años recientes. Lo que pone en alerta a los gobiernos de no implementar acciones para contrarrestar el cambio climático seguirán las sequías a pasos alarmante, a tal grado que no podrá revertirse tan fácilmente los daños ocasionados. Afectando a si cada vez más países o regiones de la tierra, a las que antes no eran expuestas ante tal fenómeno climático.

Las sequías no tienen limitantes geográficas y topográficas, como suelen ocurrir con las cuencas hidrográficas que captan el agua pluvial; las sequías son generadas por el exceso de calor emitido por el sol, lo que aumenta la temperatura del lugar, evaporando el agua que en las cuencas se encuentra como se observa en la figura 4, y en ocasiones llega a afectar la atmosfera, evitando la formación de nubes que generan las lluvias.

Figura 4: Sequia en una cuenca superficial



Fuente: Fundación AQUAE⁶

5 Consultar en: <https://www.fundacionaquae.org/sequia-en-espana/>

6 Recuperado de: <https://www.fundacionaquae.org/sequia-en-espana/>

3. México: Un territorio de contrastes entre inundaciones y sequías

En México al igual que otras zonas del mundo, históricamente se viven situaciones de inundaciones como sequías; por ser un territorio con varios microclimas, todo el año está expuesto a varios fenómenos hidrometeorológicos, pero para este caso en particular solo se hablará de las inundaciones y sequías.

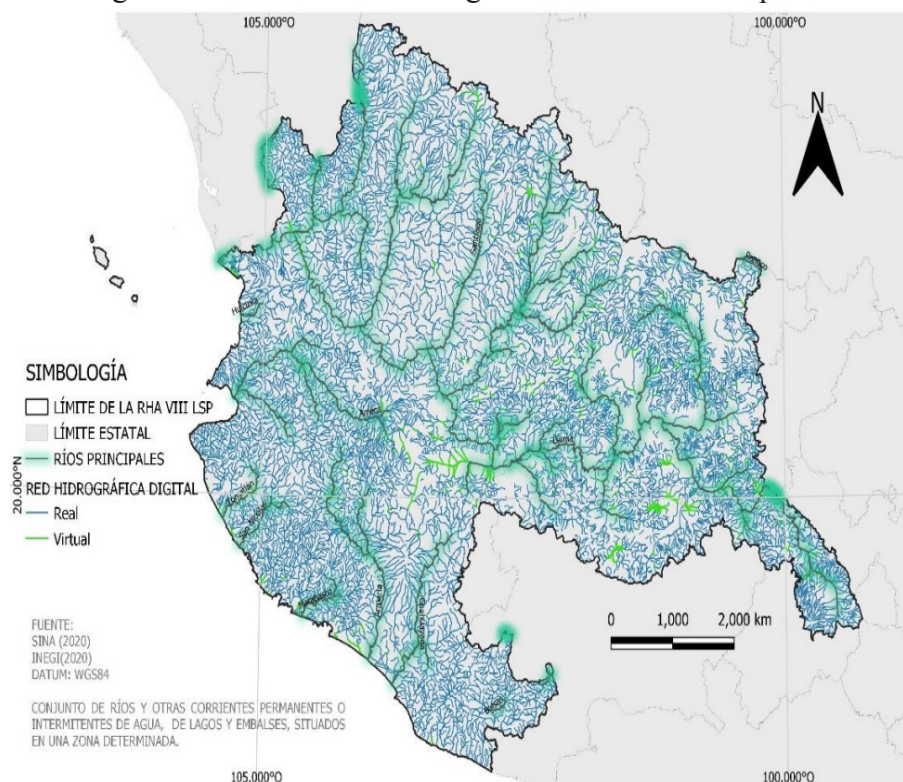
Las Naciones Unidas señalan que el año 2023 “México se calienta más rápido. Alcanzo un registro de 51.4 °C en el norte de su territorio” lo que indica que la sequía es más constante y se presente a un ritmo alarmante; lo que afecta a una superficie mayor, que incluso rebasa las fronteras de las entidades federativas. Para el caso de las inundaciones en la nación mexicana según El Economista (2024) el año 2023 sufrió grandes afectaciones, principalmente por el huracán Otis, que generó pérdidas económicas por 14, 208 millones de euros

3.1 México y su división hídrica: lugar de inundaciones

La topografía del territorio nacional es variada e irregular, por ende se pueden localizar cuencas de diferentes proporciones y escalas, hablando territorialmente; la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) ha dividido al territorio mexicano en 13 regiones hidrológicas (según el Programa Nacional Hídrico 2020-2024)⁷ debido a la topografía del lugar; el fundamento de esta institución son las delimitaciones naturales del lugar, ya que cada una de ellas es capaz de acaparar el agua pluvial en su interior, independientemente si es encauzada al mar; estas cuencas no comparten el agua superficial porque la misma topografía lo impide. alguna de las regiones hídricas nacionales es: Balsa (IV); Aguas del valle de México (XIII); y, Lerma-Santiago-Pacífico (VIII), por mencionar algunas; cada una de ellas con sus respectivas subdivisiones, por ejemplo, para la región VIII, según dicho programa “Está integrada por 332 municipios: 11 en Aguascalientes, 10 en Colima, 44 en Guanajuato, 122 en el Estado de Jalisco, 30 en el Estado de México, 68 en Michoacán, 13 en Nayarit, 4 en Querétaro y 30 en Zacatecas. Hidrológicamente, la Región Hidrológica está conformada por 93 subcuencas hidrográficas (Anexos 1, 2 y 3), cuyas superficies suman un total de 182 460.14 kilómetros cuadrados, y se agrupan en tres importantes Unidades de Planeación: Lerma Chapala (57 580 km²), Río Santiago (76 720 km²) y Costa Pacífico Centro (48 160 km²). Esta cuenca hidrologica contiene en su interior diversos ríos de distintos órdenes (ver figura 5), los cuales transportan por gravedad el agua a las partes más bajas y si algunas partes fueron modificadas por la acción del hombre tienden a sufrir eventos desfavorables como las inundaciones.

7 Consultado el día 05-06-2023, de: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5609188&fecha=30/12/2020#gsc.tab=0

Figura 5. Red hidrográfica de la cuenca hidrológica VIII – Lerma-Chapala-Pacífico



Fuente: Programa Hídrico Regional 2021-2024 (Región Hidrológico-Administrativa VIII Lerma Santiago Pacífico)⁸

La división de la cuenca VIII Lerma-Chapala-Pacífico ha permitido generar subdivisiones, algunos autores e incluso la misma CONAGUA a subdividido al río Lerma en alto, mediano y bajo; esta división del territorio lacustre facilita la comprensión local de la cuenca, para su estudio, para generar estrategias, para atender problemas hídricos, entre otros.

Los hechos y modificaciones que realiza el hombre a las cuencas se han suscitado eventos catastróficos en el territorio por las inundaciones, que se dan principalmente durante la temporada de huracanes, de acuerdo a la CONAGUA inician comúnmente de Mayo-Noviembre de cada año, donde la mayoría del territorio nacional recibe agua por el fenómeno de precipitación pluvial, lo que favorece al aumento de agua en los cuerpo contenedores de la misma, generando inundaciones, como ocurrió en el Oriente de la Ciudad de México y la zona del Valle de México en diferentes fechas⁹, debido a fuertes lluvias que cayeron en corto tiempo, el hombre al haber transformado las superficies terrestres por asfaltos el agua se acumuló en las partes más bajas como inundación, lo que afecto a todo lo que se encontraba a nivel de agua.

8 Recuperado de: https://files.conagua.gob.mx/conagua/generico/PNH/PHR_2021-2024_RHA_VIII_LSP.pdf

9 Consultado el día 09-06-2023, de: <https://www.elsoldemexico.com.mx/metropoli/fuerte-lluvia-colapsa-distintas-zonas-del-valle-de-mexico-10187969.html>

3.2 México en tiempos recientes: un país acechado por la sequía

La nación mexicana es un lugar con diferentes climas y regiones, en cada una de ellas se generan microclimas que dependen directamente del medio ambiente, esta variación provoca en el sitio modificaciones en el contexto. Según la AQUAE desde 1941 hasta el 2011 no registraba su peor sequía, afectando a más de 15 entidades federativas, además sufrieron afectaciones según el mismo autor, grandes cosechas y miles de animales vacunos perecieron. El Banco de México (BM, 2022) señaló en el 2022 México sufre anualmente tanto en la parte norte y centro este fenómeno climatológico de sequía a diversas escalas; el autor señala que son varias las causas que ocasionan este tipo de acontecimientos, como el incremento de la urbanización y la deforestación desequilibrada, por mencionar algunos casos; entre la clasificación que ha generado para el caso nacional se encuentra cuatro tipos que se pueden observar en la figura 6. Además, señala “en los últimos años, la proporción del territorio nacional afectada por sequía se ha incrementado, siendo las regiones norte y centro-norte las más susceptibles.

En fechas recientes, hacia mayo de 2018 el 7.0% de los municipios del país, distribuidos en 11 entidades federativas, presentó niveles de sequía en categoría de emergencia. Para septiembre de 2019, este número se elevó a 18.0% repartido en 18 estados, mientras que para mayo de 2021 este porcentaje fue de 35.0%, distribuido en 23 estados de la República. Asimismo, a julio de 2022, 19 entidades habían tenido al menos un municipio en estado de emergencia, siendo Coahuila, Baja California, Chihuahua, Baja California Sur y Sonora las entidades más afectadas por sequías extrema y excepcional” (p. 3). Como se puede apreciar en años recientes la sequía en la nación mexicana se ha ido incrementando a niveles cada vez más alarmantes y difíciles de mitigar.

Figura 6. Tipologías de sequía según BM (2022)

		Intensidad de sequía	Desajuste de oferta/ Disminución de demanda	Carácter de la medida
			Porcentaje	
Emergencia Sequía	D0	Anormalmente seco	10-20	Voluntaria
	D1	Sequía moderada	10-20	Voluntaria
	D2	Sequía severa	20-30	Obligatoria
	D3	Sequía extrema	30-40	Obligatoria
	D4	Sequía excepcional	50	Obligatoria

Fuente: Recuperado de BM (2022)¹⁰

¹⁰ Consultado el día 11-06-2023, de: <https://www.banxico.org.mx/publicaciones-y-prensa/informes-trimestrales/re-cuadros/%7B3A0127A1-D0C9-7D61-C9AE-E57E127FB39B%7D.pdf>

La CONAGUA y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) han publicado el pasado 5 de junio de 2023 gran parte del territorio nacional hay presencia de algún tipo de sequía; el impacto que ha generado en la vida de plantas, animales y personas ha repercutido drásticamente; este fenómeno afecta directamente la economía del sitio que lo padece. Estas dependencias de orden federal, dicen que hay varias entidades federativas que son afectadas, por mencionar algunos como Jalisco y Michoacán donde se encuentra la conurbación Briseñas-La Barca. Que decir de este 2024, en el que se han presentado hasta mayo tres olas de calor, que han superado los 35° y 40° grados, e incluso más, en diversos estados de la nación; lo que ha afectado una evaporación excepcional del agua en los cuerpos de agua superficiales, dejándolos en niveles alarmantes.

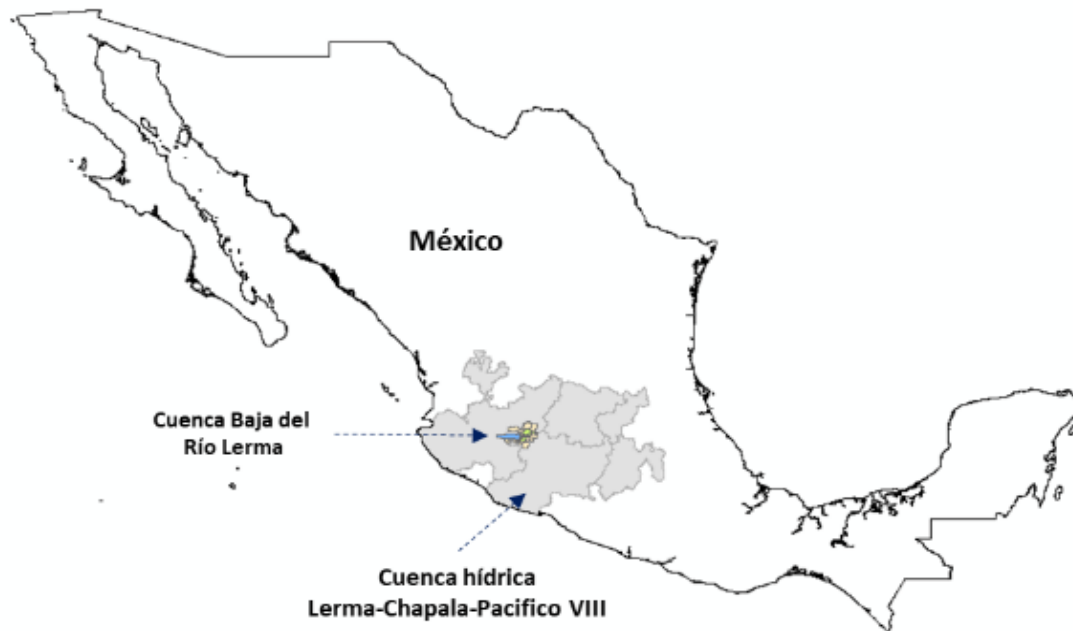
Ante lo expuesto por el BM, CONAGUA, y SMN la sequía en el territorio nacional ha cubierto cada vez más cuencas de lo que suele abarcar una inundación en sus diferentes escalas y repercute drásticamente en la vida de lo que en el área se encuentra, así como a la economía y el desarrollo del lugar.

4. Del riesgo de inundación al riesgo de crisis hídrica: Estudio de la Cuenca Baja del Río Lerma

La cuenca hídrica del Lerma-Chapala-Pacífico VIII creada por la CONAGUA alberga toda una serie de subdivisiones de la misma o mejor dicho subcuencas, en ella se puede encontrar los cuerpos lacustres del río Lerma, río Duero y la laguna de Chapala. El principal afluente es el río Lerma que recorre 5 importantes estados de la república mexicana, como son el estado de México, Querétaro, Guanajuato, Jalisco y Michoacán; para el caso del río Duero solo se encuentra en el estado de Michoacán; y la laguna de Chapala, se encuentra en dos estados mexicanos como Jalisco y Michoacán, la cual recibe el caudal de ambos ríos (CONAGUA, 2020).

Un elemento clave para comprender la transformación del territorio es el análisis de los cambios de uso del agua en los ríos que derivan sus aguas al río Lerma y lago de Chapala. La importancia de cada uno de los ríos es variable, lo que sí se puede presumir es que todos alimentan la laguna de Chapala con sus aguas superficiales por lo notable que resulta y la topografía del lugar. El caudal es considerable que se obtiene de las lluvias que comúnmente caen en la temporada de huracanes (CONAGUA, 2022) de los meses de mayo a noviembre. Ante este fenómeno de lluvias suelen suscitarse inundaciones en los municipios periféricos a los cuerpos lacustres, como el municipio de La Barca, Jalisco y Briseñas, Michoacán. A continuación, se abordan los escenarios emergentes que han transformado la cuenca baja del río Lerma, de una región hidrológica de continuas inundaciones a una región actualmente en crisis ambiental debido a la escasez de agua.

Figura 7. Ubicación geográfica de la cuenca hídrica Lerma-Chapala-Pacífico VIII en consideración a los estados que menciona la CONAGUA; más la cuenca baja del río Lerma como área de estudio



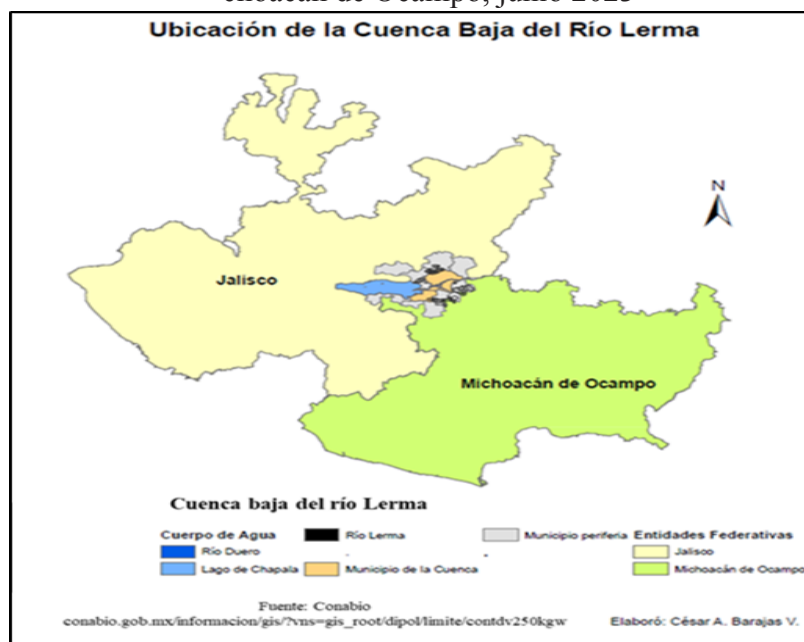
Fuente: Elaboración propia con datos de CONABIO y CONAGUA; febrero, 2024.

La cuenca baja del río Lerma es el área de estudio, conformada por los ríos Lerma y río Duero. La delimitación se hizo respondiendo a la intersección que se da entre el río Lerma (de segundo orden) con el río Duero (de primer orden) para desembocar en la laguna de Chapala, considerando la propuesta en el método de Horton-Strahler como se muestra en la figura 2, en consideración al territorio de los municipios de La Barca, Jalisco, y Briseñas de Michoacán de Ocampo, ver figura 7.

4.1 De las inundaciones a la crisis hídrica en la Cuenca Baja del Río Lerma y Duero: Una mirada al territorio conurbado de Briseñas-La Barca

Históricamente las inundaciones y las sequías han ocurrido a lo largo y ancho de la cuenca baja del río Lerma. Estos fenómenos naturales han impactado desde las inundaciones provocadas por la lluvia o el aumento del caudal de dichos ríos, lo que beneficia la recarga de mantos friáticos y de la laguna de Chapala; mientras que la sequía es todo lo contrario, evapora el agua superficial y afecta a la vida del lugar, como las plantas, animales y al ser humano, además de repercutir en toda una serie de procesos que se desarrollan día a día, así como al medio ambiente.

Figura 8. Ubicación geográfica de la cuenca baja del río Lerma en los estados de Jalisco y Michoacán de Ocampo, junio 2023



Fuente: Elaboración propia con datos de CONABIO.

En años recientes, la cuenca de estudio ha sido afectada duramente por sequías a lo largo de su historia. En pleno junio 2023 ha sido azotada por tres fuertes olas de calor en plena temporada de lluvias. En ese sentido, se procede a realizar un análisis del sitio de la baja cuenca del río Lerma, que abarca, a manera de interés la conurbación Briseñas-La Barca (ver figura 8 y 9), iniciando por las inundaciones y continuando con las sequías.

Figura 9. Cuenca baja del río Lerma conformada por los ríos, bajo Lerma, río Duero para desembocar en la laguna de Chapala



Fuente: elaboración propia con Google Earth

La cuenca baja del río Lerma ha sufrido diversas inundaciones a lo largo de su historia en diversas partes de su territorio, como las ocurridas en los años 1805, 1814, 1824, 1855, 1865, 1912 (Santiago, 1989, p.148) en algunas partes de La Barca y de Briseñas, aunque para este valdría decir que como municipio Briseñas fue constituido en 1950 por el congreso de Michoacán, ya que antes llegó a formar parte del territorio de otros municipios michoacanos.

Las inundaciones del siglo pasado registradas en la conurbación, según comentarios de habitantes afectados, son de 1956 y 1973, ver figura 8; en las inundaciones fluviales de 1956 y 1973 fueron causadas por el desbordamiento del río Lerma en la conurbación.

Figura 10. Inundaciones provocadas por el río Lerma en la ciudad de La Barca, Jalisco



Fuente: Recuperadas de La Barca Jalisco Fotogalería; 2024

Las inundaciones en lo rural en la zona de estudio, Del Castillo (2018)¹¹ reportero de noticiero Milenio durante una visita al municipio de La Barca recupero las siguientes palabras de algunos habitantes “es un desastre que se repite. [...] en la zona de La Barca hay por lo menos 600 ha según nos lo dicen los propios productores; y no quieren que les rescaten la vida, pero si al menos recuperar lo invertido, que ronda 25 mil pesos por ha; soportar ya dos años de quebrantos es muy complicado para su economía” (Milenio, 2018) haciendo alusión a las inundaciones. En 600 hectáreas (ha) representa un porcentaje importante en cuanto a la superficie terrestre del área de estudio.

En el caso de Briseñas también le ha tocado sufrir los estragos de las inundaciones a lo largo de la historia, recordar que este territorio hoy ocupado por el hombre en algún tiempo formó parte de la laguna de Chapala, diversos autores dan cuenta de ello, tal vez no de forma textual, pero si gráficamente, como Aguilar (2012: 97) ver figura 11. Dichos autores mencionan que el territorio de Bri-

11 Consultado en: <https://www.milenio.com/politica/comunidad/2-500-siniestradas-inundaciones-zula-lerma>

señas y Venustiano Carranza eran parte de la laguna de Chapala y por eso (la conformación de su topografía) tiene con mayor frecuencia a sufrir inundaciones algunas partes de la zona de estudio.

Figura 11. Ubicación geográfica de la Ciénega de Chapala, área secada en el siglo XIX por mandato de Porfirio Díaz para formar parte del territorio agrícola



Fuente: Recuperada de Teodoro Aguilar O. (2024).

Inundaciones causadas en lo rural del lado michoacano, algunas recientes ocurridas en el 2019 que afectaron gran cantidad de hectáreas, ocasionaron que los propietarios solicitaron el apoyo económico al gobernador de Michoacán, para recibirlo en Briseñas, Michoacán, el día 07 de noviembre de 2019. Además, en el 2021 volvieron a sufrir inundaciones que llegó a afectar “Más de 2 mil hectáreas de cultivos sufrieron daños severos por inundaciones en siete ejidos de este municipio, lugar hasta donde acudió Rubén Medina Niño, titular de la Secretaría de Desarrollo Rural y Agroalimentario (Sedrua), para constatar el grado de afectaciones en parcelas de maíz, sorgo, caña, jitomate, tomate, camote, alfalfa y sandía por citar algunos” (con lupa, 2021)¹². La precipitación anual que llega a registrarse en algunas zonas de la cuenca es de 800 mm aproximadamente (CONAGUA).

Las inundaciones además de causar daños a la agricultura, causan daños a la vida de las personas, y en mucho de los casos el agua potable que utilizan día a día, suele contaminarse, al introducirse en los pozos que abastecen a la población. Ver figura 12. La figura 13 muestra un panorama de inundaciones que se suscitaron tanto en el siglo pasado XX y XXI, afectando

¹² Recuperado de: <https://conlupa.com.mx/noticias/michoacan/supervisa-sedrua-danos-por-inundaciones-en-cultivos-de-brisenas/>

grandes extensiones de territorio conurbado, tanto en las zonas urbanas como en las zonas rurales, destruyendo viviendas y siembras, las cuales representaron pérdidas importantes para los habitantes locales.

Figura 12. De las inundaciones a la sequía en la cuenca baja del río Lerma



Fuente: Elaboración propia con datos de: ESDIG (SEMARNAT), La Barca Fotogalería y fotografías propias tomadas en campo.

4.2 Las sequías en la cuenca baja del río Lerma: una propuesta para entender el fenómeno climatológico reciente

Las sequías por su parte, han representado un hecho constante en los últimos años en la cuenca baja del río Lerma. Este fenómeno climatológico, caracterizado principalmente por la ausencia de agua, en cualquiera de sus estados, ha representado una amenaza constante al medio ambiente y al ser humanos a niveles alarmante. Tan solo en la parte norte de la cuenca que pertenece al municipio de La Barca para el año 2015 contaba con 441 pozos profundos, de los que en su división de uso, según la Comisión Estatal de Agua del Estado de Jalisco (CEA-EJ) el agua subterránea 372 eran para uso agrícola, 36 para uso urbano, entre otros; la extracción del agua subterránea en la zona norte ha generado un déficit alarmante en el lugar, según el CEA-EJ

(2015) esta área registro un déficit de agua subterránea de -39.175 Mm³ por año, lo que repercute en la extracción del líquido para atender la demanda de lo rural y lo urbano. Para la parte sur de la cuenca de igual manera se cuenta con un déficit, aunque inferior en comparación con la parte norte pero importante, ya que son 23.407 m³ anuales (CONAGUA, 2020); con lo que se puede resumir que el agua subterránea se está terminando y no puede atender las necesidades del exterior por causa de la sequía.

Las sequias en el lugar han afectado la vida misma de los habitantes, animales, plantas y en general al medio ambiente; al no registrar lluvia en la temporada demuestra que el clima ha cambiado y por ende la temperatura, producto del calor, tiende a un aumento, efecto que repercute de manera negativa. Según la CONAGUA en el lugar existe comúnmente una temperatura promedio anual de 23.5 °c. Pero en olas de calor llega a superar los 35 °c, provocando la evaporación del agua de los cuerpos hídricos superficiales, que se encuentran en el lugar, y ello, provoca, para quienes utilizar este elemento vital, la extracción del líquido del subsuelo, debido a una mayor extracción para atender la demanda de las necesidades como uso agrícola, uso humano, uso animal, uso de riego a la vegetación, entre otros usos; lo que provoca que el déficit aumente considerablemente.

En la parte norte de la cuenca en el año 2022 según Instituto de Información Estadística y geográfica de Jalisco (IIEG) presento una tipología de sequía excepcional, es decir, se tuvo la ausencia de agua en la superficie de manera natural. Qué decir del año 2023 para la cuenca, en el año se presentaron tres olas de calor y la ausencia de lluvia aún está presente en la mera temporada hídrica para el mes de julio. Según catalogada por la CONAGUA la sequía por su naturaleza afecta más a la cuenca que las inundaciones, ya que estas últimas están limitadas al inundar áreas bajas, mientras que las sequias no tienen limitantes geográficas o topográficas como las tienen las inundaciones; en primer lugar porque las sequias son producto del aumento de la temperatura, y las inundaciones provocadas pluvialmente o fluvialmente no son constantes y son por menor tiempo; por lo que la cuenca tiende a sufrir más por las sequias que por las inundaciones, tanto en el territorio urbano como en lo rural; ver figura 13 representa un cuadro fotográfico del río Lerma y Duero del año 2023 y 2024 (Abril), tomadas del puente que conecta La Barca-Paso de Hidalgo y del bordo del río Duero (conocido localmente como río Zamorano) que son afectados por las sequias tanto del año 2023 como de lo que de este temporal de estiaje.

Las sequias que se presentan en la conurbación, en los últimos años, han ocasionado que algunos asentamientos humanos se vean afectados por la falta de agua potable durante el temporal de estiaje, afectando su calidad de vida y los ecosistemas del lugar; la temporada de estiaje para el 2024 los meses de marzo a mayo han sido críticos (Gobierno de Jalisco)

Figura 13: Tanto el río Lerma como el río Duero, en años recientes, su caudal hídrico se ha visto afectado por las sequías que se presentan aun en temporada de lluvias



Fuente: Elaboración propia (2023 y 2024)

El aumento y constantes sequías en la conurbación Briseñas-La Barca, en años recientes, se están presentando cambios en los sembradíos y plantaciones; los agricultores de sembrar maíz, sorgo, hortalizas, entre otras plantaciones, ahora están optando por el cambio, algunos han optado por rentar sus parcelas a empresas tequileras, para la siembra de agave; lo que provoca y agrava a un más la insuficiencia de los suelos para la filtración del agua pluvial a los mantos freáticos, ya que este tipo de plantío no permite el arado de los suelos agrícolas, generando con los años que ocupa el agave para madurar, se compacten, aunado a las sequías, como lo señala el Agrónomo Miguel Taboada como un “fenómeno de salinización”; un cambio radical que afecta, de manera directa, los suelos del lugar porque el agave no requiere de agua como la demandan las plantas de maíz, sorgo, cebada u otras plantas gramíneas que generan semillas.

5. Un análisis de las inundaciones y sequías de la cuenca baja del río Lerma desde los objetivos 6, 11, 13 y 15 de la Agenda 2030

Entendiendo los objetivos 6, 11, 13 y 15 de la Agenda 2030 los cuales están encaminados y dirigidos a lo siguiente: Objetivo 6 (Agua limpia y saneamiento); Objetivo 11 (Ciudades y comunidades sostenibles); Objetivo 13 (Acción por el clima); y, Objetivo 15 (Vida de ecosistemas terrestres); es importante analizar las inundaciones y sequías de la cuenca baja del río Lerma, lugar que ha sido objeto de estos dos fenómenos naturales en distintas temporalidades.

Desde la perspectiva del Objetivo 6 que trata de Agua limpia y saneamiento, la cuenca desde una perspectiva multifuncional, se observa que cuentan con agua superficial y subterránea, la primera en cuerpos superficiales como el río Lerma y Duero, así como pequeñas presas que en temporada de lluvias se recargan un porcentaje y en temporada de sequías carecen del vital líquido; las aguas subterráneas, debido a que las tierras son muy productivas en la cuenca baja han sido explotadas fuertemente por nueva tecnología que implementan tanto en las áreas urbanas como en las rurales,

extrayendo agua desde profundidades considerables a tal grado que han generado un déficit; el IIEG (2022) dice para el caso del municipio de La Barca, Jalisco, la mayoría del territorio presenta poca o nula disponibilidad lo que ha provocado el cambio de plantío de Maíz, Cebada, Sorgo o Trigo a Agave; además en temporada de secas (estiaje) o los meses de Febrero a Julio algunas áreas urbanas presentan escasez del vital líquido, lo que su población deja de recibirlo y se enfrenta a una situación de desabasto. De las comunidades existentes en el área de estudio todas cuentan con agua potable extraída del subsuelo y solo las cabeceras municipales como La Barca y Briseñas cuentan con plantas tratadoras, las demás comunidades desechan sus aguas a campo abierto.

El objetivo 11 enfocado a ciudades y comunidades sostenibles aplicado a la cuenca baja del río Lerma cuenta con dos ciudades cabeceras municipales que, albergan a más de 45 mil habitantes de los 76,383 habitantes que contabilizo el INEGI en el año 2020; quiere decir que más del 50% vive en ambas ciudades y el resto en comunidades rurales. De alguna u otra manera su población ha sido afectada en algunos casos por inundaciones, porque varea entre la edad de los habitantes y el sitio en el que reside. Por ejemplo, la población que se encuentra habitando más hacia el lado sur ha sufrido este fenómeno de inundación; por otra parte, la sequía ha afectado a toda la población en algún momento de su existencia como la más reciente presentada en el año 2023 que abarco principalmente el mes de julio y la carencia de poca precipitación pluvial, y para el 2024, mayo ha sido el mes con más temperatura, afectando a la cuenca baja del río Lerma.

Para el caso del Objetivo 13 referente a la Acción por el clima el parque vehicular del área de estudio ha aumentado y se observa que una gran cantidad de vehículos que rebasan más de 10 años de antigüedad, tan solo con hacer el ejercicio de observación en alguna de las calles más transitadas de la zona en horas pico entre las 8:00 y 14:00 horas se puede constatar. Así como la temporada de estiaje en la que gran cantidad de agricultores queman los residuos orgánicos que han quedado de la siembra lo que provoca un microclima encaminado al aumento de la temperatura.

El Objetivo 15 encaminado a la Vida de ecosistemas, se aprecia que la vida de ecosistemas en el lugar es y ha sido uno de los más afectados; todavía a principios de la década de 90's del siglo pasado era común ver a habitantes del lugar pescar en el río Lerma y Duero, ya a mediados aproximadamente dejó de realizarse esa práctica por los habitantes debido a la contaminación que presenta principalmente el río Lerma, estando a un vigente de pesca solo el río Duero por pescadores de la conurbación. El primero esta tan contaminado que se ha perdido esa actividad local que por años se practicaba; además, que han sido pocos los años con los que ha contado con gran caudal, cabe resaltar que aún hay algunos pescadores que realizan esta actividad en dicho cuerpo lacustre. Por otra parte, habitantes del lugar como autoridades han permitido el deterioro de algunos parques ecológicos, como el deterioro que, según habitantes del lugar, fueron autoridades las que provocaron el deterioro del parque ecológico conocido como la Eucalera que se encuentra en la localidad del Paso de Hidalgo (ver figura 12).

En cuanto a los cuatro objetivos 6, 11, 13 y 15 aplicados al análisis de la cuenca baja del río Lerma los gobiernos que conforman este espacio geográfico deben implementar acciones de prevención y restauración tanto en la construcción de la infraestructura, como en el cuidado del tipo de plantas que suelen ser sembradas en la superficie rural, porque no es lo mismo sembrar agave que sembrar maíz u otro tipo de plantas, en primer lugar porque el agave por el tiempo que debe estar

sebrado promueve que se realice la erosión de los suelos, provocando la salinidad de los mismos y esto evita que el agua pluvial o llovediza se filtre por los mimos para poder llegar al manto friático y permita la recarga de la cuenca subterránea. Por otra parte, al realizar construcciones o modificaciones en las superficies urbanas el gobierno en tiempos actuales utiliza más asfaltos que evitan la filtración del agua a los mantos friáticos, lo que provocan la concentración superficial en partes bajas de agua provocando la inundación a diferente escala, porque no suele ser lo mismo que un área transformada por asfalto se inunde a un área de tierra, ya que la primera contiene el agua hasta que sea evaporada por el calor del sol, mientras que la según un porcentaje del agua estancada tiende a filtrarse al subsuelo, ayudando a recargar los mantos friático y otro porcentaje se evapora por la acción que genera el calor del sol sobre ella. Al generares estas accione se estaría de alguna forma combatiendo la sequía, dado que en tiempo que se carece del agua en algunas de sus facetas se estaría sustrayendo del subsuelo para atender las necesidades de la población, animales, entre otros, y con ellos de alguna forma se estaría combatiendo a ambos fenómenos naturales con estas acciones de prevención y conservación mediante el uso de objetivos del desarrollo sostenible de ONU.

Reflexiones preliminares

En los países desarrollados como Estados Unidos los gobiernos suelen implementar acciones constructivas, es decir, construcciones de diques, presas, bordos, entre otras construcciones, para evitar inundaciones o que las mismas repercutan a las áreas urbanas y rurales; mientras que en los países como México, los gobiernos suelen implementar acciones de prevención, es decir, tienden a crear grupos de apoyo como las protecciones civiles desde lo federal hasta lo estatal y lo municipal, lo que repercute en el desarrollo de acciones constructivas.

Tanto las inundaciones como las sequias han estado presentes a lo largo de la historia en la cuenca baja del río Lerma de la conurbación Briseñas-La Barca.

Las inundaciones en la cuenca baja del río Lerma han traído más beneficio que daños debido a que promueven se recarguen los mantos friáticos, se creen o alimenten los cuerpos superficiales, generan un riego natural a la vegetación del lugar. Además, han sido más producto del aumento del nivel del agua de los ríos Lerma y Duero que de la precipitación pluvial, haciendo más benéfico al lugar en cuanto a clima se refiere.

Las sequias han repercutido más en las cosechas que las inundaciones, ya que estas abarcan más área que las segunda, que siempre es limitada por la topografía del lugar, mientras que la primera no tiene limitantes terrestres; y tanto el año 2023 como lo que va del 2024 la temporada de estiaje a afectado tanto a los cuerpos superficiales como a los cuerpos hídricos subterráneos, debido a la falta de agua superficial para el riego de lo agrícola y ganadero se realiza una extracción mayor del agua freática, aumentando el déficit hídrico de la conurbación.

El aumento de la industria en la cuenca baja del río Lerma pone en alerta a los gobiernos locales para la implementación de políticas públicas hídricas, que permita el continuo suministro del vital líquido para la población en general.

Se observa que los gobiernos locales no están preparados para implementar políticas públicas que contribuyan a reducir las sequias y las inundaciones en la conurbación Briseñas-La Barca. En

la planeación aplicada no se considera la Agenda 2030, las demandas de atender el cambio climático no se reflejan en sus acciones, uno de los indicios de esta falta de atención es el cambio de uso de suelo agrícola como la sustitución de plantíos de granos por el agave, que cubre cada vez más área agrícola, repercutiendo en la captación de agua pluvial hacia los mantos freáticos, los cuales, según el CEAJ, cuentan con un déficit muy importante.

Se observa que en la planeación de los gobiernos locales la Agenda 2030, en la cuenca baja del río Lerma, no es un elemento esencial de actuación.

Bibliografía

- Albores Zárate, Beatriz (1995). Tules y sirenas. El alto impacto ecológico y cultural de la industrialización en el Alto Lerma. Zinacatepec: El Colegio Mexiquense.
- Banco de México (2022). Cálculo de Índices de Exposición a la Sequía. consultado el día 22-06-2024; en: <https://www.banxico.org.mx/publicaciones-y-prensa/reportes-sobre-las-economias-regionales/recuadros/%7BC91F6A9B-BAD6-C34D-CF14-1432776EAAF9%7D.pdf> Breña. P. A., Jacobo. V. (s/f). Principios y fundamentos de la hidrología superficial. Universidad Autónoma Metropolitana.
- Campos A. D., “Crecientes y sequías”, Revista Ciencia y Desarrollo, No. 127, México, marzo/abril 1996.
- CENAPRED (2009). Inundaciones. Serie Fascículos.
- CENAPRED (2014). Sequía. Serie Fascículos.
- CONAGUA (2020). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Briseñas-Yurécuaro (1609), estado de Michoacán.
- Gobierno de Jalisco (2015). Ficha técnica hidrológica municipal
- IIEG (2022). La Barca: Diagnóstico del municipio.
- Informador (2023). La ONU anuncia nuevas ayudas a Perú ante las lluvias vinculadas a ‘El Niño’; consultado el día 22-06-2024; en: <https://www.informador.mx/internacional/El-Niño-La-ONU-anuncia-nuevas-ayudas-a-Peru-ante-las-lluvias-vinculadas-al-fenomeno-natural-20230609-0097.html>.
- Marcos Valiente, Ó., (2001). Sequía: definición, tipologías y métodos de cuantificación. *Investigaciones Geográficas (Esp)*, (26), 59-80. ONU (s-f). Las ciudades afrontan las incertidumbres del agua.
- ONU (2015). Objetivos del desarrollo sostenible; consultado en: <https://www.un.org/sustainable-development/es/biodiversity/>
- ONU (
- Santiago. S. E. (1989). La Barca su pasado reciente.
- SEMARNAT (2023). ESDIG-Mapas en línea. consultado en: <https://gisviewer.semarnat.gob.mx/geointegrador2Beta/index.html>.
- Tules y sirenas (1995). El impacto ecológico y cultural de la industrialización en el Alto Lerma.
- UNESCO, “Map of the world distribution of arid regions”, MAB. tech. Notes 7, UNESCO, Paris 1979.

- Vargas, Sergio. Mollard, Eric (2005). Los retos del agua en la cuenca Lerma-Chapala. Aportes para su estudio y discusión.
- Vega, X. (2020). Diferentes soluciones para la delimitación y codificación de cuencas superficiales cubanas. *Revista Ingeniería hidráulica y ambiental*. Vol. XLI, No. 2, May-Ago 2020, p. 75-84
- Velasco *et al.* (2005). Sequía, un problema de perspectiva y gestión. *Revista Región y sociedad*. Vol. XVII / No. 34. 2005

Ciudad y Metrópoli: aproximaciones desde el Objetivo de Desarrollo Sostenible 6. Agua limpia y saneamiento. ODS: Número 6, Agenda 2030-ONU

City and Metropolis: approaches from Sustainable Development Goal 6. Clean water and sanitation. SDG: Number 6, Agenda 2030-UN

Magdiel Gómez Muñiz^a

Resumen / Abstract

México enfrenta una crisis hídrica que es propiciada por una serie de factores. El cambio climático es uno de ellos y se hace visible en las alteraciones del temporal de lluvia agravando sequías en algunas regiones e inundando otros puntos geográficos con las consabidas repercusiones que implica para las ciudades. Entre los factores, se destaca, la incipiente política del cuidado del agua, así como, frágiles estrategias de planificación metropolitana que integran el desarrollo sustentable por medio de actividades propicias para la renovación urbana. Cambio climático y estrategias de planificación metropolitana serán los ejes de un planteamiento que se vuelve fundamental para la construcción de la Nueva Agenda Urbana 2030 y de igual forma, una oportunidad para hacer cumplir uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible intitulado: Agua limpia y saneamiento que se integra por seis grandes metas focalizadas a partir de lograr un acceso universal y equitativo al agua potable para todos los que habitamos el planeta tierra. México, sabedor de esta agenda, se suma a la tarea de reforzar las condiciones para lograr unir las variables en una ecuación integral que privilegie a las generaciones a largo plazo. Metrópoli-agua, son los factores con los cuales se va a construir la próxima gobernanza metropolitana de un mundo sin fronteras postdemocrático. Para lograr lo anterior, se debe transitar de la monofuncionalidad hacia la nueva composición de territorios bio-diversos, provocando la reacción de autoridades y sociedad civil para cocrear una agenda resiliente que permita reorganizar un desarrollo integral con el fin de alcanzar un óptimo ecosistema de bienestar social y calidad de vida.

Palabras clave: Agua limpia, gobernanza, metrópoli, políticas públicas, y ODS.

^a Dr. Magdiel Gómez Muñiz. Profesor Investigador Titular de la Benemérita Universidad de Guadalajara. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores -SNII/CONAHCYT Nivel 1. Perfil PRODEP. Especialista en Agenda 2030. Objetivos de Desarrollo Sostenible-ONU. Miembro del Cuerpo Académico Consolidado: UDG-CA-562Educación, Políticas Públicas y Desarrollo Regional. Email: magdiel.gomez@cuci.udg.mx ORCID: 0000-0002-0709-3460.

Mexico faces a water crisis that is caused by a series of factors. Climate change is one of them and is visible in the alterations of the rainy season, aggravating droughts in some regions and flooding other geographical points with the well-known repercussions that it implies for cities. Among the factors, the incipient water care policy stands out, as well as fragile metropolitan planning strategies that integrate sustainable development through activities conducive to urban renewal. Climate change and metropolitan planning strategies will be the axes of an approach that becomes fundamental for the construction of the New Urban Agenda 2030 and, likewise, an opportunity to enforce one of the Sustainable Development Goals entitled: Clean water and sanitation that It is made up of six major goals focused on achieving universal and equitable access to drinking water for all of us who inhabit planet Earth. Mexico, aware of this agenda, joins the task of strengthening the conditions to unite the variables in a comprehensive equation that privileges generations in the long term. Metropolis-water are the factors with which the next metropolitan governance of a post-democratic borderless world will be built. To achieve the above, we must move from monofunctionality to the new composition of biodiverse territories, provoking the reaction of authorities and civil society to co-create a resilient agenda that allows re-organizing comprehensive development in order to achieve an optimal ecosystem of social well-being and quality of life.

Keywords: clean water, governance, metrópolis, public policies, and SDGs.

Antecedentes:

La disminución de la disponibilidad de agua es uno de los problemas más severos a los que se enfrentan los territorios que integran la República Mexicana, desde una lógica georreferencial se puede sostener que de las 92 nuevas delimitaciones en donde habita más del 60% de la población nacional.

Se subraya que las aproximaciones semánticas van de la mano con el nuevo rol que potencializa el trabajo dual entre gobierno y gobernados, lo que vuelve indispensable que se definan las siguientes territorialidades:

Zona metropolitana: conjunto de municipios cuya relación se basa en un alto grado de integración física o funcional intermunicipal o interestatal y la población total de los municipios que la conforman es de 200 mil habitantes o más. La localidad urbana o conurbación que da origen a la zona metropolitana cuenta con 100 mil habitantes o más. Metrópoli municipal: municipio que no forma parte de una zona metropolitana, sin embargo, cuenta con una población total de 300 mil habitantes o más y es económica y políticamente relevante para el estado. La localidad urbana que da origen a la metrópoli municipal cuenta con 200 mil habitantes o más.

Zona conurbada: conjunto de municipios cuya relación se basa en un alto grado de integración física o funcional intermunicipal o interestatal. La localidad urbana o conurbación que da origen a la zona conurbada tiene entre 50 mil y 100 mil habitantes. (SEDATU, 2020, p.43).

Cuadro 1. Composición de las Metrópolis en México

Zonas metropolitanas	Metrópolis municipales	Zonas conurbadas
48	22	22
Total de Municipios		
345 municipios de los cuales 237 son centrales y 108 exteriores	22 municipios	54 municipios de los cuales 36 son centrales y 18 exteriores
92 zonas metropolitanas conformadas por 421 municipios		

Fuente: elaboración propia.

Lo anterior, favorece la validación de operaciones en busca vectores de ciudad que permitan comprender las lógicas de actividades económicas, sociales y políticas del siglo XXI y a su vez, poner énfasis sobre el hecho de una implementación de la Nueva Agenda Urbana 2030 y los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Organización de las Naciones Unidas, a través del Programa ONU-Hábitat.

Para la presente investigación, el ODS número 6 intitulado *Agua limpia y Saneamiento*, al momento de trasladarse en estrategias de planificación metropolitana, fomenta a que los diversos componentes patrimoniales, institucionales e inversiones gubernamentales adquieran un polo supra-soberano al comprender el problema hídrico desde enfoques regiones capaces de hacer frente al desarrollo integral equilibrado para hacer viable la vida en las ciudades.

Para comprender la dimensión del ODS-6 se vuelve imperante advertir cómo se constituye este objetivo, a saber:

Objetivo 6. Lograr la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos.

Metas del Objetivo:

6.1. De aquí a 2030, lograr el acceso universal y equitativo al agua potable a un precio asequible para todos.

6.2. De aquí a 2030, lograr el acceso a servicios de saneamiento e higiene adecuados y equitativos para todos y poner fin a la defecación al aire libre, prestando especial atención a las necesidades de las mujeres y las niñas y las personas en situaciones de vulnerabilidad.

6.3. De aquí a 2030, mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial.

6.4. De aquí a 2030, aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua y reducir considerablemente el número de personas que sufren falta de agua.

6.5. De aquí a 2030, implementar la gestión integrada de los recursos hídricos a todos

los niveles, incluso mediante la cooperación transfronteriza, según proceda.

6.6. De aquí a 2030, proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua, incluidos los bosques, las montañas, los humedales, los ríos, los acuíferos y los lagos.

6.a. De aquí a 2030, ampliar la cooperación internacional y el apoyo prestado a los países en desarrollo para la creación de capacidad en actividades y programas relativos al agua y el saneamiento, como los de captación de agua, desalinización, uso eficiente de los recursos hídricos, tratamiento de aguas residuales, reciclado y tecnologías de reutilización.

6.b. Apoyar y fortalecer la participación de las comunidades locales en la mejora de la gestión del agua y el saneamiento”. (ODS, 2020).

Pese a que se ha hecho la declaratoria de promocionar y acelerar el capítulo de los recursos hídricos, existen asignaturas pendientes relacionadas con factores exógenos como el calentamiento global y el deterioro de la capa de ozono, pero también, factores endógenos relacionados con el comportamiento social inadecuado que fomenta el desperdicio, la sobre explotación de los mantos freáticos y la contaminación de los vasos lacustres. Ante tal escenario es importante destacar que, Domínguez, J., y López, C. (2023) en su obra intitulada “Agua y ciudades” destacan que el agua y las ciudades son “una preocupación obligada en nuestros tiempos”. Y que, desde más de una década, el desafío está en encontrar el equilibrio entre la gestión del agua y el derecho humano al vital líquido.

La introducción de los ODS, con las ciudades y los desafíos de alcanzar agua limpia para todos en tiempos de incertidumbre incentivan a mitigar la magnitud del problema que ya tiene varios meses que alcanzó la etapa de seguridad nacional: el día cero no tiene forma de postergar su llegada.

Desarrollo:

“La ciudad que está por venir lleva, en ella, una mecánica formidable, un potente toro, una fábrica de máquinas exactas e innumerables, un tifón domesticado”.
Corbusier (2018)

Desde distintas visiones logran dibujar lo que, para muchos decisores e impulsores de política pública, se está invisibilizado. No se trata solo del consumo doméstico del agua, tampoco se reduce a una política de la prevención, en cita directa sostienen que: “la gestión urbana del agua debe tener una visión estratégica de seguridad humana, o, incluso de seguridad nacional, e implicar procesos más allá del sector agua y aproximarse a un enfoque funcional y diferente a la delimitación territorial político-administrativa, ya sea por región, por cuenta o por zona metropolitana”. (Domínguez y López, 2023, p. 31). Situación que ni México ni América Latina logran cumplimentar desde una agenda intermunicipal para proveer los servicios públicos del vital líquido.

Existen casos tangibles de fenómenos de crisis hídrica en entidades federativas de México como lo son Monterrey (Nuevo León), Zacatecas (Zacatecas), San Luis Potosí (San Luis Potosí), Aguascalientes (Aguascalientes) y Guanajuato (León), todos los territorios mencionados padecieron los

primeros fenómenos de seguridad hídrica que refiere a los riesgos e impactos que tiene la vulnerabilidad desde una dimensión globalizadora de gestión e incorporación de saneamientos de agua integrales. Las ciudades señaladas empezaron con una sequía extrema o excepcional según los estudios realizados por la Comisión Nacional del Agua (Conagua, 2023).

Si a la escasez de agua se suman la contaminación y los cambios en el uso del suelo, la situación se agrava significativamente. En menos de un lustro, las 32 entidades federativas de México podrían ser catalogadas como zonas de crisis hídrica permanente, lo que conlleva enormes desafíos debido al desabasto del vital líquido. Las alarmas están encendidas, y los fenómenos hidrometeorológicos extremos, como sequías radicales e inundaciones severas, solo empeoran la situación. En este contexto, los gobiernos locales de las cinco mesorregiones (Centro-País, Sur-Sureste, Centro-Occidente, Noroeste y Noreste) deben ser más asertivos en sus respuestas. Utilizando nuevas tecnologías, es crucial garantizar la disponibilidad del agua y mejorar los procesos de gestión. Los organismos operadores deben fomentar que todas las ciudades desarrollen capacidades y recursos para una gestión eficiente del agua. Además, es esencial que los entornos conurbados adopten prácticas de conservación y economías de escala con un enfoque en la agenda verde, asegurando así una gestión sostenible y equitativa del recurso hídrico.

Las Regiones hidrológicas de México Desde una perspectiva técnica y de gestión, es crucial adoptar enfoques integrados que consideren la variabilidad y las particularidades de cada región. La implementación de modelos hidrológicos avanzados, sistemas de monitoreo en tiempo real y políticas adaptativas puede mejorar significativamente la gestión de los recursos hídricos. Además, la cooperación entre las autoridades federales, estatales y locales, así como la participación de las comunidades, es esencial para desarrollar estrategias efectivas de conservación y uso sostenible del agua.

Cuadro 2. XIII Regiones hidrológicas administrativas

I. Península de Baja California.	IV. Balsas	VII. Cuencas Centrales del Norte	X. Golfo Centro
II. Noreste	V. Pacífico Sur	VIII. Lerma Santiago Pacífico	XI. Frontera Sur
III. Pacífico Norte	VI. Río Bravo	IX. Golfo Norte	XII. Península de Yucatán
			XIII. Aguas del Valle de México

Fuente: elaboración propia con información de Conagua (2018a).

La educación y la sensibilización pública también juegan un papel crucial en promover prácticas responsables y en fomentar una cultura de cuidado y respeto por los recursos hídricos, pero hay mucha distancia entre la realidad y la teoría, debido a que la gestión de las 13 regiones hidrológicas de México requiere un enfoque especializado y multidisciplinario que integre ciencia, tecnología, política y participación comunitaria. Y en el lenguaje de orden

federal, solo los municipios son capaces de llevar una comprensión profunda y una acción coordinada se puede asegurar la sostenibilidad del agua en el país, pero que el mismo artículo 115 constitucional sesga la garantía de transversalidad para garantizar el bienestar de las generaciones a partir de la puesta en marcha de un gobierno metropolitano que rebase el escenario de la fragmentación y los muchos Méxicos que existen en el territorio nacional.

Hipótesis

Si bien es cierto que la gestión de políticas hídricas y su cuidado no logran sancionar a quien contamina, cada vez se está más cerca de impulsar una sanción verde que pague quien más dañe al ecosistema, que de entrada no se debe dañar. A la luz de las diferentes agendas o programas que tendrán que debatir los nuevos gobernantes en México están cinco hipótesis funcionales para hacer frente al problema global de seguridad ontológica en el eje de seguridad nacional:

- a) El garantizar el acceso al agua a las zonas de atención prioritarias como una política de salud para promover seguridad generacional.
- b) Tributar en razón de metro cúbico consumido por usuario. Uso doméstico e industrial tendrán que replantear las tareas de uso, goce y disfrute del vital líquido.
- c) Incorporar recursos públicos para la mejora de las redes de agua potable y alcantarillado acorde a las nuevas comunidades asentadas en los territorios verticales urbanos y ruralidades semidesarrolladas.
- d) El re-uso del agua tratada será una de las principales labores para ampliar accesos y consumos seguros.
- e) Cocreación de agendas de corresponsabilidad donde se estimule un espíritu social y solidario del consumo.

Solo así, se podrá promover, a partir de referentes empíricos las hipótesis como una estrategia que modifique patrones de comportamiento. Sin agua se desataría una nueva pandemia en razón de la contaminación de los ecosistemas.

Variables

Cuerpo normativo de las Zonas Metropolitanas (cualitativa) que aborda tres aspectos en la clasificación de los territorios a partir de las colindancias y densidad poblacional para dimensionar nuevas unidades administrativas que edifiquen la expansión urbana desde perspectivas de desarrollo sostenible y sustentable.

Metodología transversal-multidisciplinar (cualitativa) a partir de los procesos diacrónicos del Programa Hábitat de las Naciones Unidas (ODS) para el desarrollo integral congruente a los derechos humanos y la preservación de ecosistemas sanos para el desarrollo transgeneracional.

Objetivo

Analizar el fenómeno hídrico desde una orientación metropolitana a partir de enfoques extraídos del Programa ONU-Hábitat (ODS 6) como respuesta a una problemática del agua limpia y saneamiento para los que pueblan una ciudad. Esto facilitará comprender la condición a través de la cual el vital líquido se vuelve el epicentro del bienestar y calidad de vida.

Metodología

Desde la investigación cualitativa, este trabajo se desarrolla, especialmente, al incorporar la relación entre la ciudad y el agua, que permite elevar el debate ontológico, adaptarse a los contextos específicos y a la evolución de la información, proporcionando una visión holística y contextualizada del tema de estudio. Esta metodología desde la investigación documental, es particularmente útil para explorar áreas donde se requiere una comprensión profunda y matizada de los comportamientos humanos y las interacciones sociales en entornos urbanos. Al analizar cómo las comunidades urbanas interactúan con sus recursos hídricos, se pueden desarrollar teorías fundamentadas y generar nuevas hipótesis que aborden los desafíos y oportunidades únicos que surgen en la gestión del agua en contextos donde confluye la mayoría de las personas en los diferentes puntos geográficos.

Lecciones aprendidas

Siguiendo la idea de Castells (2008), “el considerar a la ciudad como la proyección de la sociedad en el espacio es, al mismo tiempo, un punto de partida indispensable y una afirmación demasiado elemental”. En voz de Domínguez y López (2023), la seguridad hídrica consiste en tener lo siguiente:

1. Disponibilidad de agua en cantidad y calidad para abastecimiento humano, diversos usos, protección de los ecosistemas y producción.
2. Capacidad institucional, financiera y de infraestructura para acceder y aprovechar el agua de forma sustentable.
3. Un nivel de riesgo aceptable para la población, el medio ambiente y la economía que se ven afectados por la inestabilidad de los recursos hídricos. (Domínguez, 2023, p. 43).

Discusión

Nadie dimensiona cómo serán los escenarios de un mundo sin agua, el desplome del mundo que se conoce en este siglo XXI, incita a que la discusión sea bipolar y que las brechas de desigualdad se amplíen en un desarrollo sostenible y sustentable (solo para unos cuantos). La multipolaridad, a partir de las supra-soberanías de la globalización se hará acompañar con una creciente atomización de las regiones. La planificación del mundo para la próxima década invita a realizar un viraje hacia una reingeniería de políticas sociales que provoquen construir mayorías sólidas desde una

gran agenda verde. Las metrópolis se deben reconstruir desde una filosofía de cuidado al medio ambiente, sumado a competir por un galardón que incentive a roles de inclusión social y solidaria.

Ante tales escenarios, hay posibilidades que se estandaricen índices de confianza interpersonal e institucional a partir de un nuevo contrato social. La propuesta en una dimensión espacial es comprender que se vuelve indispensable que las Relaciones Intergubernamentales (RIG's) se articulen debido a que se tiene una ley general de aguas que difícilmente se cumple debido a las complejidades e interpretaciones de los diferentes órdenes de gobierno, que con la interseccionalidad jurídica provoca ineficiencia en el manejo del vital líquido. Hasta que se unifiquen criterios de responsabilidad, hasta entonces habrá nuevos episodios a considerar ante la posibilidad de un mejor futuro sin crisis hídrica.

Parece, entonces, que lo relacionado a las políticas de ciudad y sus dinámicas territoriales tienden a impulsar proyectos bajo criterios lejanos a la rigurosidad metodológica y las necesidades de la población; por ejemplo, los desarrolladores inmobiliarios edifican -frecuentemente- sobre zonas de amortiguamiento sin el objetivo de proteger el medio ambiente. Y lo más crítico es que los proyectos de traza de ciudad erosionan las fronteras con las que se pudiese garantizar el acceso al agua. No es lo mismo dotar de agua a las zonas periféricas de los anillos urbanos ni tampoco construir protectorados colmados de privilegios. La etiqueta de los derechos humanos para el agua está condicionada a un desarrollo simbólico desde los principios conocidos como 5P. donde la gente, la prosperidad, y el planeta, la paz y el compañerismo son los vectores del sector social, económico y medio ambiental.

No hay duda que con la compatibilidad entre la Agenda 2030-ODS/6-Ciudades se obedecerá al elemento de derechos humanos y el realismo jurídico que culmine en proceso que produzcan más certezas que dudas. Basta advertir que la única receta para disolver las ilegalidades urbanas y medioambientales es la intervención con políticas públicas y agendas institucionales que califiquen el espacio con un sentido de respeto pleno a los vocacionamientos de las regiones y sobre todo con los criterios que correspondan a comprender que las garantías de un individuo son las garantías de todos para conseguir modalidades de acción sostenible de cara al 2030. Pero entre compatibilidades y crisis, el sistema político obedece a la lógica de afrontar el fenómeno hídrico como uno de los desafíos más apremiantes de las metrópolis contemporáneas. En ciudades densamente pobladas, la demanda de agua supera con creces la capacidad de suministro, exacerbada por el cambio climático, la urbanización descontrolada y la contaminación de las fuentes hídricas. En una sociedad heterogénea, donde coexisten diversos estratos sociales, las disparidades en el acceso al agua son aún más pronunciadas. Las zonas marginadas a menudo enfrentan cortes de suministro prolongados, mientras que las áreas más privilegiadas mantienen acceso continuo, generando tensiones sociales y conflictos. La escasez de agua no solo afecta la vida diaria de los ciudadanos, sino que también tiene repercusiones económicas, sanitarias y ambientales.

En medio de esta crisis, los padecimientos de la metrópoli son múltiples y variados. Los hospitales enfrentan dificultades para mantener la higiene básica y tratar a los pacientes, las industrias que dependen del agua para sus procesos productivos ven reducida su capacidad operativa, y los hogares se ven forzados a racionar su consumo, afectando la calidad de vida. Las enfermedades relacionadas con la falta de acceso a agua potable y saneamiento adecuado proliferan, impactando

de manera desproporcionada a los más vulnerables. Las mujeres y niñas, tradicionalmente responsables de la recolección de agua en muchas culturas, sufren el doble peso de la escasez, debiendo recorrer largas distancias en busca de fuentes alternativas. Afrontar los retos de la crisis hídrica en sociedades heterogéneas requiere un enfoque multifacético e inclusivo. Las políticas públicas deben centrarse en la gestión sostenible de los recursos hídricos, incluyendo la mejora de la infraestructura de distribución y la implementación de tecnologías de reutilización y desalinización. Es crucial fomentar la cooperación entre sectores y niveles de gobierno para asegurar una distribución equitativa del agua, y promover la educación y conciencia sobre el uso responsable del recurso. Inversiones en investigación y desarrollo pueden ofrecer soluciones innovadoras para la conservación y gestión del agua. Solo a través de un esfuerzo colectivo y sostenido se podrán mitigar los efectos de la escasez y garantizar que todos los habitantes de la metrópoli tengan acceso al vital líquido. Para mitigar la crisis hídrica desde el enfoque de las Naciones Unidas, es crucial alinear las acciones con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 6: Agua Limpia y Saneamiento, y ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles. A continuación, se proponen soluciones integradas y unificadas que aborden estos objetivos:

Soluciones Propuestas

1. Mejora de la Infraestructura de Agua y Saneamiento (ODS 6).
 - a) Inversiones en Infraestructura: Ampliar y modernizar las redes de distribución de agua potable y sistemas de alcantarillado, especialmente en áreas urbanas marginadas.
 - b) Tecnologías de Purificación y Desalinización: Implementar plantas de desalinización en áreas costeras y tecnologías avanzadas de purificación para asegurar el suministro de agua potable.
 - c) Reducción de Pérdidas de Agua: Modernizar la infraestructura para reducir fugas y pérdidas de agua en las redes de distribución, mediante la implementación de tecnologías inteligentes para monitoreo y reparación.
 - d) Implementación de políticas públicas racionales enfocadas para el cuidado y la prevención del

2. Gestión Sostenible de los Recursos Hídricos (ODS 6).
 - a) Protección de Fuentes de Agua: Implementar políticas para la conservación de cuencas hidrográficas y la protección de acuíferos, reduciendo la contaminación y promoviendo prácticas agrícolas sostenibles.
 - b) Reutilización de Agua: Fomentar el uso de tecnologías para la reutilización de aguas residuales tratadas en la agricultura, la industria y el riego de áreas verdes urbanas.
 - c) Educación y Sensibilización: Desarrollar campañas educativas para promover el uso eficiente y responsable del agua entre ciudadanos, industrias y gobiernos locales.

3. Desarrollo de Ciudades y Comunidades Sostenibles (ODS 11).
 1. Planificación Urbana Integrada: Fomentar la planificación urbana que incorpore la gestión del agua, la reducción del consumo y la creación de espacios verdes que contribuyan a la

recarga de acuíferos.

2. Sistemas de Captación de Agua de Lluvia: Incentivar la instalación de sistemas de captación y almacenamiento de agua de lluvia en edificios públicos y privados, reduciendo la dependencia de fuentes tradicionales.
3. Resiliencia ante el Cambio Climático: Desarrollar infraestructuras urbanas resilientes que puedan soportar eventos climáticos extremos, asegurando el suministro continuo de agua.

Conclusión Unificada

La crisis hídrica es un desafío global que requiere una respuesta coordinada y multifacética. Integrar las metas del ODS 6 y ODS 11 proporciona un marco efectivo para abordar tanto la necesidad de agua limpia y saneamiento como la sostenibilidad de las ciudades y comunidades. Mejorar la infraestructura de agua, gestionar de manera sostenible los recursos hídricos y desarrollar comunidades urbanas resilientes son pasos esenciales para mitigar los efectos de la escasez de agua. La colaboración internacional, el uso de tecnologías innovadoras y la educación sobre el uso responsable del agua son fundamentales para asegurar que todos los habitantes del planeta tengan acceso al vital líquido. A través de estos esfuerzos colectivos, podemos avanzar hacia un futuro donde el agua limpia y el saneamiento sean accesibles para todos, y nuestras ciudades sean verdaderamente sostenibles y resilientes.

Referencias bibliográficas

- Castells, M. (2008). *La cuestión urbana*. Siglo Veintiuno Editores.
- Comisión Nacional del Agua. (Conagua) (2018^a). *Atlas del agua México 2018*. 15 de junio 2024 <https://www.gob.mx/conagua>
- Corbusier, L. (1966). *Urbanismo*. Vincent Freal.
- Domínguez, J. & López, C. (2023). *Agua y ciudades*. El Colegio de México.
- ONU-Hábitat, (2020). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. 27 de junio 2024, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- SEDATU, (2020). *Metrópolis de México 2020*. Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano. 30 de junio de 2024, de https://www.gob.mx/cms/uploads/sedatu/MM2020_06022024.pdf

Descontaminación del agua residual de un centro universitario utilizando humedales artificiales: estudio a escala piloto*

Decontamination of wastewater from a university center using artificial wetlands: pilot-scale study

Khirbet López Velázquez^{a}; Yahir Murakawa Guzmán^b, Carlos Gómez de León^b,
Andrés G. Suárez Santizo^b, Linnet Roque-Romero^b, Cesar Castillo Quevedo^c,
Edwin R. Hoil Canul^b, y José Luis Cabellos Quiroz^d*

Resumen / Abstract

La contaminación del agua es un problema ambiental de gran relevancia ya que compromete la salud humana y el acceso seguro al agua limpia y de calidad. En este trabajo estudiamos un sistema de dos humedales artificiales (HA) a escala piloto para la descontaminación del agua residual proveniente de un centro universitario. Los HA se construyeron utilizando cajas de madera, membranas impermeables de polietileno, piedras de río, grava y tierra como soporte para las plantas, el volumen operacional de los HA fue de 108 L. Posteriormente, uno de los HA se plantó con ejemplares de *Alpinia purpurata*, el sistema se operó a un tiempo de retención hidráulica de 72 h y durante toda la experimentación los HA se alimentaron con agua residual. Con este sistema fue posible tratar el agua residual con una eficiencia superior al 70%, reduciendo la demanda química de oxígeno hasta niveles inferiores a lo establecido en la NOM-001-SEMARNAT-2021. Por lo tanto, los HA representan una tecnología prometedora para su aplicación en procesos de descontaminación del agua.

Palabras clave: agua, contaminación ambiental, fitorremediación, sustentabilidad, tecnología ambiental.

* khirbet.lopez@uptapachula.edu.mx (Autor responsable)

a. El Doctor López es el autor responsable del presente artículo. Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías - Universidad Politécnica de Tapachula, C.P. 30830. Tapachula, Chiapas, México. Correo electrónico: Khirbet.lopez@uptapachula.edu.mx.

b. Universidad Politécnica de Tapachula, Carretera Tapachula - Puerto Madero, Km. 24 + 300, C.P., 30830, Tapachula, Chiapas, México.

c. Departamento de Fundamentos del Conocimiento, Centro Universitario del Norte, Universidad de Guadalajara, Colotlán C.P. 46200, Jalisco, México.

d. El Doctor José Luis Cabello es Profesor Investigador de la Universidad Politécnica de Tapachula, Carretera Tapachula - Puerto Madero, Km. 24 + 300, C.P., 30830, Tapachula, Chiapas, México. Correo electrónico: jose.cabellos@uptapachula.edu.mx.

Nowadays, water pollution is an environmental problem of great relevance since it compromises human health and safe access to clean and quality water. In this work, we study a system of two pilot-scale constructed wetlands (CWs) for the decontamination of wastewater from a university center. The CWs used in this work were built with wooden boxes, waterproof membranes, river stones, gravel and soil as plant support, the operational volume of the CWs were 108 L each. Subsequently, one CW was planted with specimens of *Alpinia purpurata* and throughout the experiment the system was fed with raw wastewater at a hydraulic retention time of 72 h. With this system it was possible to treat wastewater with an efficiency greater than 70%, reducing the chemical oxygen demand to levels lower than that established in NOM-001-SEMARNAT-2021. Therefore, the use of CWs represents a promising technology for application in wastewater decontamination processes.

Keywords: water, environmental pollution, phytoremediation, sustainability, environmental technology.

Introducción

Los sistemas de fitorremediación conocidos como humedales artificiales (HA) representan una alternativa económica y accesible para el tratamiento de diversos efluentes, entre ellos: aguas residuales domésticas, municipales, de centros educativos, de fincas agrícolas y de pequeñas comunidades con población entre 1000 y 2000 personas (Pérez et al., 2022). Los HA están constituidos principalmente por el componente vegetal (plantas flotantes, sumergidas o emergentes), los consorcios microbianos (microorganismos aerobios y anaerobios) y el medio de soporte que generalmente son agregados pétreos (rocas, grava y arena). La interacción entre estos componentes da lugar a una serie de complejos procesos físicos, químicos y biológicos que favorecen la depuración del agua residual que fluye a través de estos sistemas artificiales de manera horizontal (superficial o subsuperficial) o vertical (ascendente o descendente) (Delgadillo et al., 2011). De esta manera, los HA pueden remover la materia orgánica, los sólidos suspendidos, nutrientes como nitrógeno y fósforo, algunos metales pesados como hierro, plomo y cadmio, así como contaminantes orgánicos persistentes e hidrocarburos. Además, reducen la contaminación microbiológica y pueden favorecer la eliminación de distintos fármacos y pesticidas en el agua.

En las últimas décadas, los HA se han comenzado a utilizar como una alternativa innovadora, eficiente y sostenible para el tratamiento de aguas residuales (Magwaza et al., 2020). De hecho, Pérez et al., (2022) reportaron en su investigación que durante la década de 2010 a 2020 se publicaron cerca de 14,245 artículos científicos acerca del estudio de HA para la descontaminación del agua. En este sentido, Aminsharei et al., (2019) y Ma et al., (2019) reportaron la efectiva reducción de la demanda química de oxígeno (DQO) del agua residual utilizando humedales artificiales, con eficiencias de eliminación entre 70 y 98 %.

El objetivo principal de este trabajo fue evaluar un sistema de humedales artificiales plantados con ejemplares de *A. purpurata* para el tratamiento del agua residual proveniente de un centro universitario, con ello se busca proponer una alternativa eficaz para la descontaminación del agua, con potencial aplicación en regiones rurales donde carecen de sistemas de tratamiento para los efluentes domésticos, agrícolas, municipales y de centros educativos.

Metodología

Este estudio a escala piloto se realizó en las instalaciones de la Universidad Politécnica de Tapachula (latitud: 14.746111, longitud: -92.397807) localizada en el municipio de Tapachula, Chiapas, a una altitud de 15 m.s.n.m y temperatura promedio anual de 32 °C. En este centro universitario, la comunidad estudiantil, administrativa y docente se compone de 850 individuos aproximadamente (datos de septiembre 2023 – abril 2024) distribuidos en el horario de 7:00 a 20:00 h de lunes a viernes. En la Figura 1 se muestra la localización de las instalaciones de la universidad y el sitio experimental donde se establecieron los HA. Cabe destacar que los HA se evaluaron durante aproximadamente 120 días para tratar una fracción del agua residual que se genera en la universidad. Además, debe considerarse que este estudio se realizó en la temporada de secas durante los meses de septiembre - diciembre de 2023 y se descarta que los resultados obtenidos reflejen un efecto de dilución por lluvia.

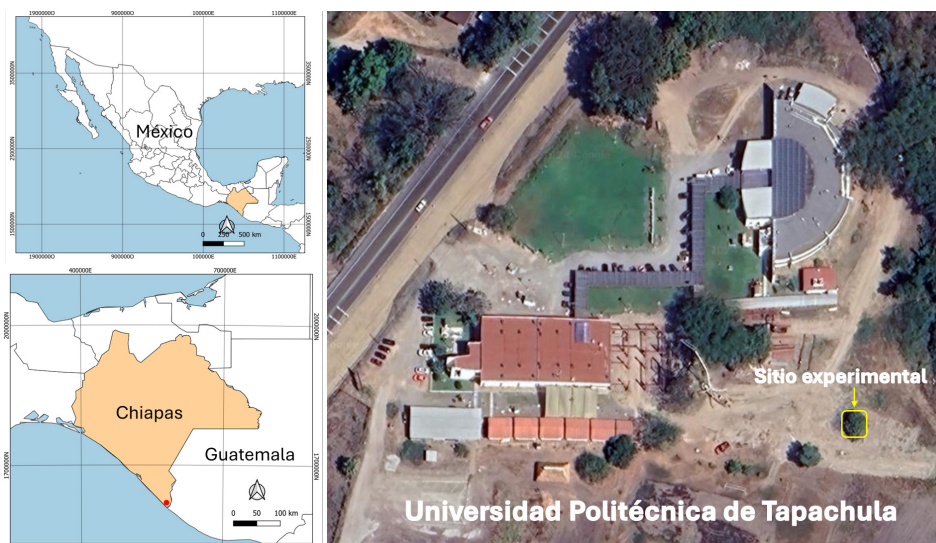


Figura 1. Localización del sitio experimental para la evaluación de los HA plantados con *A. purpurata* (imagen tomada del servicio Google Earth, marzo 2024)

En la Figura 2 se presenta las etapas de construcción de los HA a escala piloto, para ello se emplearon dos cajas de madera con las siguientes medidas: 2 m de longitud en la base superior, 1.6 m de longitud en la base inferior, 0.6 m de ancho y 0.4 m de profundidad. Como barrera impermeable se utilizó membranas de polietileno calibre #12; posteriormente, las cajas de madera se rellenaron con una capa de piedras de río ($\varnothing = 10$ cm aproximadamente), luego se incorporó una capa de grava de $\frac{1}{2}$ " con una altura de 15 cm, cabe destacar que sobre la capa de grava se depositó un inóculo de bacterias anaerobias provenientes de excremento fresco de ganado vacuno (2 L de inóculo para cada HA); posteriormente se depositó una capa superficial de tierra de 10 cm de grosor la cual sirvió como soporte para los ejemplares de *A. purpurata* (densidad de 20 plantas por m^2), cabe destacar que el HA sin plantas se utilizó como tratamiento control.



Figura 2. Etapas de la construcción de los HA: a) dos cajas de madera, b) membrana impermeable de polietileno, c) capa inferior de piedras de río, d) capa de grava y tierra, e) HA plantado con *A. purpurata* (a 60 días de operación)

Ambos humedales artificiales se configuraron en un régimen de flujo horizontal subsuperficial, se anegaron con agua residual para estimar el volumen operacional y posteriormente se ajustó del tiempo de retención hidráulica (TRH = 72 h para cada uno). En la Figura 3 se muestra la configuración general de los humedales artificiales construidos en este trabajo.

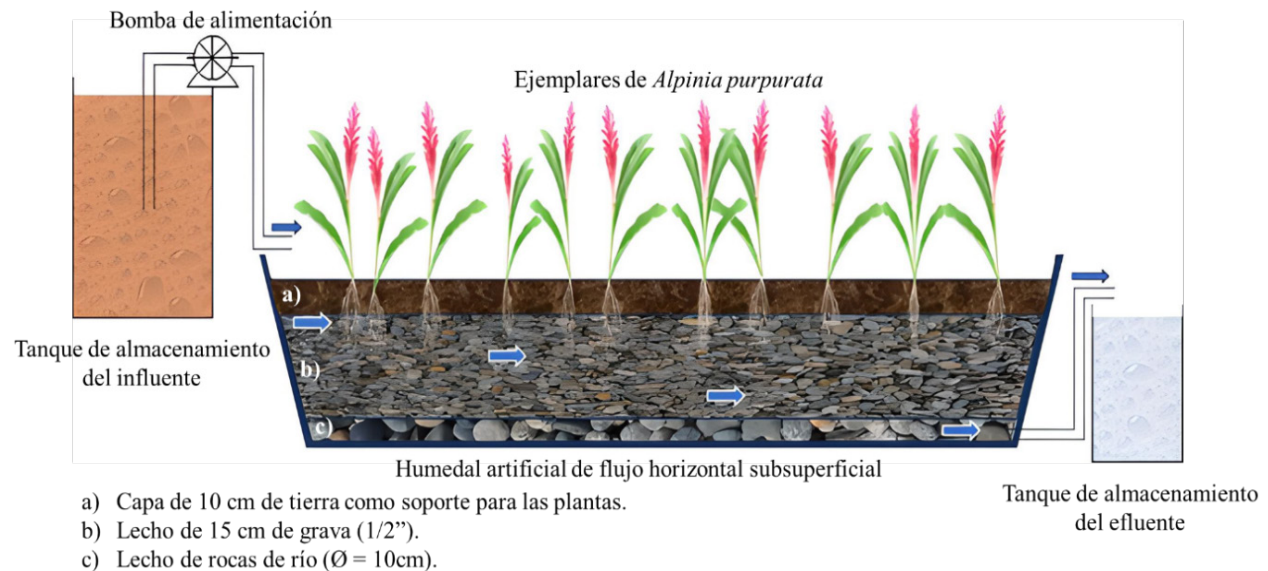


Figura 3. Esquema ilustrativo de los HA empleados en este trabajo para el tratamiento de agua residual proveniente de un centro universitario (elaboración propia)

Los HA se sometieron a una etapa de 30 días de estabilización, tanto para la aclimatación de las plantas y establecimiento de los consorcios microbianos en el lecho de los humedales. Los humedales con volumen operacional de 108 L se operaron a TRH = 72 h y en todo momento se alimentaron con agua residual cruda proveniente del centro universitario. Posterior a la etapa de estabilización, cada 72 h se tomó una muestra de 0.1 L en los efluentes y se midieron los siguientes parámetros de calidad del agua: pH, temperatura, oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica (CE), turbidez, demanda química de oxígeno (DQO), sólidos totales (ST), sólidos disueltos totales (SDT), sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos sedimentables de acuerdo con la metodología establecida en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WEF, 2012).

Resultados y discusión

El volumen de agua residual que se genera diariamente en el centro universitario es aproximadamente 3500 L/día y sus principales características se enlistan en el Cuadro 1:

Cuadro 1. Principales características del agua residual cruda tratada mediante los HA construidos en este trabajo (valor promedio, n = 12)

pH	7.6
Temperatura (°C)	29.2
OD	<1.0
DQO (mg/L)	269.5
ST (mg/L)	2285.3
SDT (mg/L)	2198.2
SST (mg/L)	85.3
Sólidos sedimentables (mg/L)	< 1.0
Turbidez (UNT)	56.9
CE (μS/cm)	3146.4

Fuente: Investigación directa

Cabe destacar que los niveles de pH tanto en la entrada como en la salida de los humedales se mantuvo en el rango de 7.2 a 8.0, lo cual indicó la adecuada estabilidad del sistema para amortiguar la acidificación del agua por la generación de ácidos orgánicos a partir de la descomposición de la materia orgánica (López-Velázquez et al., 2020). En este trabajo, los resultados de la caracterización del agua residual son similares a lo reportado en otro estudio en México, donde también se evaluaron HA plantados con *A. purpurata* para el tratamiento de agua residual generada en otro centro universitario: pH = 7.9, DQO = 482.1 mg/L, SDT = 845 mg/L y SST = 75 mg/L (Lara-Acosta et al., 2022).

En la Figura 4 se observa gráficamente la eficiencia de ambos HA para la eliminación de la DQO, el humedal control (0 plantas) removió 57.6 % de la DQO inicial y el humedal plantado con *A. purpurata* (20 plantas/m²) removió 70.2 % de la DQO inicial; es notable que ambos

humedales tienen la capacidad de reducir el nivel de contaminación del agua residual por debajo de lo marcado en la NOM-001-SEMARNAT-2021 (fijado en 150 mg/L) que establece los límites permisibles de contaminantes en descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación, entre ellos: ríos, arroyos, canales y drenes (SEMARNAT, 2021). Los resultados obtenidos demostraron que el humedal con plantas fue el más eficiente para la remoción de la DQO y que la presencia de *A. purpurata* favorece diferencias significativas entre ambos tratamientos (t Student = 2.94; p -value = 0.025, n = 6) coincidiendo con lo reportado previamente por Pérez et al., (2022). Así mismo, en estudios previos se ha reportado el uso de HA con *A. purpurata* para el tratamiento de aguas residuales con eficiencia de eliminación de la DQO entre 35 – 70 % (Méndez-Mendoza et al., 2015) lo cual es similar a lo obtenido en este trabajo.

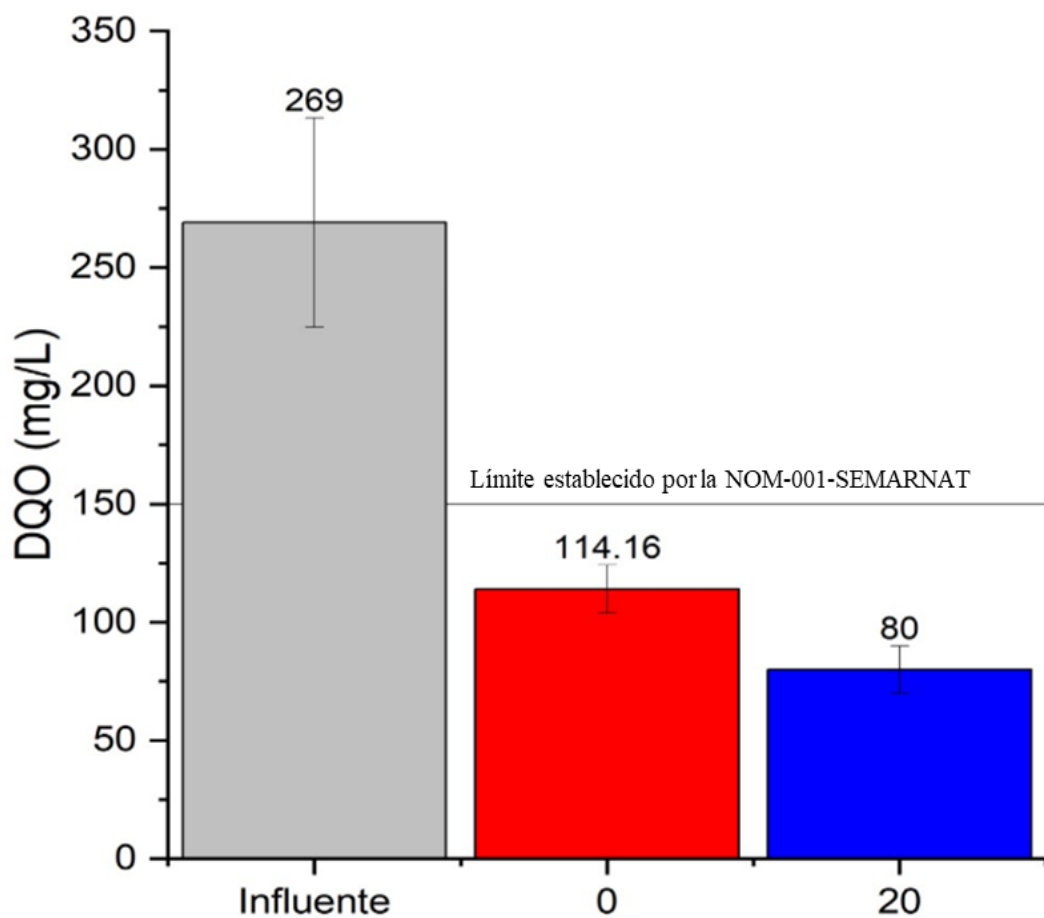


Figura 4. Concentración de la DQO en el agua residual no tratada (influyente) y en los efluentes de ambos HA (0 = tratamiento control, 20 = HA con 20 plantas/m²)

De manera similar, en la Figura 5 se muestran los resultados de la eliminación de SST y de la turbidez, se observa que ambos humedales pueden reducir los SST por debajo de los límites

permisibles fijados por la NOM-001-SEMARNAT-2021 (60 mg/L). La eficiencia del humedal sin plantas para remover SST y turbidez fue de 67.6%, mientras que la eficiencia del humedal con plantas fue notablemente superior (81.5%) tanto para SST como para la turbidez, lo que coincide adecuadamente con lo reportado previamente con otros estudios donde se ha reportado la notable eficiencia de los HA para remover los SST y como consecuencia la turbidez del agua tratada (Al-Wahaibi et al., 2021). Cabe mencionar que en este trabajo, se observó una mínima disminución de los SDT, los cuales se mantuvieron estables en un rango entre 2190 - 2230 mg/L en el influente y entre 1930 – 2080 mg/L en los efluentes de ambos HA, lo anterior puede atribuirse a que bajo las condiciones descritas los HA son ineficientes para la eliminación de las sales disueltas que conforman los SDT, de acuerdo con lo reportado por Al-Wahaibi et al., (2021).

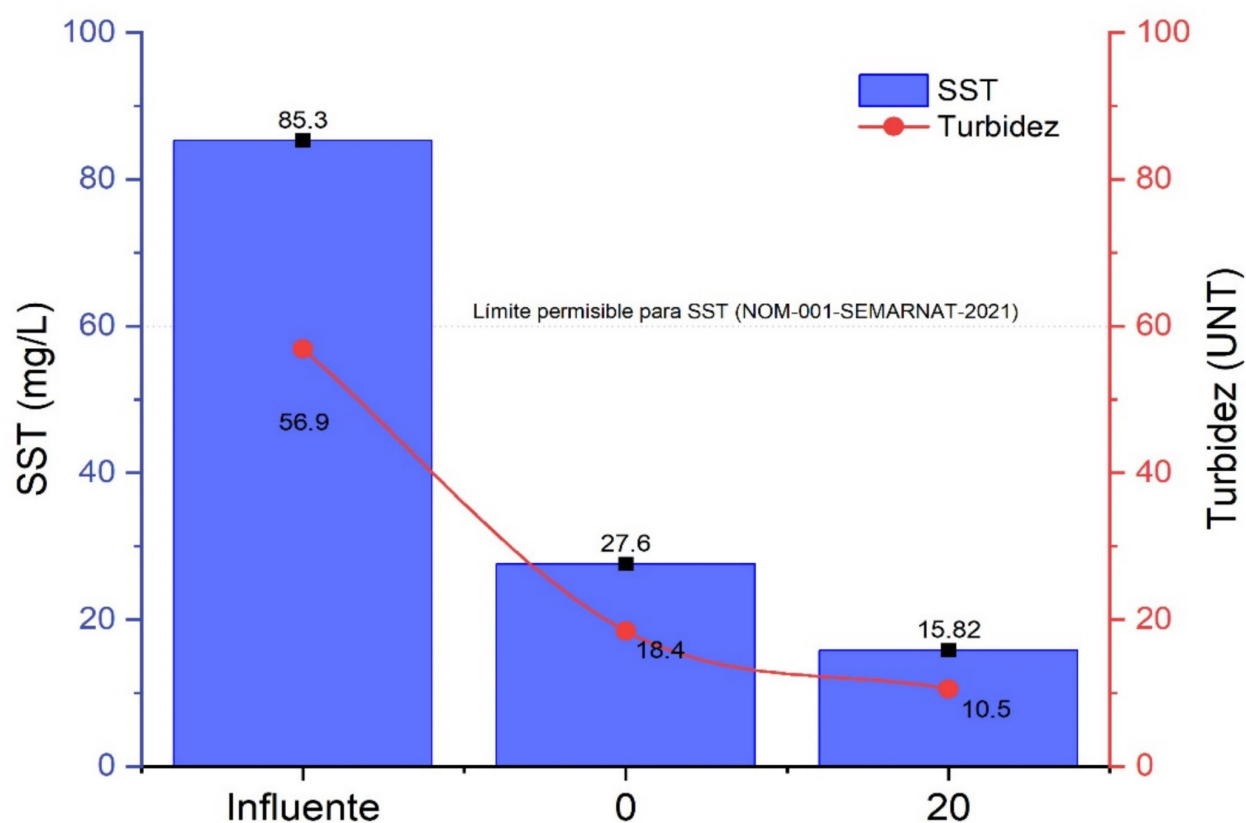


Figura 5. Niveles de SST y Turbidez en los influentes y efluentes de los HA (0 = tratamiento control, 20 = HA con 20 plantas/m²)

Por otra parte, en trabajos previos se ha reportado que entre los principales mecanismos de eliminación de los contaminantes dentro de los HA se encuentran: la bioconversión por bacteria anaerobias y facultativas adheridas a las raíces de las plantas y a las partículas del sustrato (biofilm microbiano), así como la bioconversión por bacterias aerobias asociadas a las raíces de las plantas

en la superficie de los HA. Además, el sustrato de soporte en conjunto con los rizomas y los sistemas radiculares de las plantas favorecen los procesos de filtración, sedimentación, adsorción y translocación de los contaminantes presentes en el agua residual (Al-Wahaibi et al., 2021; Amins-harei et al., 2019; Delgadillo et al., 2011; Ma et al., 2019).

Una vez más, cabe destacar que los HA evaluados son una alternativa adecuada para el tratamiento del agua residual generada en el centro universitario, ya que reducen los niveles de contaminación hasta niveles aceptables para su descarga en ríos y arroyos de acuerdo con lo establecido por la NOM-001-SEMARNAT-2021, destacando el humedal con plantas como el más eficiente, lo cual representa una contribución positiva para la preservación del ambiente, mediante el desarrollo de tecnologías eficientes para el tratamiento de las aguas residuales. Además, con base en los resultados obtenidos, sugerimos que los HA representan una excelente alternativa para el tratamiento de efluentes domésticos, municipales y agrícolas en regiones rurales que carecen de sistemas de alcantarillado y de plantas de tratamiento de aguas residuales. De esta manera, como lo demostramos en este estudio, es posible reducir el grado de contaminación del agua residual entre 57 y 70 % (en términos de DQO) y la adopción de estos sistemas a mediana o gran escala puede contribuir significativamente a disminuir el impacto negativo sobre los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, ocasionado por las descargas de aguas residuales no tratadas. Incluso, los HA plantados con especímenes tropicales como *A. purpurata* pueden favorecer a realzar notablemente la estética del paisaje y aportar a la economía de los usuarios dado su valor como plantas de ornato.

Por otra parte, entre las principales limitaciones de este trabajo de investigación se destaca la importancia de evaluar los niveles de nutrientes como nitratos y fosfatos, así como la concentración de agentes patógenos (coliformes fecales, totales y *E. coli*) en los influentes y efluentes de los HA. De este modo, se tendrá una visión más clara de la eficiencia de los HA para la descontaminación del agua residual generada en el centro universitario. Aparte, en trabajos posteriores se propone evaluar el efecto de distintos TRH; preliminarmente, en este trabajo se observó que un TRH = 24 h no es favorable para el sistema debido a que el agua residual permanece un menor tiempo dentro de los HA, dando como resultado niveles de eliminación de DQO, SST, SDT y turbidez menores al 20%.

Conclusiones

Los HA constituyen una alternativa adecuada para el tratamiento de agua residual y se destaca que el uso de *A. purpurata* tiene un efecto notablemente positivo en su rendimiento ya que estas plantas favorecen una mayor eliminación de la carga contaminante hasta niveles inferiores a lo establecido en normativas nacionales. Los HA son una alternativa práctica, eficiente y de bajo costo en comparación con las PTAR convencionales y se sugiere su implementación en áreas de traspas para el tratamiento de aguas residuales domésticas urbanas. Así mismo, se resalta que esta tecnología tiene potencial aplicación para la biorremediación del agua residual que se genera principalmente en regiones rurales tales como: ranchos, ejidos y fincas agrícolas, donde no existen sistemas de alcantarillado ni plantas de tratamiento de agua residual.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Politécnica de Tapachula por todas las facilidades otorgadas para la realización de esta investigación. López-Velázquez agradece al programa de estancias posdoctorales por México–CONAHCYT por la beca otorgada (CVU 736037).

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen competencia en intereses financieros ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo que se presenta en este documento.

Referencias bibliográficas

- Al-Wahaibi, B. M., Jafary, T., Al-Mamun, A., Baawain, M. S., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., & Stefanakis, A. I. (2021). Operational modifications of a full-scale experimental vertical flow constructed wetland with effluent recirculation to optimize total nitrogen removal. *Journal of Cleaner Production*, 296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126558>
- Aminsharei, F., Borghei, S. M., Arjomandi, R., Nouri, J., & Pendashteh, A. (2019). Effects of various plants on treatment efficiency of horizontal subsurface flow constructed wetlands based on the hydraulic retention time. *Environmental Engineering and Management Journal*, 18(6). <https://doi.org/10.30638/eemj.2019.115>
- APHA, AWWA, WEF. (2012). Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. Washington: American Public Health Association.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., & Andrade, M. (2011). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua. In *Tropical and Subtropical Agroecosystems* (Vol. 14).
- Lara-Acosta, M., Lango-Reynoso, F., & Castañeda-Chávez, M. del R. (2022). Use of tropical macrophytes in wastewater treatment. *Agro Productividad*. <https://doi.org/10.32854/agrop.v15i11.2302>
- López-Velázquez, K., Villanueva-Rodríguez, M., Mejía-González, G., & Herrera-López, D. (2020). Removal of 17 α -ethinylestradiol and caffeine from wastewater by UASB-Fenton coupled system. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 1–12. <https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1740799>
- Luna-Pabello, V. M., & Aburto-Castañeda, S. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutrofización del lago del Bosque de San Juan de Aragón. *TIP*, 17(1). [https://doi.org/10.1016/s1405-888x\(14\)70318-3](https://doi.org/10.1016/s1405-888x(14)70318-3)
- Ma, Y., Zhai, Y., Zheng, X., He, S., & Zhao, M. (2019). Rural domestic wastewater treatment in constructed ditch wetlands: Effects of influent flow ratio distribution. *Journal of Cleaner Production*, 225. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.235>
- Magwaza, S. T., Magwaza, L. S., Odindo, A. O., & Mditshwa, A. (2020). Hydroponic technology

as decentralised system for domestic wastewater treatment and vegetable production in urban agriculture: A review. *In Science of the Total Environment* (Vol. 698). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134154>

Méndez-Mendoza, A. S., Bello-Mendoza, R., Herrera-López, D., Mejía-González, G., & Calixto-Romo, A. (2015). Performance of constructed wetlands with ornamental plants in the treatment of domestic wastewater under the tropical climate of South Mexico. *Water Practice and Technology*, 10(1). <https://doi.org/10.2166/wpt.2015.013>

Pérez, Y. A., García Cortés, D. A., & Jauregui Haza, U. J. (2022). Humedales construidos como alternativa de tratamiento de aguas residuales en zonas urbanas: una revisión. *Ecosistemas*, 31(1). <https://doi.org/10.7818/ecos.2279>

SEMARNAT. (2021). NOM-001-SEMARNAT-2021. *Diario Oficial de La Federación*.

Técnicas para el mejoramiento en la eficiencia de un sistema de baño compostero de dos cámaras*

Techniques to improve the efficiency of a two-chamber composting toilet system

Adrian R. Maldonado-Martínez^a

Resumen / Abstract

El presente trabajo muestra las características y funcionamiento de un baño seco compostero de dos cámaras, como una alternativa a la crisis de agua y con el propósito de mitigar los efectos de la contaminación por excretas y orina en baños "convencionales" además, considera y reúne aspectos que hay que tener en cuenta para elaborarlo, reuniendo características que permitan tener un baño de cámaras adecuado, considerando materiales, dimensiones y pasos que debemos seguir para un uso eficiente y buen funcionamiento, mostrando la viabilidad de su implementación en la vida diaria.

Palabras clave: saneamiento, composta, orgánico, baño, ecológico, salud, agua, microorganismos.

This work shows the characteristics and operation of a two-chamber dry composting toilet, as an alternative to the water crisis and with the purpose of mitigating the effects of contamination by excreta and urine in "conventional" toilets. It also considers and gathers aspects that must be taken into account to elaborate it, gathering characteristics that allow having an adequate chamber toilet, considering materials, dimensions and steps that must be followed for an efficient use and good operation, showing the feasibility of its implementation in daily life.

Key words: sanitation, compost, organic, toilet, ecological, health, water, microorganisms.

* **Agradecimientos.** Se agradece a la M. en C. Ana María Alfaro Espinosa, quién asesoró y realizó observaciones en el presente trabajo, además de los centros transdisciplinarios que brindaron asesoría, tal como Matamoros 404 y centro de permacultura Bonanza.

^a. Estudiante de la licenciatura de biología. Facultad de Sistemas Biológicos e Innovación Tecnológica, Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca, Av. Universidad S/N. Ex-Hacienda 5 Señores, Universidad, Universidad UABJO, Oaxaca de Juárez. Correo electrónico: adrianmaldonadozz06@gmail.com .

Introducción

La situación actual del agua en México es alarmante, las zonas norte y centro reciben sólo el 9% del agua renovable al año, mientras que la zona sur recibe el 67,2%, tan solo el abastecimiento público de agua representa el 15% del total concesionado y se distribuye a través de redes de agua potable a viviendas, industrias y otros, por supuesto es importante considerar factores externos, por ejemplo nuestro país es vulnerable a la sequía ya que el 52% de su territorio cuenta con climas áridos o semiáridos, en total, 14 estados se encuentran en esta situación. (CONAPO) estima que para el año 2030, aproximadamente el 75% de la población estará en áreas urbanas y que el crecimiento poblacional conducirá a una disminución del agua renovable per cápita a nivel nacional, esto debido a la inminente demanda generada por los grandes conglomerados, pese a toda esta situación en cuanto a la crisis hídrica y de todos los problemas que la rodean, resulta impactante como se utiliza este recurso tan importante y vital para alejar de nuestros hogares los desechos como excremento y orina, mismos que representan una serie de problemas considerando que la contaminación fecal de las aguas superficiales es un problema que incide directamente en la salud humana. El sistema actual no aborda el problema; sólo aleja los residuos del punto de origen, el país sigue un sistema lineal que contamina el agua potable, recurso vital y limitado, ahora bien, si hablamos del gasto de este recurso, un inodoro convencional consume de 10 A 16 litros de agua por descarga, si consideramos que una persona defeca dos veces al día en promedio, estaría utilizando al año un total de 7,300 L de agua, el número se hace más alarmante cuando lo multiplicamos por cada integrante de la casa. Por tal motivo resulta particularmente importante la implementación de tecnologías como los sistemas de baños secos composteros para el tratamiento de nuestros residuos, ya que el producto resultante tras el procesamiento de nuestros desechos es completamente apto para el aprovechamiento humano, sin representar problemas a la salud, además de no generar olores si este se trata de manera correcta y se siguen completamente todas las instrucciones para su instalación (Esrey et al., 1998), ya que a lo largo del trabajo se pudo observar que en caso de faltar algún detalle, por más insignificante que pudiese parecer, podía causar problemas en el sistema de saneamiento. siendo no sólo una solución para países pobres, sino disponible para una amplia gama de escenarios socioeconómicos.

Baño seco

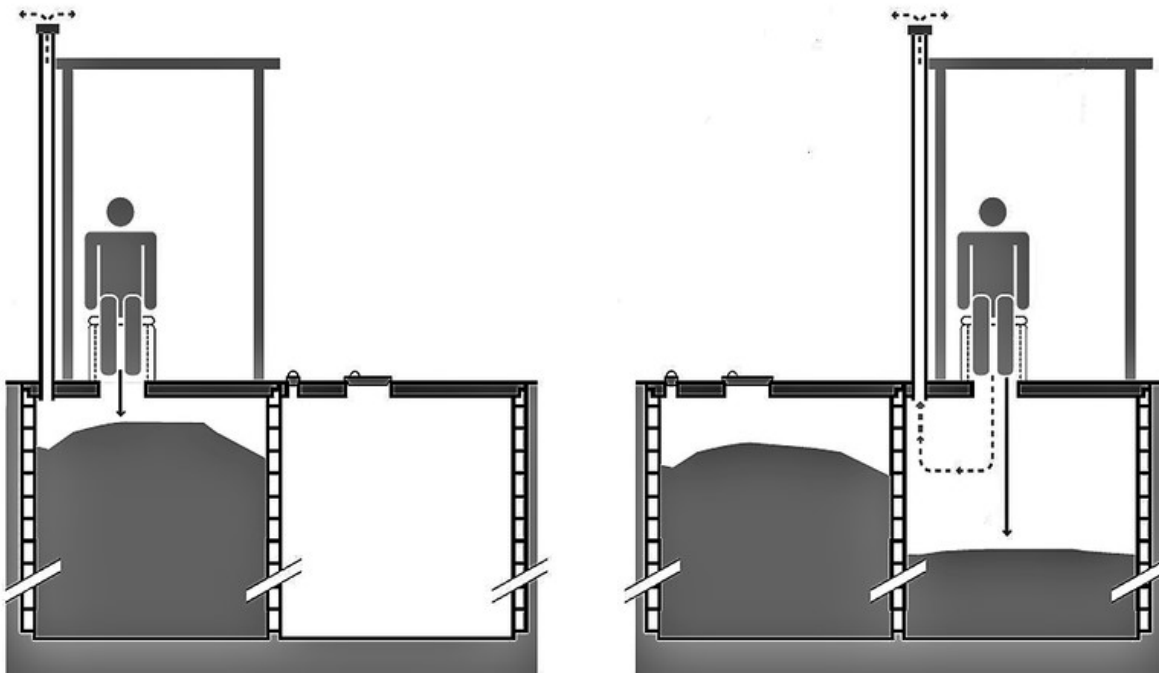
¿Qué es un baño seco?

Los baños secos se han implementado en diferentes culturas a lo largo del tiempo y en una gran cantidad de países, sin embargo la aceptación por parte de diversas culturas ha sido muy variada. Los chinos de manera eficaz llevan implementando el uso de los desechos orgánicos de manera muy eficiente, debido a que saben el valor que tiene el producto de la composta. El primer país en hacer uso del baño seco de dos cámaras fue Vietnam, sin embargo en los úl-

timos años el uso de este sistema se ha ido extendiendo por países tales como Suecia, China, México y Brasil (Winblad, 2004).

El baño seco es un sistema que no utiliza agua para su funcionamiento, separa excretas y orina por medio de una taza diseñada con dos diferentes espacios, uno destinado para la materia fecal y otro para la orina, donde el excremento es cubierto por un sustrato inodoro y absorbente, entre otras características y la orina pasa a un filtro o se puede acumular para su posterior uso. Para el caso de los baños secos de cámaras, se conforma por dos cámaras de concreto, donde mientras una está en uso, la otra está procesando la materia orgánica previamente depositada, con las medidas y tiempo adecuados, podrán usarse de manera alternada sin ningún problema.

Figura 1. Sistema de baño seco compostero de dos cámaras



Fuente: (Tilley et al 2014)

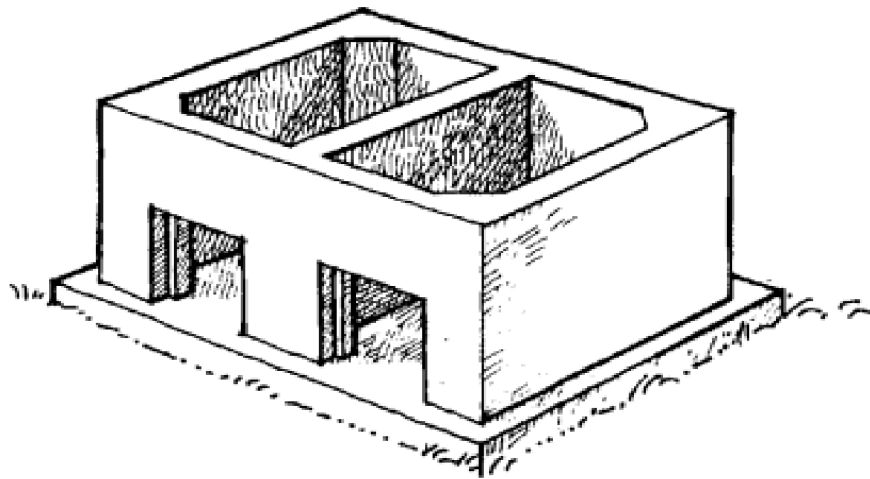
Cámaras

Aspectos a considerar

Las cámaras deben estar hechas de concreto, esto con el propósito de asegurar la durabilidad y la hiper ventilación, sin embargo resulta de vital importancia prestar especial cuidado en la construcción, para que no existan filtraciones, los muros son de ladrillos y una losa, misma que tiene

las cavidades donde será colocada la taza. Para las dimensiones de cada cámara, es importante que cumplan 1 m³ (Winblad, 2002).

Figura 2. Cámaras de procesamiento del baño vietnamita de doble cámara. También se puede observar las puertas donde se realiza la extracción del material deshidratado

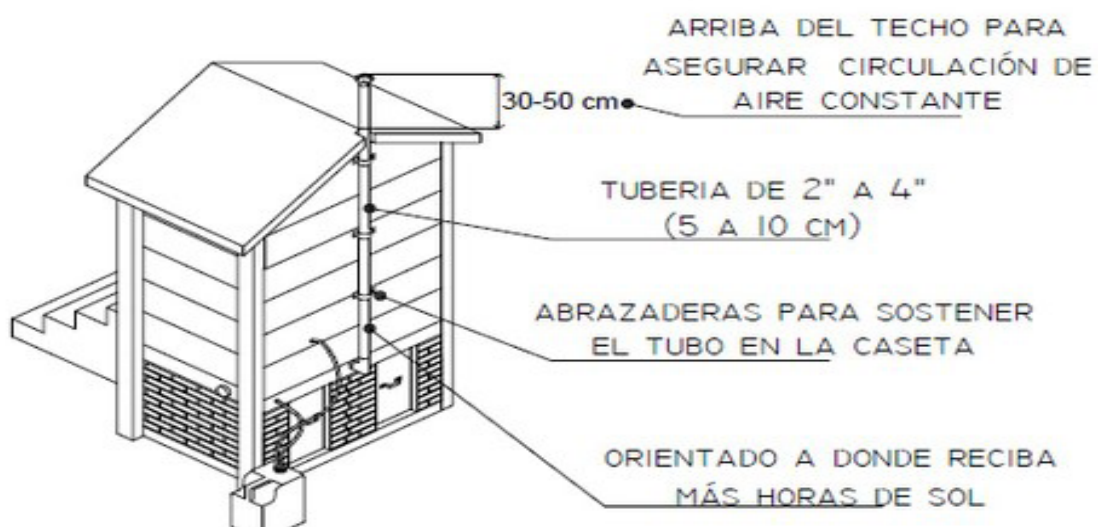


Fuente: (Tilley et al 2014).

Ventilación

Las cámaras deberán contar con una pared frontal abierta, de tal manera que permita el paso de aire, mismo que se conducirá hacia un tubo o “respiradero”, (con mosquitera).

Figura 3. Tubo de ventilación y puertas de evacuación



Fuente: (Castillo et al 2002)

Resulta importante colocar en cada una de las puertas tela mosquitera para evitar el posible acceso de artrópodos al interior de las cámaras, además de cejas, con el propósito de proteger del agua. El tubo de aireación será más eficiente si se pinta de negro, el color negro absorbe más calor que el color blanco. Al pintar el tubo de este color, nos aseguramos que absorberá la totalidad de la radiación que le llega del sol (Roche-Delgado et al 2017).

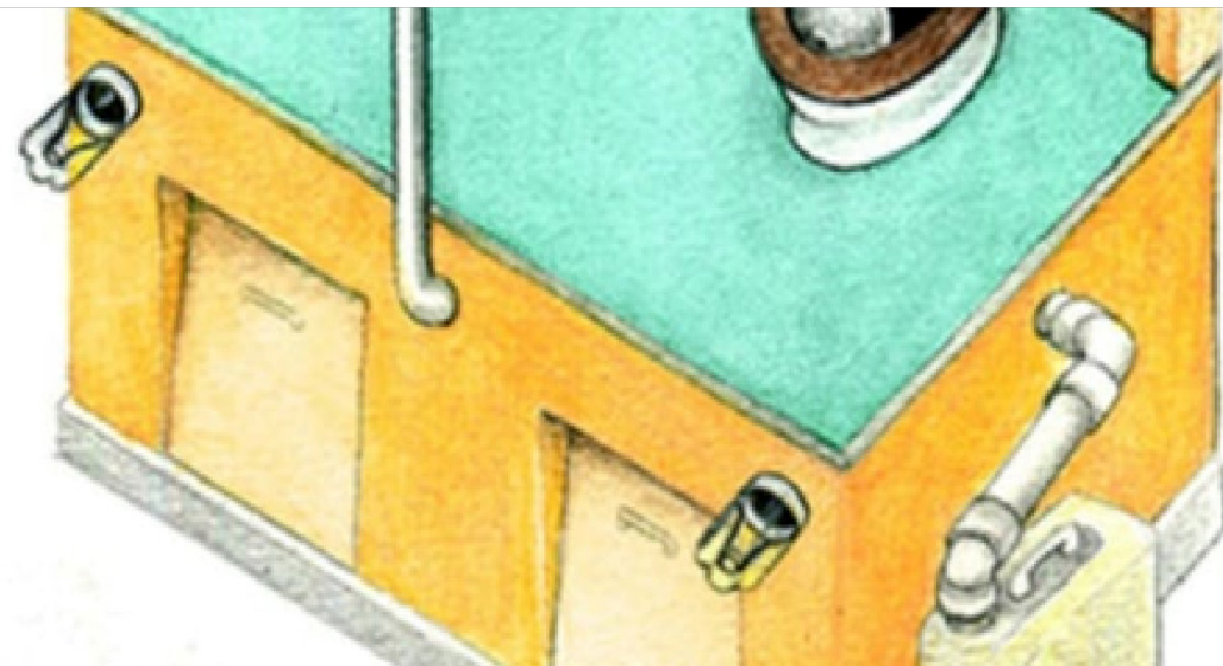
Inclinación

Es necesario considerar la inclinación del suelo al interior de las cámaras, esto debido a la separación de los sólidos y líquidos, ya que en caso de llegar a tener contacto orina y heces, estas se separarán por la inclinación, con un desnivel de 10 a 15 grados es suficiente para tal propósito, esta inclinación será con dirección a la puerta, el líquido separado será dirigido a una “canaleta” con destino a un filtro.

Trampa de insectos

Las trampas de moscas se colocan en un extremo de las puertas de evacuación, pueden ser elaboradas con botellas de pet, será necesario que la boca de la botella sea pequeña, de tal forma que se adecue para el tamaño de moscas. Las trampas de moscas nos ayudan a prevenir la proliferación de larvas en nuestras cámaras, lo cual no es algo bueno para nuestro abono.

Figura 4. Trampas de moscas en los extremos superiores de las puertas de las cámaras



Fuente: (Castillo et al 2002).

Materia secante

La materia secante es vital para el buen tratamiento de nuestro abono, si no tenemos cuidado con los materiales que constituyen nuestro material secante, ponemos en riesgo a los microorganismos que se desarrollan en nuestro material orgánico. Los consorcios microbianos suprimen los malos olores en el proceso de compostaje, a la par aceleran la descomposición de la materia orgánica, mayor cantidad de microorganismos, resulta más nutritivo (Alvarez-Vera et al 2019). Al hacer uso de compuestos “agresivos”, se pierde el beneficio microbiano. Para la materia secante se utilizan tres medidas de tierra cernida para absorber humedad, uno un medio de aserrín, para aporte de carbono (deberá estar libre de esmaltes y productos químicos en general), abusar de la proporción de aserrín podría acidificar el medio, media porción de polvo de carbón como desodorizante, si se desea, se puede agregar un cuarto de cascara de café, mismo que ayuda como ambientador (Mata-moros 2021). Una vez lista la materia secante, se podrá cubrir la excreta en su totalidad.

Figura 5. Implementación de materia secante en baño seco compostero de dos cámaras.



Fuente: (Esrey et al 1998).

Fachada

La fachada de cada uno de los baños dependerá totalmente de las necesidades de sus propietarios, pudiendo ser tan austeros u opulentos como así se decida.

Conclusión

El uso de los inodoros convencionales no es una alternativa sostenible, nunca lo fue, es por ellos que es indispensable optar por alternativas ecológicas, mismas que nos permitan aprovechar de manera razonable nuestro valioso y vital recurso hídrico. Las características antes mencionadas garantizan tener un baño seco compostero de cámaras sin ningún problema.

Referencias bibliográficas

- Alvarez-Vera^{1,2}, Manuel, Largo, Ana, Iglesias-Abad, Sergio, & Castillo, Jorge. (2019). Calidad de compost obtenido a partir de estiércol de gallina, con aplicación de microorganismos benéficos. Castillo, L. (2002): Sanitario Ecológico Seco: Manual de diseño, construcción, uso y mantenimiento, 14 (98). https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/CASTILLO Scientia Agropecuaria, 10(3), 353-361.
- del Porto, D & Steinfeld, C. 1999. The Composting Toilet System Book: a practical guide to choosing, planning and maintaining composting toilet systems, an alternative to sewer and septic systems. The Center for Ecological Pollution Prevention.
- Esrey, S.A., Gough, J., Rapaport, D., Sawyer, R., Simpson-Herbert, M., Vargas, J. & Winblad, U. 1998. Ecological Sanitation. Sida, Stockholm.
- García-Ubaque, César A, Vaca-Bohórquez, Martha L, & García-Ubaque, Juan C. (2014). Sanitario seco: una alternativa para el saneamiento básico en zonas rurales. Revista de Salud Pública, 16(4), 638-689.
- Hernández González, Leobardo, Medrano Hernández, Juan, Bermúdez González, Issac, & Santillán Jiménez, Ariadna. (2014). Análisis y diseño de un esquema de control para aplicación en baño seco portátil. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, (72), 61-72.
- López, K. M. (2019). Baños secos: instrumento de desarrollo y mejoramiento de la calidad de vida de la población rural del municipio de san pablo de borbur, boyacá. [Monografía, Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD]. Repositorio Institucional UNAD.
- Lourenço, N., Nunes, L.M. Review of Dry and Wet Decentralized Sanitation Technologies for Rural Areas: Applicability, Challenges and Opportunities. Environmental Management 65, 642–664 (2020).
- Ponce Martínez, A. E., Martínez Mendoza, E., & Ríos Esperanza, R. (2023). Análisis del desempeño de la red de agua potable en Salina Cruz, México. Ingeniería Industrial, 44(44), 177203.
- Quiñones Triana, Y. (2023). El sistema de saneamiento convencional y la escasez global de agua: Uso irracional de los recursos versus sistemas secos y circulares. Revista Iberoamericana De Ciencia, Tecnología Y Sociedad - CTS, 18(52), 173–194.
- Roche-Delgado, Liset, Hernández-Touset, Juan Pedro, & García-Rodríguez, Agustín. (2017). DISEÑO CONCEPTUAL DE SECADOR SOLAR A ESCALA PILOTO PARA ALGAS MARI-NAS.

Tecnología Química, 37(2), 184-200.

TILLEY, E., ULRICH, L., LÜTHI, C., REYMOND, P., SCHERTENLEIB, R., y ZURBRÜGG, C. (2018): Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento . Dübendorf (Suiza): Instituto Federal Suizo para la Ciencia y la Tecnología Acuática (Eawag), 2da. edición revisada.

Winblad, U. (2002) Ecological Sanitation Pilot Project in Palestine – a Project Appraisal. Report to Department for Natural Resources and the Environment, Sida, Stockholm, Sweden.

Baños secos, como una estrategia de conservación del agua*

Dry toilets, strategy for conservation of water

Ana María Alfaro Espinosa^a

Resumen / Abstract

Los baños secos son una propuesta viable para evitar el desperdicio y contaminación de agua, un recurso vital para todo ser vivo. Los baños secos cuentan con cámaras en donde se desechan y tratan las heces sin usar agua. El objetivo de este trabajo es determinar el número de personas que están usando baños secos en la ciudad de Oaxaca, y cuál es la cantidad de agua que se ha evitado contaminar gracias a esta tecnología. Se aplicaron 25 encuestas y se generó un mapa interactivo para ubicar baños secos en la ciudad. Una de las respuestas en las encuestas que llama la atención, es que una persona usa baños secos desde hace 24 años y con ello ha evitado la contaminación de 262,800 litros de agua. El mapa interactivo mostró la ubicación de 58 baños secos en domicilios particulares, escuelas y negocios, destacando que un solo negocio evitó la contaminación de 53,190 L de agua en un año. Esto demuestra que los baños secos son una tecnología simple, con un enorme potencial para disminuir la contaminación del agua.

Palabras clave: baño seco, contaminación, agua, propuesta, sustentable.

Dry toilets are a viable proposal to avoid waste and contamination of water, a vital resource for all living beings. Dry toilets have chambers where feces are disposed of and treated without using water. The objective of this work is to determine the number of people who are using dry toilets in the city of Oaxaca, and how much water contamination has been avoided thanks to this technology. Twenty-five surveys were administered and an interactive map was generated to locate dry toilets in the city. One of the answers in the surveys that stands out is that one person has been using dry toilets

* **Agradecimientos.** A todas las personas que han contribuido a la realización del presente estudio.

a. Licenciatura en Biología, Facultad de Sistemas biológicos e innovación tecnológica, Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca. Av. Universidad S/N Col. Cinco Señores. Oaxaca, Oaxaca, C.P. 68120. México. Correo electrónico: aespinoza.cat@uabjo.mx (autor responsable).

for 24 years and has avoided the contamination of 262,800 liters of water. The interactive map showed the location of 58 dry toilets in private homes, schools, and businesses, highlighting that a single business avoided the contamination of 53,190 liters of water in one year. This shows that dry toilets are a simple technology with enormous potential to reduce water pollution.

Keywords: dry toilet, pollution, water, proposal, sustainable.

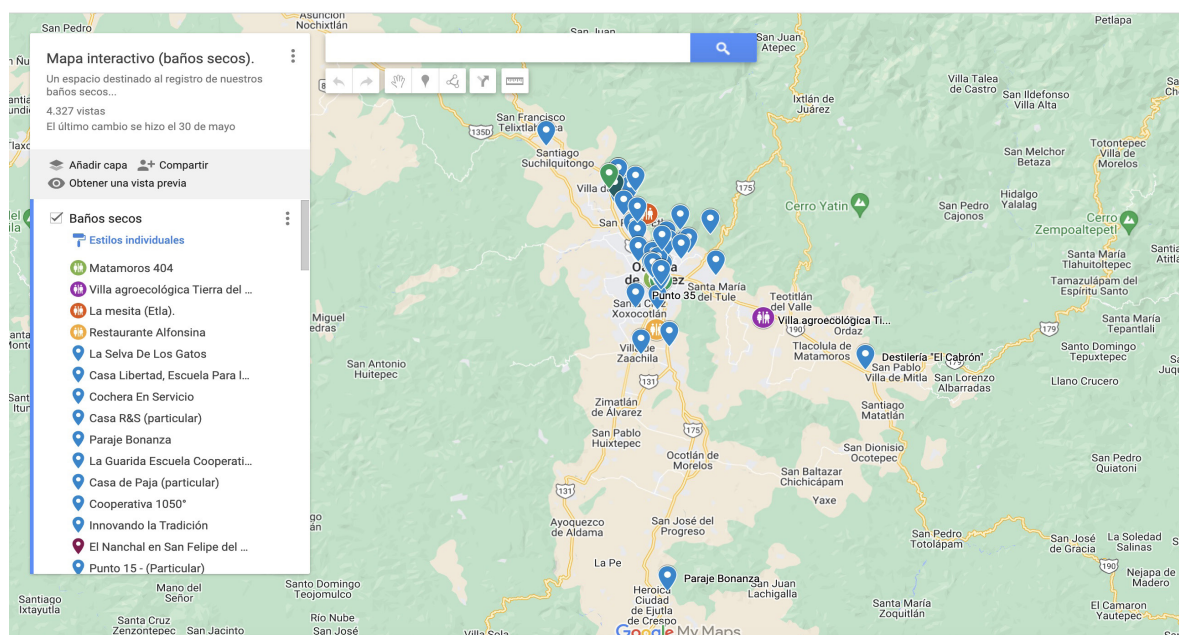
Introducción

En la actualidad es evidente la crisis del agua: casi la mitad de la población mundial sufre escasez de agua al menos durante parte del año, y se espera que siga aumentando la frecuencia y la gravedad de las sequías (UNESCO, 2024), por lo que es necesario y urgente hacer cambios en el uso que hacemos del agua, como el hecho de evitar usar agua limpia para eliminar nuestras heces, práctica que representa un importante desperdicio de agua con los inodoros convencionales, que utilizan entre 10 y 16 litros de agua en cada descarga (CONAGUA 2018). En el caso de baños ahorradores se usan 6 L por descarga. Una alternativa para evitar este desperdicio de agua, es el uso de baños secos, que están diseñados para tratar la heces y orina de manera segura y sustentable, usando tierra en lugar de agua. Además, los desechos se transforman en abono que contribuye al aporte de nutrientes en suelos. La creación como tal de un baño seco, se le atribuye al reverendo Henry Moule, quien creó un armario de tierra que en realidad era un retrete que utilizaba tierra para cubrir las heces, hizo varias pruebas en donde pudo constatar que la tierra era el elemento clave para el correcto funcionamiento, logrando una patente en 1860, 1869 y 1873, además de lograr que 2000 personas los usaran en 1868 (Hart-Davis, 1996). Con el paso del tiempo estos baños quedaron en el olvido para la mayoría de la sociedad, hasta las últimas décadas, ante la conciencia y necesidad de cuidar un recurso natural vital como lo es el agua, los baños secos vuelven a estar presentes. En el estado de Oaxaca existen grupos y lugares que se han encargado de la promoción de baños secos, pero se desconocía de cifras que dieran una idea de la aceptación de los mismos, y la cantidad de agua que se evita contaminar con su implementación. En el presente trabajo, el objetivo es conocer esas cifras a través de la aplicación de una encuesta y un mapa interactivo en la ciudad de Oaxaca, México.

Materiales y Métodos

El estado de Oaxaca se encuentra en la parte sur de México, es un Estado que figura en los primeros lugares de diversidad biológica a nivel nacional, sus recursos naturales en algunos puntos se encuentran en buen estado de conservación, aunque en la ciudad capital del mismo nombre, no es el caso. El agua por ejemplo presenta serios problemas de contaminación, y una de las razones es la descarga de aguas negras domiciliarias. Sin embargo por parte de particulares y centros de permacultura, se realizan propuestas y acciones para intentar revertir o evitar la contaminación de aguas;

la implementación y uso de baños secos es una de ellas. Sin embargo no se conoce el impacto que ha tenido esta estrategia, razón por la que se implementa en el presente estudio una encuesta y un mapa interactivo, dirigidos a la sociedad en general que vive en la ciudad de Oaxaca, difundidos en medios digitales en abril de 2024, obteniendo la respuesta de 25 personas para la encuesta y 58 puntos de registro del mapa interactivo [Mapa interactivo \(baños secos\). - Google My Maps](#).



Fuente: <https://www.google.com/maps/d/edit?mid=1odoJ9Scqv3km0YOpNPBNxney2ng-FS0&usp=sharing>

Resultados

Veinticinco personas contestaron la encuesta, 23 de ellas usan baños secos, que se encuentran ubicados en distintos puntos de la ciudad, como el centro, domicilios particulares, instituciones y negocios. Las personas usan los baños secos desde hace uno, hasta 15 y 24 años. Considerando como ejemplo la cantidad de agua no contaminada gracias a los baños secos, uno que es usado por cinco personas desde hace 15 años, se estima que se ha evitado la contaminación de 821,250 litros de agua aproximadamente (5 personas x 3 veces el uso de baño en promedio x 10 litros de agua por cada uso del baño x 365 días en un año x 15 años), para el caso de una persona que contestó que ha usado el baño seco por 24 años, esto representa 262, 800 litros de agua no contaminada con heces fecales y orina. Con el mapa interactivo se logró identificar el uso de baños secos no solo por particulares, también por comercios (hoteles y cafeterías), lo cual es un aporte importante para evitar descargas de heces y orina en cuerpos de agua, por ejemplo, el Centro Cultural Matamoros 404 atiende a 175 personas mensuales en promedio, si consideramos 3 visitas al baño por persona, con una descarga de 10 L de agua por cada uso del baño, representa un ahorro de agua y contaminación de 5, 250 L de agua en promedio en un mes, en el caso del Hotel Niyana, ubicado en el centro de Oaxaca, proporcionó datos de 2023, hospedó a 591 personas, durante tres noches en promedio y si

cada persona usa el baño 3 veces al día y gasta 10 litros de agua por cada uso, entonces se estima que 53,190 litros de agua no fueron contaminados en un año.

Discusión

De acuerdo a CONAGUA, 2018, un baño convencional usa 10 a 16 litros de agua. El baño seco trata las heces con tierra, hojas secas, por lo tanto no hay un desperdicio de agua, y se hace un compostaje con las heces que servirán como abono una vez tratada

La ONU en 2015, establece los objetivos mundiales del desarrollo sostenible, el objetivo 6 hace referencia a un medio ambiente limpio, saludable y sostenible, el uso de baños secos contribuyen a este objetivo, al evitar la contaminación de agua y generar abono para enriquecimiento de suelos

Conclusiones

El uso de baños secos es un elemento clave para evitar la contaminación al recurso natural agua.

Los baños secos ayudan a generar abono a partir de heces tratadas de forma eficiente y segura

La implementación en negocios permite la difusión y un alcance mayor en evitar la contaminación de agua.

Referencias bibliográficas

Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021: el valor del agua - UNESCO Biblioteca Digital

Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2024: agua para la prosperidad y la paz; resumen ejecutivo - UNESCO Biblioteca Digital

Naciones Unidas, Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021: El valor del agua. UNESCO, París

www.unicef.org

Día Mundial del Retrete | ONU-Agua (unwater.org)

Agua en el Mundo | Comisión Nacional del Agua | Gobierno | gob.mx (www.gob.mx)

Hart-Davis, A. (enero 15 de 1996). Rev. Henry Moule y el armario de tierra. Online science and technology. No. 5. On-line: SCIENCE AND TECHNOLOGY (exnet.com)

<https://www.un.org/es/common-agenda/sustainable-development-goals>

<https://www.gob.mx/conagua/articulos/inodoros-sustentables-otra-forma-de-cuidar-el-agua>

Manual de pruebas a instalaciones sanitarias, UNAM
http://www.agua.unam.mx/assets/pumagua/manuales/manual_sanitarios.pdf

Manejo sostenible del agua, Banco Interamericano de Desarrollo
<https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/6771/Manejo%20sostenible%20del%20agua.pdf>

Crisis Mundial del Agua: un tema prioritario para atender en la Zona Metropolitana de Ocotlán en proceso de consolidación

World Water Crisis: a priority issue to address in the Metropolitan Area of Ocotlán in the process of consolidation

*Luis Arturo Macías García^a, José de Jesús Quintana Contreras^b y
Paloma Elizabeth Macías Ruíz^c*

Resumen / Abstract

El presente trabajo pretende ser un análisis reflexivo, sobre la urgencia de implementar acciones inmediatas por la carencia del vital líquido en la Zona Metropolitana de Ocotlán, que comprende los municipios de Ocotlán, Poncitlán y Jamay situados en la zona Ciénega del Estado de Jalisco, esto debido a lo que nosotros consideramos como una crisis hídrica, causada por el cambio climático manifestado en las altas temperaturas de los últimos años, la contaminación, el crecimiento de unidades económicas en la Zona, así como el mal manejo y distribución del recurso del agua. Además el estudio arroja datos sobre el estado que guardan las presas de la región, contrastados con datos demográficos y de actividad económica, principalmente.

Palabras clave: zonas metropolinasas, crisis hídrica, contaminación, cambio climático.

a. El Profesor Macías García ha sido Profesor Investigador Titular en la Universidad de Guadalajara. Con estudios de ingeniería industrial y posgrados en economía. economía regional y ciencia política ha sido profesor en diversas instituciones de educación superior, entre ellas el UNITEC, la UNID y el Instituto Tecnológico Nacional en Ocotlán. Integrante del Laboratorio de Estudios Metropolitanos (LEMet-Colegio de Jalisco). Integrante de la Red Internacional América Latina, África, Europa y El Caribe (Red ALEC). <https://orcid.org/0000-0001-7703-4012>. Correo electrónico: larturo.macias@academicos.udg.mx.

b. El Doctor Quintana Contreras es Profesor Investigador Titular adscrito al Centro Universitario del Norte, Abogado con Maestría en Investigación e Innovación Educativa y Doctor en Investigación e Innovación Educativa, Universidad de Málaga. Es miembro del SNI de CONACHYT, correo electrónico: dejesus.quintana@academicos.udg.mx

c. Economista, auxiliar de investigación.

This work aims to be a reflective analysis of the urgency of implementing immediate actions due to the lack of vital liquid in the Metropolitan Zone of Ocotlán, which includes the municipalities of Ocotlán, Poncitlán and Jamay located in the Ciénega zone of the State of Jalisco, this due to what we consider to be a water crisis, caused by climate change manifested in the high temperatures of recent years, pollution, the growth of economic units in the Area, as well as the poor management and distribution of the water resource. In addition, the study provides data on the state of the region's dams, contrasted with demographic and economic activity data, mainly.

Keywords: metropolitan zone, water crisis, pollution, climate change.

1. Sobre el proceso de metropolización en México

Según datos del Consejo Nacional de Población (CONAPO), la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano del Gobierno de México, SEDATU, y el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, se reconocen 48 zonas metropolitanas en el territorio nacional, mismas que están conformadas por 345 municipios, en los que residen 67.6 millones de personas. Además, se reconoce la existencia de 22 metrópolis municipales en donde habitan 12 millones. De igual manera, se hace el reconocimiento de 54 municipios que al expandirse territorialmente ha dado lugar en la actualidad a 22 zonas conurbadas, en donde tiene residencia una población que alcanza ya los 2.9 millones. En resumen, se tiene en la actualidad una población de 82.5 millones con residencia en zonas metropolitanas, o en proceso de metropolización; lo que significa un 65.5% de toda la población nacional.

Proceso de metropolización en el Estado de Jalisco

La más reciente clasificación de metrópolis en México, por CONAPO, SEDATU e Inegi resultó reconocimiento de tres zonas metropolitanas: la Zona Metropolitana de Guadalajara, la Zona Metropolitana Interestatal de Puerto Vallarta y la Zona Metropolitana de Ocotlán. En el caso de ésta última, la ZMO esta integrada por tres municipios ribereños del Lago de Chapala, Jamay, Ocotlán y Poncitlán.

En un principio la Zona Metropolitana de Ocotlán, ZMO, se integró sólo por los municipios de Ocotlán y Poncitlán, más sin embargo, para la segunda década del presente siglo, Siglo XXI, se sumó el municipio de Jamay. Para el 2020, la Zona Metropolitana de Ocotlán, ZMO, registró 184,603 habitantes, de los cuales 93 mil 984 (50.9%) fueron mujeres y 90 mil 619 (49.1%) fueron hombres. Como en otros muchos casos en donde se analiza la composición relativa por género, la población femenina supera a la masculina en 3 mil 365 personas, de lo que puede concluirse que por cada cien mujeres, se tiene tan sólo a noventa y seis hombres.96 hombres.

Inicialmente la Zona Metropolitana de Ocotlán tenía en la esfera federal el reconocimiento de Zona Metropolitana 23, por estudios que iniciaron la CONAPO-SEDATU-Inegi a principios

del presente siglo, En la actualidad, la clasificación más reciente llevó a estos tres municipios a ser considerados como una de las veintidós zonas conurbadas en México, Lo cierto es que los tres municipios exhiben un crecimiento homogéneo desde los últimos decenios del siglo pasado, Siglo XX. En la actualidad se cuenta con un Instituto de Planeación Metropolitana, Imeplan Ocotlán; si bien se reconoce que se hace necesario llevar a la práctica los compromisos de cooperación intermunicipal para la consolidación de una zona metropolitana. Sin duda, la necesidad de promover un verdadero desarrollo sostenible reclama la puesta en práctica los instrumentos jurídicos esenciales para un verdadero desarrollo y así fomentar mejores estándares de bienestar para la población residente.

Para tal efecto, los reglamentos; leyes y órganos colegiados que regulan la coordinación, administración, y marco jurídico entre los municipios de la ZMO, en los cuales se puede sopor-tar esta conurbación y metropolización son:

- Plan Nacional de Desarrollo.
- Ley General de Asentamientos Humanos y Desarrollo Urbano
- Plan Estatal de Desarrollo y Gobernanza.
- Plan Municipal de Desarrollo.
- Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Humano.
- Ley de Coordinación Metropolitana.
- Plan de Ordenamiento Territorial Metropolitano.
- Programa de Fomento a la Planeación Urbana, Metropolitana y ordenamiento Territorial.
- Reglamento de Desarrollo Urbano.
- Consejo Metropolitano.
- Instituto Metropolitano de Planeación.
- Comisión de Asuntos Metroplitanos: Congresos, Federal y Local.

Aún existiendo toda esta gama de instituciones y ordenamientos jurídicos, no se encuentra plas-mado en esta Zona Metropolitana de Ocotlán, convenio alguno o trabajo intermunicipal que pro-ponga acciones concretas al problema del agua.

2. La realidad actual, situación de alarma.

Durante el 2023 el occidente de México experimentó un pésimo temporal de lluvias lo que terminó afectando la producción de granos, principalmente maíz; alimento básico en la alimenta-ción de la población en este país. Las consecuencias de estos hechos seguramente son variados y extensos, algunos de ellos insospechados para las mayorías. A manera de ejemplo de las múltiples repercusiones originadas por el mal temporal durante el pasado año, se puede señalar la baja en la producción de miel, hecho que esta inhibiendo a muchos productores de la región a exportar este producto a Europa, como lo han venido haciendo durante otros años. Se tiene la sospecha de que esto es sólo una de muchas consecuencias que están aconteciendo como resultado del mal tempo-ral. Lo anterior anima a aventurarnos en definir el significado de lo que se debe entender por crisis hídrica.

Por una parte, relacionado con el concepto de crisis hídrica, debe señalarse el problema de su contaminación a causa de las descargas industriales, agrícolas y urbanas sin conseguir un tratamiento adecuado por falta de infraestructura para el tratamiento de aguas residuales.

A este respecto, se asegura que los países y regiones industrializados son propensos a experimentar crisis hídrica por no tener sistemas adecuados de manejo y distribución del recurso agua, o bien, porque los sistemas o infraestructura que se tiene son a todas luces obsoletos. En países como México, el problema también está relacionado con la falta de alcantarillado y de tuberías de distribución para el agua potable, en la medida en que evolucionan los procesos de urbanización, se provoca una mayor demanda de este preciado líquido.

El fenómeno metropolitano del que México es un caso especial, durante varias décadas del ya concluido siglo XX, existió una migración campo ciudad, que dio como resultado el crecimiento de ciudades, inicialmente manchas urbanas como la Ciudad de México, Puebla, Guadalajara y Monterrey. Una multiplicación de población citadina que en tiempos actuales ha provocado en definitiva la aparición de grandes metrópolis que cada decenio se extienden sobre centros de población adyacentes, lo que en efecto da lugar a las zonas metropolitanas que son el origen de una demanda excesiva de agua, presionado cada vez más hasta hacer patente su escasez. Fundamentalmente agua potable, aunque también para uso productivo, situación que la hace aparecer, paradójicamente, como un lujo; por cuanto la humanidad no puede prescindir de su consumo.

Si bien, se asegura que el planeta está compuesto en un 70% por agua, según National Geographic, sólo el 3.5% es agua dulce, y más grave, únicamente una pequeña fracción de ese porcentaje es potable, por lo que cada vez es más determinante en las agendas de gobierno, la búsqueda de opciones y la definición de políticas públicas, para su eficiente administración y cuidado.

Preocupan profundamente las circunstancias actuales, una situación alarmante, pues aproximadamente dos mil millones de personas en el mundo no tienen acceso a servicios seguros de agua potable, es decir, entre 27% y el 48% de la población mundial tiene algún problema con el acceso al agua. Desafortunadamente, la zona metropolitana de Ocotlán, conformada por los municipios de Jamay, Ocotlán y Poncitlán es parte de estas cifras de alarma por los problemas relacionados con el agua.

Sin duda que los acontecimientos recientes en torno a la disponibilidad del recurso agua, deben inducir a una seria reflexión sobre la gestión del agua, en lo particular en las ciudades, aunque los gobiernos deben esforzarse por la profesionalización técnica y el impulso de una cultura con soportes normativo adecuado, para el diseño de políticas públicas que garanticen la disponibilidad de este recurso para sus poblaciones, en congruencia con el sexto Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS).dentro de la Agenda ONU 2030 que hace alusión al acceso al agua limpia y a su saneamiento

Debemos trabajar intensamente académicos, empresarios, organizaciones de la sociedad civil y gobiernos para cambiar las concepciones tradicionales, sobre la comprensión, utilización, dimensión, valoración y prognosis de un recurso tan valioso, limitado y necesario para la vida y el desempeño de las actividades humanas. Nuestra supervivencia depende de ello, el proceso de crecimiento económico y el desarrollo socioeconómico sostenible requieren de garantías de acceso al agua en el corto, mediano y largo plazo.

3. Elementos determinantes que explican y agudizan la crisis

El agua como recurso, es imprescindible para la vida en nuestro planeta. Se identifican con precisión factores directos e indirectos que ocasionan y agravan la problemática del agua y que ubican a la humanidad en la crisis hídrica que hoy por hoy, indiscutiblemente se enfrenta. Entre los más determinantes por su influencia, impacto y gravedad, señalamos tres aspectos: *el cambio climático*; *nuestra conducta con respecto al uso del agua*, y; *la contaminación* de los recursos hídricos.

El cambio climático. No existe duda alguna, el cambio climático influye con fuerza muy negativamente en la cantidad y calidad de agua disponible en todo el mundo y México particularmente es afectado por su condición y ubicación geográfica, amenazado por fenómenos meteorológicos como huracanes, pobres temporales de lluvia, tormentas de hielo, ondas de calor y períodos de sequía, que explican su agudización hacia extremos del cambio climático.

La huella hídrica irracional que ha resultado de conductas consumistas sin conciencia de su valor y consecuencias, que han dado lugar al desperdicio de grandes cantidades de agua para fines industriales y productivos indiscriminadamente, con apoyo y complicidad de muchas autoridades en beneficio de privilegiados grupos que pocas veces consideran acciones para revertir los efectos negativos o compensar los daños ocasionados al planeta. También es importante advertir la importancia del uso del agua para la producción de alimentos en el medio rural, la Organización de Naciones Unidas (ONU) asegura que la huella hídrica de la producción de alimentos en el mundo está relacionada con el 70% de agua y reconoce la importancia de prevenir daños por contaminación por el vertido de pesticidas, fosfatos y nitritos en tierras agrícolas.

La contaminación. Deben analizarse y replantearse los procesos productivos que hacen posible la producción de bienes y servicios en todo el mundo, tanto en países altamente industrializados, como en aquellos de menor desarrollo, en los que en menor escala avanzan hacia procesos de producción manufacturera. Las explotaciones mineras, la producción de hidrocarburos, la producción de químicos y plásticos, y por supuesto, las maneras en que se vierten los desechos de poblaciones de áreas urbanas a ríos y lagunas, deben ser objeto de observación y en su momento proceder a sancionarlas dentro de marcos normativos exigentes y autoridades comprometidas con las acciones que deben poner freno y señalen mecanismos paralelos para proteger el agua y al entorno ecológico en general.

El hecho de beber agua contaminada causa la muerte de millones de personas en el mundo, cada año; situación que es flagrante en un mundo negligente donde los gobiernos y sectores productivos hacen caso omiso de las repercusiones de la actividad humana sobre la cantidad y calidad del agua que llega en especial a poblaciones en condición de exclusión social, pobreza y marginalidad.

Un tema de la mayor relevancia y por el que desafortunadamente, no se están realizando acciones con la contundencia que exige la gravedad de la situación, es lo relacionado con la deforestación, provocada la mayor de las veces por razones de ambición económica o clientelismo popular o político. Lo cierto es que se pierde la batalla, porque bastan solo unas horas a los incendios, para arrasar con bosques enteros, que para su madurez requirieron de muchos años. Reconocer el efecto de los árboles y bosques para la sobrevivencia del planeta y desde luego su relación directa con el agua, debería por sí mismo obligar a la población a su cuidado y a realizar continuamente campa-

ñas de reforestación. Es necesario se incluya en todas las agendas públicas, acciones tanto para la producción de árboles, como para su plantación y cuidado.

1. Situaciones a considerar en la zona metropolitana de Ocotlán.

Los datos que integran el diagnóstico del agua en la Zona Metropolitana de Ocotán se obtuvieron de la Comisión Estatal del Agua, CEA, mediante las fichas técnicas publicadas por municipio y que en su conjunto nos advierten de la necesidad urgente de tomar conciencia y formular los mecanismos públicos y de participación privada, ciudadana, necesarios para revertir la tendencia hacia una crisis de mayor profundidad y construir una cultura de trabajo coordinado metropolitano para alcanzar una cultura de preservación y cuidado del medio, de gestión eficiente y de impacto positivo en la calidad de vida de la población.

En principio es importante señalar que la Zona Metropolitana de Ocotlán, según la versión oficial, se encuentra en lo que se denomina la Región Hidrológica-Administrativa Lerma Santiago Pacífico VIII, que se extiende en general sobre varias entidades del occidente del país. En lo específico, de acuerdo a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el territorio del municipio de Jamay se encuentra en un 85.53% en la Cuenca Hidrológica Río Lerma 7 y en un 14.47% en la Cuenca del Río Zula. Por su parte el territorio del municipio de Ocotlán se encuentra en un 85.89% en la Cuenca del Río Zula y en un 14.11% sobre la Cuenca del Río Santiago 1. Por último, el territorio del municipio de Poncitlán se extiende en un 65.78% sobre la Cuenca del Río Santiago 1, y en un 34.22% sobre la Cuenca del Río Lerma 7.

Población y superficie

En cuanto a la población, esta zona metropolitana contó en 2010 con una población de 164,256 habitantes y para el año 2020, 184,603 personas. Lo que arroja una tasa de crecimiento poblacional promedio anual de 1.2%. Si la tendencia se mantiene podemos esperar una población de 207.5 miles de habitantes para el 2030. Lo anterior significará una densidad de población promedio de 167 personas por kilómetro cuadrado. En el entendido de que la superficie agregada de los tres municipios como zona metropolitana alcanza una extensión de 1,240.385 kilómetros cuadrados.

Cuadro 1. Población en la Zona Metropolitana de Jamay-Ocotlán-Poncitlán.

Integración por municipio

Municipio	2010	2020	2030*	T de C. media anual
Jamay	22,881	24,894	27,100	0.85
Ocotlán	92,967	106,050	121,000	1.33
Poncitlán	48,408	53,659	59,500	1.04
Zona Metropolitana	164,256	184,603	207,600	

* Proyecciones de población con base en cifras censales.

Fuente: Censos Generales de Población y Vivienda. Instituto Nacional de Estadística,
Geografía e Informática, INEGI.

Lo anterior significa que cada día se estarán demandando 33,400 litros de agua por kilómetro cuadrado de la zona metropolitana, a razón de 200 litros por persona.

Cuadro 2. Superficie de la Zona Metropolitana de Jamay-Ocotlán-Poncitlán, por municipio

Municipio	Superficie en kms ²	Estructura relativa
Jamay	162.76	13.12%
Ocotlán	242.72	19.57%
Poncitlán	834.90	67.31%
Zona Metropolitana J-O-P	1,240.38	100.00%

Fuente: cifras oficiales, Inegi.

Ahora bien, procediendo a hacer el recuento en el año 2015, la Comisión Estatal de Agua, CEA; hacía en cuanto a disponibilidad de agua en el territorio bajo estudio.

El recurso agua para esta zona metropolitana tiene su origen en aguas superficiales, aguas subterráneas, con un soporte importante en las presas existentes en la actualidad sobre el territorio de la zona metropolitana.

Presas

En el municipio de Jamay se tiene la presa de La Calzada con una capacidad de operación de 0.8 millones de metros cúbicos dedicada al riego de cultivos. En el caso del municipio de Ocotlán, se tienen tres presas, La Guaracha con una capacidad de operación de 5 millones de metros cúbicos, La Grulla, con capacidad de 3.2 millones de metros cúbicos y la presa de Los Araiza con una capacidad de operación de 0.5 millones de metros cúbicos. Las tres dedicadas al riego de cultivos. El municipio de Poncitlán tiene por su parte la presa de La Tinaja con una capacidad de 2.4 millones de metros cúbicos, y su agua se dedica a la cabecera municipal del municipio.

Cuadro 3. Enumeración de las principales presas de la Zona Metropolitana de Jamay-Ocotlán-Poncitlán

Jamay			Ocotlán			Poncitlán		
Nombre de la presa	Capacidad de operación (Mm3)	Uso	Nombre de la presa	Capacidad de operación (Mm3)	Uso	Nombre de la presa	Capacidad de operación (Mm3)	Uso
La Calzada	0.8	Riego	La Guaracha	5.0	Riego	La Tinaja	2.4	Poncitlán
			La Grulla	3.2	Riego			
			Los Araiza	0.5	Riego			
				8.7				

Fuente: Fichas técnicas por municipio. Fichas técnicas hidrológicas municipales.

Gobierno del Estado de Jalisco. 2015.

Aguas superficiales

Con relación al *aprovechamiento de las aguas superficiales*, la Zona Metropolitana de Ocotlán, potencialmente puede disponer de 3.737222 millones de metros cúbicos, De este volumen total, se dedican a las actividades del campo un aproximado de 96.8% y el resto, un 3.2% al servicio residencial, Público Urbano.

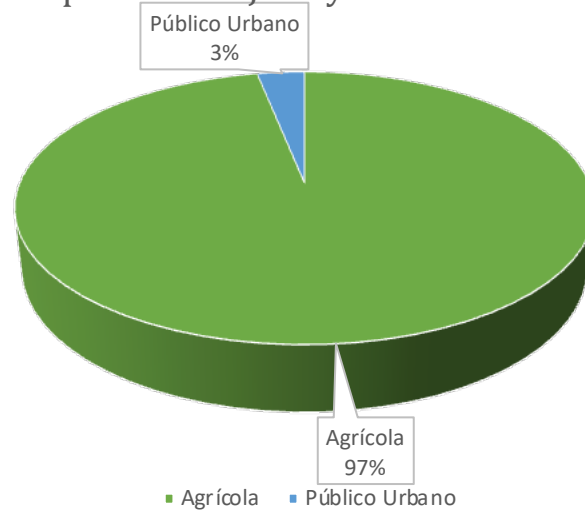
Cuadro 4. Aprovechamiento de Aguas Superficiales en la Zona Metropolitana de Jamay-Ocotlán-Poncitlán

Uso	Jamay		Ocotlán		Poncitlán		ZM J-O-P	
	Número	Volumen (Mm3)	Número	Volumen (Mm3)	Número	Volumen (Mm3)	Número	Volumen (Mm3)
Agrícola	2	0.12768	3	0.909000	5	2.582875	10	3.619555
Público Urbano	0	0.00000	1	0.004968	11	0.112699	12	0.117667
Total	2	0.12768	4	0.913968	16	2.695574	21	3.737222

Fuente: Fichas técnicas por municipio. Fichas técnicas hidrológicas municipales.

Gobierno del Estado de Jalisco. 2015.

Aprovechamiento de Aguas Superficiales en la Zona Metropolitana de Jamay-Ocotlán-Poncitlán



Fuente: cifras del cuadro 4.

Aguas subterráneas

Sobre el *aprovechamiento del recurso hídrico de aguas subterráneas*, se tiene una mayor diversidad: acuacultura, 0.4%; a la producción agrícola, 74.8%; a industria, 13.7%; a la actividad pe-

cuaria, 0.5%; al uso residencial público urbano, 9.2%; a los servicios, 0.9%; y finalmente a varios o usos múltiples, el 0.5%.

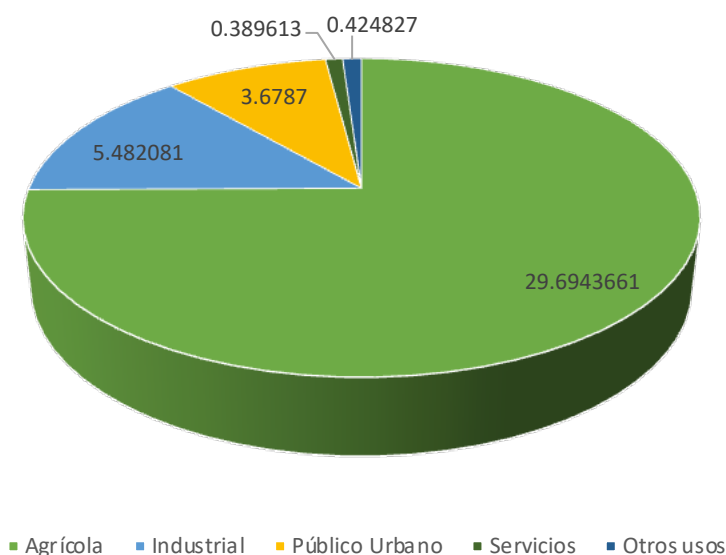
Cuadro 5. Aprovechamiento de Aguas Subterráneas en la Zona Metropolitana de Jamay-Ocotlán-Poncitlán

Uso	Jamay		Ocotlán		Poncitlán		ZM J-O-P	
	Número	Volumen (Mm3)	Número	Volumen (Mm3)	Número	Volumen (Mm3)	Número	Volumen (Mm3)
Acuacultura	2	0.1783290	0	0.000000	0	0.000000	2	0.178329
Agrícola	181	7.1736541	96	11.65288	96	10.867832	373	29.69437
Industrial	2	0.0700000	2	0.839139	13	4.572942	17	5.482081
Pecuario	8	0.0906520	2	0.063875	10	0.043374	20	0.197901
Público Urbano	3	0.3785030	20	0.964091	26	2.336106	49	3.678700
Servicios	1	0.0015000	5	0.185876	6	0.202237	12	0.389613
Doméstico	0	0.0000000	2	0.000711	4	0.004273	6	0.004984
Múltiples	0	0.0000000	2	0.043613	0	0.000000	2	0.043613
Total	197	7.8926380	129	13.750185	155	18.026764	481	39.66959

Fuente: fichas técnicas por municipio. Fichas técnicas hidrológicas municipales.

Gobierno del Estado de Jalisco. 2015.

Aprovechamiento de Aguas subterráneas en la Zona Metropolitana Jamay-Ocotlán-Poncitlán



Fuente: cifras del cuadro 4.

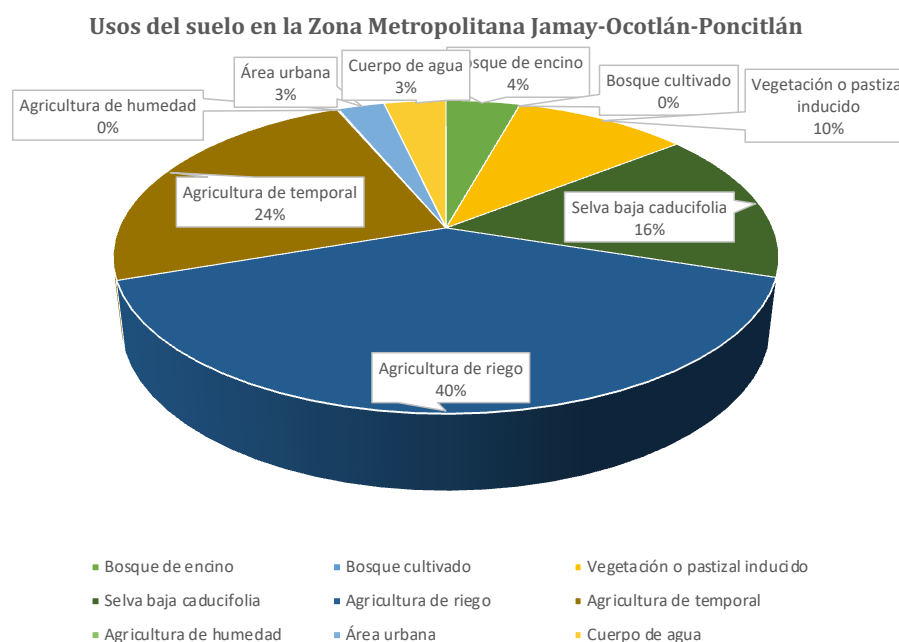
Uso del suelo en la Zona Metropolitana

En cuanto al uso del suelo de la zona metropolitana, éste se clasifica de la siguiente manera: agricultura de riego, 39.7%; agricultura de temporal, 23.9%; selva baja caducifolia, 15.6%; vegetación o pastizales inducidos, 10.1%; bosques de encino, 4.3%; cuerpos de agua, 3.6%; áreas urbanas de centros de población, 2.7%; actividad agrícola por humedad, 0.1% y bosques cultivados 0.0%.

Cuadro 6. Usos del suelo existente en la Zona Metropolitana Jamay-Ocotlán-Poncitlán. Superficie

Uso del Suelo	Jamay Superficie en Km2	Ocotlán Superficie en Km2	Poncitlán Superficie en Km2	ZM J-O-P Superficie en Km2	Estructura relativa (ZM J-O-P)
Bosque de encino	3.21	4.91	19.92	28.04	4.3%
Bosque cultivado	0.03	0.00	0.00	0.03	0.0%
Vegetación o pastizal inducido	1.63	5.89	58.42	65.94	10.1%
Selva baja caducifolia	19.59	38.46	43.74	101.79	15.6%
Agricultura de riego	69.27	114.91	74.73	258.91	39.7%
Agricultura de temporal	32.60	49.90	73.85	156.35	23.9%
Agricultura de humedad	0.79	0.00	0.00	0.79	0.1%
Área urbana	1.83	10.36	5.33	17.52	2.7%
Cuerpo de agua	22.06	1.57	0.00	23.63	3.6%
Total	151.01	226.00	275.99	653.00	100.0%

Fuente: Fichas técnicas por municipio. Fichas técnicas hidrológicas municipales.
Gobierno del Estado de Jalisco. 2015.



Fuente: cifras del cuadro 6.

Plantas de tratamiento de aguas residuales

La información relativa a *la presencia de plantas de tratamiento de aguas residuales* señala que para el 2015, se tenían sólo dos plantas en operación con un gasto de diseño de 340 litros por segundo; una en el municipio de Ocotlán y otra muy pequeña en el municipio de Jamay. Para ese mismo año, se tenían seis plantas fuera de operación: una en Jamay, cinco en Poncitlán. En el municipio de Ocotlán se reportaron 4 plantas dadas de baja.

Cuadro 7. Número de plantas de tratamiento de aguas residuales según su status de operación en 2015, en la Zona Metropolitana de Jamay-Ocotlán-Poncitlán

Status de las plantas	Jamay		Ocotlán		Poncitlán		ZM de J-O-P	
	No PTARs	Gasto de Diseño (lps)	No. de PTRs	Gasto de diseño (lps)	No. de PTRs	Gasto de diseño (lps)	No. de PTRs	Gasto de diseño (lps)
En operación	1	40	1	300	0	0	2	340
Fuera de operación	1	2	0	0	5	33	6	35
Estabilización	0	0	0	0	0	0	0	0
Rehabilitación	0	0	0	0	0	0	0	0
Baja	0	0	4	29	1	32	5	61
Abandonada	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	2	42	5	329	6	65	13	436

Fuente: Fichas técnicas por municipio. Fichas técnicas hidrológicas municipales.

Gobierno del Estado de Jalisco. 2015.

Compromiso con la región y con el planeta.

Con recurrencia se señala la zona metropolitana por la generosidad de su ubicación y por la riqueza natural de que dispone, eso le da un gran potencial para el desarrollo pero también una gran responsabilidad para su adecuado aprovechamiento y para su conservación y cuidado, absolutamente convencidos de que nuestras acciones positivas y también los abusos tienen repercusión por mucho, más allá de nuestros límites geográficos, en ocasiones es alarmante la indolencia de nuestra sociedad en general, gobiernos y ciudadanos, frente a una crisis que se viene anunciando desde hace años con relación a un recurso que es vital para la existencia humana sobre el planeta.

Si bien la responsabilidad fundamentalmente señala a los gobiernos municipales, estatales y federal, lo cierto es que los ciudadanos tienen un papel fundamental que debe asumirse con protagonismo para trabajar a través de una eficiente gobernanza. Apoyo y vigilancia de acciones en favor del agua, en donde la sociedad o ciudadanía en general, no debe permanecer ajena a la amenaza de su propia sobrevivencia. Todos en conjunto, debemos intervenir en forma decisiva y asumir al menos, actitudes de mayor cuidado del agua, pues este recurso es el que da forma a nuestro entorno y garantiza la existencia del ser humano sobre el planeta.

Es fundamental la formación de una conciencia masiva de que habitamos un territorio, que si bien se observa como una región con abundancia de agua, Ocotlán, rodeada de ríos, en tanto que Jamay y Poncitlán, frente al Lago de Chapala, el lago más grande de México, lo cierto es que también debemos reconocer los graves daños provocados por la contaminación y la amenaza de la escasez. Por ello, es necesario advertir comunitariamente de la importancia de este vital líquido y actuar en consecuencia, en estrecha suma de esfuerzos con las instituciones, locales y metropolitanas.

Anexo

Descripción de unidades de agua subterránea existentes en 2015, para dar servicio a áreas residenciales, catalogadas como uso “público urbano”

Titular	Localidad	Volumen Asignado	Uso
Municipio de Jamay, Jalisco. (San Miguel de la Paz)	San Miguel de la Paz	173793.00	Público Urbano
Municipio de Jamay, Jalisco. (La Maltaraña o La Palmita)	Maltaraña (La Palmita)	48341.00	Público Urbano
Municipio de Jamay, Jalisco. (San Agustín)	San Agustín	156369.00	Público Urbano
Total Jamay	3	0.378503	Público Urbano
Municipio de Ocotlán, Jalisco. La Muralla o La Manga	La Muralla, (La Manga)	4968.00	Público Urbano
Municipio de Ocotlán, Jalisco. (El Joconoxtle o La Tuna)	Joconoxtle	81706.00	Público Urbano
Municipio de Ocotlán, Jalisco.	San Martín de Zula	121522.00	Público Urbano
Municipio de Ocotlán, Jalisco. (Cabecera Municipal)	Ocotlán, Jalisco	68373.00	Público Urbano
Municipio de Ocotlán, Jalisco. (Cabecera Municipal)	Ocotlán, Jalisco	68373.00	Público Urbano
Municipio de Ocotlán, Jalisco. (Cabecera Municipal)	Ocotlán, Jalisco	68373.00	Público Urbano
Municipio de Ocotlán, Jalisco. (Cabecera Municipal)	Ocotlán, Jalisco	68373.00	Público Urbano
Municipio de Ocotlán, Jalisco (Cabecera Municipal)	Ocotlán, Jalisco	68373.00	Público Urbano

Municipio de Ocotlán, Jalisco. (Cabecera Municipal)	Ocotlán, Jalisco	68373.00	Público Urbano
Municipio de Ocotlán, Jalisco (La Orilla de la Cerca)	La Orilla de La Cerca	11863.00	Público Urbano
Municipio de Ocotlán, Jalisco. (Joconoxtle o La Tuna)	Joconoxtle (La Tuna)	81706.00	Público Urbano
Municipio de Ocotlán, Jalisco. (Gral. Joaquín Amaro o Los Sauces)	Gral. Joaquín Amaro, (Los Sauces)	33587.00	Público Urbano
Municipio de Ocotlán, Jalisco. (San Vicente o Labor Vieja)	San Vicente (La Labor Vieja)	67842.00	Público Urbano
Municipio de Ocotlán, Jalisco. (Santa Clara de Zula o Santa Clara)	Santa Clara de Zula (Santa Clara)	35589.00	Público Urbano
Municipio de Ocotlán, Jalisco. (La Palma)	La Palma	5709.00	Público Urbano
Municipio de Ocotlán, Jalisco. (Rancho Viejo del Refugio o Rancho Viejo)	Rancho Viejo del Refugio (Rancho Viejo)	54644.00	Público Urbano
Municipio de Ocotlán, Jalisco. (Paso de la Comunidad)	Paso de la Comunidad	22317.00	Público Urbano
Municipio de Ocotlán, Jalisco. (El Pedregal o Santa Clara del Pedregal)	El Pedregal (Santa Clara del Pedregal)	14236.00	Público Urbano
Municipio de Ocotlán, Jalisco. (La Puerta de los Ranchos o Los Ranchos)	La Puerta de los Ranchos (Los Ranchos)	11270.00	Público Urbano
Municipio de Ocotlán, Jalisco. (El Ramireño)	El Ramireño	2817.00	Público Urbano
Municipio de Ocotlán, Jalisco (San Juan Chico)	San Juan Chico	9045.00	Público Urbano
Total Ocotlán	21	0.964091	Público Urbano
Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco. (Santa María de la Joya)	Santa María de la Joya	3336.00	Público Urbano
Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco. (Ojo de Agua)	Ojo de Agua	14310.00	Público Urbano

Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco. (Estancia de San Nicolás)	Estancia de San Nicolás	9119.00	Público Urbano
Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco. (Cuesta de Mezcala)	Cuesta de Mezcala	53828.00	Público Urbano
Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco. (La Ladrillera)	La Ladrillera	2521.00	Público Urbano
Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco. (San José de las Pilas o La Pila Chica)	San José de las Pilas (La Pila Chica)	14755.00	Público Urbano
Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco. (El Zapote)	El Zapote	5561.00	Público Urbano
Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco. (El Campo)	El Campo	2743.00	Público Urbano
Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco. (San Miguel de la Orilla)	San Miguel de la Orilla	1335.00	Público Urbano
Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco. (Isla de Mezcala, El Presidio)	Mezcala	1113.00	Público Urbano
Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco. (El Gusano)	El Gusano (El Mezquite)	4078.00	Público Urbano
Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco. (La Estancia de Cuitzeo)	La Estancia de Cuitzeo	109500.00	Público Urbano
Colonos del Fraccionamiento Campestre del Valle, A.C,	Fraccionamiento Campestre del Valle	82785.00	Público Urbano
Asociación de Colonos del Fraccionamiento Los Galapagos, A. C.	San Juan Tecomatlán	5700.00	Público Urbano
Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco	Poncitlán	306600.00	Público Urbano
Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco. (San Sebastián)	San Sebastián	23726.00	Público Urbano
Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco. (Santa Cruz el Grande)	Santa Cruz el Grande	127305.00	Público Urbano
Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco. (San Luis del Agua Caliente)	San Luis del Agua Caliente	59018.00	Público Urbano
Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco. (San Miguel Zapotitlán)	San Miguel Zapotitlán	119519.00	Público Urbano

Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco. (San Pedro Itzicán)	San Pedro Itzican	176076.00	Público Urbano
Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco.	San José de Ornelas	17646.00	Público Urbano
Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco. (Cuitzeo o La Estancia)	Cuitzeo (la Estancia)	272162.00	Público Urbano
Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco. (Casa Blanca)	Casa Blanca	41446.00	Público Urbano
Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco. (Mezcala)	Mezcala	206900.00	Público Urbano
Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco. (San Jacinto)	San Jacinto	83559.00	Público Urbano
Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco. (Tlachichilco del Carmen o Barrio de Tlachichilco)	Tlachichilco del Carmen	26395.00	Público Urbano
Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco. (San Juan Tecamatlán)	San Juan Tecamatlán	99056	Público Urbano
Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco. (Mezcala)	Mezcala	210404.00	Público Urbano
Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco. (Chalpicote)	Chalpicote	78346.00	Público Urbano
Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco. (La Granjena)	La Granjena	12456.00	Público Urbano
Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco. (La Peña)	La Peña	35441.00	Público Urbano
Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco. (El Romereño, Infonavit)	El Romereño (Infonavit)	67529.00	Público Urbano
Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco. (La Granjena)	La Granjena	12456.00	Público Urbano
Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco. (La Celanese)	La Celanese	4300.00	Público Urbano
Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco. (Granjas San Miguel)	Granjas San Miguel	3781.00	Público Urbano
Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco.		50000.00	Público Urbano
Ayuntamiento de Poncitlán, Jalisco.	La Barranquilla	104000.00	Público Urbano
Total Poncitlán	37	2.336106	Público Urbano

Roles de los coautores en el desarrollo del documento

- **Luis Arturo Macías García.** Captación de información, análisis, redacción del borrador inicial.
- **José de Jesús Quintana Contreras.** Captación de información, análisis, redacción del documento final.
- **Paloma Elizabeth Macías Ruíz.** Captación de información, tabulación de datos, construcción de cuadros y gráficos, revisión del documento final.

Caracterización hidráulica de suelos mediante experimentos de infiltrómetro de disco

Hydraulic Characterization of soils through disc infiltrometer experiments

Manuel Zavala-Trejo^a

Resumen / Abstract

El riego por gravedad se utiliza en la mayor parte de la superficie agrícola irrigada en México, presentando generalmente baja eficiencia de aprovechamiento del agua. Un conocimiento adecuado de cómo se mueve el agua a lo largo de los surcos y se infiltra en el suelo, es esencial para establecer acciones que permitan mejorar las eficiencias de aplicación y distribución de este recurso. En este trabajo se aborda la caracterización hidráulica de suelos que es fundamental para el manejo del riego superficial, presentándose una metodología basada en la porosidad volumétrica, curva granulométrica del suelo y en la reproducción de un evento transitorio de infiltración. Se analizó con un modelo matemático de simulación la infiltración originada por un infiltrómetro de disco y se realizó la caracterización hidráulica del suelo de dos parcelas agrícolas de la unidad de riego La Lagunita Zacatecas.

Palabras clave: riego por gravedad, curva de retención de humedad, curva de conductividad hidráulica, conductividad hidráulica a saturación.

Surface irrigation is used in most of the irrigated agricultural area in Mexico, generally presenting low water use efficiency. Adequate knowledge of how water moves along the furrows and infiltrates into the soil is essential to establish actions that improve the efficiencies of application and distribution of this resource. This work addresses the hydraulic characterization of soils, which is fundamental for the management of surface irrigation, presenting a methodology based on volumetric porosity, granulometric curve of the soil and the reproduction of a transient infiltration event. The infiltration caused by a disk infiltrometer was analyzed with a mathematical simulation model and the hydraulic characterization of the soil of two agricultural lands in the La Lagunita Zacatecas irrigation area was carried out.

Key words: surface irrigation, soil-water retention curve, hydraulic conductivity curve, saturated hydraulic conductivity.

^a. Docente-Investigador, Unidad Académica de Ciencia y Tecnología de la Luz y la Materia, Universidad Autónoma de Zacatecas, Circuito Marie Curie S/N, Parque de Ciencia y Tecnología, Quantum, Zacatecas, C.P. 98160, México. Orcid 0000-0002-0595-735X. Correo electrónico: mzavala73@uaz.edu.mx.

Introducción

La modelación físico-matemática del riego por gravedad es una herramienta útil para investigar y analizar los procesos de transferencia de masa y energía que se desarrollan sobre y bajo la superficie del suelo. En la literatura se reportan diferentes modelos matemáticos para describir el riego por gravedad, los cuales varían en su grado de complejidad en función del nivel de simplificación de las ecuaciones diferenciales consideradas para describir el proceso (Saucedo *et al.*, 2011).

Una descripción detallada del riego por gravedad puede ser obtenida considerando las ecuaciones de Saint-Venant para representar el flujo superficial del agua y la ecuación de Richards (1931) para describir su movimiento a través del suelo (infiltración); el acoplamiento de ambas ecuaciones diferenciales permite determinar el avance del frente superficial del agua y la evolución de la distribución de la humedad en el suelo durante la aplicación del riego. Este tipo de aproximación conocido en la literatura como modelo hidrodinámico para el riego superficial, requiere el conocimiento detallado de las características hidráulicas del suelo que intervienen en la ley de Darcy generalizada; estas propiedades son la curva de retención de humedad que relaciona el potencial de presión del agua en el suelo (Ψ) con el contenido volumétrico de agua (θ) y la curva de conductividad hidráulica que relaciona el potencial de presión (Ψ) con la conductividad hidráulica (K). Ambas propiedades hidráulicas son altamente no lineales y en la literatura se han presentado diversos modelos mecanicistas para representarlas (Fuentes *et al.*, 2001), sin embargo su aplicación se ha visto limitada por la cantidad de parámetros a determinar y los costos experimentales requeridos para su determinación.

Este trabajo tiene como objetivo presentar y aplicar una metodología mecanicista de caracterización hidráulica eficiente y teóricamente sustentada, basada en la porosidad, curva granulométrica del suelo y en la reproducción de un evento transitorio de infiltración y/o drenaje (Zavala *et al.*, 2023). En el caso del evento transitorio de infiltración se aborda el análisis de la infiltración tridimensional originada por un infiltrómetro de disco, con el cual se completa el procedimiento para determinar las propiedades hidráulicas que intervienen en la ecuación de Richards. El estudio es llevado a cabo utilizando un modelo numérico basado en la solución numérica de la ecuación de Richards bidimensional con la hipótesis de simetría axial alrededor del eje vertical y la información obtenida de pruebas de infiltración desarrolladas en dos parcelas de la unidad de riego La Lagunita ubicada en el estado de Zacatecas.

Materiales y métodos

Las representaciones analíticas de las propiedades hidráulicas del suelo, curva de retención de humedad y curva de conductividad hidráulica, contienen parámetros que son los contenidos volumétricos de humedad a saturación y residual y otros mas que se pueden agrupar en parámetros de forma y parámetros de escala.

Parámetros de forma de las propiedades hidráulicas del suelo

De acuerdo con Zavala *et al.* (2023) es posible estimar los parámetros de forma que aparecen en las propiedades hidráulicas del suelo a partir de la porosidad total ϕ y la curva granulométrica del suelo, si se tiene como base el estudio de la ley de Laplace y la ley de Stokes. Considerando el suelo como un objeto fractal (Mandelbrot, 1982) y aceptando la hipótesis de similitud entre el grado de saturación $S(R)$ y la frecuencia acumulada $F(D)$, se establece la siguiente relación entre el tamaño de los poros del suelo (R) y el diámetro de las partículas del suelo (D):

$$S(R) = F(D) \quad (1)$$

$$(R/R_d) = (D/D_g)^{1+\kappa} \quad (2)$$

donde R_d es un parámetro característico del tamaño de los poros; D_g es un parámetro característico del tamaño de las partículas. El exponente κ se calcula con:

$$\kappa = \frac{2s - 1}{2(1 - s)} \quad (3)$$

donde $s = D_f/E$, donde D_f es la dimensión fractal del suelo (D_f) y $E = 3$ es la dimensión euclidiana del espacio físico, es definida de manera implícita en función de la porosidad volumétrica total del suelo:

$$(1 - \phi)^s + \phi^{2s} = 1 \quad (4)$$

El paso de la curva granulométrica del suelo a la curva retención de humedad $\theta(\psi)$ se realiza con las relaciones (1)-(4) considerando además que $\theta = \phi S(R)$ y $\theta = \phi F(D)$, donde θ es el contenido volumétrico de humedad y ψ el potencial de presión del agua en el suelo.

Parámetros de escala de las propiedades hidráulicas del suelo

La caracterización hidrodinámica de un suelo puede ser complementada considerando experimentos de infiltración y/o drenaje los cuales permiten obtener información para identificar los parámetros de escala de la función de retención de humedad y de conductividad hidráulica. Las pruebas de infiltración puntual consisten en imponer una carga de presión o succión conocida en la superficie del suelo y medir la evolución en el tiempo de la lámina de agua infiltrada (pruebas de infiltración durante la aplicación del riego, pruebas de infiltración unidimensional, infiltrómetros de tensión, etc.).

La infiltración originada por un infiltrómetro de disco de succión es un fenómeno de naturaleza tridimensional (Figura 1a), sin embargo si se acepta la hipótesis de simetría axial alrededor

del eje vertical (Figura 1b) este proceso se puede describir con la ecuación de Richards bidimensional:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) \right] \quad (5)$$

donde ψ es el potencial de presión del agua en el suelo [L], el cual es positivo en la zona saturada del suelo y negativo en la zona no saturada; θ es el contenido volumétrico de agua [L³L⁻³], que en un suelo parcialmente saturado es función de ψ , esta dependencia es conocida como curva de retención de humedad $\theta(\psi)$; $K(\psi)$ es la curva de conductividad hidráulica [LT⁻¹] que en suelo no saturado es función del potencial de presión o del contenido volumétrico de agua; z es la coordenada vertical orientada positivamente hacia abajo; x es la coordenada horizontal.

Sujeta a la condición inicial:

$$\psi(x, z, 0) = \psi_{ini} \quad (6)$$

y a las condiciones de frontera:

$$\psi = \psi_{succ} \quad 0 \leq x \leq r; \quad z = 0; \quad t > 0 \quad (7)$$

$$-K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) = 0 \quad r < x \leq X_{max}; \quad z = 0; \quad t > 0 \quad (8)$$

$$-K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0 \quad x = 0 \text{ y } x = X_{max}; \quad 0 \leq z \leq Z_{max}; \quad y \quad t > 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\psi - z)}{\partial z} = -1 \quad 0 \leq x \leq X_{max}; \quad z = Z_{max} \quad t > 0 \quad (10)$$

donde ψ_{ini} es la distribución del potencial de presión del agua en el suelo antes de la prueba de infiltración; ψ_{succ} es la succión fijada en la base del infiltrómetro durante la prueba; r es el radio de la base o disco poroso del infiltrómetro; X_{max} y Z_{max} son las distancias horizontal y vertical máximas medidas desde el centroide de la base del infiltrómetro que se consideran en el análisis.

La resolución de la ecuación (5) requiere representar las propiedades hidráulicas del suelo mediante modelos que relacionen la conductividad hidráulica (K) y el potencial de presión del agua en el suelo (ψ) como funciones del contenido volumétrico del agua (θ). Fuentes *et al.* (1992) a partir del análisis de las propiedades integrales de la infiltración, recomiendan en estudios experimentales el uso del modelo para la curva de retención de van Genuchten (1980) sujeto a la restricción de Burdine (1953) combinado con el modelo de conductividad de Brooks y Corey (1964).

Van Genuchten (1980) propone la siguiente expresión:

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{\psi_d} \right)^n \right]^m} \quad \text{con} \quad m = 1 - \frac{2}{n} \quad (11)$$

donde θ_s es el contenido volumétrico de agua a saturación [L^3L^{-3}]; θ_r es el contenido volumétrico residual [L^3L^{-3}]; Ψ_d es un valor característico de la presión también llamado parámetro de escala de la presión [L]; m y n son parámetros de forma de la curva, adimensionales y positivos.

La curva de conductividad de Brooks y Corey (1964) es:

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\eta \quad (12)$$

donde η es un parámetro de forma empírico y positivo; y K_s es un parámetro de escala llamado conductividad hidráulica a saturación.

Modelo numérico de simulación

Para reproducir y analizar las pruebas de infiltración se aplica una versión modificada del modelo numérico de Zavala y Ojeda (1999) que resuelve las ecuaciones (5)-(12), el cual usa el método del elemento finito en la discretización espacial, un método de diferencias finitas para la integración en el tiempo, y el método de iterativo de Picard para linealizar el sistema de ecuaciones. A este modelo se le incorporó un método de gradiente conjugado preconditionado adaptado para resolver el sistema de ecuaciones resultante en cada iteración de la simulación considerando sólo los coeficientes no nulos del sistema, optimizando así el manejo de memoria y tiempo de cómputo.

Unidad de riego

La unidad de riego La Lagunita se ubica en el municipio de Gral. Enrique Estrada, Zacatecas, cuenta con una superficie física total de 100 ha, de las cuales 47 ha son de riego y el resto no se cultiva. Los cultivos que se manejan tradicionalmente son frijol, chile, maíz grano, alfalfa y avena; la fuente de abastecimiento para el riego es subterránea y se aplica el riego por gravedad. La zona está conformada por ocho lotes (Figura 2), la localización geográfica del pozo de riego es $22^\circ 58' 47.21''N$ y $102^\circ 46' 44''O$ y esta a una altitud media de 2,190 msnm. Se seleccionaron para el estudio dos lotes de la unidad (parcela A y parcela B). La parcela A tiene una superficie de 2.4ha y la parcela B tiene una superficie de 3.4ha.

Muestreo de suelos

En la unidad de riego se seleccionó un sitio de muestreo por cada parcela evaluada, realizándose las excavaciones para identificar el espesor de los estratos de suelo y obtener muestras alteradas de suelo para estudios en laboratorio. En la parcela "A" el sitio de muestreo se localizó en las coordenadas $22^\circ 58' 32''$ de latitud norte y $102^\circ 45' 31''$ de longitud oeste, y en este punto los horizontes de muestreo fueron 0-5 cm, 5-25 cm, 25-40 cm y 40-80 cm; mientras que en la parcela "B" las

coordenadas del punto de muestreo son 22° 58' 55" de latitud norte y 102° 45' 57" de longitud oeste, tomándose muestras entre 0-5cm, 5-30 cm, 30-80 cm.

Resultados y discusión

Las curvas granulométricas de las muestras de suelo se determinaron en laboratorio aplicando el procedimiento de Bouyoucos para partículas menores de 74 micras, mientras que la distribución de las partículas entre 74 y 2000 micras fue realizada aplicando el método de tamizado. Las curvas granulométricas experimentales se muestran en las Figuras 3a y 3b. En ambas parcelas las curvas exhiben una variabilidad espacial poco significativa a lo largo del perfil del suelo y de acuerdo al triángulo de texturas del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA por sus siglas en inglés) las muestras de suelo se clasifican como franco arenosas.

La densidad aparente de las muestras de suelo ρ_a se determinó en laboratorio empleando el método del terrón y la porosidad volumétrica total del suelo se determinó aplicando la fórmula clásica $\phi = 1 - \rho_a / \rho_s$, con los valores de densidad aparente estimados y $\rho_s = 2.65 \text{ g cm}^3$ (densidad de las partículas de cuarzo).

Los resultados de densidad aparente y porosidad volumétrica por estrato de suelo se presentan en la Cuadro 1, incluyéndose también los valores medios. Los valores de desviación estándar mostrados son un indicador de la poca variabilidad espacial de estas propiedades a lo largo del perfil del suelo, lo cual se detectó también en las curvas granulométricas correspondientes. Esta condición permitió asumir en los análisis subsecuentes la hipótesis de suelo homogéneo considerando entonces los valores medios de las propiedades anteriores y las curvas granulométricas promedio en cada parcela analizada.

De acuerdo con Haverkamp *et al.* (2005) el contenido volumétrico de agua a saturación θ_s puede ser asimilado a la porosidad volumétrica total del suelo $\theta_s = \phi$, lo cual implica acaptar que el 100% de los poros del suelo se llenan con agua al saturarse el suelo; mientras que el contenido volumétrico de agua residual puede asumirse igual a cero $\theta_r = 0$, si se acepta que el contenido de humedad en el suelo tiende a cero cuando el valor absoluto del potencial de presión del agua tiende a infinito, es decir $\theta \rightarrow 0$ cuando $|\Psi| \rightarrow \infty$. En estos términos para la parcela A los valores de los contenidos volumétricos de agua son $\theta_s = 0.535 \text{ cm}^3$ y $\theta_r = 0.0 \text{ cm}^3$, mientras que para la parcela B son $\theta_s = 0.478 \text{ cm}^3$ y $\theta_r = 0.0 \text{ cm}^3$.

Siguiendo la recomendación de Fuentes *et al.* (1992) la curva retención de humedad se representa con el modelo de van Genuchten (ecuación 11) sujeto a la restricción de Burdine (1953) mientras que la curva de conductividad hidráulica con la relación de Brooks y Corey (ecuación 12). Los parámetros de forma m y n del modelo de retención así como el parámetro η de la curva de conductividad son estimados a partir de la porosidad volumétrica (ϕ), dimensión cociente ($s = D_r / 3$) y curva granulométrica.

La dimensión cociente del suelo (s) se calcula resolviendo numéricamente la función implícita de la porosidad (ecuación 4) con los valores promedio obtenidos en laboratorio. Para el suelo de la parcela A el valor de la dimensión cociente es $s = 0.702$ y para la parcela B se tiene $s = 0.690$.

Las curvas granulométricas promedio de cada parcela se ajustan con la función de distribución tipo van Genuchten $F(D) = [1 + (D_g/D)^N]^M$, empleando un algoritmo de optimización no lineal y el criterio del error cuadrático medio $RECM = \sum_{i=1}^{T_{obs}} (F_{exp_i} - F_{calc_i})^2 / (T_{obs} - 1)$, donde F_{exp_i} y F_{calc_i} son los valores de las funciones de distribución acumulada experimental y calculada asociados al tamaño de partícula i ; y T_{obs} es el número total de datos de la curva granulométrica experimental.

Para la parcela A las diferencias entre datos experimentales y medidos se minimizan con $N=2.36$, $M=1-2/N=0.153$ y $D_g=1500$ μm siendo el error $RECM=0.036$ (Figura 4a). Para la parcela B se obtuvo $N=2.33$, $M=1-2/N=0.141$ y $D_g=1250$ μm siendo el error $RECM=0.031$ (Figura 4b).

Conforme a las ecuaciones (1-3) el paso de la curva granulométrica a la curva de retención para el modelo particular de van Genuchten permite establecer $(MN/mn) \cong 1 + \kappa$, con κ estimado con la ecuación 3; y de la restricción de Burdine se tiene $m = 1-2/n$. Mientras que el parámetro de forma η de la función de conductividad se puede estimar con la relación deducida por Fuentes *et al.* (2001) $\eta = 2s(2\lambda + 1)$, con $\lambda = mn$. Los resultados obtenidos para cada parcela se presentan en la Cuadro 2.

Se realizaron pruebas de campo con un infiltrómetro de disco para medir la evolución en el tiempo de la lámina de agua infiltrada bajo una carga de succión constante cercana a la saturación en la superficie del suelo. En las parcelas A y B se realizaron tres pruebas de infiltración en cada una, lo cual permitió tener información experimental para revisar la variabilidad espacial de los parámetros de escala que intervienen en las propiedades hidráulicas del suelo. Previo a cada prueba de infiltración se muestreo el perfil del suelo para determinar en laboratorio el contenido volumétrico de agua inicial (θ_i), los resultados para la parcela A son $\theta_{i1}=0.172 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, $\theta_{i2}=0.170 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ y $\theta_{i3}=0.184 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$; mientras que para la parcela B se obtuvo $\theta_{i1}=0.115 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, $\theta_{i2}=0.150 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ y $\theta_{i3}=0.124 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

Los valores de succión fijados en las pruebas experimentales para la parcela A fueron 6 cm, 8 cm y 3 cm; mientras que en las pruebas de la parcela B las succiones fijadas fueron 1 cm, 1 cm y 1.5 cm. Para reproducir las pruebas de infiltración se aplicó una versión modificada del modelo presentado por Zavala y Ojeda (1999), con el objetivo de minimizar la diferencia entre la evolución del volumen de agua infiltrado medida y la calculada considerando el criterio de ajuste la raíz del error cuadrático medio (RECM); en este caso los parámetros de optimización son la escala de la presión Ψ_d y la conductividad hidráulica a saturación K_s . Dos resultados de este proceso de optimización se muestran en las Figuras 5a y 5b.

Los resultados de los problemas inversos de infiltración muestran que la conductividad hidráulica a saturación en la parcela A varía entre 0.45 y 1.1 cm/h mientras que en la parcela B exhibe menor rango de variación, 0.575 y 0.7 cm/h. Por el contrario la presión característica Ψ_d es más estable en la parcela A ($-22.7 \text{ cm} \leq \Psi_d \leq 25.3 \text{ cm}$) que en la parcela B ($-8.0 \text{ cm} \leq \Psi_d \leq 17.5 \text{ cm}$).

Conclusiones

Se ha presentado y aplicado una metodología mecanicista para la caracterización hidráulica del suelo de dos parcelas de la unidad de riego La Lagunita Zacatecas, determinándose los parámetros de forma y escala de las curvas de retención de humedad y conductividad hidráulica. La meto-

dología es capaz de representar la variabilidad espacial de los parámetros hidráulicos del suelo debida tanto al tipo de suelo que se tiene en cada parcela, como a las variaciones que se tienen en la propias parcelas debido a diferentes condiciones de humedad inicial y cambios del régimen de humedad en la superficie del suelo, lo cual son condiciones que se presentan en la práctica del riego superficial. Los resultados obtenidos pueden ser aplicados para alimentar un modelo numérico que simule el riego superficial en estas parcelas y realizar el diseño agronómico del riego por gravedad (determinación simultánea del caudal de agua óptimo por surco, el tiempo óptimo de riego, la longitud del surco que maximiza las eficiencias de uniformidad del riego, aplicación del agua y del requerimiento de riego,). La información obtenida con la metodología desarrollada en el trabajo permitirá analizar detalladamente el riego por gravedad con un modelo hidrodinámico que resuelva de manera acoplada las ecuaciones de Saint-Venant para el flujo superficial del agua a lo largo de los surcos y la ecuación de Richards para la infiltración.

Referencias bibliográficas

- Brooks, R. H. and Corey, A. T. (1964), Hydraulic properties of porous media. Hydrol. Pap. 3, Colo. State Univ., Fort Collins.
- Burdine, N. T. (1953), Relative permeability calculation from size distribution data. Pet. Trans. AIME, 198: 71-78.
- Fuentes, C., Haverkamp, R. and Parlange, J.-Y. (1992), Parameter constraints on closed-form soil-water relationships. Journal of Hydrology, 134: 117-142.
- Fuentes, C., Brambila, F. Vauclin, M., Parlange, J.-Y. y Haverkamp, R. (2001), Modelación de la conductividad hidráulica de los suelos no saturados. Ingeniería Hidráulica en México, 16(2): 119-137.
- Haverkamp, R., Leij, F.J., Fuentes, C., Sciortino, A. and Ross, P.J. (2005), Soil water retention, I: Introduction of a Shape Index. Soil Sci. Soc. Amer. J., 69: 1881-1890.
- Mandelbrot, B. (1982), The Fractal Geometry of Nature. W.H. Freeman and Company, New York: 458 p.
- Richards, L.A. (1931), Capillary conductions of liquids through porous medium. Physics 1: 318-333.
- Saucedo, H, Zavala, M. y Fuentes, C. (2011), Modelo hidrodinámico completo para el riego por melgas. Tecnología y Ciencias del Agua, antes Ingeniería Hidráulica en México, II (2): 23-38.
- Van Genuchten, M. TH. (1980), A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of the unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Amer. J., 44: 892-898.
- Zavala, M., y Ojeda, W. (1999), Un modelo para simular la transferencia de agua en sistemas de riego por goteo. Ingeniería Hidráulica en México, 14(3): 55-63.
- Zavala, M., Saucedo, H. and Castanedo, V. (2023), Inverse problems solution in the hydraulic characterization of unsaturated soils. Applied ecology and environmental research 21(2): 1731-1747.

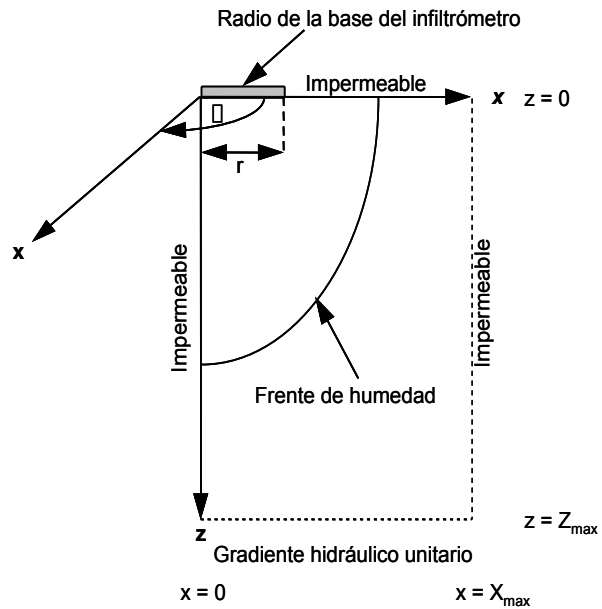
Anexo de Figuras y Cuadros

Figura 1. Infiltrómetro de disco de succión

a) Dispositivo en campo

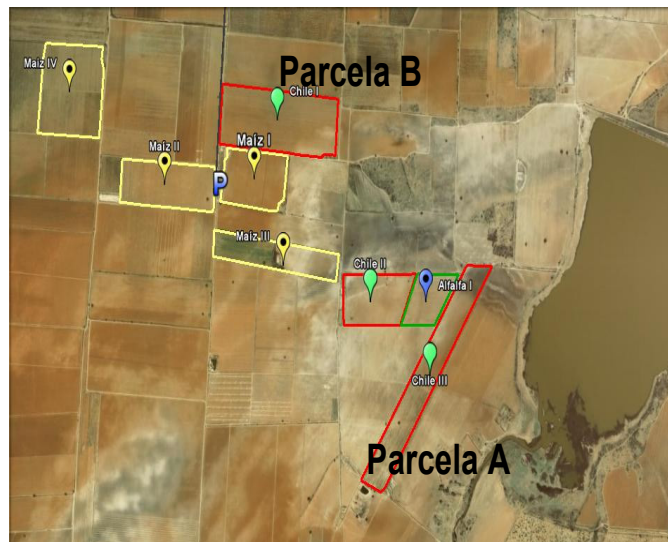


b) Representación de una prueba



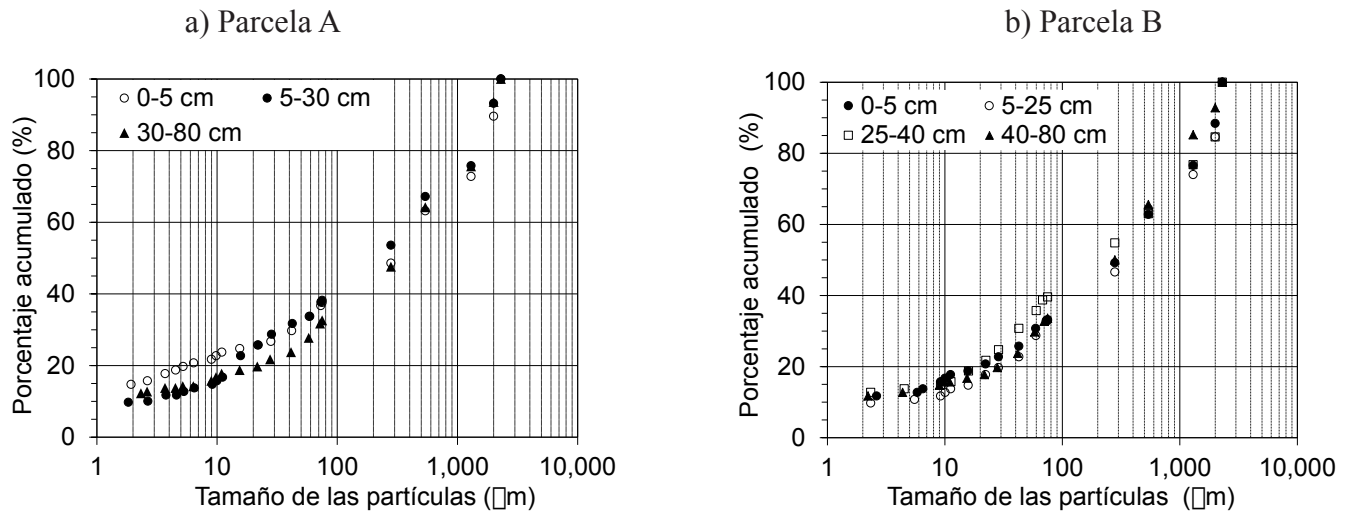
Fuente:

Figura 2. Lotes de la unidad de riego La Lagunita, Enrique Estrada, Zacatecas



Fuente:

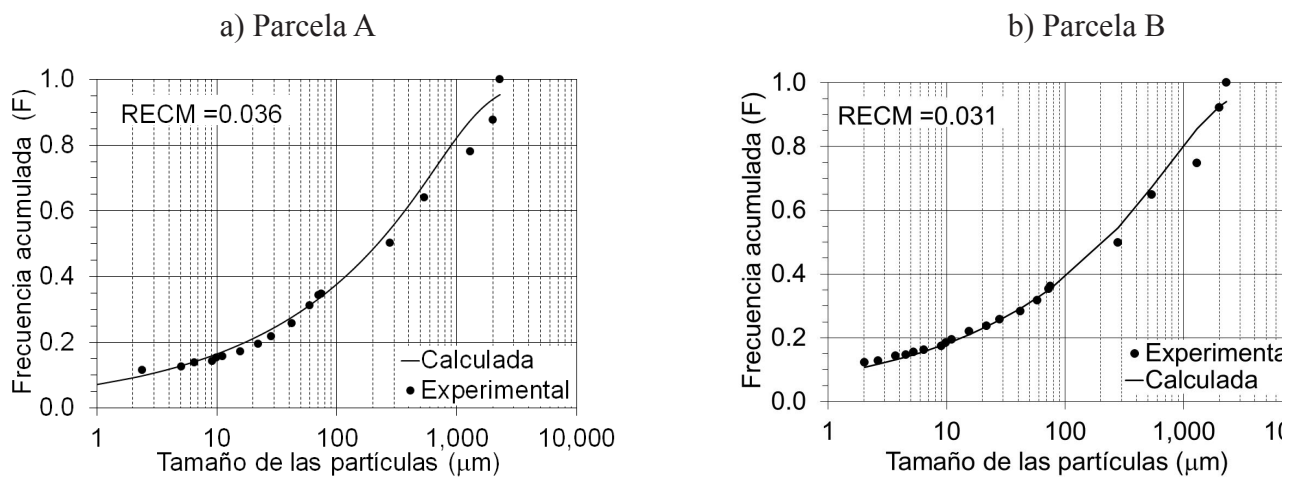
Figura 3. Curvas granulométricas experimentales



Fuente

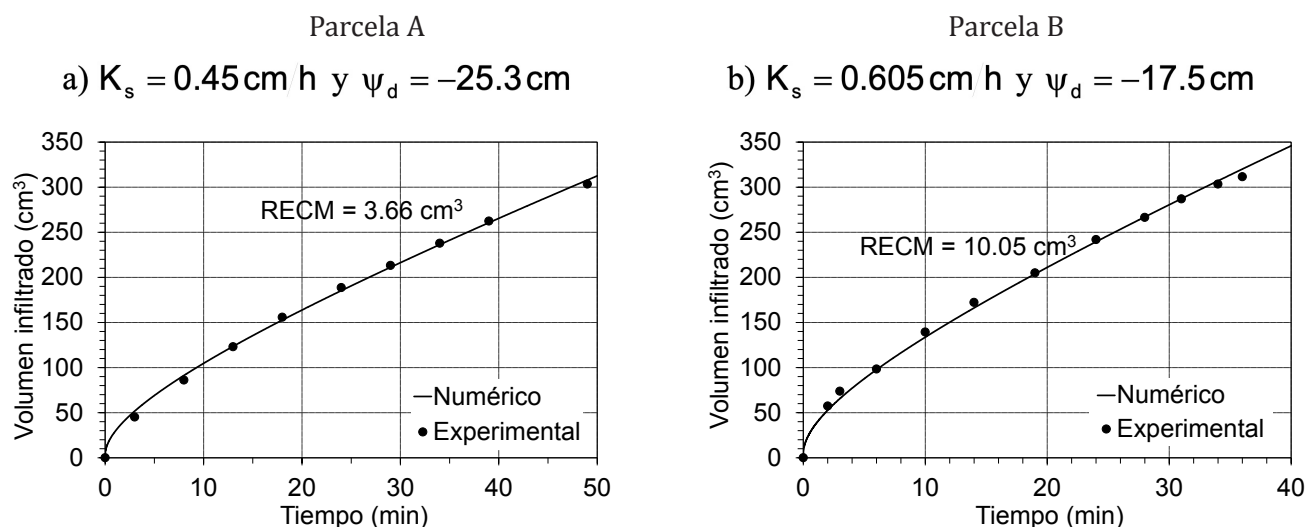
Figura. Ajuste de las curvas granulométricas experimentales con la función

$$F(D) = \left[1 + (D_g / D)^N \right]^{-M}$$



Fuente:

Figura 5. Optimización del volumen de agua infiltrado experimental y el calculado



Fuente:

Cuadro 1. Valores densidad aparente (ρ_a) y porosidad volumétrica (ϕ) de las muestras de suelo de la unidad de riego La Lagunita

Parcela A				Parcela B			
Estrato	Profundidad	ρ_a	ϕ	Estrato	Przofundidad	ρ_a	ϕ
	media cm	g/cm^3	cm^3/cm^3		media cm	g/cm^3	cm^3/cm^3
1	2.50	1.302	0.509	1	2.50	1.421	0.464
2	15.00	1.302	0.509	2	17.50	1.381	0.479
3	32.50	1.175	0.557	3	55.00	1.349	0.491
4	60.00	1.151	0.566				
Promedio		1.232	0.535	Promedio		1.384	0.478
Desviación	estándar	0.081	0.030	Desviación	estándar	0.036	0.014

Fuente:

Cuadro 2. Parámetros de forma

Parcela	K	M	N	m	n	η
A	0.678	0.153	2.360	0.097	2.360	14.477
B	0.613	0.141	2.330	0.093	2.205	14.848

Fuente:

El rol de la Universidad en el Desarrollo Sostenible: caso del Centro Universitario del Norte, CUNorte, de la Universidad de Guadalajara

The role of the University in Sustainable Development: The Centro Universitario del Norte, CUNorte, Universidad de Guadalajara

*Elba González Aguayo^a, Itzel Celeste Romero Soto, Irma Robles Rodríguez y
María de los Ángeles Camacho Ruíz*

Resumen / Abstract

Las universidades desempeñar un papel crucial en el fomento de acciones concretas que abonen al desarrollo sostenible, mediante la educación de calidad, la investigación con pertinencia, el desarrollo de modelos productivos sostenibles y la implementación de prácticas de consumo responsable entre su comunidad universitaria y que esto trascienda a la sociedad en general. Preocupados por los desafíos apremiantes en temas de sostenibilidad el Centro Universitario del Norte constituye el comité de sostenibilidad, con el objetivo de diseñar e implementar programas y proyectos que fomenten la participación de toda la comunidad universitaria en la construcción de un modelo institucional que promueva la sostenibilidad y la responsabilidad social. Este esfuerzo se enmarca en los programas de transición energética sostenible y renovable, gestión integral y sostenible del agua, manejo de residuos sólidos, restauración y reordenamiento ecológico de las áreas verdes y sistemas productivos sostenibles. Los resultados obtenidos son gracias a la integración de toda la comunidad universitaria; a la suma de esfuerzos para a la construcción de una cultura de sostenibilidad.

Palabras clave: educación, sostenible, gestión ambiental, transición energética.

Universities play a crucial role in fostering concrete actions that contribute to sustainable development through quality education, relevant research, the development of sustainable productive models, and the implementation of responsible consumption practices within their university community, extending this impact to society at large. Concerned with pressing sustainability challenges, the Centro Universitario del Norte has established a Sustainability Committee with the objective of designing and implementing programs and projects that encourage the participation of the entire university community in building an institutional model that pro-

^a. Departamentos de Bienestar y Desarrollo Sustentable y Productividad y Desarrollo Tecnológico, Centro Universitario del Norte, Universidad de Guadalajara. Carretera Federal No. 23, Km. 191, C.P. 46200, Colotlán, Jalisco, México. Correo electrónico: elba.gonzalez@cunorte.udg.mx (coautor responsable).

motes sustainability and social responsibility. This effort is part of programs focused on sustainable and renewable energy transition, integrated and sustainable water management, solid waste management, ecological restoration and reorganization of green areas, and sustainable production systems. The results achieved are thanks to the integration of the entire university community and the combined efforts towards building a culture of sustainability.

Keywords: education, sustainable, environmental management, energy transition

Introducción

El desarrollo sostenible desde su esencia busca satisfacer las necesidades de las generaciones actuales sin comprometer la capacidad de satisfacer las necesidades de futuras generaciones (García Rangel et al., 2022). En este sentido, las universidades juegan un papel crucial como espacios donde se generan y comparte conocimientos, investigación y formación de seres humanos integrales, que puedan promover y aplicar principios de sostenibilidad en las diversas áreas del conocimiento (Ortega Sánchez et al., 2020).

Las universidades forman a profesionales y líderes que deben incorporar principios de sostenibilidad en sus respectivas disciplinas (Vásquez et al., 2020). Mediante currículos que contemplen temas de medio ambiente, economía sostenible y responsabilidad social, las instituciones educativas deberán sensibilizar a los estudiantes sobre la importancia de la sostenibilidad (Androshchuk et al., 2020). Otra singularidad es que las universidades son los epicentros de investigación básica y de frontera que desarrollan tecnologías y estrategias innovadoras para dar solución a los desafíos en el tema ambiental (Dahl, 2019).

Aunado a lo anterior, a través de los programas de extensión las universidades trabajan directamente con las comunidades, implementando proyectos con enfoques sustentables. Mediante estas colaboraciones las comunidades se ven beneficiadas y por ende los estudiantes adquieren habilidades y experiencias invaluableles en su formación profesional (Cebrián, 2020).

El liderar con el ejemplo, es otra área de acción de las universidades a través de la implementación de prácticas sustentables en la gestión de sus campus. Estas prácticas incluyen uso eficiente de energía y recursos, gestión de residuos sólidos, tratamiento de aguas residuales, edificios verdes aunado a sensibilizar y promover la cultura de sostenibilidad de sus estudiantes personal académico, administrativo y operativo (Santacruz Espinoza et al., 2020).

Pese a todo, el potencial de acción que tienen las universidades en temas relacionados al desarrollo sostenible, existen una serie de retos que no han permitido concretar acciones eficientes en el tema, esto principalmente por las inversiones iniciales que se requieren para implementar iniciativas en temas ambientales, específicamente las universidades año con año enfrentan reducciones presupuestales, por lo que se ven forzadas a enfocarse en acciones prioritarias para garantizar la funcionalidad operativa y administrativa de la institución (Muñoz Rodríguez et al., 2020).

Estrategias para Promover la Sostenibilidad desde las universidades

La integración de temática relacionadas con la sostenibilidad en los programas académicos, abordándose desde una comprensión holística que contemple aspectos sociales, económicos y ambientales (Matos, 2022). Para ello es indispensable diseñar unidades de aprendizaje interdisciplinarias que se centren en el abordaje de las problemáticas actuales y que aborden propuestas de solución viables y sostenibles desde múltiples perspectivas (Rentería-Vera et al., 2022).

El desarrollo de políticas de gestión sostenible de los campus universitarios es el punto de partida para la puesta en marcha de acciones concretas dirigidas a promover la sostenibilidad en el quehacer cotidiano de la universidad (Guevara Herrero et al., 2023). Dentro de estas prácticas se contemplan las líneas de acción, los indicadores y metas a alcanzar en la gestión de recursos, reducción de huella de carbono e hídrica, reducción de consumo de energía eléctrica, incorporar áreas verdes y aumentar el número de árboles, entre muchas otras acciones que permitan convertir al campus en un espacio sostenible (Aguilar Barojas, 2022). Para lograr que se concreten las metas algunas universidades han implementado departamentos y comités de sostenibilidad integrados con catedráticos especialistas e interesados en las temáticas más apremiantes en el tema y con esto asegurar el correcto seguimiento de los proyectos y que se concrete el liderazgo dentro del campus y que trascienda fuera de las paredes perimetrales que las instituciones (González Campo et al., 2022).

Para esto, las alianzas de triple hélice, que permitan implementar proyectos que brinden soluciones prácticas a partir de líneas de investigación aplicada y colaborativa con comunidades locales. Con estas acciones se fomenta los programas de vinculación, generando un impacto positivo, además de promover la concientización y responsabilidad social (Olivares Sánchez et al., 2023).

Comité de Sostenibilidad del Centro Universitario del Norte de la Universidad de Guadalajara

Partiendo de estas necesidades concretas y vislumbrado la responsabilidad de las instituciones educativas tienen en temas de sostenibilidad en octubre de 2022, se estableció el Comité de Sostenibilidad del Centro Universitario del Norte de la Universidad de Guadalajara. Con el objetivo de diseñar e implementar programas y proyectos que fomenten la participación de toda la comunidad universitaria en la construcción de un modelo institucional que promueva la sostenibilidad y la responsabilidad social (Comité de Sostenibilidad CUNorte, 2023).

Entre las atribuciones de este comité se encuentran:

1. Velar por la integración de la sostenibilidad y la responsabilidad social universitaria en el Plan de Desarrollo Institucional.
2. Desarrollar y mantener actualizado el Plan Integral de Sostenibilidad del Centro Universitario del Norte, el cual establece las líneas de acción para cumplir los objetivos estratégicos mediante la definición de programas y proyectos de Desarrollo Sostenible.
3. Coordinar la implementación de los programas y proyectos establecidos en el Plan Integral de Sostenibilidad.

Líneas de acción

Dentro del Plan se contemplan tres líneas de acción, en primer lugar, la extensión y la responsabilidad social; entrada en establecer alianzas con instituciones gubernamentales, organizaciones y población civil, con el fin de establecer iniciativas que contribuyan al desarrollo de la región con un enfoque sostenible, construyendo un puente entre la academia la sociedad y el gobierno que permita la participación de las comunidades en la gestión de un futuro sostenible.

La segunda corresponde a la educación para la vida, esta línea de acción se plantea fortalecer la conciencia ambiental, la formación de habilidades y conocimientos en temáticas del desarrollo sostenible; mediante la implementación de cursos y talleres que aborden la gestión de los recursos naturales, uso de las energías renovables, eficiencia energética, prácticas de agricultura regenerativa, ganadería sostenible, economía circular. Con esto se espera contribuir a la formación integral de nuestros estudiantes aportándoles a su formación profesional, pero también abonando a que sean ciudadanos responsables y fomentando que sean agentes de cambio en la transición a modelo productivos y de consumo más amigables con el entorno.

La tercera línea de acción, plantea promover la generación de conocimiento científico, tecnológico y social, mediante proyectos de investigación interdisciplinar centrándose en soluciones innovadoras para los desafíos apremiantes del cambio climático, la conservación y restauración de los recursos naturales, la mejora de la calidad de vida y la promoción de la equidad social.

Ejes temáticos

El establecer los ejes temáticos clave para el proceder del Comité de Sostenibilidad de CUNorte, facilita agrupar las acciones de acuerdo a criterios e indicadores; es así como la gestión integrada de agua, energía y residuos contempla generar acciones concretas que permita minimizar el impacto ambiental. Particularizando en el agua, es un recurso vital e invaluable que desafortunadamente en la actualidad su disposición es limitada debido a la creciente demanda en las zonas urbanas, la falta de tratamiento para evitar la contaminación y la modificación del uso del suelo; además de los efectos del cambio climático representan serios desafíos para garantizar el suministro a toda la población y la disposición para las diferentes actividades productivas y de servicios. Para colaborar a dar solución a esta problemática en el CUNorte se trabaja en la implementar medidas para hacer un uso eficiente y responsable de agua, así por ejemplo se pueden citar algunas acciones concretas.

1. Sistema de captación y utilización de agua pluvial
2. Tratamiento y reutilización de aguas residuales
3. Cambio de grifos y sanitarios convencionales por ahorradores de agua.

En el ámbito de la energía implementar prácticas para garantizar la eficiencia energética y la adopción de tecnologías que permitan el uso de energías renovables han sido consideradas el unto de partida; para esto se emplean tecnologías con mejor eficiencia, la optimización de sistemas de iluminación, así como de climatización, sumado al aprovechamiento de energías renovables, en este sentido se cuenta con:

1. Todos los nuevos edificios están dotados de paneles solares.
2. Los pacillos y andadores están iluminados con lámparas solares.
3. Los edificios cuentan con sistema de iluminación led.
4. Aires acondicionados y equipos eléctricos tienen tecnología de eficiencia energética.

En relación a la gestión de residuos sólidos, se han implementado el programa de separación y correcta clasificación de los residuos, para esto se cuenta con contenedores rotulados de acuerdo al tipo de residuos; plástico, vidrio, papel y cartón, aluminio, plástico de difícil reciclaje y orgánica. Aunado a la promoción de prácticas de consumo responsable y eliminar el consumo de productos de un solo uso.

Los espacios universitarios sostenibles implican diseñar y conservar hábitats adecuados para las especies de flora y fauna presentes en el campus, que permitan prosperar y continuar con sus ciclos de vida. Estos espacios desempeñan funciones ecológicas en la regulación del ciclo del agua, la calidad del aire y el correcto reciclaje de los nutrientes. Sin embargo, no son los únicos beneficios, desde el punto de vista de los aportes al bienestar de las personas en ambientes educativos, expertos en el tema afirman que los espacios con vegetación como áreas verdes favorecen la disminución de violencia, fomentan las actividades al aire libre, mejora las relaciones sociales, reduce el estrés y promueve la conciencia ecológica en los integrantes de la comunidad universitaria.

Programas y Estrategias

En primer lugar, se considere la transición a un sistema energético sostenible y renovable centrándose en reducir el uso de combustibles fósiles en las actividades propias del Centro Universitario, implementando acciones para facilitar la adopción de hábitos que permitan eficientar el consumo energético. En este aspecto una de las estrategias principales es la instalación de paneles solares en techos de los edificios y áreas de estacionamiento, reemplazo paulatino de lámparas convencionales por luminarias LED y equipos electrónicos con tecnología de eficiencia energética, fomentar proyectos de investigación aplicada en energías limpias. Capacitación a la comunidad universitaria con temas que favorezcan la transición energética, así como acciones concretas de uso adecuado de la energía.

Lo que se refiere a la gestión integral y sostenible del agua, es uno de los quehaceres primordiales debido a la relevancia de este recurso para esto se han implementado prácticas para disminuir la huella hídrica del CUNorte. Dentro de las cuales destacan la instalación de medidores de flujo en las diferentes fuentes de agua, mejorar las condiciones de almacenamiento de agua del vaso regulador para aprovechar la cantidad de agua pluvial captada y evitar su contaminación. Garantizar que el agua residual que se genera en el Centro Universitario se trate adecuadamente y se reutilice para el riego de las áreas verdes, Sustituir los baños y lavamanos actuales por nuevos sanitarios con tecnología ahorradora de agua. Establecer alianzas estratégicas con otras instituciones y comunidades para promover la resiliencia y la adaptación al cambio climático.

En relación al manejo de residuos sólidos, es para toda la sociedad uno de los desafíos más apremiantes que se deberá abordar no solo desde la disposición final, si no más bien desde la generación y el consumo responsable. Partiendo de este principio ineludible la institución se plan-

tea reducir la generación de residuos sólidos, para esto se implementó un sistema de separación y clasificación de residuos sólidos generados en las instalaciones, abordado con un enfoque de economía circular; el sistema contempla los procedimientos para cuantificar periódicamente los residuos sólidos, Instalar un Centro de Valoración de Residuos dentro de las instalaciones donde se realice la correcta clasificación, el procesamiento y la valoración de los residuos. En el caso particular de los residuos orgánicos se procesará en composta y lombricomposta, estos productos se utilizarán para abonar las parcelas productivas y el área de jardines. El éxito de estas estrategias depende la participación activa y comprometida de la comunidad universitaria, así que mediante campañas de sensibilización se busca promover acciones de reducción, reutilización y reciclaje de los residuos sólidos.

El programa de restauración y reordenamiento ecológico, promueve la restauración y diversificación de las especies de flora presentes en los jardines y áreas verdes del centro universitario. El punto de partida se acota a la identificación y cuantificación de las diferentes especies de plantas presentes en las áreas verdes y su estado de conservación, a partir de esta información se diseñó un catálogo de especies nativas e introducidas, donde se especifica los requerimientos edafológicos, hídricos y nutricionales que permita el agrupamiento de ciertas especies con características similares. Otro punto de interés es identificar zonas de escorrentías y anegamientos para instalar especies que se adopten a estas condiciones y favorezcan la infiltración de agua, las actividades sustantivas a la jardinería tendrán bases de manejo sostenible como el control biológico de plagas, la recuperación de la calidad y fertilidad del suelo, la aplicación de abonos orgánicos, algunos indicadores que se evalúan al respecto son la diversidad de especies, el porcentaje de plantas nativas e introducidas, la densidad de arbolado, la cantidad de las láminas de riego, estatus sanitarios de las plantas; esto permitirá realizar las modificaciones pertinentes para garantizar la efectividad del programa.

En lo que respecta a los sistemas productivos sostenibles, aspiran a cimentar los principios de una economía circular que incorpore los alimentos que se producen en los huertos y granjas universitarias al menú del Comedor, reduciendo la dependencia de compra de materias primas y fomentando el consumo responsable. Para concretar este programa se contempla establecer y mantener los huertos y las granjas en el Laboratorio de Agroecología y Zootecnia, los modelos productivos se apegarán a buenas prácticas agrícolas y ganaderas. Estableciéndose protocolos de manipulación y almacenamiento para garantizar la calidad e inocuidad de los alimentos y la salud de los consumidores finales.

Resultados

1. Transición a un sistema energético sostenible y renovable

En tres de los edificios principales del Centro Universitario se encuentran instalados paneles solares; específicamente el laboratorio de ingenierías cuenta con 138, el laboratorio de la salud 291 y el laboratorio de neurociencia 35; formando un total de 464 paneles solares. Al mismo tiempo se ha instalado 50 lámparas solares para iluminar pasillos y andadores en zonas estratégicas.

Cabe destacar que en el edificio de servicios académicos se implementó un proyecto de reingeniería de luminarias en 2023, este espacio se iluminaba con 735 lámparas y se redujo a 180 luminarias de tecnología LED observándose mejoras significativas en la eficiencia de la iluminación y reduciendo la demanda energética de este edificio.

2. Gestión integral y sostenible del agua

En el tema del agua es donde más acciones concretas se ha emprendido, donde resaltan la construcción de un vaso regulador que entro en funcionamiento en el verano de 2020, con una capacidad de almacenar de 5,130 m³ de agua de lluvia y los escurrimientos superficiales, cabe señalar que actualmente se trabaja en el desarrollo de un sistema de filtración para hacer uso del agua captada en los sanitarios. Con el objetivo de aumentar el volumen captado se realizó la instalación de conexiones en zonas de escurrimiento y desagües de los techos en edificios del puesto de servicios académicos, la sala de educación continua y los módulos de aulas C y D con una superficie estimada de 2,763 m², además de las áreas de terreno que por escorrentía a una boca de tormenta canalizada a el vaso regulador asciende a una superficie de 11,535 m². Al mismo tiempo en lugares donde se anegaba el agua de construyeron cinco pozos de infiltración con un diámetro de dos metros y una profundidad de 2.80 metros; con rellenos se colocaron tres capasla primera de piedra de 3 a 5", la segunda capa de grava de 1 a 2" y la tercera de grava de ¾ a ½ " y fueron cubiertos con tierra y césped; este diseño facilita y acelera la velocidad de infiltración del agua de lluvia y a su vez favorece la recarga de los acuíferos subterráneos.

El CUNorte cuanta con una planta de tratamiento de agua residual con lodos activados en este proceso se utilizan microorganismos para reducir el tamaño de los materiales orgánicos y transformarlos a formas inorgánicas. Este sistema esta constituido por un tanque de aireación que también es conocido como biorreactor, un tanque de sedimentación, el sistema de retorno de lodos y la tubería de desecho equipada con un filtro de zeolita y otro de carbón activado, esta planta tiene la capacidad de tratar 60 mil litros de agua al día. Este tratamiento permite que el agua tratada se pueda reutilizar para otros fines, en este caso se utiliza para el riego de las áreas verdes, reduciendo un 80% la extracción de agua del pozo profundo para este fin.

Otra obra que continua en proceso es la remodelación de los sanitarios y su equipamiento con inodoros y lavamanos grado ecológico que permitan el ahorro de agua. Actualmente se encuentran en este proceso los sanitarios ubicados en los módulos de aulas A y C, de la misma manera se plantea realizar las remodelaciones en todos los edificios del campus, esto de manera paulatina para no entorpecer las actividades propias de la institución.

3. Manejo de residuos solidos

Durante el ciclo escolar 2024-A se puso en marcha la campaña de separación de residuos involucrando a toda la comunidad universitaria, para este fin se reubicaron los contenedores de residuos agrupándolos en estaciones en los puntos de mayor afluencia de personas. El primero se instalo

afuera de rectoría, el segundo en frente al puerto de servicios académicos, el tercero entre los módulos de aulas A y B y por último entre los módulos de aulas C y D; cada uno de estos módulos cuanta con contenedores rotulados para el tipo de residuos, como vidrio, cartón y papel, plástico, metal, residuos de difícil reciclaje y orgánico. Esta clasificación permite la separación de los residuos de origen y su posterior valorización, para tal fin se estableció un convenio con una empresa local que se dedica a la compra de residuos.

Una de las estrategias más viables para darle tratamiento a los residuos orgánicos es mediante el compostaje, que permite obtener abonos líquidos como es el caso de los lixiviados y se pueden utilizar en el riego de las áreas verdes o a través de aplicaciones foliares para reducir las deficiencias de algunos nutrientes en las plantas. Y probablemente el más popular que es la obtención de abonos orgánicos sólidos que se utilizan como mejoradores de la calidad del suelo. Dentro del laboratorio de agroecología y zootecnia se encuentra un área destinada para tales fines, equipada con 4 canteros que procesan al año 3 toneladas de residuos orgánicos.

4. Restauración y reordenamiento ecológico

Un espacio emblemático y de identidad universitaria son las hermosas áreas verdes con las que cuenta el CUNorte, su superficie se extiende por 8.45 hectáreas que se entrelazan por andadores y edificios proporcionando un paisaje inigualable. Estas áreas albergan 8,119 ejemplares dividido en 4,631 árboles, 1,267 arbustos y 2,221 herbáceas; constituidos por 87 especies diferentes donde los árboles representan el 45 % de la diversidad y las herbáceas y arbustos el 31% y 17% respectivamente. En relación con su origen el 84% son especies introducidas y el 16% son nativas de la región; sumado a lo anterior se realizó un diagnóstico del estatus sanitario de las especies que permitió identificar deficiencia de nutrientes, plagas principalmente insectos defoliadores, enfermedades causadas por hongos destacando *Fusarium spp.* y *Phytophthora spp.*; además de algunas epífitas que se han convertido en parásitos de sus huéspedes.

El hecho de contar con espacios de jardines con plantas de diferentes portes, no solo favorece a la diversidad de flora si no que, a su vez, propicia la llegada de aves migratorias, pequeños mamíferos, reptiles y anfibios. Generando un hábitat apto para una gran variedad de especies de fauna que encuentran refugio, alimento y agua en las instalaciones del centro universitario, convirtiéndose en un corredor biológico.

5. Sistemas productivos sostenibles

Los aportes de las huertas y granjas del laboratorio de agroecología y zootecnia a la producción de alimentos para el comedor universitario se concretan a huevos, carne de conejo y algunas hortalizas de temporada; este programa en particular falta fortalecerlo con la incorporación de estudiantes que permitan mantener una producción constante y proveer de manera parcial la demanda del comedor.

Conclusión

Las universidades cuentan con una posición única para liderar los cambios necesarios para transitar hacia un futuro sostenible, fomentando la formación de agentes de cambio que tengan la capacidad de influir en la sociedad. Para esto la educación con estándares de calidad permite formar las nuevas generaciones con principios basados en el desarrollo sostenible. De manera responsable y comprometida el CUNorte asume estas responsabilidades y en los primeros años de adopción de esta visión integral muestra resultados tangibles en la transición energética, la gestión integral del agua, el manejo de residuos sólidos, las restauración y reordenamiento ecológico de sus áreas verdes y sienta las bases para la implementación de sistemas productivos sostenibles. Y todo esto ha sido posible gracias a la integración de toda la comunidad universitaria desde los estudiantes, docentes, personal administrativo y de apoyo; todos han sumado esfuerzos para alcanzar las metas planteadas. Los programas no solo se basan en la modificación de la infraestructura o los currículos, sino a la adopción de una cultura de sostenibilidad y responsabilidad social que permee cada aspecto y quehacer de la vida universitaria.

Referencias Bibliográficas

- Aguilar Barojas, S. (2022). Objetivos de Desarrollo Sostenible y Responsabilidad Social Universitaria integrados en un modelo de Planeación Estratégica. *Emerging Trends in Education*, 4(8A), 191–214. <https://doi.org/10.19136/etie.a4n8a.4780>
- Androshchuk, I. V., Androshchuk, I. P., & Komochkova, O. O. (2020). Building the Content of Teacher Training in the Context of Education for Sustainable Development. *Revista Romaneasca Pentru Educatie Multidimensionala*, 12(1Sup1), 19–36. <https://doi.org/10.18662/rrem/12.1sup1/221>
- Cebrián, G. (2020). Education for sustainable development in the university curriculum: Cooperative action research with teachers. *Revista Iberoamericana de Educacion Superior*, 11(30), 99–114. <https://doi.org/10.22201/iisue.20072872e.2020.30.590>
- Comité de Sostenibilidad CUNorte. (2023). *Plan de sostenibilidad CUNORTE Comité de Sostenibilidad*.
- Dahl, T. (2019). Prepared to teach for sustainable development? Student teachers' beliefs in their ability to teach for sustainable development. *Sustainability (Switzerland)*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/su11071993>
- García Rangel, F., Vega Cano, R., & Vallaeys, F. (2022). Ética, Desarrollo Sostenible y Responsabilidad Social desde la docencia en instituciones de educación superior latinoamericanas. *Emerging Trends in Education*, 4(8A), 74–92. <https://doi.org/10.19136/etie.a4n8a.4729>
- González Campo, C. H., Ico Brath, D., & Murillo Vargas, G. (2022). Integrating of sustainable development goals (SDG) for the fulfillment of the 2030 agenda in Colombian public universities. *Formacion Universitaria*, 15(2), 53–60. <https://doi.org/10.4067/S0718-50062022000200053>
- Guevara Herrero, I., Pérez Martín, J. M., & Bravo Torija, B. (2023). Impact of the Sustainable De-

- velopment Goals on educational research on Environmental Education. *Revista Eureka*, 20(2). https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2023.v20.i2.2501
- Matos, B. (2022). Influence of environmental education in sustainable development perception among high-school teachers and students. *Revista Kawsaypacha: Sociedad y Medio Ambiente*, 2022(10). <https://doi.org/10.18800/kawsaypacha.202202.007>
- Muñoz Rodríguez, J. M., Sánchez Carracedo, F., Barrón Ruiz, Á., & Serrate González, S. (2020). Are we training in sustainability in higher education? Case study: Education degrees at the university of Salamanca. *Sustainability (Switzerland)*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/su12114421>
- Olivares Sánchez, R. E., & Leyva Aguilar, N. A. (2023). Bases teóricas de la conciencia ambiental como estrategia para el desarrollo sostenible. *Revista Alfa*, 7(21). <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v7i21.242>
- Ortega Sánchez, D., Alonso Centeno, A., & Corbí, M. (2020). Socio-environmental problematic, end-purposes, and strategies relating to education for sustainable development (ESD) through the perspectives of Spanish secondary education trainee teachers. *Sustainability (Switzerland)*, 12(14). <https://doi.org/10.3390/su12145551>
- Rentería-Vera, J. A., Hincapié-Montoya, E. M., Rodríguez-Caro, Y. J., Vélez-Castañeda, C. K., Osorio-Vélez, B. E., & Durango-Marín, J. A. (2022). Competencia global para el Desarrollo Sostenible: una oportunidad para la educación superior. *Entramado*, 18(1). <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.1.7641>
- Santacruz Espinoza, A., Montenegro Muguerza, H., Pizarro Alejandro, A., & Estacio Flores, H. (2020). Liderazgo transformacional y desarrollo sostenible ambiental verde en docentes de la Universidad Nacional Herminio Valdizán. *Revista de Comunicación de La SEECI*, 135–151. <https://doi.org/10.15198/seeci.2020.53.135-151>
- Vásquez, C., Seckel, M. J., & Alsina, Á. (2020). Belief system of future teachers on education for sustainable development in math classes. *Uniciencia*, 34(2), 1–30. <https://doi.org/10.15359/RU.34-2.1>

Evaluación longitudinal de la dinámica de la calidad del agua en el Río Santiago*

Longitudinal evaluation of the dynamics of water quality in the Santiago River

*Aida Alejandra Guerrero de León^a, Alberto Daniel Rocha Muñoz^b,
Gualberto Iglesias Gonzalez^c y Valerie Natalia Salazar Zepeda^d*

Resumen / Abstract

Se evaluó la dinámica longitudinal de la calidad del agua en el río Santiago durante diez años (2009-2020). Mediante análisis de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en un punto de muestreo significativo entre los municipios de El Salto y Juanaacatlán. Los resultados mostraron que el Índice de Calidad del Agua (ICA) se mantuvo en la categoría de "Pobre", reflejando una grave y persistente contaminación. El ICA se calculó mediante oxígeno disuelto (OD), coliformes fecales (CF), potencial de hidrógeno (pH), demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), temperatura del agua (Temp), fósforo total (PT), nitratos (NO₃-), turbidez y sólidos disueltos totales (SDT). Estos parámetros determinaron un ICA consistentemente "Pobre" en los 10 años de seguimiento, una calidad de agua insuficiente para el consumo humano y la conservación de los ecosistemas. Los niveles de OD estuvieron frecuentemente por debajo del mínimo requerido, y los CF superaron consistentemente los límites permisibles, indicando un ambiente anóxico y alta presencia de contaminantes biológicos. Estos hallazgos subrayan la necesidad urgente de implementar intervenciones efectivas para mejorar el tratamiento de aguas residuales y mitigar los impactos negativos en la salud pública y el ecosistema.

Palabras clave: río Santiago, índice de calidad del agua, calidad de agua, dinámica longitudinal, contaminación microbiológica.

* **Agradecimientos.** Proyecto financiado por CONAHCYT-Proyectos Nacionales-PRONCES-AGUA, en la primera etapa del proyecto titulado "Incidencia para la regeneración ecohidrológica y la reapropiación comunitaria de la Cuenca Alta del Río Grande de Santiago. No. 318965 -2021-2024.

a. La Profesora Guerrero de León es Bióloga con grado de Doctora en Ecología y Manejo de Recursos Naturales. Profesora Investigadora adscrita al Departamento de Estudios del Agua y la Energía en el Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores. Línea de investigación Agua y Medio Ambiente. Correo electrónico: aida.guerrero@academicos.udg.mx (primer autor).

b. El Profesor Rocha Muñoz es Médico con grado de Doctor en Ciencias Médicas y Posdoctorado en Farmacología Clínica. Profesor Investigador adscrito al Departamento de Salud-Enfermedad como Proceso Individual, Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores. Línea de investigación Enfermedades crónico-degenerativas. Correo electrónico: alberto.rocha@academicos.udg.mx

c. El Profesor Iglesias González es Ingeniero en Nanotecnología. Técnico Académico del Instituto Transdisciplinar de Investigación y Servicios (ITRANS). Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías. Correo electrónico: guaberto2008@gmail.com.

d. Valerie Natalia Salazar Zepeda es estudiante de Doctorado del Departamento de Estudios de la Salud Poblacional. Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara. Correo electrónico: valerie.salazar@alumnos.udg.mx.

The longitudinal dynamics of water quality in the Santiago River were evaluated over ten years (2009-2020) through the analysis of physicochemical and microbiological parameters at a significant sampling point between the municipalities of El Salto and Juanacatlán. The results showed that the Water Quality Index (WQI) remained in the "Poor" category, reflecting severe and persistent pollution. The WQI was calculated using dissolved oxygen (DO), fecal coliforms (FC), hydrogen potential (pH), biochemical oxygen demand (BOD5), water temperature (Temp), total phosphorus (TP), nitrates (NO3-), turbidity, and total dissolved solids (TDS). These parameters determined a consistently "Poor" WQI over the 10 years of monitoring, indicating water quality insufficient for human consumption and ecosystem conservation. DO levels were frequently below the required minimum, and FC levels consistently exceeded permissible limits, indicating an anoxic environment and high presence of biological contaminants. These findings underscore the urgent need to implement effective interventions to improve wastewater treatment and mitigate the negative impacts on public health and the ecosystem.

Keywords: Santiago River, water quality index, water quality, longitudinal dynamics, microbiological contamination.

INTRODUCCIÓN

La calidad del agua de los ríos es un indicador crucial del estado de los ecosistemas acuáticos y de la salud pública. La contaminación del agua puede llevar a la proliferación de enfermedades, la pérdida de fuentes de agua potable y la disminución de la productividad agrícola y pesquera, afectando significativamente la salud humana y de los ecosistemas (Thorslund et al., 2021; Gervasio et al., 2022). Los ríos actúan como conductos de transporte para nutrientes y contaminantes, influenciando directamente la biodiversidad acuática y la calidad del agua utilizada para consumo humano, agricultura y recreación.

En México, la situación de calidad del agua de sus ríos es alarmante. La contaminación por metales pesados, residuos industriales y aguas residuales urbanas es prevalente. El manejo de aguas residuales es deficiente en muchas áreas, con un alto porcentaje de aguas residuales descargadas sin tratamiento adecuado, lo que agrava la calidad del agua en los cuerpos receptores (Gutiérrez et al., 2022). La gestión inadecuada de aguas residuales contribuye significativamente a la contaminación del agua, ya que introduce patógenos, nutrientes excesivos y químicos tóxicos en los ríos.

El río Santiago, que fluye desde el lago de Chapala hasta el océano Pacífico, es uno de los ríos más importantes de México, recorriendo 562 kilómetros y atravesando importantes centros industriales y urbanos. Históricamente, la problemática ambiental del río Santiago ha sido significativa debido a la descarga continua de aguas residuales sin tratamiento adecuado. Durante las últimas décadas, la expansión industrial y urbana ha resultado en altos niveles de contaminación, afectando gravemente la salud pública en comunidades como El Salto y Juanacatlán, donde se han reportado altas incidencias de cáncer y enfermedades renales (Peniche et al., 2022; Teran-Velasquez et al., 2022).

Evaluar la dinámica longitudinal de la calidad del agua en el río Santiago es crucial para comprender las variaciones temporales y espaciales de los contaminantes y diseñar estrategias efectivas de gestión y mitigación. La "dinámica longitudinal" se refiere al estudio de cómo cambian los

niveles de contaminantes y otros parámetros de calidad del agua a lo largo del curso del río y en diferentes momentos (Holbach et al., 2022). Este enfoque permite identificar patrones y fuentes de contaminación, facilitando el desarrollo de políticas de gestión ambiental más efectivas.

Los estudios longitudinales de la calidad del agua utilizan tecnologías avanzadas de monitoreo, como sensores en tiempo real y análisis multivariado, para proporcionar una visión detallada de los procesos biogeoquímicos que afectan la calidad del agua.

El monitoreo y la modelización de la calidad del agua son herramientas esenciales para evaluar el estado ecológico y químico de los cuerpos de agua. La Directiva Marco del Agua en Europa establece que todos los cuerpos de agua deben alcanzar un buen estado ecológico y químico (Fang et al., 2023). En este contexto, el uso de tecnologías de monitoreo en tiempo real y el análisis de datos espaciales y temporales permiten obtener una visión detallada de la calidad del agua y de los factores que la afectan (Holbach et al., 2022; Fang et al., 2023).

El Índice de Calidad del Agua (ICA), desarrollado por la Fundación Nacional de Saneamiento (NSF), es una herramienta internacionalmente validada que mide parámetros como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la concentración de oxígeno disuelto, el pH, la temperatura, y la presencia de nutrientes y metales pesados (Syeed et al., 2023; Chidiac et al., 2023). Este índice proporciona información crucial sobre el estado general de los cuerpos de agua, facilitando la comparación y la identificación de áreas prioritarias para la intervención. Estudios han demostrado que el ICA es efectivo para identificar y monitorear áreas de alta contaminación, aunque también presenta desventajas como la variabilidad en la precisión de los datos debido a las diferencias en métodos de muestreo y análisis (Syeed et al., 2023; Chidiac et al., 2023).

Evaluar la dinámica longitudinal de la calidad del agua en el río Santiago es esencial debido a los riesgos significativos para la salud pública. Los seres humanos pueden estar expuestos a agentes biológicos infecciosos y productos químicos tóxicos a través del agua de consumo o por exposición directa. Patógenos como bacterias, virus y parásitos pueden causar enfermedades gastrointestinales, mientras que la exposición a metales pesados y compuestos químicos puede llevar a enfermedades crónicas y cáncer. La comprensión detallada de los patrones de contaminación y los procesos biogeoquímicos permitirá diseñar estrategias de mitigación que protejan la salud humana y mejoren la calidad del agua. Desde el enfoque ecosistémico el monitoreo y análisis de la calidad del agua en el tiempo nos pueden dar cuenta del nivel de resiliencia del río Santiago, entendiendo la resiliencia es definida por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por su sigla inglesa) como: “Capacidad de los sistemas sociales, económicos y ambientales de afrontar un fenómeno, tendencia o perturbación peligroso respondiendo o reorganizándose de modo que mantengan su función esencial, su identidad y su estructura, y conserven al mismo tiempo la capacidad de adaptación, aprendizaje y transformación”. En este sentido es importante conocer la capacidad que tendrá los ecosistemas de seguir abasteciendo de agua para las generaciones futuras y el compromiso de las presentes en el cumplimiento en los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS 2015-2030) sobre agua limpia y saneamiento (IPCC, 2014).

Por tanto, el objetivo de este estudio es evaluar la dinámica longitudinal de la calidad del agua en el río Santiago, utilizando los datos reportados por la Comisión Estatal del Agua sobre el monitoreo continuo del río durante diez años aplicando un análisis multivariado para identificar patrones

de contaminación y sus posibles fuentes. Este análisis proporcionará una comprensión detallada de los procesos que afectan la calidad del agua y ofrecerá información crítica para el desarrollo de políticas y estrategias de gestión ambiental más efectivas de la cuenca hídrica del Río Santiago.

MATERIAL Y MÉTODOS

Diseño: Seguimiento de una cohorte retrospectiva.

Caracterización del área de estudio: El punto de muestreo se localiza entre los municipios de Juanacatlán y El Salto, justo antes de la cascada de Juanacatlán, en las coordenadas N 20°30, 43.7 y W 103°10, 27.4 (**Figura 1**). Estos municipios tienen una población actual de 30,855 y 232,852, respectivamente. Esta zona tiene climas semicálidos semihúmedos, con una temperatura media que oscila entre 20°C y 31°C, su precipitación media anual aproximada de 1000 mm. (IIEG de Jalisco, 2021). En este punto, se percibió fuertes olores a contaminación fecal, así como una gran cantidad de espuma en el río, posiblemente a la alta concentración de surfactantes, esta característica son documentadas en la **Figura 2** y **Figura 3**. Estudios previos realizados por la CONAGUA, han reportado descargas de aguas residuales provenientes de múltiples fuentes (procesos industriales y asentamientos humanos). Se estima que en un solo día se arrojan aproximadamente 394.4 t de materia orgánica, 177.2 t de sólidos suspendidos, 31.9 toneladas (t) de grasas y aceites, 56.4 t de nutrientes, 4.9 t de sustancias activas al azul de metileno, 0.29 t de MP y 0.18 t de compuestos orgánicos (CONAGUA, 2018). Se seleccionó la población de El Salto y Juanacatlán por ser considerarse zona de emergencia ambiental, señalado por diversas autoridad en particular por la Recomendación No. 5/2022 de la Comisión Estatal de Derechos Humanos de Jalisco (CEDH), donde señala que esta región debe ser Área de Intervención Prioritaria en materia de salud.

Obtención de datos: Para realizar los cálculos del ICA, los datos se obtuvieron de los monitoreos mensuales generados en las estaciones de monitoreo de la Comisión Estatal de Agua, Jalisco (CEAJALISCO, <https://www.ceajalisco.gob.mx/>). El punto evaluado fue el correspondiente al Salto-Rio Santiago (RS-04), obtenido desde el año 2009 al 2020.

Determinación del Índice de Calidad del Agua (ICA): La calidad el agua se definió con el índice de calidad del agua de la Fundación Nacional de Sanidad de los Estados Unidos de América (ICA-NSF) (Brown et al., 1970). El ICA-NSF se compone de nueve parámetros: saturación de oxígeno disuelto (OD), coliformes fecales (CF), potencial de hidrógeno (pH), demanda bioquímica de oxígeno en 5 días (DBO₅), temperatura del agua (T°), fósforo total (PT), nitratos (NO₃-), turbidez (Turbiedad) y sólidos disueltos totales (SDT). Los nueve parámetros fueron analizados según los métodos APHA 1998 y EPA, 1971 descritos en Geypens et al. 1995 y Murthy 1988).

Obtenido el valor del parámetro evaluado, este se utilizó para determinar el valor de calidad a través de las curvas Q (Imagen).

Los cálculos de ICA-NSF se realizaron de acuerdo con Canter (1998) y Abbasi y Abbasi (2012), mediante la aplicación de la fórmula:

$$ICA = \sum_{i=1}^9 w_i q_i$$

Dónde:

q_i es la calificación del valor de calidad de cada parámetro;

w_i es el peso de importancia.

En **tabla 1**, el estado de la calidad del agua en este estudio se agrupó en cinco categorías con colores que definen sus efectos a la salud pública, siendo: Excelente (Azul: 100 a 80), Bueno (Verde: 79 a 60), Moderada (Amarillo: 59 a 40), Pobre (Naranja: 39 a 20) y Mala (Rojo: 19 a 0).

Análisis estadístico: Se describieron las variables cuantitativas a través de medidas de tendencia central, como media y mediana, posterior se determinaron medidas de dispersión, como desviación estándar y rangos, para posteriormente analizar su normalidad, a través del análisis de curtosis y asimetría, las variables cualitativas fueron expresadas en número y porcentaje. Se realizaron gráficas temporales de los parámetros de interés. Comparaciones de variables cuantitativas realizadas mediante prueba de T de student y ANOVA de un factor, se obtuvieron intervalos de confianza del 95%, y la comparación de variables cualitativas por prueba J_i^2 . Para analizar la tendencia de evolución entre variables cuantitativas realizadas mediante correlación de Pearson. Análisis realizado con paquete estadístico SPSS v25. Se tomó un valor de $p \geq 0.05$ como significativo.

RESULTADOS

Los resultados de la calidad del agua monitoreados muestran un análisis el análisis descriptivo de los parámetros evaluados, separados por año de estudio. Donde podemos encontrar que la mayoría de ellos están fuera de los rangos establecidos y se comportan de manera anormal (**tabla 2**). Algunos de los parámetros están fuera de norma NOM-001-SEMARNAT-2021 y la Ley Federal de Derechos de Agua 2021, establecen criterios de calidad de agua para determinar cuáles están fuera de norma. El Oxígeno disuelto (OD), está en la mayoría de los parámetros fuera de norma, significa que el ambiente es anóxico principalmente. El comportamiento bacteriano es significativamente alto para el parámetro de Coliformes Fecales (CF), esto significa que se en todos los años el parámetro está fuera de norma porque el límite permisible es de 1000 NMP/100ml, este comportamiento en el tiempo es alarmante. El pH si tiene un comportamiento normal, además está dentro del cumplimiento normativo, significa que las descargas de agua que recibe no modifican el potencial de hidrógeno, esta condición puede permitir el desarrollo de la vida acuática. La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) es un parámetro significativo porque tiene que ver con la materia orgánica que son descompuestas por microorganismos, se consume gran cantidad de oxígeno disuelto en el agua, poniendo en riesgo a otros organismos acuáticos que también dependen de este oxígeno para su supervivencia. Por tanto, el aumento de la presencia bacteriana, también impacta en el indicador de DBO5. La temperatura alta aumenta el desove de huevos de peces y aumenta la toxicidad por tanto cualquier descarga con temperatura alta es importante que se regule para la conservación de la biodiversidad, en este caso no se identificaron cambios significativos. El nitrógeno presente en el sistema con un sistema anaerobio genera metano, nitrógeno amoniacal, un efluente rico en nitrógeno amoniacal y SDT provocando susceptibilidad para ser oxidado y puede

comportarse como un reactor anaerobio, este último parámetro está por encima de lo establecido en la LFDA (500). Los valores del Fósforo Total (FT), nos indican el fósforo biológicamente disponible tiene origen en minerales, detergentes, escorrentías agrícolas (fertilizantes) y otros factores antropogénicos. El fósforo fosfatado total (PT) es un nutriente vegetal que, en altas concentraciones en las aguas superficiales, puede provocar eutrofización (fertilización excesiva y es necesario para las bacterias, pero esto puede ser perjudicial para ríos y lagos. Un aumento de estos nutrientes fomenta el crecimiento que agota el oxígeno disuelto y mata a los peces. Pueden crecer una gran cantidad de algas y algunas con toxinas como las cianobacterias (Maters et al 2008) . **(tabla 3)**.

En la **tabla 4**, analizamos el ICA obtenido por año, descrito y comparado contra el primer año de evaluación y obtuvimos que ningún año había sido diferente, esto es que en ninguno de ellos había mejorado en comparación al año de inicio de las observaciones. La tabla 5, establece los tipos de correlaciones entre algunas de las variables, coinciden en el ICA porque existe una correlación negativa fuerte entre variables como DBO, PT y la Turbiedad relacionadas con la calidad del agua, es decir se presenta principalmente abundancia de materia orgánica producto de descargas de agua municipales. El parámetro de Oxígeno Disuelto tiene una correlación positiva con el ICA, y con los demás parámetros. Coliformes Totales no presenta correlaciones debido al comportamiento anormal de los datos.

En la **figura 5**, mostramos el seguimiento del ICA a través del tiempo evaluado, esto desde el 2009 hasta el año 2020, donde podemos observar que, a pesar de los años, no ha habido una mejoría en la calidad. Y si se compara con las clasificaciones propuestas por la Fundación Nacional de Sanidad de los Estados Unidos de América (ICA-NSF), podemos ver la calidad del agua ha sido constante y cayendo en una puntuación de entre 25 a 50, cayendo en la clasificación de “Pobre calidad”.

DISCUSIÓN

Los resultados del estudio muestran que el Índice de Calidad del Agua (ICA) del río Santiago se mantiene en niveles de “Pobre” a “Mala” calidad a lo largo de los diez años de monitoreo. Los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, como el oxígeno disuelto (DO), la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) y los coliformes fecales, se encuentran consistentemente fuera de los rangos aceptables para agua de buena calidad, indicando una persistente contaminación del río. A nivel nacional, la situación del río Santiago es similar a la de otros cuerpos de agua en México que también enfrentan altos niveles de contaminación debido a descargas industriales y urbanas sin tratamiento adecuado (Gutiérrez et al., 2022). Por ejemplo, el río Atoyac en Puebla presenta problemas similares de contaminación por metales pesados y patógenos, afectando gravemente la salud pública local. En comparación con estudios internacionales, los resultados del río Santiago reflejan situaciones observadas en otros ríos contaminados en el mundo. Un estudio en el río Ganges en India encontró que los niveles de contaminantes microbiológicos y químicos están significativamente por encima de los límites seguros, similares a los hallazgos en el río Santiago (Kumar et al., 2021). Asimismo, investigaciones en el río Po en Italia han demostrado que la eutrofización y la presencia de nutrientes excesivos, como el fósforo y los nitratos, son problemas comunes que también se observan en el río Santiago (Gervasio et al., 2022).

Otro trabajo importante reciente en Ecuador se utilizó el ICA- NSF el cual redujo significativamente la gran cantidad de datos fisicoquímicos diversos, de forma simple rápida y objetiva (Robledo-Hernández, 2023).

El monitoreo continuo de la calidad del agua es crucial para entender la evolución temporal y espacial de la contaminación. La consistencia en los datos recolectados durante los diez años de estudio permite identificar patrones y tendencias que son esenciales para diseñar estrategias efectivas de mitigación y gestión ambiental (Fang et al., 2023). Sin un monitoreo regular, sería imposible detectar cambios sutiles en la calidad del agua que pueden tener impactos significativos a largo plazo.

El ICA es una herramienta vital para evaluar la calidad del agua y su impacto en la salud humana. En el caso del río Santiago, los bajos valores del ICA indican una alta exposición de la población a patógenos y químicos tóxicos. Esto se traduce en mayores riesgos de enfermedades gastrointestinales, enfermedades crónicas y cáncer, como se ha observado en las comunidades cercanas al río (Peniche et al., 2022). Evaluar la dinámica longitudinal de la calidad del agua es esencial para comprender las variaciones en los niveles de contaminantes a lo largo del tiempo y el espacio. Este enfoque permite identificar las fuentes de contaminación y evaluar el impacto de las actividades humanas y los cambios ambientales en la calidad del agua (Holbach et al., 2022). Los estudios longitudinales ofrecen una visión detallada de los procesos biogeoquímicos que influyen en la calidad del agua, proporcionando una base sólida para el desarrollo de políticas y estrategias de gestión ambiental.

CONCLUSIONES

El ICA, desarrollado por la Fundación Nacional de Saneamiento (NSF), es un índice validado internacionalmente que mide varios parámetros críticos de la calidad del agua, incluyendo la demanda bioquímica de oxígeno, oxígeno disuelto, pH, temperatura, fósforo total, nitratos, turbidez y sólidos disueltos totales (Syeed et al., 2023; Chidiac et al., 2023). Este índice es ampliamente utilizado para comparar la calidad del agua a nivel nacional e internacional, facilitando la identificación de áreas prioritarias para la intervención. Aunque el ICA es efectivo para monitorear la contaminación, presenta algunas desventajas, como la variabilidad en la precisión de los datos debido a diferencias en métodos de muestreo y análisis (Syeed et al., 2023). Evaluar la calidad del agua en el río Santiago es fundamental debido a los riesgos significativos para la salud pública. La exposición a agentes biológicos infecciosos y productos químicos tóxicos a través del agua de consumo puede causar enfermedades graves, como infecciones gastrointestinales y cáncer. Comprender los patrones de contaminación y los procesos biogeoquímicos permitirá diseñar estrategias de mitigación que protejan la salud humana y mejoren la calidad del agua.

Referencias bibliográficas

Chidiac, S., El Najjar, P., Ouaini, N., El Rayess, Y., & El Azzi, D. (2023). A comprehensive review of water quality indices (WQIs): history, models, attempts and perspectives. **Rev Environ Sci Biotechnol**, 22(2), 349-395. <https://doi.org/10.1007/s11157-023-09650-7>

- CONAGUA, C. N. del A. (2018). Diagnóstico de calidad del agua de la Región Hidrológica Lerma Santiago Pacífico (p. 63). https://files.conagua.gob.mx/conagua/generico/calidad_del_agua/diagnostico_lerma_santiago_pacifico_2012-2018.pdf
- Fang, X., Hu, J., & Sharma, S. (2023). Water quality modeling and monitoring. **Water**, 15(18), 3216. <https://doi.org/10.3390/w15183216>
- Geypens, M., Vanderdriech, E. J., Gonçalves, L., KCFS, M., & SASAKI, C. (2012). APHA, AEG; AWWA, ADE; WEF, LSC Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Washington DC; American Public Health Association, 1995. ATLAS, RM; BARTHA, R. Microbial Ecology—Fundamentals and Applications. New York: Addison Wesley Longman In. FRANCIHELE CARDOSO MÜLLER, 42.
- Gervasio, M. P., Soana, E., Granata, T., Colombo, D., & Castaldelli, G. (2022). An unexpected negative feedback between climate change and eutrophication: higher temperatures increase denitrification and buffer nitrogen loads in the Po River (Northern Italy). **Environ. Res. Lett.**, 17, 84031. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abcde8>
- Gutiérrez, J., Flores, A., & Jiménez, B. (2022). Water quality in Mexican rivers: Current status and future challenges. **Environmental Science and Pollution Research**, 29(8), 11023-11036. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15627-0>
- Holbach, A., Norra, S., & others. (2022). Insights into phytoplankton dynamics and water quality monitoring with the BIOFISH at the Elbe River, Germany. **Water**, 14(13), 2078. <https://doi.org/10.3390/w14132078>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014), “Anexo II: Glosario”, en Mach, Katharine J.; Planton, Serge; von Stechow, Christoph, *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*, Ginebra, IPCC, pp. 127-141.
- IIEG de Jalisco. Instituto de Información de Geografía y Estadística del Estado de Jalisco. Población y Sociedad. Medio Ambiente. Acceso en: <https://ieeg.gob.mx/ns/>
- Kumar, P., Sharma, P. K., Kumar, P., Sharma, M., & Butail, N. P. (2021). Agricultural sustainability in Indian Himalayan region: Constraints and potentials. *Indian Journal of Ecology*, 48(3), 649-661.
- ONU (Organización Naciones Unidas). Objetivos del Desarrollo Sostenible. 2015-2030. Acceso en <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- Peniche, S., et al. (2022). Can economics save Jalisco’s toxic Santiago River? **Mexico News Daily**. Retrieved from [Mexico News Daily](<https://mexiconewsdaily.com>).
- Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. DOF:11/03/2022 https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022&print=true
- Ley Federal de Derechos de Agua. Ley Federal de Derechos Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales 2021. CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/635527/CGRF-1-21_LFD_VF.pdf
- Masters, G. M., Ela, W. P., & Parra, Y. D. (2008). Introducción a la ingeniería medioambiental.

Pearson educación.

- Murthy, G. K., & Cox, S. (1988). Evaluation of APHA and AOAC methods for phosphatase in cheese. *Journal of the Association of Official Analytical Chemists*, 71(6), 1195-1199.
- Robledo-Hernández, J. A. (2023). Evaluación del Índice de Calidad de Agua ICA-NSF en las microcuencas del Parque Nacional Río Dulce como herramienta en la gestión integral del manejo sustentable, Livingston, Izabal, Guatemala, Centroamérica. *Revista Tecnología En Marcha*, 36(1), 106-116.
- Syeed, M. M. M., Hossain, M. S., Karim, M. R., Uddin, M. F., Hasan, M., & Khan, R. H. (2023). Surface water quality profiling using the water quality index, pollution index and statistical methods: A critical review. **Environmental and Sustainability Indicators**, 18, 100247. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2023.100247>
- Teran-Velasquez, G., Helm, B., & Krebs, P. (2022). Longitudinal river monitoring and modeling substantiate the impact of weirs on nitrogen dynamics. **Water**, 14(2), 189. <https://doi.org/10.3390/w14020189>
- Thorslund, J., Bierkens, M. F. P., Oude Essink, G. H. P., Sutanudjaja, E. H., & van Vliet, M. T. H. (2021). Common irrigation drivers of freshwater salinisation in river basins worldwide. **Nat. Commun.**, 12, 4232. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24535-3>

TABLAS Y GRÁFICOS

Tabla 1. Clases de calidad del agua y su traducción a la escala de valores

Clases de calidad del agua	Requerimientos legales	Escala de valores
Excalente	Cumplido	100 – 91
Buena		90 – 71
Moderada		70 – 51
Pobre		50 – 26
Mala		25 – 0

Fuente:

Tabla 2. Características fisicoquímicas del punto RS-04 (Salto-Río Santiago) examinado a través del tiempo

Año	Parámetros	Media	Mediana	DE	Xmin	Xmax	Curtosis	Asimetría
2009	OD (mg/L)	0.35	0.00	0.77	0.00	2.20	3.08	2.02
	CF(MPN)	450,000.00	195,000.00	463,938.454	15,000.00	1,100,000.00	-1.41	0.81
	pH	7.69	7.59	0.35	7.35	8.42	0.82	1.22
	DBO5 (mg/L)	22.52	19.31	10.57	8.88	44.00	1.05	1.24
	T (oC)	22.26	23.00	2.87	18.00	26.00	-1.22	-0.44
	PT (mg/L)	3.17	2.49	2.89	0.37	9.58	1.73	1.36
	NO3-(mg/L)	0.12	0.10	0.07	0.10	0.32	10.00	3.16
	Turbiedad(NTU)	19.52	20.00	8.51	8.73	37.15	0.70	0.85
	SDT	626.60	699.00	195.53	185.00	836.00	1.97	0.69
2010	OD (mg/L)	1.09	0.65	0.87	0	2.30	-1.76	0.25
	CF (MPN)	2,409,454.55	1,100,000.00	3,908,299.99	15,000.00	1,100,000.00	2.00	1.83
	pH	7.52	7.50	0.15	7.34	7.83	1.28	0.92
	DBO (mg/L)	24.53	30.54	14.32	3.57	43.08	-1.64	-0.27
	T (oC)	21.33	21.40	3.86	15.40	25.90	1.28	-0.38
	PT (mg/L)	4.55	4.81	2.77	1.04	8.41	-2.04	0.02
	NO3-(mg/L)	0.38	0.10	0.48	0.10	1.50	1.28	1.67
	Turbiedad (NTU)	155.49	70.00	299.02	15.00	1,051.00	1.28	3.24
	SDT	693.82	73.00	184.06	385.00	949.00	1.28	-0.44
2011	OD (mg/L)	1.32	1.54	1.25	0	3.50	-0.21	0.48
	CF (MPN)	1,901,250.00	350,000.00	3,750,502.58	210,000.00	11,000,000.00	7.05	2.63
	pH	7.59	7.62	0.24	7.18	7.89	1.48	-0.56
	DBO (mg/L)	32.52	41.09	18.162	6.02	49.20	-1.24	-0.63
	T (oC)	24.09	24.15	3.49	19.70	30.80	1.05	0.77
	PT (mg/L)	4.37	4.39	1.65	2.13	6.49	-1.36	-0.17
	NO3- (mg/L)	0.29	0.18	0.34	0.10	1.12	7.29	2.66
	Turbiedad (NTU)	66.20	75.00	34.92	4.60	110.00	-0.14	-0.74
	SDT	638.12	796.00	388.75	8.00	977.00	1.48	-1.29
2012	OD (mg/L)	3.63	3.95	1.33	0.80	4.90	1.29	-1.25
	CF (MPN)	12,341,477.78	93,000.00	36,622,223.29	4,300	110,000,000.00	9.00	3.00
	pH	7.55	7.58	0.19	7.22	7.84	0.23	-0.46
	DBO (mg/L)	9.16	7.71	4.719	3.29	15.96	-1.25	0.45
	T (oC)	22.81	24.10	2.74	16.70	24.90	2.46	-1.69
	PT (mg/L)	3.22	3.37	1.71	0.80	5.82	-1.10	0.26
	NO3-(mg/L)	0.37	0.25	0.28	0.10	0.87	-0.75	0.74
	Turbiedad (NTU)	18.70	11.00	17.01	2.70	50.00	-0.49	0.97
	SDT	778.67	700.00	185.34	512.00	1,080.00	-0.73	0.46
2013	OD (mg/L)	3.97	4.27	1.03	2.50	5.40	-1.79	-0.02
	CF (MPN)	79,152.73	15,000.00	142,059.07	430.00	460,000.00	5.53	2.33

	pH	7.67	7.64	0.15	7.47	7.93	-0.58	0.27
	DBO (mg/L)	7.50	7.65	4.56	2.03	17.04	0.35	0.84
	T (°C)	23.37	23.80	3.02	17.10	27.60	0.59	-0.81
	PT (mg/L)	2.67	2.61	0.79	1.62	3.80	-1.57	0.13
	NO3- (mg/L)	1.86	1.32	2.23	0.10	7.49	3.75	1.94
	Turbiedad (NTU)	27.39	5.60	67.49	1.40	230.00	10.75	3.26
	SDT	641.91	719.00	344.679.00	30.00	1,020.00	0.00	-0.99
2014	OD (mg/L)	3.10	2.96	1.10	1.40	4.90	-0.90	-0.04
	CF (MPN)	229,775.45	46,000.00	37,056.11	230.00	1,100,000.00	1.28	1.99
	pH	7.49	7.54	0.15	7.21	7.66	-0.34	-0.91
	DBO (mg/L)	7.66	8.04	4.04	3.07	14.93	1.28	0.66
	T (oC)	22.91	23.80	3.04	17.40	27.20	-0.61	-0.49
	PT (mg/L)	2.95	3.22	0.89	1.79	4.09	-1.96	-0.16
	NH3 -(mg/L)	0.19	0.10	0.19	0.10	0.70	5.00	2.33
	Turbiedad (NTU)	10.51	10.00	10.37	1.80	37.00	3.99	1.89
	SDT	723.81	791.00	197.75	405.00	961.00	-1.18	-0.40
2015	OD (mg/L)	2.17	1.97	0.72	1.40	3.70	0.22	1.00
	CF(MPN)	888,454.55	240,000.00	130,929.86	93,000.00	4,600,000.00	7.78	2.65
	pH	7.46	7.49	0.15	7.13	7.67	1.68	-1.03
	DBO (mg/L)	11.44	9.00	7.57	5.88	32.50	6.97	2.49
	T (oC)	23.79	24.50	33.46	17.50	28.50	-0.36	-0.78
	PT (mg/L)	3.00	3.04	0.89	1.86	4.37	-1.20	0.28
	NO3- (mg/L)	0.27	0.10	0.48	0.10	1.72	10.68	3.25
	Turbiedad (NTU)	7.97	7.20	5.01	2.20	17.30	-0.62	0.63
	SDT	765.82	783.00	155.40	513.00	1,004.00	-0.47	-0.36
2016	OD (mg/L)	2.46	2.36	1.12	1.20	3.80	-2.30	0.16
	CF (MPN)	1,288,800.00	240,000.00	1,947,520.40	11,000.00	4,600,000.00	2.96	1.77
	pH	7.49	7.47	0.23	7.21	7.85	0.91	0.23
	DBO (mg/L)	16.05	9.42	15.93	4.02	43.80	4.01	-0.53
	T (oC)	24.26	24.40	2.13	21.10	26.90	1.03	-0.54
	PT (mg/L)	2.51	2.36	0.81	1.63	3.35	-2.88	0.18
	NO3 (mg/L)	0.15	0.10	0.12	0.10	0.37	5.00	2.24
	Turbiedad (NTU)	37.34	7.70	68.63	3.20	160.00	4.96	2.23
	SDT	734.40	823.00	231.76	494.00	927.00	-3.14	-0.47
2017	OD (mg/L)	0.63	0.09	1.43	0.10	3.90	7.00	2.65
	CF (MPN)	5,620,000.00	2,400,000.00	8,266,567.20	240,000.00	24,000,000.00	6.15	2.43
	pH	7.59	7.66	0.18	7.34	7.76	-1.21	-0.88
	DBO (mg/L)	24.71	19.20	13.93	9.60	42.00	-2.46	0.26
	T (oC)	22.17	24.00	3.06	16.00	24.00	2.68	-1.78
	PT (mg/L)	3.21	3.10	0.99	1.88	4.44	-1.76	-0.11

	NO3-(mg/L)	0.10	0.10	0.00	0.10	0.10		
	Turbiedad (NTU)	23.71	13.00	21.36	5.30	60.00	-0.48	1.00
	SDT	664.14	653.00	175.32	440.00	918.00		
2018	OD (mg/L)	1.51	1.52	1.25	0.00	4.20	1.02	0.82
	CF (MPN)	4,320,909.09	4,600,000.00	2,682,202.28	430,000	11,000,000.00	3.97	1.33
	pH	7.43	7.40	0.24	7.00	7.70	-0.76	-0.44
	DBO (mg/L)	17.29	13.32	7.67	10.56	34.80	1.49	1.46
	T (oC)	20.73	22.00	2.53	15.00	23.00	1.30	-1.29
	PT (mg/L)	3.34	3.49	1.71	0.96	6.72	0.18	0.40
	NO3- (mg/L)	0.10	0.10	0.00	0.10	0.10		
	Turbiedad (NTU)	20.52	10.00	25.93	2.60	85.00	3.30	1.92
	SDT	700.45	745.00	161.47	444.00	889.00	-1.57	-0.24
2019	OD (mg/L)	2.50	2.73	1.70	0.00	5.20	-1.09	-0.11
	CF (MPN)	5,745,454.55	4,600,000.00	3,609,809.87	1,100,000.00	11,000,000.00	-0.83	0.65
	pH	7.35	7.40	0.33	6.80	7.70	-0.47	-0.85
	DBO (mg/L)	45.45	29.70	33.22	7.80	101.40	-1.44	0.49
	T (oC)	19.73	20.00	2.53	16.00	23.00	-1.20	-0.21
	PT (mg/L)	3.18	3.45	0.82	2.05	4.25	-1.19	-0.39
	NO3-(mg/L)	0.19	0.10	0.13	0.10	0.40	0.57	1.15
	Turbiedad (NTU)	41.49	33.00	36.19	4.40	100.00	-1.46	-0.27
	SDT	679.09	712.00	143.93	451.00	888.00	-1.17	-0.27
2020	OD (mg/L)	2.89	3.16	2.61	0.10	5.60	-2.98	-0.12
	CF(MPN)	3,150,000.00	1,100,000.00	4,460,661.39	150,000.00	11,000,000.00	4.36	2.06
	pH	7.36	7.50	0.34	7.00	7.70	-3.04	-0.41
	DBO (mg/L)	28.42	20.76	16.89	13.98	53.40	-0.78	0.96
	T (oC)	18.40	18.00	2.07	16.00	21.00	-1.96	0.24
	PT (mg/L)	4.54	4.66	1.16	3.08	5.84	-2.06	-0.21
	NO- (mg/L)	0.26	0.29	0.11	0.14	0.37	-2.93	-0.31
	Turbiedad (NTU)	16.05	4.90	37.43	1.00	65.00	4.90	2.21
	SDT	786.00	771.00	72.73	696.00	871.00	-1.93	0.05

OD, oxígeno disuelto; CF, coliformes fecales; MPN, número más probable; DBO, demanda bioquímica de oxígeno; NO3-, nitratos; T, temperatura; PT, fósforo total; NTU, unidades nefelométricas de turbidez; SDT, sólidos disueltos totales; DE: desviación estándar; X, valor.

Tabla 3. Normatividad en agua. Ley Federal de Derechos de Agua

Parámetros	Ley Federal de Derechos de Agua (LFDA 2021)
OD (mg/L)	5
CF (MPN/100ml)	1000
pH	6-8.5
DBO (mg/L)	-
T (oC)	+1.5
PT (mg/L)	0.05
NO3-(mg/L)	0.06
Turbiedad (NTU)	10
SDT	500

OD, oxígeno disuelto; CF, coliformes fecales; MPN, número más probable; DBO, demanda bioquímica de oxígeno; NO3-, nitratos; T, temperatura; PT, fósforo total; NTU, unidades nefelométricas de turbidez; SDT, sólidos disueltos totales.

Tabla 4. Parámetros estadísticos obtenidos del ICA en el sistema de agua superficial examinado

Año	Parámetros descriptivos del ICA					p*
	Media $\pm$ DE	Mediana ($X_{\min}$ - $X_{\max}$)	Curtosis	Asimetría	IC95%	
2009	33.90 $\pm$ 3.54	32.50 (31.00 – 42.00)	3.08	2.02	(31.37 – 36.43)	–
2010	31.00 $\pm$ 4.52	30.00 (25.00 – 40.00)	1.28	0.91	(27.97 – 34.03)	0.86
2011	30.75 $\pm$ 4.17	29.50 (26.00 – 39.00)	1.48	1.69	(27.27 – 34.23)	0.86
2012	36.78 $\pm$ 3.99	36.00 (33.00 – 45.00)	0.94	1.13	(33.71 – 39.85)	0.90
2013	39.45 $\pm$ 4.95	37.00 (34.00 – 47.00)	-1.85	0.30	(36.13 – 42.78)	0.06
2014	38.64 $\pm$ 4.13	38.00 (34.00 – 46.00)	-1.03	0.48	(35.86 – 38.00)	0.20
2015	36.27 $\pm$ 2.57	37.00 (31.00 – 39.00)	0.15	-0.93	(34.54 – 38.00)	0.96
2016	36.80 $\pm$ 6.53	34.00 (32.00 – 48.00)	3.34	1.82	(28.69 – 44.91)	0.97
2017	33.14 $\pm$ 2.12	32.00 (31.00 – 36.00)	-2.23	0.33	(31.19 – 35.10)	1.00
2018	34.27 $\pm$ 3.00	34.00 (28.00 – 40.00)	2.05	-0.37	(32.26 – 36.29)	1.00
2019	32.00 $\pm$ 2.76	31.00 (28.00 – 37.00)	-0.35	0.63	(30.15 – 33.85)	0.99
2020	34.40 $\pm$ 3.64	36.00 (28.00 – 37.00)	4.27	-2.03	(29.87 – 38.93)	1.00
General	34.84 $\pm$ 4.64	34.50 (25.00 – 48.00)	0.34	0.57	(33.96 – 35.71)	–

ICA, Índice de Calidad del Agua; DE, desviación estándar; X, valor; IC del 95%: intervalo de confianza del 95%.

Se realizaron comparaciones entre las medias obtenidas por ANOVA de una vía.

*valores de p resultantes de la comparación entre el valor obtenido del ICA del año de inicio del sistema de monitoreo (2009) y el ICA de años posteriores.

Tabla 5. Análisis de correlación

Variable	ICA		OD (mg/L)		CT (MPN)		pH		DBO (mg/L)		T (°C)		PT (mg/L)		NO ₃ - (mg/L)		Turbiedad (NTU)		SDT	
	r	p	r	p	r	p	r	p	r	p	r	p	r	p	r	p	r	p	r	p
OD (mg/L)	0.514	≤0.001	1.000	-	0.080	0.41	0.102	0.29	-0.371	≤0.001	-0.062	0.52	-0.208	0.03	0.308	0.001	-0.152	0.11	0.037	0.70
CT (MPN)	-0.161	0.92	0.080	0.41	1.00	-	-0.175	0.07	0.121	0.21	-0.073	0.45	0.073	0.45	-0.072	0.45	0.068	0.48	-0.025	0.79
pH	0.076	0.43	0.102	0.29	-0.175	0.07	1.00	-	-0.137	0.15	0.075	0.435	0.092	0.34	0.021	0.83	-0.052	0.59	0.374	≤0.001
DBO (mg/L)	-0.573	≤0.001	-0.371	≤0.001	0.121	0.21	-0.137	0.15	1.00	-	-0.189	0.05	0.249	0.009	-0.198	0.04	0.158	0.10	-0.060	0.53
T (°C)	-0.078	0.42	-0.062	0.52	-0.073	0.45	0.075	0.43	-0.189	0.05	1.00	-	-0.245	0.01	0.056	0.56	-0.072	0.46	-0.195	0.04
TP (mg/L)	-0.455	≤0.001	-0.208	0.03	0.073	0.45	0.092	0.34	0.249	0.009	-0.245	0.01	1.00	-	-0.122	0.20	0.088	0.36	0.391	≤0.001
NO ₃ - (mg/L)	0.135	0.16	0.308	0.001	-0.072	0.45	0.021	0.83	-0.198	0.04	0.056	0.56	-0.122	0.20	1.00	-	0.037	0.70	-0.285	0.003
Turbiedad (NTU)	-0.345	≤0.001	-0.152	0.11	0.068	0.48	-0.052	0.59	0.158	0.10	-0.072	0.46	0.088	0.36	0.037	0.70	1.00	-	-0.142	0.14
SDT	0.034	0.72	0.037	0.70	-0.025	0.79	0.374	≤0.001	-0.060	0.53	-0.195	0.04	0.391	≤0.001	-0.285	0.003	-0.142	0.13	1.00	-

OD, oxígeno disuelto; C.T., coliformes fecales; MPN, número más probable; DBO, demanda bioquímica de oxígeno; NO₃-, nitratos; T, temperatura; PT, fósforo total; NTU, unidades nefelométricas de turbidez; SDT, sólidos disueltos totales

Figura 1. Localización zona de estudio, río Santiago entre El Salto y Juanacatlán, Jalisco

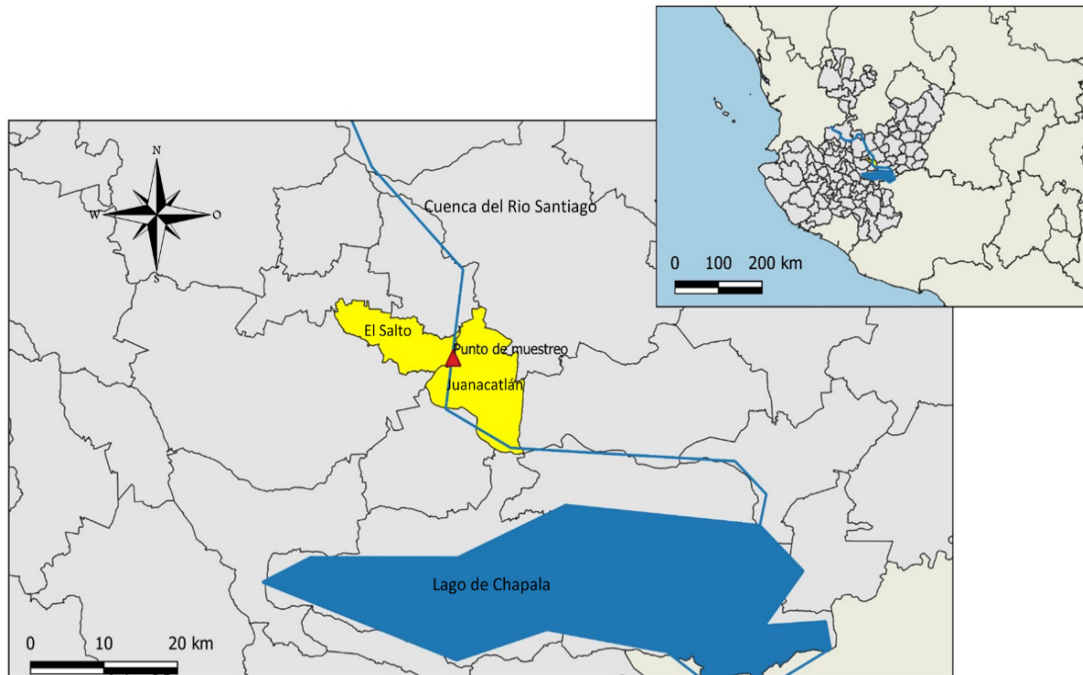


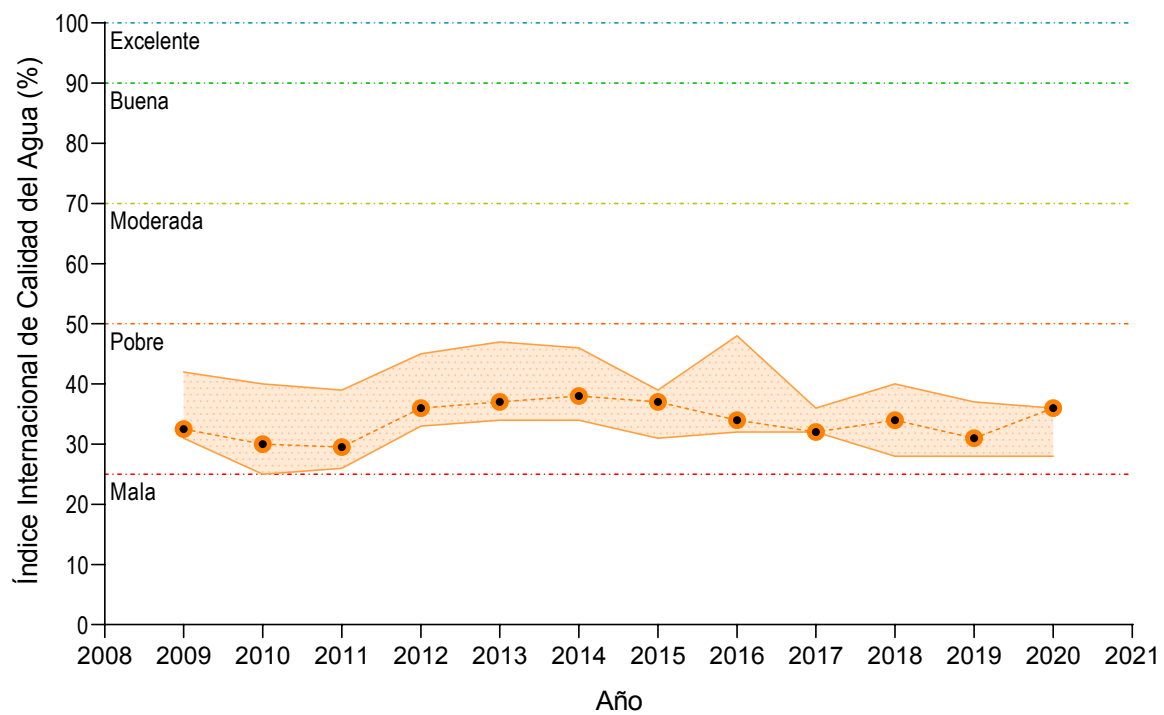
Figura 2. Cascada de Río Santiago



Figura 3. Calidad de agua del río Santiago, con la presencia de espuma y residuo



Figura 4. Comportamiento en el tiempo del ICA del punto evaluado



Eliminación de Sólidos en Agua Pluvial captada mediante un Sistema de Electrocoagulación Energizado con paneles fotovoltaicos

Removal of Solids in Rainwater captured through an Electrocoagulation System Powered with photovoltaic panels

Maria Angeles Camacho Ruiz, Ernesto Villegas Márquez, Norma Guadalupe González Montoya, Elba González Aguayo, Celestino García Gómez^a, Filiberto Briseño Aguilar e Itzel Celeste Romero Soto^b

Resumen / Abstract

Los sólidos son contaminantes que llegan por arrastre a las ollas de almacenamiento durante la captación de agua pluvial. Estos contaminantes deben ser eliminados previamente a la aplicación de procesos de filtración y de pulido. En este trabajo, se evaluó un sistema de electrocoagulación alimentado con celdas fotovoltaicas en la remoción de sólidos. Se utilizó un reactor de acrílico con un volumen de operación de 800 ml y dos pares de electrodos; Al como ánodos y acero inoxidable como cátodos, con un área de superficie activa de 77.12 cm². Dos variables experimentales: tiempo (40, 80 y 120 min) y distancia entre los electrodos (1 y 1.5 cm) sobre la remoción de sólidos totales fueron evaluadas. Los resultados destacan una remoción máxima de sólidos totales de 80.15 % a los 120 min con una distancia entre electrodos de 1 cm. Estas condiciones fueron establecidas como óptimas y se evaluaron a escala piloto, encontrando una eliminación del 90.12 % de sólidos. Los resultados resaltan la alta eficiencia bajo un tratamiento sostenible.

Palabras clave: agua pluvial, contaminantes, sólidos, sistema de electrocoagulación, sostenibilidad.

Solids are contaminants that wash into storage pots during rainwater harvesting. These contaminants must be removed prior to the application of filtration and polishing processes. In this work, an electrocoagulation system powered by photovoltaic cells was evaluated in the removal of solids. An acrylic reactor with an operating volume of 800 ml and two pairs of electrodes was used; Al as anodes and stainless steel as cathodes, with an active surface area of 77.12 cm². Two experimental variables: time (40, 80 and 120 min) and distance between electrodes (1 and 1.5 cm) on the removal of total solids were evaluated. The results highlight a maximum removal

^a. Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Francisco I. Madero S/N, Ex Hacienda el Cañada, 66050, Cd Gral, Escobedo, NL, Mexico.

^b. Los investigadores Camacho Ruiz, Villegas Márquez, González Montoya, González Aguayo, Briseño Aguilar y Romero Soto laboran en el Laboratorio de Investigación en Biotecnología, Centro Universitario del Norte, CUNorte, Universidad de Guadalajara, Colotlan, 46200, Jalisco, México. Itzel Celeste Romero Soto, autor responsable, teléfono +52 (644) 2 27 9829. Correo electrónico: itzel.romero@cunorte.udg.mx.

of total solids of 80.15 % at 120 min with a distance between electrodes of 1 cm. These conditions were established as optimal and were evaluated on a pilot scale, finding an elimination of 90.12 % of solids. The results highlight the high efficiency under sustainable treatment.

Keywords: rainwater, pollutants, solids, electrocoagulation system, sustainability.

1. Introducción

En México, los sectores con mayor demanda de agua son la agricultura, que consume el 76%, seguida por la industria y las termoeléctricas con un 14%, y finalmente el uso doméstico con un 10% (SEMARNAT, 2017; CONAGUA, 2019). La elevada demanda de este recurso, junto con el aumento de su escasez, ha hecho indispensable la exploración de nuevas alternativas para incrementar su disponibilidad. En este contexto, en las zonas semidesérticas, una estrategia viable es aprovechar la temporada de lluvias para captar y almacenar agua, con el fin de utilizarla durante los meses de mayor sequía. La precipitación pluvial en estas regiones generalmente promedia 400 mm anuales, y se localizan principalmente en el norte y noroeste del país (SEMARNAT, 2015; SMN, 2023).

Algunas comunidades han adoptado la captación directa desde los techos para minimizar la contaminación. No obstante, otras han construido ollas de captación, muchas de las cuales carecen de la estructura y diseño adecuado, resultando en una sobrecarga de contaminantes durante el escurrimiento. Las impurezas que se acumulan en los vasos reguladores suelen ser de naturaleza química, biológica y física, destacándose principalmente los sólidos (Fabregas, 2023). La presencia de estos contaminantes limita el uso directo del agua en actividades agropecuarias y domésticas, ya que obstruyen bombas y filtros, requiriendo un tratamiento previo.

Los métodos convencionales para la eliminación de sólidos incluyen la coagulación/floculación química, que demanda la adición de agentes químicos y una agitación constante para la formación de flóculos, lo que incrementa sus costos (Mollah et al., 2001). Otra alternativa es la electrocoagulación (EC) un tratamiento avanzado que utiliza altas cargas de energía para generar un coagulante mediante una reacción química con el cual atrapa a los contaminantes como sólidos, metales, bacterias, etc. (Hakizimana et al., 2017). La reacción que se genera depende del material del ánodo, puede ser de Al (Al(OH) , Al(OH)_2 , Al(OH)_3) y Fe (Fe(OH) , Fe(OH)_2 , Fe(OH)_3) (Mouedhen, et al., 2008; Sasson, Calmano & Adin, 2008). El ánodo funciona como electrode de sacrificio, mientras que en el cátodo se hidroliza el agua para formar H^+ y OH^- . Las ventajas que presenta EC frente a una coagulación convencional son la baja cantidad de lodos que se generan y, además, estos suelen ser menos tóxicos, lo cual facilita su reúso como absorbente (Moghaddam, Moghaddam & Arami, 2010). Para operar este sistema de manera sostenible, se pueden incorporar paneles fotovoltaicos que suministren la energía necesaria. Esta opción es viable en zonas con alta radiación

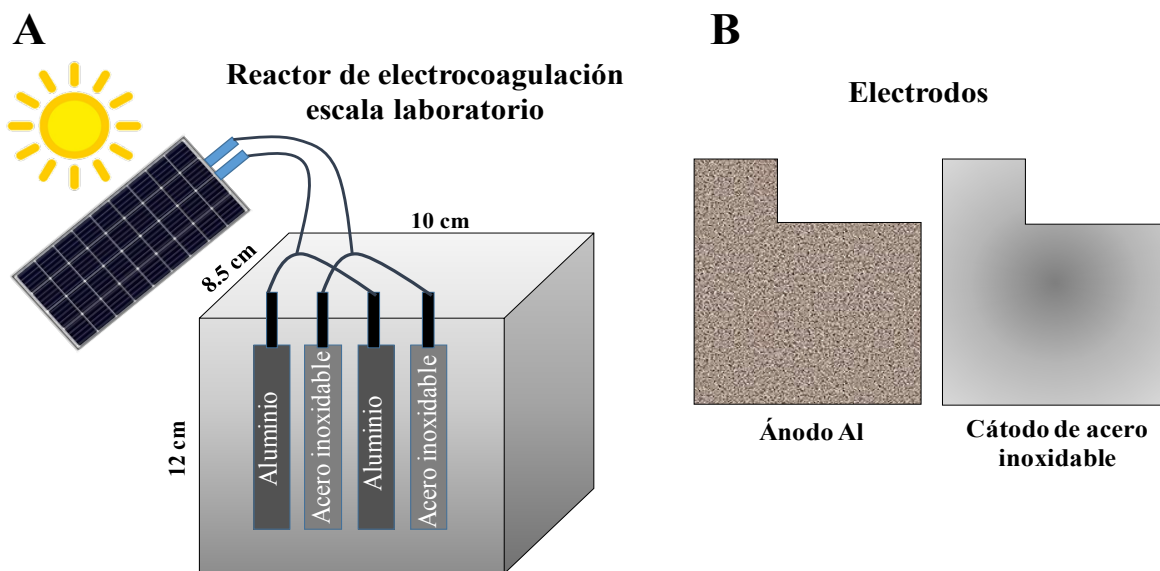
solar, considerando solo los costos iniciales de inversión y la sustitución periódica de los ánodos de sacrificio. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue evaluar la eliminación de sólidos del agua pluvial captada en un vaso regulador mediante electrocoagulación, utilizando paneles fotovoltaicos como fuente de energía.

2. Materiales y Métodos

2.1 Unidad experimental

Para el primer diseño a escala laboratorio, se empleó una celda de acrílico de configuración cuadrangular con dimensiones de 12 cm por 8.5 cm por 10 cm, y capacidad de 1 L. El volumen de operación fué de 800 ml. Se utilizó un par de electrodos en forma de placas planas con un área de superficie activa de 77.12 cm². Como ánodo se usó Al y como cátodo acero inoxidable. En este reactor, se utilizó un módulo solar policristalino de Microm electrónica modelo CX 50 con medidas de 52.3 cm de ancho y 81.5 cm de largo, formado por 36 celdas fotovoltaicas. Con una potencia nominal de 50 Watts, corriente de corto a 3.80 A y una corriente a potencia máxima de 3.45 A (Figura 1).

Figura 1. A) Reactor de electrocoagulación escala laboratorio conectado a un panel fotovoltaico para el abastecimiento de su requerimiento energético. B) configuración de electrodos utilizados en el reactor cuadrangular: ánodos de aluminio y cátodos de acero inoxidable

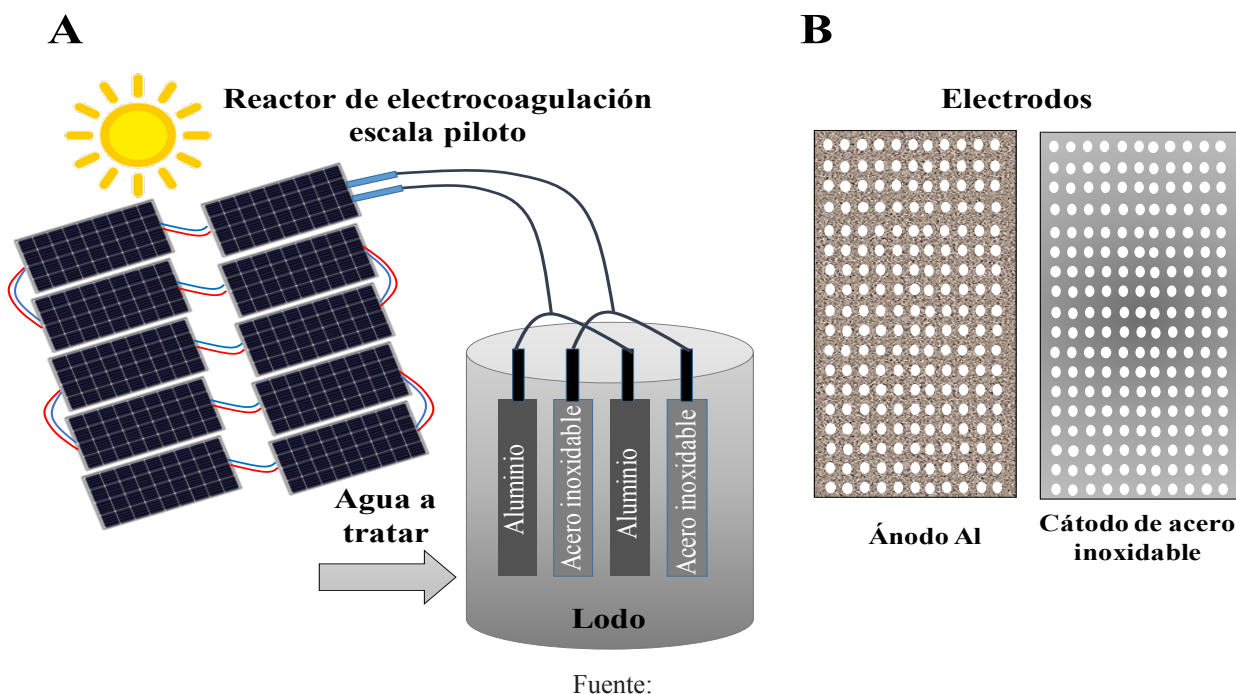


Fuente:

Para las pruebas a escala piloto bajo condiciones óptimas se utilizó un recipiente cilíndrico de plástico de 57.5 cm de diámetro y 91.4 cm de altura con un volumen de operación de 200 L. Se

utilizaron dos pares de electrodos (ánodos de Al y cátodos de acero inoxidable) en forma de láminas planas con perforaciones y un área de superficie activa de 4500 cm² para cada uno (Figura 2).

Figura 2. A) Reactor de electrocoagulación escala piloto conectado a 10 panel fotovoltaicos conectados en serie. B) Electroodos de malla utilizados en el reactor cilindrico: ánodos de aluminio y cátodos de acero inoxidable.



2.2 Solución experimental

Para la experimentación, se recolectó agua pluvial almacenada en el vaso regulador del Centro Universitario del Norte (CUNorte), de la Universidad de Guadalajara. El muestreo se realizó cumpliendo con la NOM-230-SSA1-2002. Se recolectó y almacenó un volumen suficiente para el desarrollo del diseño experimental, utilizándose el agua cruda sin dilución y sin la adición de ningún agente químico en cada experimento.

2.3 Condiciones de operación

Durante la experimentación, se colocó el reactor de acrílico con 800 ml del agua pluvial previamente recolectada de la olla de captación y homogenizada con dos pares de electrodos separados de acuerdo al diseño experimental (1 cm y 1.5 cm). Los electrodos se colocaron en serie y de forma directa al panel fotovoltaico. El sistema se operó en batch sin agitación. La medición del amperaje se realizó continuamente durante las corridas experimentales con un multímetro digital Tulumex modelo 16-101, manteniéndose una intensidad constante de 3.4 A.

El diseño experimental a nivel laboratorio, se optimizó y evaluó en un reactor cilindrico a escala piloto con un volumen de operación de 200 L. En este sistema tambien se utilizó agua pluvial recolectada del vaso regulador del CUNorte y se operó con dos pares de electrodos con una distancia de 1 cm entre ellos de manera cerrada. 10 paneles solares conectados en serie con las mismas características del reactor a nivel laboratorio fueron utilizados y la intensidad de corriente se monitoreo de manera constante, manteniendo un promedio de 26.5 A. Ambos experimentos se realizaron a las horas de luz solar de mayor intensidad (de las 10:55-13:10 h).

Una vez transcurrido el tiempo de cada corrida, se dejó reposar cada experiment durante 20 min para dar tiempo a la sedimentación del coagulante con los sólidos atrapados. De la parte clarificada se recolectaron 50 ml de muestra para el analisis del contaminante.

2.4 Diseño experimental

Se utilizó un diseño factorial, donde se evaluaron dos variables experimentales: el tiempo en 3 niveles: 40 min, 80 min y 120 min y la distancia entre electrodos en 2 niveles: 1 cm y 1.5 cm, dando un total de 6 experimentos (Tabla 1). Todos los ensayos se realizaron por triplicado. En el análisis de datos se empleo el software Minitab 17 ®. Para la optimización, se priorizó la remoción de sólidos, sin restricciones para las variables evaluadas.

2.5 Análisis de muestra

La Determinación se sólidos totales se realizó en base a la norma NMX-AA-034-SCFI-2015. El porcentaje de eliminación de sólidos se determinó en base a la ecuación 1.

$$R (\%) = \frac{C_f - C_i}{C_f} \times 100 \quad (Ec. 1)$$

Donde:

$R (\%)$ = porcentaje de remoción de sólidos

C_f = concentración final de sólidos después del tratamiento

C_i = concentración inicial de sólidos en el agua pluvial a tratar

3. Resultados y discusión

Antes de iniciar las corridas experimentales, se monitoreo el aporte energetico de un panel fotovoltaico conectado al reactor de electrocoagulación a partir de las 9:30 horas hasta las 13 h. La medición se realizó cada 5 min con el fin de determinar la hora más conveniente de operación del Sistema. De acuerdo a Kielar (2023), las horas de mayor radiación oscilan entre las 11-16 horas, pero esto varía en cada lugar. En México, Limón- Portillo (2017) afirma que las horas las hora pico promedio oscilan entre 3 y 7 horas al día. De acuerdo al monitoreo realizado las horas de luz solar de mayor intensidad fueron de las 10:55-13:10 h (figura 3).

Figura 3. Monitorización del aporte energético de un panel fotovoltaico en el sistema de electrocoagulación



Fuente:

3.1 Unidad a nivel laboratorio

Durante la experimentación a nivel laboratorio, la eliminación máxima de sólidos alcanzada en el agua pluvial tratada fué 80.15 ± 2.2 % bajo las condiciones de 1 cm de distancia entre electrodos a 120 min (table 1). En las corridas, se observó que al incrementar la distancia entre los electrodos la remoción disminuye, lo cual concuerda con lo encontrado por Zhang et al., (2013), quien reveló que al ampliar la distancia aumenta la resistencia y esto hace que disminuya la eficiencia en el sistema. Boinpally et al. (2023) también demostró en su trabajo que la distancia y el tiempo experimental son variables de gran importancia en el rendimiento del tratamiento. Bazrafshan et al., (2015) señaló que el agua con baja conductividad requiere menor distancia entre los electrodos, así mismo, cuando la conductividad es mayor la distancia también puede ser mayor y aun así alcanzar altas eliminaciones de contaminantes, esto es por que a mayor conductividad, la resistencia se reduce (Martínez-Villafañe, Montero-Ocampo & García-Lara, 2009).

Tabla 1. Porcentajes de eliminación de sólidos en el sistema de electrocoagulación

Tiempo (min)	Distancia (cm)	Remoción (%)
40	1	47.27 ± 1.3
80	1	56.36 ± 0.9
120	1	80.15 ± 2.2
40	1.5	21.82 ± 5.3
80	1.5	32.73 ± 3.4
120	1.5	59.70 ± 1.7

Fuente:

El análisis estadístico muestra una R^2 de 99.70, lo cual indica un buen ajuste del diseño. Asimismo, en la tabla 2 se observa el análisis de varianza, donde se destaca un valor de $P < 0.05$ para ambas variables evaluadas, lo cual las hace significativas para el experiment.

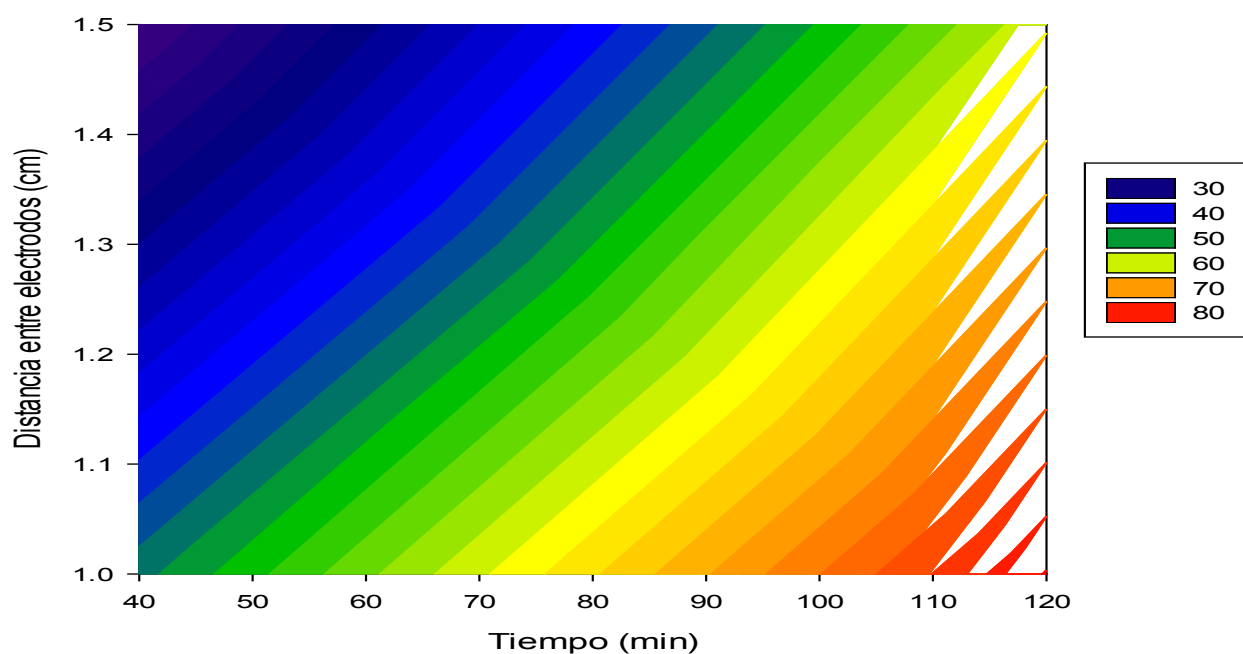
Tabla 2. Análisis de varianza del diseño experimental

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tiempo	2	1330.59	665.296	207.77	0.005
Distancia	1	805.74	805.737	251.63	0.004
Error	2	6.40	3.202		
Total	5	2142.73			

Fuente:

Dando seguimiento a los resultados, en la figura 4 se muestra la gráfica de efectos del tiempo y la distancia entre los electrodos sobre la remoción de sólidos en el agua tratada. En la imagen se observa que a mayor tiempo y menor distancia se incrementa la eliminación de sólidos por encima del 70% como en los resultados obtenidos.

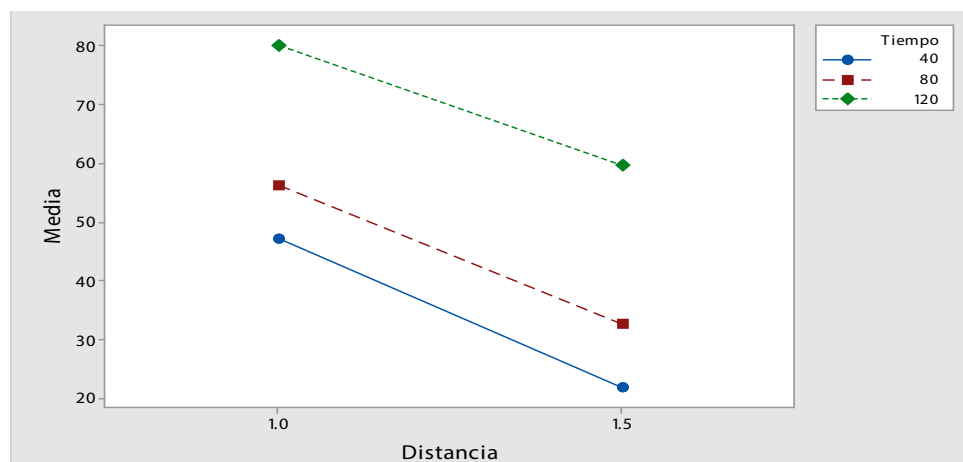
Figura 4. Grafica de contornos del tiempo y la distancia entre electrodos sobre la remoción de sólidos en agua pluvial captada



Fuente:

El efecto del tiempo en ambas distancias evaluadas se muestran en la figura 5. En los distintos tiempos analizados a la distancia de 1 cm se obtuvieron las eliminaciones de sólidos más altas.

Figura 5. Grafica de interacciones entre variables evaluadas en el diseño experimental.
De  el tiempo a los 40 min,  a los 80 min y  a los 120 min



Fuente:

La optimización del sistema destacó las siguientes condiciones para ser evaluadas en el reactor de electrocoagulación a escala piloto: distancia entre electrodos de 1 cm y tiempo experimental de 120 min para alcanzar una eliminación de sólidos de 80.15 %.

3.2 Unidad piloto

Las variables mas importantes a considerar para realizar el escalamiento de este sistema son la relación volumen y densidad de corriente (Hakizimana et al., 2017), sin embargo, para que la operación del método sea sostenible es necesario operarlo por debajo de los 20 mA/cm² (Bayramoglu et al., 2004).

En el reactor a escala piloto se realizaron algunos ajustes para mejorar el funcionamiento del sistema y reducir el gasto de energía. En los electrodos se hicieron perforaciones para incrementar la transferencia de masa y, además se redujo la relación de intensidad/ área de superficie activa expresada como densidad de corriente de 44.08 mA/cm² que fué la que se usó en el reactor escala laboratorio a 5.88 mA/cm². Los resultados en este reactor fueron más favorable que en reactor pequeño, alcanzando un eliminación del 91.2 % de sólidos bajo condiciones óptimas, mismas donde se esperaba una remoción teórica de 80.15%. En la tabla 3 se muestra la caracterización que se le realice al agua antes y después del tratamiento. Así mismo, en la figura 6, se observa el agua pluvial captada antes y después de la aplicación del sistema de electrocoagulación.

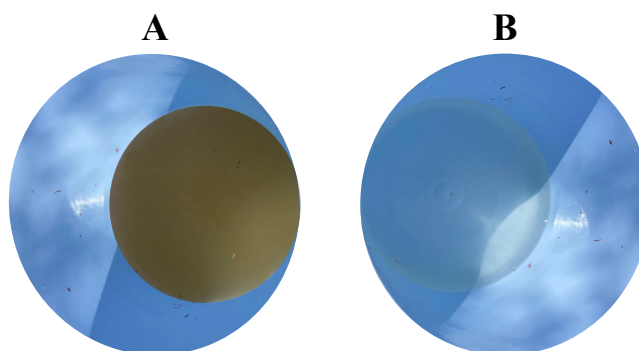
Tabla 3. Caracterización fisicoquímica del agua pluvial captada antes y después del tratamiento

Parámetro	Agua antes del tratamiento (mg/L)	Agua tratada (mg/L)	Remoción (%)
DQO total	1130±12	104	90.8%

Sólidos totales	830±50	73	91.2%
Sólidos suspendidos	180±35	12	93.3%
Sólidos disueltos	650±20	68	89.53%
Nitritos (N-NO ₂)	61.83±2	12.3	80.10%
Nitratos (N-NO ₃)	7.14±0.6	1.1	84.59%

Fuente:

Figura 6. A) Agua pluvial captada en presencia de altas concentraciones de sólidos y antes del tratamiento. B) Agua pluvial después de la aplicación del sistema de electrocoagulación a escala piloto



Fuente:

Conclusión

La aplicación del sistema de electrocoagulación usando paneles fotovoltaicos para la eliminación de sólidos y otros contaminantes constituye una forma sostenible para el tratamiento de agua. En este trabajo se logró alcanzar altas remociones de sólidos aplicando 120 min de tratamiento y una distancia entre electrodos de 1 cm en un reactor de 200 L empleando 10 paneles fotovoltaicos. Estos resultados resaltan la posible aplicación a gran escala de esta tecnología en zonas con alta radiación solar y con bajos recursos, pues constituye una alternativa fiable y sustentable ya que permite disminuir costos y emisiones al medio ambiente.

Referencias bibliográficas

- Bayramoglu, M.; Kobya, M.; Can, O. T.; Sozbir, M. (2004). Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater, Sep. Purif. Technol. 37. Pp 117–125.
- Bazrafshan, E.; Mohammadi, L.; Ansari-moghaddam, A.; Mahvi, A. H. (2015). Heavy metals removal from aqueous environments by electrocoagulation process – a systematic review, J Envi-

- ron Heal Sci Eng, <https://doi.org/10.1186/s40201-015-0233-8>.
- Boinpally, S.; Kolla, A.; Kainthola, J.; Kodali, R.; Vemuri, J. (2023) A state-of-the-art review of the electrocoagulation technology for wastewater treatment. *Water Cycle* 4. Pp 26-36. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2023.01.001>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2019). Estadísticas del Agua en México 2019. https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM_2019.pdf
- Fabregas, J. (2023). Eliminación de sólidos en suspensión de las aguas residuales industriales. <https://sigmadafclarifiers.com/eliminacion-de-solidos-suspendidos-totales-del-agua-residual/>
- Hakizimana, J. N; Bouchaib G. A. F.; Mohammed, C.; Stiriba, Y.; Vial, C.; Drogui, P.; Naja, J. F. (2017). Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. *Desalination*. 404. Pp 1-21. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2016.10.011>
- Hanna Kielar, H (2023). Peak Sun Hours & Solar Energy. <https://www.greenlancer.com/post/peak-sun-hours>
- Limón-Portillo A (2017). Energía solar en México: su potencial y aprovechamiento. <https://ciep.mx/energia-solar-en-mexico-su-potencial-y-aprovechamiento/>
- Martínez-Villafañe, J. F.; Montero-Ocampo, C.; García-Lara, A. M. (2009). Energy and electrode consumption analysis of electrocoagulation for the removal of arsenic from underground water, *J. Hazard. Mater.* 172. Pp1617–1622.
- Moghaddam, S. S.; Moghaddam, M. R. A. & Arami, M. (2010). Coagulation/flocculation process for dye removal using sludge from water treatment plant: optimization through response surface methodology, *J. Hazard. Mater.* 175. Pp 651–657.
- Mollah, M.Y.A.; Schennach, R.; Parga, J. R.; Cocke, D. L. (2001). Electrocoagulation (EC)-science and applications, *J. Hazard. Mater.* Pp 29–41.
- Mouedhen, G., Feki, M., De Petris W. M., Ayedi, H. F. (2008). Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process, *Journal of Hazardous Materials*. 150 (1). Pp 124-135. ISSN 0304-3894. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.04.090>.
- NOM-230-SSA1-2002, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo.
- Sasson, M. B.; Calmano, W. & Adin, A. (2009). Iron-oxidation processes in an electroflocculation (electrocoagulation) cell, *J. Hazard. Mater.* 171. Pp704–709.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2015). Precipitación Media Anual. <https://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/Atlas2015/atmosfera.html>
- SEMARNAT (2017). Informe del Medio Ambiente. <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap6.html>
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (2023). Precipitación Acumulada Mensual (mm). <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/pronostico-climatico/precipitacion-form>
- Zhang, S.; Zhang, J.; Wang, W.; Li, F.; Cheng, X. (2013). Removal of phosphate from landscape water using an electrocoagulation process powered directly by photovoltaic solar modules, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 117. Pp 73–80.

Estudio de la influencia del agua en la citosina mediante métodos DFT

Study of the influence of water on cytosine using DFT methods

Francisco E. Rojas González^a, César Castillo Quevedo^b, Edgar Paredes Sotelo^c, Eduardo Robles Chaparro^d, Ana María Mendoza Wilson^e, Anned de León Flores, Khirbet López Velázquez^f, Edwin Hoil Canul, Adolfo López Sánchez, Jesús Cob Cantu, Luis Maldonado López^g, Gerardo Martínez Guajardo^h y José Luis Cabellos Quiroz^h

Resumen / Abstract

Las interacciones del agua con el ADN ocasionan un incremento en la estabilidad termodinámica de este último es de vital importancia el conocimiento de las estructuras más favorables energéticamente, sus interacciones, así como sus propiedades geométricas, ópticas y electrónicas como función de la cantidad de agua. En este trabajo presentamos un estudio teórico-computacional basado en la teoría funcional de la densidad de los efectos de la solvatación en las propiedades geométricas y vibracionales de la citosina. En los resultados se expone un análisis de las estructuras de más baja energía y de sus sitios de hidratación considerando una y dos moléculas de agua interactuando con la citosina.

*. El Doctor Rojas González desea expresar su agradecimiento a CONAHCYT por la beca otorgada 492050. De igual manera el Doctor Paredes Sotelo también agradece al CONAHCYT por la beca otorgada 1008864.

Conflicto de intereses. Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Financiamiento. Esta investigación no recibió fondos.

a. Departamento de Física, Edificio 3F, Universidad de Sonora, 83000, Hermosillo, Sonora, México.

b. Departamento de Fundamentos del Conocimiento, Centro Universitario del Norte, Universidad de Guadalajara, Carretera Federal No. 23, Km. 191, C.P. 46200, Colotlán, Jalisco, México.

c. Departamento de Investigación en Polímeros y Materiales, Edificio 3G. Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora, México.

d. Los Profesores Robles Chaparro y De León Flores laboran como Profesores Investigadores en el Departamento de Ciencias Químico Biológicas, Edificio 5A. Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora, México.

e. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Coordinación de Tecnología de Alimentos de Origen Vegetal, Carretera Gustavo Enrique Astiazarán Rosas No. 46, 83304 Hermosillo, Sonora, México.

f. Los Profesores e Investigadores López Velázquez, Hoil Canul, López Sánchez, Cob Cantú y Cabellos Quiroz laboran en la Universidad Politécnica de Tapachula, Carretera a Puerto Madero Km. 24+300, Tapachula - Puerto de San Bento, 30830 Puerto de San Benito, Chiapas.

g. Departamento de Física, CINVESTAV-Unidad, Mérida, Yuc, México.

h. Unidad Académica de Ciencias Químicas, Área de Ciencias de la Salud, Universidad Autónoma de Zacatecas, Km. 6 carretera Zacatecas-Guadalajara s/n, Ejido La Escondida C. P. 98160, Zacatecas, Zacatecas. Correo electrónico: jose.cabellos@uptapachula.edu.mx.

Palabras clave: 61.46.-w,65.40.gd,65.,65.80.-g,67.25.bd,71.15.-m,71.15.Mb,74.20.Pq,74.25.Bt,74.25.Gz,74.25.Kc, Teoría Funcional de la Densidad, citosina, agua, solvatación, DFT.

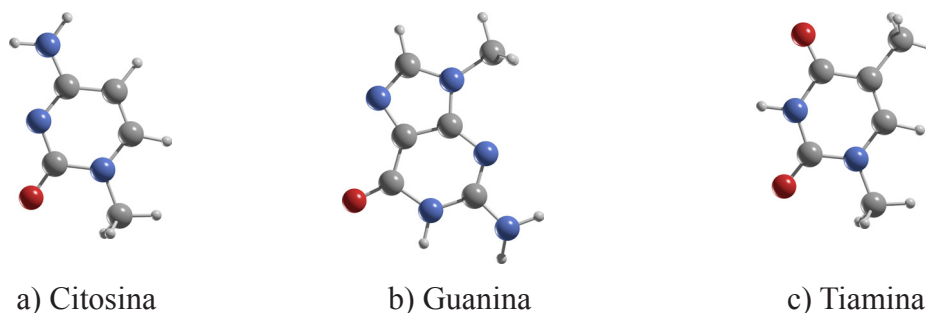
The interactions of water with DNA cause an increase in the thermodynamic stability of the latter; consequently, knowledge of the most energetically favorable structures, their interactions, and their geometric, optical, and electronic properties as a function of the quantity of water is essential in many areas. In this work, we present a theoretical-computational study based on the density functional theory of the effects of solvation on cytosine's geometric and vibrational properties. The results show an analysis of the lowest energy structures and their hydration sites, considering one and two water molecules interacting with cytosine.

Keywords: rainwater, pollutants, solids, electrocoagulation system, sustainability.

1. Introducción

El ADN es considerada la biomolécula más importante, siendo depositario de la información genética, cuyas instrucciones vienen codificadas por el ordenamiento de las bases nitrogenadas que la conforman: (A)denina, (C)itosina, (G)uanina, (T)imina. En la Figura 1, se muestra la citosina, guanina y timina. El ADN es una hélice doble que consta de dos cadenas complementarias de polinucleótidos, donde cada monómero está compuesto por una molécula de azúcar (desoxirribosa), un grupo fosfato y una de las bases mencionadas. La importancia de la hidratación en la estructura de ADN fue reconocida de manera casi inmediata después de su descubrimiento, en el año 1953¹. No obstante, debido a complejidades tales como el fuerte acoplamiento electrostático, tanto en la vecindad como entre la molécula negativamente cargada², y considerando que la estructura del ADN es tridimensional, el estudio de la dinámica del solvente sigue siendo un gran desafío, siendo hasta el día de hoy una pregunta abierta e importante línea de investigación activa³⁻⁷. Sin embargo, existe una vasta literatura acerca de la relación entre la sostenibilidad de la vida y las propiedades anómalas del agua, que debido principalmente a las características de los puentes de hidrógeno, le permiten actuar de diversas maneras en diferentes condiciones⁸.

Figura 1. Bases nitrogenadas



Fuente:

Generalmente, las funciones biológicas suceden en una solución mayoritariamente de agua, acompañada de una regulación de iones.⁹ Específicamente, la presencia del agua juega un rol importante en la conformación e interacción de ácidos. Basados se evidencia experimental, sabemos que la conformación geométrica y la estabilidad de la doble hélice de ADN dependen de la humedad y de la actividad del agua¹⁰. Un buen ejemplo de ello son los cambios conformacionales en su estructura, demostrando gran influencia en las transiciones desde la forma B (de alta hidratación) a la forma A (de baja hidratación)³. Este fenómeno puede explicarse como la consecuencia de la interacción entre las moléculas de agua y moléculas más grandes (ADN o una proteína), formándose una red alrededor de ellas, principalmente por puentes de hidrógeno. Estas interacciones pueden cambiar la estructura de la misma, así como alterar sus modos vibracionales¹¹⁻¹³, y como consecuencia cambiar sus propiedades electrónicas, ópticas y alterar las funciones biológicas, entre ellas la expansión, contracción o torsión de la hélice de ADN^{14,15}. Estudios experimentales de Resonancia Magnética Nuclear (RMN) han confirmado estructuras de moléculas de agua alrededor del DNA^{9,16,17}. Por otro lado, un número considerable de cálculos *Ab Initio* usando Teoría del Funcional de la Densidad (DFT) han sido publicados en estudio de la interacción de moléculas de agua con diferentes bases nitrogenadas, pares de bases o moléculas de interés biológico¹⁸⁻²⁵. También se ha usado como solvente para disociar ácido clorhídrico²⁶, así como estudios teóricos con dinámica molecular²⁷⁻²⁹. La mayoría de estos estudios se enfocan en los efectos del solvente sobre afinidad protónica¹⁸, sitios de localización o efectos del solvente²⁵.

La estructura tridimensional de ADN, está determinada principalmente por las interacciones de las bases nitrogenadas de ácidos nucleicos y por las interacciones con las moléculas de agua. La naturaleza de la estabilización los diferentes tipos de pares que pueden existir es debida a los puentes de hidrógeno, que son de origen electrostático y el apilamiento que se debe a las fuerzas de dispersión de London. Consecuentemente, las fuerzas que estabilizan la doble hélice de ADN juegan un papel importante en los procesos de transcripción y recombinación³⁰. Estudios experimentales recientes han confirmado que la doble hélice ADN es estabilizada principalmente por interacciones hidrofóbicas y dispersión relacionada con el apilamiento (*stacking*)³¹, contrario al pensamiento tradicional, donde los puentes de hidrógeno son los principales responsables de la estabilización de la doble hélice³²⁻³⁵. La motivación principal para incluir las fuerzas de London en los cálculos de la exploración de superficie potencial, es su importante contribución a la determinación de los isómeros (geométrica y energéticamente) que influyen de manera determinante en la espectroscopia y otras propiedades del sistema.

Debido al gran esfuerzo computacional requerido para el número de cálculos en el estudio a primeros principios o *Ab Initio* sobre una macromolécula tal como un gen o una proteína, el cual sobrepasa nuestras capacidades actuales, el presente estudio se limita al estudio en detalle de la solvatación de la base nitrogenada citosina. Entre los principales motivos de la selección está el interés por la comprensión de su estructura no planar, donde la deformabilidad específica en el grupo amino es esencial para la explicación de muchas interacciones base-base observadas en estructuras cristalizadas de ADN³⁶, confiriendo consecuencias positivas en las interacciones de apilamiento, incrementando la estabilidad de la hélice³⁷. En particular, los ángulos Buckle y Propeller twisted, que caracterizan la rotación de las bases sobre el plano medio y el eje largo del par

de bases respectivamente, proveen un efecto de bloqueo estereoquímico, confiriendo rigidez a los segmentos escalonados con geometría no planar, siendo esto, junto con la piramidalización del grupo amino, factores clave para la comprensión de la flexibilidad del ADN³⁸. Como observación, una de las bases, la guanina tiene el más bajo potencial de ionización de todas las bases purínicas y pirimidínicas, volviéndola en el sitio más reactivo para un daño oxidativo³⁷. Dependiendo de las condiciones del ambiente, las bases de ácidos nucleicos, así como las pares de bases pueden existir en distintas formas tautoméricas. La posible existencia de una o más de las bases del ADN en forma tautomerizada incrementa la probabilidad de los mispairings o discordancias entre las purinas y pirimidinas, ocasionando mutaciones puntuales.

II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y METODOLÓGICOS

Ecuación de Schrödinger

El estudio de sistemas químicos mediante la mecánica cuántica se basa en la solución de la ecuación de Schrödinger estacionaria independiente del tiempo dada en la ecuación (1)

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x) \right] \Psi(x) = E\Psi(x) \quad (1)$$

La ecuación de Schrödinger^{39,40} dependiente del tiempo está dada en la ec. (2)

$$i\hbar \frac{\partial \Psi(x, t)}{\partial t} = \hat{H}\Psi(x, t) \quad (2)$$

El Hamiltoniano sin considerar efectos relativistas, $\hat{H}$, es la suma de la energía cinética y potencial $V(x, t)$ del sistema, esto es:

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x)$$

donde $\hbar$ es la constante de Planck, m es la masa de los electrones y Ψ es la función de onda asociada al estado en el que se encuentra el sistema y contiene toda la información de las propiedades de este. La solución exacta de la ec. (2) se conoce para el átomo de hidrógeno, pero para sistemas que tienen muchos electrones no existe solución analítica exacta. Con el objeto de encontrar una solución se recurre a métodos numéricos a diferentes aproximaciones. Para el Hamiltoniano no relativista e independientes del tiempo, donde el potencial $V(r)$ sólo depende de la r se obtiene la ecuación de Schrödinger independiente del tiempo no relativista ec (4)(4)

$$\hat{H}\Psi(x, t) = E\Psi(x) \quad (4)$$

La solución de la ec.(4) es compleja y generalmente requiere el uso de la aproximación de *Born-Oppenheimer*^{41,42} (ABO). La energía total de un sistema molecular es:

$$E_t = E_{CM} + E_{CE} + E_{NN} + E_{EE} + E_{NE} \quad (5)$$

donde

E_{CM} Energía cinética del núcleo;
 E_{CE} Energía cinética del electrón;
 E_{NN} Energía repulsiva del núcleo-núcleo;
 E_{EE} Energía repulsiva electrón- electrón: y
 E_{NE} Energía atractiva núcleo-electrón.

En la aproximación de Born-Oppenheimer, debido a que el núcleo no se mueve, la energía cinética del núcleo se considera cero y la energía es constante.

A. Teoría del funcional de la densidad (Density Funtional Theory DFT)

En los últimos 30 años, la teoría del funcional de la densidad (*Density Functional Theory*, DFT) es uno de los temas más activos en el área de ciencia de materiales, química y física⁴³. Para tener un punto de referencia, el artículo más notable sobre DFT ha sido citado 84719 veces⁴⁴ (11/06/2024), y uno de los científicos más citados es *John P. Perdew*^{43,45}. La DFT aplicada en átomos, moléculas y sólidos, es un procedimiento variacional que resuelve la ecuación de Schrödinger (6) considerando muchos electrones e implementado en métodos numéricos y algoritmos escritos en código de programación, generalmente FORTRAN

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x) \right] \Psi(x) = E \Psi(x) \quad (6)$$

En la Ec. (6), donde $\hbar$ es la constante de Planck, m es la masa de los electrones, $V(x)$ es el potencial externo, E las energías propias y $\Psi(x,t)$ es la función de onda asociada al estado en el que se encuentra el sistema y contiene toda la información de las propiedades de este. El átomo de hidrógeno, sistema con dos cuerpos electrón-núcleo, es uno de los casos en que la solución de la ecuación de Schrödinger tiene una solución analítica (la partícula libre es otra). Para átomos multi-electrónicos la ecuación de Schrödinger⁴⁷. Consecuente y con el objeto de encontrar una solución, se recurre a DFT y/u otros métodos. La idea fundamental de DFT radica en la minimización de la energía total del sistema con respecto a la densidad electrónica del estado base, en lugar de usar la función de onda. La DFT es una teoría que describe adecuadamente las propiedades del estado base y su ventaja principal con respecto a métodos que usan la función de onda es que la densidad electrónica depende sólo de las coordenadas espaciales x,y,z , contrario a la función de onda, que posee un número grande de parámetros. La primera DFT fue propuesta por *Thomas* y *Fermi*^{48,49} en 1928. Originalmente el modelo fue propuesto para estudiar átomos multi-electrónicos.

En ese trabajo, el cálculo de la energía total del átomo se realizó expresando la energía cinética y las expresiones de las interacciones núcleo-electrón y electrón-electrón como función de la densidad electrónica la densidad electrónica. Los fundamentos que cimientan la *DFT* moderna fueron publicados por *Peter Hohenberg y Walter Kohn* en su artículo de 1964⁵⁰, donde establecieron que la energía es un funcional de la densidad, es decir, la energía es función de la densidad y esta es función de las coordenadas geométricas, una función de funciones. En su artículo⁵⁰, *Peter Hohenberg y Walter Kohn* mostraron que la energía es un funcional de la densidad electrónica estableciendo la Ec. 7:^{46,47}. Consecuente y con el objeto de encontrar una solución, se recurre a DFT y/u otros métodos. La idea fundamental de DFT radica en la minimización de la energía total del sistema con respecto a la densidad electrónica del estado base, en lugar de usar la función de onda. La DFT es una teoría que describe adecuadamente las propiedades del estado base y su ventaja principal con respecto a métodos que usan la función de onda es que la densidad electrónica depende sólo de las coordenadas espaciales x,y,z , contrario a la función de onda, que posee un número grande de parámetros. La primera DFT fue propuesta por *Thomas y Fermi*^{48,49} en 1928. Originalmente el modelo fue propuesto para estudiar átomos multi-electrónicos. En ese trabajo, el cálculo de la energía total del átomo se realizó expresando la energía cinética y las expresiones de las interacciones núcleo-electrón y electrón-electrón como función de la densidad electrónica la densidad electrónica. Los fundamentos que cimientan la *DFT* moderna fueron publicados por *Peter Hohenberg y Walter Kohn* en su artículo de 1964⁵⁰, donde establecieron que la energía es un funcional de la densidad, es decir, la energía es función de la densidad y esta es función de las coordenadas geométricas, una función de funciones. En su artículo⁵⁰, *Peter Hohenberg y Walter Kohn* mostraron que la energía es un funcional de la densidad electrónica estableciendo la Ec. 7:

$$E[\rho] = E_{xc}[\rho] + \int \rho(\mathbf{r}) V(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \quad (7)$$

donde $E_{xc}[\rho]$ es el funcional que contiene la energía cinética y la energía debida a la interacción electrón-electrón. El problema de *DFT* es que no se conoce la forma exacta del funcional E_{xc} . Además, establecieron que la densidad electrónica que minimiza el funcional de la energía es la densidad del estado fundamental; la energía evaluada en esa densidad es la energía del estado fundamental. En 1965 *Walter Kohn y Lu Jeu Sham* en su artículo⁵¹ propusieron el término correlación e intercambio, que incluye las contribuciones de correlación electrónica dinámica y las desconocidas, que no están consideradas en la DFT. Las ecuaciones resultantes son conocidas como *Ecuaciones de Kohn-Sham* y son las que están implementadas, usando diferentes estrategias en un variedad de códigos de estructura electrónica como *Gaussian*⁵² y *NWChem*⁵³, entre otros. La ecuación de Schrödinger independiente del tiempo en notación (8):

$$\hat{H}|\Psi(\mathbf{x})\rangle = E|\Psi(\mathbf{x})\rangle \quad (8),$$

La cantidad más importante en la DFT es la energía del estado base, E_0 . El principio variacional establece que E_0 se obtiene mediante la minimización de la Ec.(9) con respecto a la densidad electrónica.

O en términos de la Ec. (7):

$$E_0 = \min \{ E_{xc}[\rho] + \int \rho(\mathbf{r}) V(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \} \quad (10)$$

Los teoremas de *Hohenberg* y *Kohn* muestran que la densidad electrónica es la variable fundamental e importante en la descripción de un sistema en estado basal. Los dos teoremas de *Hohenberg* y *Kohn* en esencia dicen así:

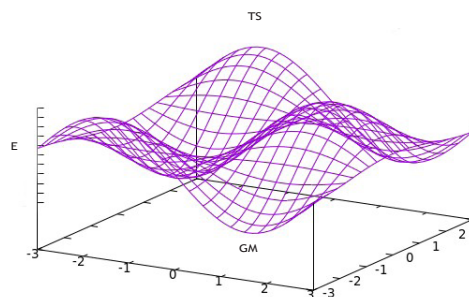
1. Todas las cantidades físicas son un funcional de la densidad electrónica.
2. La densidad electrónica que minimiza el funcional de la energía es la densidad del estado fundamental, Ec.(9) y la Ec. (10) .

La minimización del funcional en la Ec.(10) relativa a la densidad electrónica conduce a las ecuaciones de *Kohn-Sham*, las cuales tienen forma de ecuación de Schrödinger y como se mencionó en el párrafo anterior, son las ecuaciones implementadas en muchos códigos de estructura electrónica.

B. Superficie de energía potencial

La relación entre la geometría de un conjunto de átomos y su energía potencial define la superficie de energía potencial^{54,55} (PES por sus siglas en ingles) y juega un papel preponderante en el estudio del sistema molecular. En la Figura 2, se muestra una representación de una PES, y se muestran sus características más importantes.

Figura. 2. Representación de una superficie de energía potencial. La dimensionalidad de la PES es función de $3N-6$, donde N es el número de átomos. Es posible visualizar la PES multidimensional mediante una figura dimensional usando gráficos de desconexión (disconnectivity graphs).^{56,57}



Fuente:

El concepto de PES surge de la forma lógica y natural al resolver la ec. (4) bajo la aproximación de Born-Oppenheimer, considerando que la molécula es un conjunto de electrones y núcleos interactuando. En 1931 Michael Polanyi y Henry Eyring propusieron, para la reacción $H + H_2$ por primera vez el cálculo semiempírico PES.⁵⁸ Las PES fueron utilizadas para calcular las constantes de velocidad de reacción en la teoría del estado sólido de transición en 1935. La construcción de la superficie de energía potencial, que posee un sólo mínimo global y varios mínimos locales, es complicado y representa un desafío en estudios teóricos y experimentales⁵⁹, principalmente debido a estos factores:

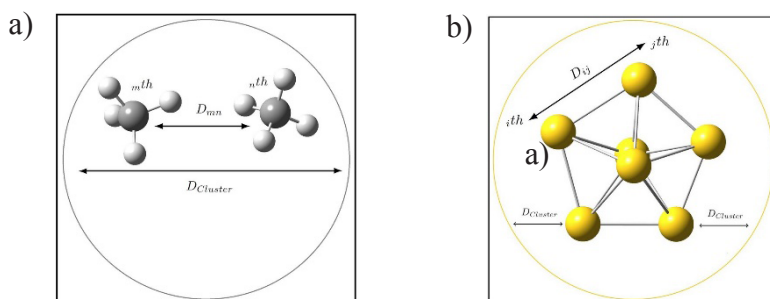
- El número de grados de libertad de la PES es $3N$, donde N es el número de átomos del sistema.
- El gran número de mínimos locales que la molécula posee y que crece exponencialmente como función del número de átomos, por ejemplo, una molécula con 147 átomos posee del orden de 10^{44} mínimos locales⁶⁰.
- El cálculo de una PES aproximada a la demanda real en el uso de métodos mecánico-cuánticos avanzados con capacidad para realizar cálculos con precisión química ($1\text{kcal} \cdot \text{mol}^{-1}$).

Actualmente para sistemas moleculares relativamente pequeños como BrH₂, de tres o cuatro átomos, el cálculo de la PES se ha realizado con métodos Ab-initio multireferenciales (*multireference configuration interaction (MRCI) method*) a muy alto nivel⁶¹⁻⁶³ para más de 10000 geometrías.

C. Exploración de la superficie de energía potencial

Con el objetivo de explorar eficaz y metódicamente la superficie de energía potencial (PES) de los sistemas estudiados en este artículo, se utiliza metodología heurística modificada *de la patada (kick)* implementada en el código escrito en *Python* llamado *Polytechnic University of Tapachula Search Atomic Cluster (PUTSAC)* y disponible en el cluster de la Universidad. Existe una amplia variedad de metodologías heurísticas para la búsqueda de estructuras de mínima energía en áreas de química, física y biología, tales como Monte Carlo, Dinámica Molecular (MD), recocido simulado, algoritmos genéticos, *cuckoo search algorithm*⁶⁴⁻⁶⁹, entre otros. La eludación de estructuras de energía mínima un problema demasiado complejo y no existe ningún método que garantice encontrar el mínimo de energía usando recursos de cómputo y tiempo razonables. *PUTSAC* explota la paralización de manera eficiente a través del sistema administrador de colas de *Linux* y permite utilizar átomos individuales para formar las estructuras candidatas. La principal ventaja de utilizar átomos es la eficiencia para optimizar las estructuras iniciales debido a que estos fueron construidos con fragmentos preoptimizados. El método implementado en *PUTSAC* y el utilizado en este artículo para la búsqueda de la estructura de mínima energía sobre la PES, comienza con la generación de posiciones aleatorias, una por una, utilizando el algoritmo aleatorio para la generación de números aleatorios twister de Mersenne⁷⁰, en el que se colocan los individuales como el ejemplo mostrado en la Figura. 3 y donde,

Figura. 3. Parámetros importantes en la construcción de cúmulos, a) cúmulo atómico. b) cúmulos molecular



Fuente:

las estructuras ensambladas cumplen con tres condiciones geométricas:

1. Todos los átomos están colocados en el interior de una esfera de diámetro (ver Fig. 3) y es la suma de los radios covalentes de todos los átomos por los que está compuesta la molécula.
2. La distancia entre cualquier par de átomos de ser más larga que la suma de sus radios covalentes especificada en la figura a, b) 3 D_{mn} .
3. Cada átomo debe estar conectado con otro átomo, como se muestra en la Figura 3.

La esfera está representada por el círculo verde en la Figura 3 y donde se muestra D_{ij} o D_{mn} que son las distancias mínimas a los que se pueden colocar dos átomos ij o moléculas mn . Todas las posiciones atómicas deben de quedar dentro de la esfera de diámetro $D_{cluster}$ y que satisfacen la siguiente Ec.(12).

$$D_{cluster} = \sum_i^{n-mol} D_{motif} \times \sigma \quad (11)$$

donde σ es un factor introducido por el usuario y varía típicamente entre y La distancia mínima de, D_{mn} , debe satisfacer la siguiente ecuación,

$$D_{mn} = \frac{[(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 + (z_A - z_B)^2]^{\frac{1}{2}}}{2\sigma} \quad (12)$$

Donde A y B son coordenadas atómicas de las moléculas o átomos y σ es un factor introducido por el usuario y varía entre y típicamente.

D. Nivel de teoría y detalles computacionales

El paso inicial consiste en la optimización geométrica del cúmulo a un nivel bajo de teoría. Remarcando en este artículo, todas las optimizaciones geométricas y cálculos de propiedades espectroscópicas se realizaron usando la teoría del funcional de la densidad tal y como está implementada en el código de estructura electrónica Gaussian 09⁵². También el algoritmo utilizado para realizar todas las optimizaciones geométricas realizadas en los sistemas de estudio en este artículo fueron con el algoritmo de Berny⁷¹ (*Berny algorithm*) tal y como está implementado en *Gaussian*.

Para la exploración de la superficie de energía potencial se usó el código PUTSAC escrito en *Python* y está acoplado a *Gaussian*. Para una primera optimización a la que nombramos Nivel bajo de teoría y donde se utilizó el funcional híbrido (*PBE0*)⁷², basado en el desarrollado del funcional por *Perdew, Burke, y Ernzerhof* (*PBE*)⁷³. *PBE0* considera las energías de intercambio de *PBE* y la energía de intercambio de *Hartree-Fock* y adecuado para modelar sistemas con puentes de hidrógeno⁷⁴, como es el caso de los sistemas estudiados en este artículo de citosina solvatadas con agua. La base usada en esta etapa es LANL2DZ⁷⁵, que es un conjunto de funciones base de los *Los Alamos*

National Laboratory, double- ζ quality basis set, double zeta (DZ), combinada con Effective Core Pseudopotentials (ECP), además de la inclusión de las fuerzas de Van der Waals.

IV. RESULTADOS

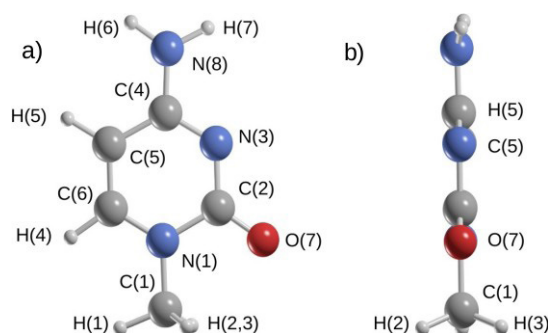
A. Citosina

La citosina es una de las cinco bases nitrogenadas y contiene un anillo aromático heterocíclico, un grupo amino y un grupo cetónico. La citosina es la base más pequeña que es común tanto en DNA como RNA y sus derivados son de gran importancia biológica. La citosina también es la base más alcalina en solución acuosa, esta última característica juega un importante rol en una gran cantidad de procesos bioquímicos⁷⁶. Es sabido que la estructura ceto-amino es la más estable⁷⁷. Estudios experimentales y teórico-computacionales se han realizado con la citosina con el objetivo de investigar sus propiedades geométricas y ópticas tanto en fase gas como en solución acuosa^{77,78}. Sitios de hidratación han sido investigados usando cálculos DFT^{79,80}. La citosina casi siempre se asocia con la guanina y viceversa.

B. Citosina en fase gas

La construcción de la citosina se realizó usando el visualizador molecular *chemcraft*. En la Figura (4) se muestra la citosina en fase gas en vista frontal en el inciso a) y en el inciso b) en vista lateral optimizada sin restricciones al nivel de teoría PBE0/Def2TZVP/GD3 usando el código de estructura electrónica Gaussian⁵². Las coordenadas atómicas se enlistan en el Apéndice A. Nuestro cálculo muestra que la estructura es planar, en concordancia con otros estudios teóricos^{77,79} como se puede observar en la Figura (4) y que por inspección visual se confirma en la columna Z de las coordenadas atómicas del Apéndice 1, donde los valores mayores a cero corresponden a los hidrógenos del grupo metilo,

Figura 4. Representación de citosina en fase de gas. a) vista de frente. b) vista de lado. En color rojo átomos de oxígeno (O), gris átomos de carbono (C), blanco átomos de hidrógeno (H) y en azul átomos de nitrógeno (N)



Fuente:

C. Longitud de enlace en la citosina en fase gas

La longitud del enlace para el , obtenida en nuestro cálculo es de a nivel de teoría *PBE0/Def-2TZVP/GD3* (color verde en la Tabla I), en muy buena concordancia con el valor experimental de obtenido a través de rayos-X en la literatura⁸¹ y también con el valor obtenido de en cálculos Ab-initio⁷⁷. Nuestra longitud de enlace obtenida está ligeramente subestimada, sólo el con respecto a la experimental, lo que consideramos en excelente acuerdo con los datos experimentales. Siguiendo enlace de interés en este estudio de la citosina, es la longitud del enlace calculada para el es de . El valor experimental medido es publicado en la referencia⁸¹ sólo ligeramente 1% por abajo del valor experimental, el valor teórico reportado en la misma referencia⁸¹ es de 1.361 Å.

En la Tabla I se enlistan las distancias de enlaces más importantes que posee la citosina. La distancia más corta, enlace número en la Tabla I, y coloreada en azul, ocurre entre los átomos *N*(8), y *H*(6), y es 1.44 Å. La distancia de enlace más larga ocurre en el enlace número mostrado en la Tabla I y coloreado en color rojo y está entre *N*(1) y *C*(1) con valor de 1.44 Å.

Tabla 1. Longitudes de enlace optimizadas a nivel de teoría *PBE0/Def2TZVP/ GD3* de la citosina

Número de enlace	Átomo (i)	Átomo (j)	<i>r</i> [(i) - (j)] (Å)
1	N (3)	C(2)	1.3580481825
2	N (3)	C (4)	1.31009687535
3	N (1)	C (2)	1.42365965155
4	N (1)	C (6)	1.34307604947
5	N (1)	C (1)	1.44659309422
6	C(2)	O (7)	1.21330966932
7	C (4)	C (5)	1.42678052019
8	C (4)	N (8)	1.35152310711
9	C (5)	C (6)	1.35304815749
10	C (5)	H (5)	1.08042201191
11	C (6)	H (4)	1.08408155317
12	N (8)	H (6)	1.00198186158
13	N (8)	H (7)	1.00499463771
14	C (1)	H (3)	1.09051337582
15	C (1)	H (2)	1.09048710778
16	C (1)	H (1)	1.08986363233

Fuente:

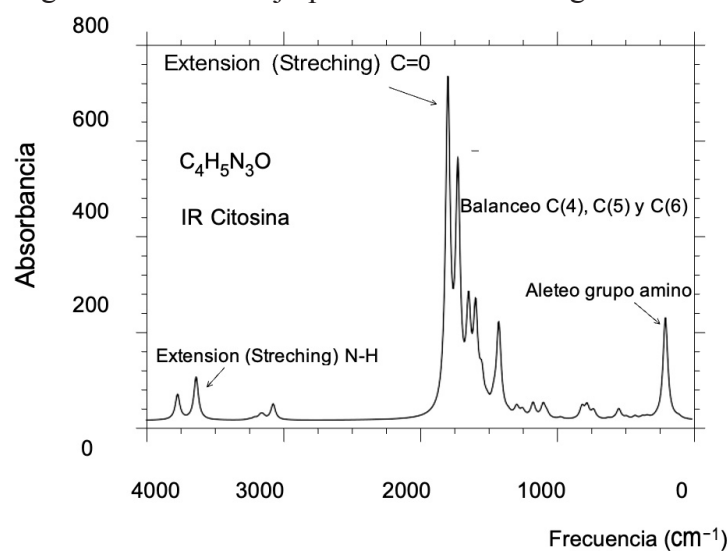
Los enlaces *C*(5) - *C*(6) y *C*(6) - *C*(1) no toman parte en la estructura resonante, esa es la razón por la que pueden ser predecidos con muy buena exactitud. El enlace *C*2 = *O*7 es muy sensitivo a la presencia del solvente (todavía solvente) y a las correcciones por anarmonicidad, de manera similar la disminución de la longitud en los enlaces *C*(2) - *N*(1), *C*(2) - *N*(3), *C*(4) - *N*(8), son de-

bidos a efectos de resonancia⁷⁷. En general, los enlaces calculados concuerdan muy bien con las mediciones experimentales⁷⁷.

D. Espectro infrarrojo de la citosina

El espectro infrarrojo de la citosina ha sido estudiado mediante DFT en fase gas y en soluciones acuosas⁸²⁻⁸⁶. La referencia⁷⁷ contiene una lista de los valores de las frecuencias experimentales para la citosina. El número de modos vibracionales para la citosina se calcula usando la ecuación $3N-6$, donde N es el número de átomos. La citosina posee átomos, aplicando la ecuación anterior se obtienen modos vibracionales. El modo más bajo calculado es de 100.3 cm^{-1} comparado con el experimental, de 131 cm^{-1} acorde con la referencia⁸⁷. El modo más bajo obtenido está subestimado en , con respecto al valor experimental. Las causas pueden ser varias, entre ellas podemos mencionar el nivel de teoría empleado, así como correcciones al conjunto de bases que no han sido usadas y el número de isómeros que se usaron en el cálculo. El espectro se muestra en la Figura 5, de los modos vibracionales que posee la citosina. Mucha atención ponemos a los de mayor intensidad, que están en el rango de 1500 cm^{-1} a 2000 cm^{-1} . El pico de mayor intensidad, en el espectro mostrado en la Figura 5, corresponde a una extensión o alargamiento en el plano en el enlace formado por $C(2) \equiv O(7)$. El modo también involucra el balanceo o compresión con menor intensidad del heterociclo.

Figura 5. IR infrarrojo para la citosina fase gas calculado



Fuente:

V. CITOSINA CON $[H_2O]_n$ ($n=1$)

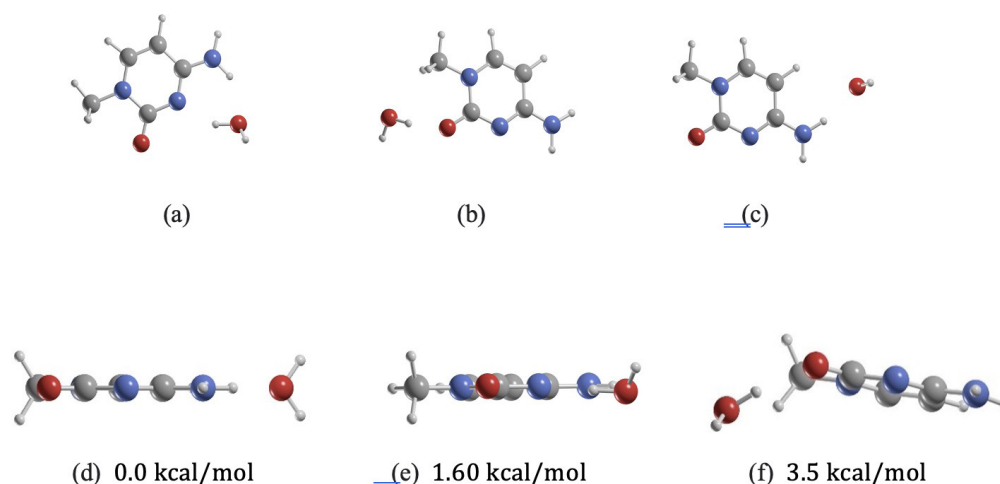
En esta sección se muestra la evolución de las propiedades geométricas de la citosina interaccionando con moléculas de agua desde 1 hasta , con énfasis en cómo es la variación de los puen-

tes de hidrogeno que ocurren entre la citosina y las moléculas de agua (cómo y dónde). También, podemos resaltar la identificación de las tres estructuras energéticas más estables. Recalcando, es interesante investigar los cambios en las propiedades electrónicas, ópticas y geométricas como una función del número de moléculas de agua⁷⁹. Estudios *Ab-initio* previos se han realizado con cuatro moléculas sobre la molécula cromona (chromone)⁸⁸, donde se investigaron las energías y geometrías del sistema. En la misma dirección se han realizado estudios *Ab-initio* de la solvatación de timina y citosina⁸⁹ donde se investigó la transferencia de carga como función de la solvatación. También en este artículo identificamos los sitios de hidratación más favorables en todos los sistemas, y al final del capítulo presentamos los resultados acerca de la estabilidad energética.

A. CITOSINA CON [H₂O]₁

En la Figura 6 se muestra la citosina interaccionando con una molécula de agua y las tres estructuras energéticamente más bajas. El mínimo global energético se muestra en inciso a), Figura 6, posee energía relativa y de referencia cero, el segundo isómero, mostrado en inciso b) Figura 6, se localiza a arriba del mínimo global energético. La diferencia en energía entre el isómero de más baja energía y el segundo isómero es mayor a una 1 kcal/mol. El tercer isómero mostrado el en inciso c) Figura 6, se localiza a , muy arriba energía con respecto al mínimo global energético, lo que consideramos una diferencia energética considerable. Los tres isómeros mostrados en la Figura 6 son energéticamente, lo que comprobamos mediante el cálculo de las frecuencias vibracionales, resultando todas para todos los isómeros, como se muestra en la Figura 6. Para el mínimo global mostrado, inciso b) Figura 6, la molécula de agua prefiere asociarse con el nitrógeno,

Figura. 6. Vista de frente y de lado para las tres estructuras energéticamente más bajas con 1 molécula de agua, ([H₂O]₁), energías en paréntesis



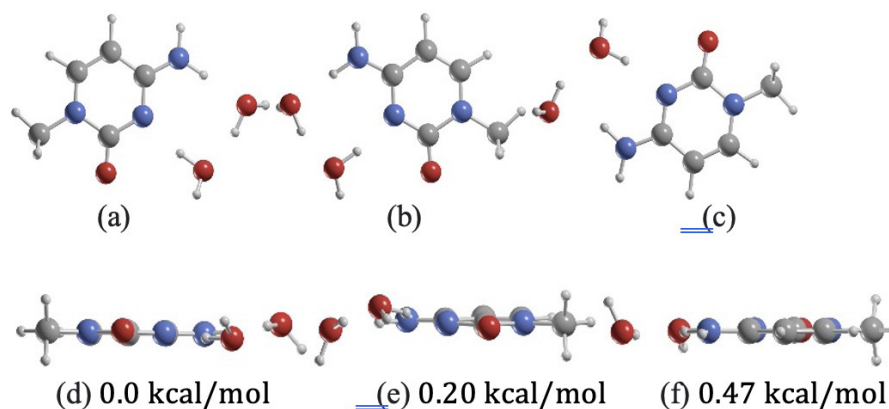
Fuente:

de la citosina a través de un puente de hidrógeno con longitud de 1.9547 Å y con el grupo amino NH_2 también con un puente de hidrógeno de longitud 1.8813 Å. Nuestros resultados, comparados con la longitud del puente de hidrógeno de 2.0910 Å con el grupo amino NH_2 y 2.105 Å reportados en un estudio similar⁸⁹, son sólo subestimadas con respecto a la reportada en trabajos anteriormente publicados⁸⁹. Esto se debe a la inclusión de la dispersión tomada en consideración en este artículo. Basados en la Figura 6, inciso a) el sitio de hidratación de la citosina es entre el grupo amino NH_2 y uno de los nitrógenos, en la Fig. 6 podemos inferir que los otros sitios, donde se coloca la molécula de agua, no son favorables en términos energéticos. Para el mínimo global, Figura.6 inciso a), la molécula de agua está en el plano, igual que para el segundo isómero, mientras que en el tercer isómero la molécula de agua permanece fuera del plano.

B. CITOSINA CON $[H_2O]_2$

Para el caso de dos moléculas de agua, el mínimo global así como la segunda y tercer estructuras energéticamente más bajas se muestran en la Fig 7 (inciso a), b) y c) vista frontal e incisos d), e) y f) vista lateral respectivamente). Mediante análisis vibracional probamos que estas fueran mínimos energéticos verdaderos.

Figura 7. Vista de frente y de lado para las tres estructuras energéticamente más bajas, con 2 moléculas de agua, $[H_2O]_2$, energías en paréntesis



Fuente:

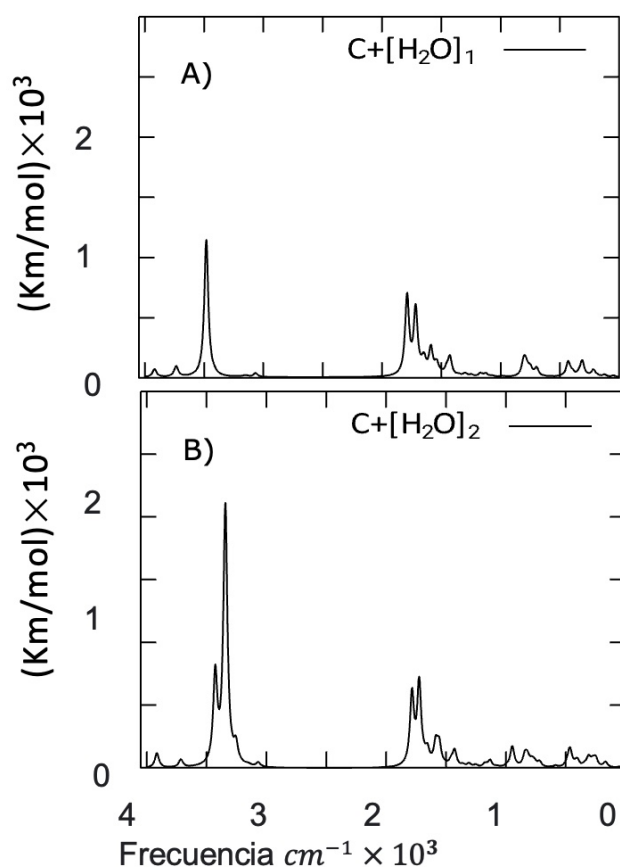
El cálculo arrojó todas las frecuencias vibracionales positivas. Los tres isómeros están localizados en un rango menor de 0.5 kcal/mol. En el mínimo global, Figura 7, inciso a) y d), las dos moléculas de agua se enlazan a la citosina por medio de puentes de hidrógeno, uno formado con el grupo amino y el otro con el nitrógeno localizado a un lado del grupo amino NH_2 . La longitud de enlace del puente de hidrógeno con el grupo amino NH_2 es de 1.8271 Å y la longitud de enlace del puente de hidrógeno con el nitrógeno es de 1.8019 Å. Los sitios de hidratación favorables están en el *fillo* de la citosina y con el grupo amino NH_2 y el nitrógeno localizado a un lado del grupo

amino NH_2 , el segundo isomero localizado solo a 0.20 kcal/mol por arriba del mínimo global. La citosina no es planar (el enlace $C=O$ está fuera del plano). En estudios *ab-initio* previos⁸⁹ encontraron que la citosina es no planar en el grupo amino, una diferencia significativa entre nuestros resultados y los publicados. Explicamos estas diferencias a un efecto de las fuerzas de *van der Waals*, tomadas en consideración en nuestro cálculo. El tercer isómero localizado arriba solo 0.47 kcal/mol, las moléculas de agua permanecen en el plano como se puede apreciar en la Figura 7, inciso f).

VI. ESPECTROS INFRARROJOS $[H_2O]_n$ (n=1,2)

El espectro infrarrojo para la citosina (absorbancia) que se muestra en la Figura. 8 incisos A), y B) corresponden al espectro infrarrojo con 1 y 2 moléculas de agua, respectivamente y calculados a nivel de teoría *PBE0/Def2TZVP/GD3*. En la Figura. 5 se muestra el espectro infrarrojo para la citosina en fase gas, donde se observa claramente que el pico con mayor intensidad corresponde al elongamiento del enlace $C=O$. En la Figura. 8, inciso a) se puede observar que el pico de mayor intensidad en el espectro, localizado a 3483.19 cm^{-1} corresponde a una combinación de los hidrógenos del grupo amino NH_2 y una elongación de uno de los hidrógenos de la molécula del agua. El segundo pico en intensidad en el espectro IR de la Figura. 8 y localizado exactamente en 1789.71 cm^{-1} corresponde a la extensión/contracción del enlace $C=O$. El tercer pico en intensidad localizado a 1717.51 cm^{-1} corresponde a la vibración del esqueleto del heterociclo en combinación con un tijereteo del grupo amino NH_2 .

Figura. 8. Espectro IR para la citosina. Panel, A) con una molécula de agua. Panel B), con dos moléculas de agua



Fuente:

VII. CONCLUSIONES

El agua es crucial y estudiarla es un reto de gran envergadura. Sabemos (*Ab studiis praevis*) que el agua es crucial en los sitios reactivos del ensamble proteína-ligando, y que la remoción o reorganización de partículas de agua del sitio reactivo o de su vecindad ocurre a nivel molecular con la participación de no más de una docena de moléculas de agua. La reorganización de unas cuantas moléculas de agua induce grandes cambios en las energías de interacción ocasionando enlaces más fuertes o débiles en el sistema proteína-ligada. Nuestros resultados y análisis muestran que las geometrías, longitudes de enlace y ángulos de los sistemas tratados a nivel *PBE0/Def2TZVP* y considerando la dispersión están en un muy buen acuerdo con datos experimentales y cálculos teóricos reportados en estudios previos. Cabe mencionar que nuestros datos se compararon con los datos experimentales y teóricos disponibles en la literatura. El efecto de la dispersión es acercar y/o mejorar el valor de las energías calculadas a los valores experimentales. Es interesante que las moléculas de agua prefieren ubicarse sobre una cara y no sobre las dos caras de la citosina, es

decir los sitios hidrófilos se localizan sobre una cara del sistema. Encontramos que sistemas con moléculas de agua localizadas en las dos caras de la citosina no son favorables energéticamente. Respecto a la geometría, la citosina en fase gas es plana mientras con la presencia de agua esta pierde la planariedad. Respecto a los espectros IR, basados en el análisis de resultados, concluimos que se presenta discrepancia entre los valores calculados del espectro fase gas y los reportados experimentalmente. Aunque los espectros presentan discrepancias, podemos capturar los cambios significativos y tendencias. Podemos afirmar que en el rango menor a 1000 cm^{-1} , la influencia a del agua es incrementar la intensidad de los picos IR. En el rango de $2000\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$ no hay incremento de las intensidades en los picos del espectro IR, ni desplazamiento en frecuencias de los picos IR. En el rango de $2000\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$ corresponde a modos vibracionales relacionados con el puente de hidrógeno, adicionar agua no cambia el modo. En el rango de $3000\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ hay muchos incrementos en intensidades y en ensanchamientos de los picos IR, debido a los OH que se adicionan con el agua, estos cambios si afectan el puente de hidrógeno. Futuro trabajo es incluir un nivel de teoría CCSD(T).

Referencias bibliograficas

- ¹ R. E. Franklin and R. G. Gosling. The structure of sodium thymonucleate fibres. I. The influence of water content. *Acta Crystallographica*, 6(8-9):673–677, Sep 1953.
- ² Him Shweta and Sobhan Sen. Dynamics of water and ions around dna: What is so special about them? *Journal of Biosciences*, 43(3):499–518, Jul 2018.
- ³ Surjit B. Dixit, Mihaly Mezei, and David L. Beveridge. Studies of base pair sequence effects on dna solvation based on all-atom molecular dynamics simulations. *Journal of Biosciences*, 37(3):399–421, Jul 2012.
- ⁴ Olga Kennard Wolfram Saenger, William N. Hunter and. DNA conformation is determined by economics in the hydration of phosphate groups. *Nature*, 324(6095):385–388, Sep 1986.
- ⁵ Berman HM. Schneider B, Patel K. Hydration of the phosphate group in double-helical DNA. *Biophys J.*, 5(75):2422–2434, Jan 1998.
- ⁶ S Leikin, V A Parsegian, D C Rau, and R P Rand. Hydration forces. *Annual Review of Physical Chemistry*, 44(1):369–395, 1993. PMID: 8257560.
- ⁷ Tigran V. Chalikian and Kenneth J. Breslauer. Volumetric properties of nucleic acids. *Biopolymers*, 48(4):264–280, 1998.
- ⁸ Martin Chaplin. Water's hydrogen bond strength, 2007.
- ⁹ Jaydeep Bardhan. Biomolecular electrostatics—i want your solvation (model)*. *Computational Science and Discovery*, 5:013001, 11 2012.
- ¹⁰ A.G.W. Leslie, Struther Arnott, Rengaswami Chan drasekaran, and R.L. Ratliff. Polymorphism of dna double helices. *Journal of Molecular Biology*, 143(1):49–72, 1980.
- ¹¹ F. H. C. Crick J. D. Watosn and. Molecular structure of nucleic acids: A structure for deoxyribose nucleic acid. *Nature*, 171(130):737–738, 1953.
- ¹² Martin F. Chaplin. Water: its importance to life. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 29(2):54–59, 2001.

- ¹³ Martin F. Chaplin. Do we underestimate the importance of water in cell biology? *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 7(11):861–866, 2006.
- ¹⁴ G. Albiser, A. Lamiri, and S. Premilat. The a–b transition: temperature and base composition effects on hydration of dna. *International Journal of Biological Macromolecules*, 28(3):199 – 203, 2001.
- ¹⁵ Monika Fuxreiter, Mihaly Mezei, Istv'an Simon, and Roman Osman. Interfacial water as a "hydration fingerprint" in the noncognate complex of bamhi. *Biophysical journal*, 89(2):903—911, August 2005.
- ¹⁶ David G. Gorenstein. Conformation and dynamics of dna and protein-dna complexes by 31p nmr. *Chemical Reviews*, 94(5):1315–1338, 1994.
- ¹⁷ Qiang Chen, Hua-Jin Zhai, Si-Dian Li, and Lai-Sheng Wang. On the structures and bonding in boron-gold alloy clusters: B₆au_n-and b₆au_n (n = 1-3). *J. Chem. Phys.*, 138(8):084306, 2013.
- ¹⁸ G. Maes, J. Smets, L. Adamowicz, W. McCarthy, M.K. Van Bael, L. Houben, and K. Schoone. Correlations between ab initio and experimental data for isolated h-bonded complexes of water with nitrogen bases. *Journal of Molecular Structure*, 410 411:315 – 322, 1997. *Molecular Spectroscopy and Molecular Structure* 1996.
- ¹⁹ Jir'ı Sponer and Pavel Hobza. *DNA Bases and Base Pairs: Ab Initio Calculations*. American Cancer Society, 2002.
- ²⁰ Barbara Marchetti, Tolga N. V. Karsili, Michael N. R. Ashfold, and Wolfgang Domcke. A 'bottom up', ab initio computational approach to understanding fundamental photo-physical processes in nitrogen containing heterocycles, dna bases and base pairs. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 18:20007–20027, 2016.
- ²¹ Pavel Hobza and Jir'ı Sponer. Structure, energetics, and dynamics of the nucleic acid base pairs: Nonempirical ab initio calculations. *Chemical Reviews*, 99(11):3247–3276, 1999. PMID: 11749516.
- ²² Jir'ı Sponer, Imre Berger, Nada Spackov'a, Jerzy Leszczynski, and Pavel Hobza. Aromatic base stacking in dna: From ab initio calculations to molecular dynamics simulations. *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*, 17(sup1):1–24, 2000. PMID: 22607400.
- ²³ C. Espejo and Rey-Gonzales. R. Stabilization and interaction energies of non planar dna base pairs guanine-cytosine and adenine-thymine. a study based on the siesta method. *Revista Mexicana de Física*, 53:212–216, 2007.
- ²⁴ Semen A. Trygubenko, Tetyana V. Bogdan, Manuel Rueda, Modesto Orozco, F. Javier Luque, Jir'ı Sponer, Petr Slav'ıcek, and Pavel Hobza. Correlated ab initio study of nucleic acid bases and their tautomers in the gas phase, in a microhydrated environment and in aqueous solution part 1. cytosine. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 4:4192–4203, 2002.
- ²⁵ Federico Moroni, Antonino Famulari, and Mario Raimondi. Ab initio study of the crystallographic solvation pattern of the cytosine-guanine base pair in dna. *The Journal of Physical Chemistry A*, 105(7):1169–1174, 2001.
- ²⁶ Alba Vargas-Caamal, Cabellos, Jose Luis, Filiberto Ortiz-Chi, Henry S. Rzepa, Albeiro Restrepo, and Gabriel Merino. How many water molecules does it take to dissociate hcl? *Chemistry – A European Journal*, 22(8):2812– 2818, 2016.
- ²⁷ V. Fritsch, G. Ravishanker, D. L Beveridge, and E. Westhof. Molecular dynamics simulations of poly(da)·poly(dt): Comparisons between implicit and explicit solvent representations. *Biopoly-*

- mers, 33(10):1537–1552, 1993.
- ²⁸ Alona Furmanchuk, Olexandr Isayev, Oleg V. Shishkin, Leonid Gorb, and Jerzy Leszczynski. Hydration of nucleic acid bases: a Car-Parrinello molecular dynamics approach. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 12:3363–3375, 2010.
 - ²⁹ Santiago Tolosa, Jorge A. Sansón, and Antonio Hidalgo. Theoretical study of adenine to guanine transition assisted by water and formic acid using steered molecular dynamic simulations. *Frontiers in Chemistry*, 7:414, 2019.
 - ³⁰ Bobo Feng, Robert P. Sosa, Anna K. F. Mårtensson, Kai Jiang, Alex Tong, Kevin D. Dorfman, Masayuki Takahashi, Per Lincoln, Carlos J. Bustamante, Fredrik Westerglund, and Bengt Nordén. Hydrophobic catalysis and a potential biological role of dna unstacking induced by environment effects. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(35):17169–17174, 2019.
 - ³¹ Theodore T. Herskovits. Nonaqueous solutions of dna: Factors determining the stability of the helical configuration in solution. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 97(3):474 – 484, 1962.
 - ³² O. Sınanoğlu and S. Abdulnur. Hydrophobic stacking of bases and the solvent denaturation of dna*. *Photochemistry and Photobiology*, 3(4):333–342, 1964.
 - ³³ Maxim Frank-Kamenetskii. How the double helix breathes. *Nature*, 18(328):17—18, August 1987.
 - ³⁴ Peter Yakovchuk, Ekaterina Protozanova, and Maxim D. Frank-Kamenetskii. Base-stacking and base-pairing contributions into thermal stability of the DNA double helix. *Nucleic Acids Research*, 34(2):564–574, 01 2006.
 - ³⁵ S. Walter Englander. A hydrogen exchange method using tritium and sephadex: Its application to ribonuclease*. *Biochemistry*, 2(4):798–807, 1963. PMID: 14075117.
 - ³⁶ Jiri Sponer and Pavel Hobza. Nonplanar geometries of dna bases. ab initio second-order moller-plesset study. *The Journal of Physical Chemistry*, 98(12):3161–3164, 1994.
 - ³⁷ Manoj K. Shukla and Jerzy Leszczynski. Tautomerism in nucleic acid bases and base pairs: a brief overview. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Molecular Science*, 3(6):637–649, 2013.
 - ³⁸ Noriyuki Kurita, Victor I. Danilov, and Victor M. Anisimov. The structure of watson–crick dna base pairs obtained by mp2 optimization. *Chemical Physics Letters*, 404(1):164 – 170, 2005.
 - ³⁹ E. Schrödinger. An undulatory theory of the mechanics of atoms and molecules. *Phys. Rev.*, 28:1049–1070, Dec 1926.
 - ⁴⁰ Vanessa A. Seifert. An alternative approach to unifying chemistry with quantum mechanics. *Foundations of Chemistry*, 19(3):209–222, Oct 2017.
 - ⁴¹ M. Born and R. Oppenheimer. Zur Quantentheorie der Molekeln. *Annalen der Physik*, 389(20):457–484, Jan 1927.
 - ⁴² Michael Baer and Robert Englman. A modified born–oppenheimer equation: application to conical intersections and other types of singularities. *Chemical Physics Letters*, 265(1):105 – 108, 1997.
 - ⁴³ Axel D. Becke. Perspective: Fifty years of density functional theory in chemical physics. *The Journal of Chemical Physics*, 140(18):18A301, 2014.
 - ⁴⁴ Chengteh Lee, Weitao Yang, and Robert G. Parr. Development of the colle salvetti correlation energy formula into a functional of the electron density. *Phys. Rev. B*, 37(2):785–789, 1988.
 - ⁴⁵ Gus Scuseria, Mel Levy, and Kieron Burke. Special issue in honor of john p. perdew for his 65th birthday. *Journal of Chemical Theory and Computation*, 5(4):675–678, 2009. PMID: 26609571.

- ⁴⁶ Zhongqi Ma. Quantum three-body problems. *Science in China Series A: Mathematics*, 43(10):1093–1107, Oct 2000.
- ⁴⁷ Book Review: Quantum mechanics. L. I. Schiff, Second edition. McGraw Hill Book Co, New York, Toronto, London. 1955. xii-417 pages. *McGraw Hill*, 1:133–133, 1956.
- ⁴⁸ L. H. Thomas. The calculation of atomic fields. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 23(5):542–548, 1927.
- ⁴⁹ Elliott H Lieb and Barry Simon. The thomas-fermi theory of atoms, molecules and solids. *Advances in Mathematics*, 23(1):22 – 116, 1977.
- ⁵⁰ P. Hohenberg and W. Kohn. Inhomogeneous electron gas. *Phys. Rev.*, 136:B864–B871, Nov 1964.
- ⁵¹ W. Kohn and L. J. Sham. Self-consistent equations including exchange and correlation effects. *Phys. Rev.*, 140:A1133–A1138, Nov 1965.
- ⁵² M. J. Frisch, G. W. Trucks, H. B. Schlegel, and G. E. Scuseria et al. Gaussian 09. *Gaussian Inc. Wallingford CT 2009*, jan 2009.
- ⁵³ M. Valiev, E.J. Bylaska, N. Govind, K. Kowalski, T.P. Straatsma, H.J.J. Van Dam, D. Wang, J. Nieplocha, E Apra, T.L. Windus, and W.A. de Jong. NWChem: A comprehensive and scalable open-source solution for large scale molecular simulations. *Computer Physics Communications*, 181(9):1477 – 1489, 2010.
- ⁵⁴ Errol G. Lewars. Computational chemistry, introduction to the theory and applications of molecular and quantum mechanics. *Book*, 1(1):1–300, Oct 2011.
- ⁵⁵ I. N. Levine. Quantum chemistry. *Pearson Prentice Hall*, 1(1):1–400, Oct 209.
- ⁵⁶ David J. Wales and Tetyana V. Bogdan. Potential energy and free energy landscapes. *The Journal of Physical Chemistry B*, 110(42):20765–20776, 2006. PMID: 17048885.
- ⁵⁷ Lewis C. Smeeton, Mark T. Oakley, and Roy L. Johnston. Visualizing energy landscapes with metric disconnectivity graphs. *Journal of Computational Chemistry*, 35(20):1481–1490, 2014.
- ⁵⁸ Henry Eyring. The activated complex in chemical reactions. *The Journal of Chemical Physics*, 3(2):107–115, 1935.
- ⁵⁹ Si-Da Huang, Cheng Shang, Pei-Lin Kang, and Zhi-Pan Liu. Atomic structure of boron resolved using machine learning and global sampling. *Chem. Sci.*, 9:8644–8655, 2018.
- ⁶⁰ C. J. Tsai and K. D. Jordan. Use of an eigenmode method to locate the stationary points on the potential energy surfaces of selected argon and water clusters. *The Journal of Physical Chemistry*, 97(43):11227–11237, 1993.
- ⁶¹ Bin Jiang, Changjian Xie, and Daiqian Xie. New ab initio potential energy surface for brh2 and rate constants for the h + hbr h2 + br abstraction reaction. *The Journal of Chemical Physics*, 134(11):114301, 2011.
- ⁶² Bin Jiang, Changjian Xie, and Daiqian Xie. New ab initio coupled potential energy surfaces for the br(2p3/2, 2p1/2) + h2 reaction. *The Journal of Chemical Physics*, 135(16):164311, 2011.
- ⁶³ Changjian Xie, Bin Jiang, and Daiqian Xie. State-to-state quantum dynamics of the h + hbr reaction: Competition between the abstraction and exchange reactions. *The Journal of Chemical Physics*, 134(18):184303, 2011.
- ⁶⁴ Carlos Emiliano Buelna-Garcia, Eduardo Robles Chaparro, Tristan Parra-Arellano, Jesus Manuel Quiroz Castillo, Teresa del Castillo Castro, Gerardo Martínez-Guajardo, Cesar Castillo

- Quevedo, Aned de León Flores, Gilberto Anzueto Sanchez, Martha Fabiola Martin del Campo Solis, Ana María Mendoza Wilson, Alejandro V'asquez Espinal, and José Luis Cabellos Quiroz. Theoretical prediction of structures, vibrational circular dichroism, and infrared spectra of chiral Be₄B₈ cluster at different temperatures. *Molecules*, 26(13), 2021.
- ⁶⁵ Carlos Emiliano Buelna García, José Luis Cabellos Quiroz, Jesús Manuel Quiroz Castillo, Gerardo Martínez Guajardo, Cesar Castillo Quevedo, Aned de León Flores, Gilberto Anzueto Sánchez, and Martha Fabiola Martin del Campo Solís. Exploration of free energy surface and thermal effects on relative population and infrared spectrum of the Be₆B–11 fluxional cluster. *Materials*, 14(1), 2021.
- ⁶⁶ Abril C. Castro, Edison Osorio, José Luis Cabellos Quiroz, Erick Cerpa, Eduard Matito, Miquel Solá, Marcel Swart, and Gabriel Merino. Exploring the potential energy surface of E2P4 clusters e group 13 element the quest for inverse carbon-free sandwiches. *Chemistry - A European Journal*, 20(16):4583–4590, 2014.
- ⁶⁷ Zhong-hua Cui, Yi-hong Ding, Jose Luis Cabellos Quiroz, Edison Osorio, Rafael Islas, Albeiro Restrepo and Gabriel Merino. Planar tetracoordinate carbons with a double bond in CAI₃E clusters. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 17:8769–8775, 2015.
- ⁶⁸ Zhong-hua Cui, Valentin Vassilev-Galindo, Jose Luis Cabellos Quiroz, Edison Osorio, Mesías Orozco, Sudip Pan, Yi-hong Ding, and Gabriel Merino. Planar pentacoordinate carbon atoms embedded in a metallocene framework. *Chem. Commun.*, 53:138–141, 2017.
- ⁶⁹ Maryel Contreras, Sudip Pan, Mesías Orozco-Ic, José Luis Cabellos Quiroz, and Gabriel Merino. E₃m₃⁺ (e=c-pb, m=li-cs) clusters the smallest molecular stars. *Chemistry – A European Journal*, 23(47):11430–11436, 2017.
- ⁷⁰ Makoto Matsumoto and Takuji Nishimura. Mersenne twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudo-random number generator. *ACM Trans. Model. Comput. Simul.*, 8(1):3–30, January 1998.
- ⁷¹ Xiaosong Li and Michael J. Frisch. Energy-represented direct inversion in the iterative subspace within a hybrid geometry optimization method. *Journal of Chemical Theory and Computation*, 2(3):835–839, 2006. PMID: 26626690.
- ⁷² Carlo Adamo and Vincenzo Barone. Toward reliable density functional methods without adjustable parameters: The pbe0 model. *The Journal of Chemical Physics*, 110(13):6158–6170, 1999.
- ⁷³ John P. Perdew, Matthias Ernzerhof, and Kieron Burke. Rationale for mixing exact exchange with density functional approximations. *The Journal of Chemical Physics*, 105(22):9982–9985, 1996.
- ⁷⁴ R. E. A. Kelly and L. N. Kantorovich. Planar nucleic acid base super-structures. *J. Mater. Chem.*, 16:1894–1905, 2006.
- ⁷⁵ P. Jeffrey Hay and Willard R. Wadt. Ab initio effective core potentials for molecular calculations. potentials for k to au including the outermost core orbitals. *The Journal of Chemical Physics*, 82(1):299–310, 1985.
- ⁷⁶ Ram Avtar Yadav, Rashmi Singh, and Mayuri Srivastava. Vibrational studies and dft calculations of cytosine, thiocytosine and their cations and anions. 2015.
- ⁷⁷ Roksana Walesa, Teobald Kupka, and Ma-Igorzata A. Broda. Density functional theory (dft) prediction of structural and spectroscopic parameters of cytosine using harmonic and anharmonic approximations. *Structural Chemistry*, 26(4):1083–1093, Aug 2015.

- ⁷⁸ A.K Chandra, M.T Nguyen, and Th Zeegers-Huyskens. Theoretical study of the protonation and deprotonation of cytosine. implications for the interaction of cytosine with water. *Journal of Molecular Structure*, 519(1):1 – 11, 2000.
- ⁷⁹ Carlos Alem'an. Hydration of cytosine using combined discrete/scrf models: influence of the number of discrete sol- vent molecules. *Chemical Physics*, 244(2):151 – 162, 1999.
- ⁸⁰ Tanja van Mourik, David M. Benoit, Sarah L. Price, and David C. Clary. Ab initio and diffusion monte carlo study of uracil-water, thymine-water, cytosine-water, and cytosine-(water)₂. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2:1281– 1290, 2000.
- ⁸¹ Donald Voet and Alexander Rich. The crystal structures of purines, pyrimidines and their intermolecular complexes. volume 10 of *Progress in Nucleic Acid Research and Molecular Biology*, pages 183 – 265. Academic Press, 1970.
- ⁸² D. Ferro, L. Bencivenni, R. Teghil, and R. Mastromarino. Vapour pressures and sublimation enthalpies of thymine and cytosine. *Thermochimica Acta*, 42(1):75 – 83, 1980.
- ⁸³ Tabish Rasheed and Shabbir Ahmad. Approximate solution of the mode–mode coupling integral: Application to cytosine and its deuterated derivative. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 77(2):446 – 456, 2010.
- ⁸⁴ Philippe Carbonniere, Sandrine Thicoipe, Thibault Very, and Xavier Assfeld. Vibrational analysis beyond the harmonic from ab initio molecular dynamics: Case of cytosine in its anhydrous and aqueous forms. *International Journal of Quantum Chemistry*, 112(9):2221–2230, 2012.
- ⁸⁵ Philippe Carbonniere, Sandrine Thicoipe, Thibault Very, and Xavier Assfeld. Vibrational analysis beyond the harmonic from ab initio molecular dynamics: Case of cytosine in its anhydrous and aqueous forms. *International Journal of Quantum Chemistry*, 112(9):2221–2230, 2012.
- ⁸⁶ A. Aamouche, M. Ghomi, L. Grajcar, M. H. Baron, F. Romain, V. Baumruk, J. Stepanek, C. Coulombeau, H. Jobic, and G. Berthier. Neutron inelastic scattering, optical spectroscopies and scaled quantum mechanical force fields for analyzing the vibrational dynamics of pyrimidine nucleic acid bases 3 cytosine. *The Journal of Physical Chemistry A*, 101(51):10063–10074, 1997.
- ⁸⁷ P.C. Mishra. Vibrational structures and intensity distributions in the electronic absorption spectra of nucleic acid bases: evidence for non-planarity of guanine. *Journal of Molecular Structure*, 144(3):309 – 317, 1986.
- ⁸⁸ Carlos Aleman and Sergio E. Galembeck. Solvation of chromone using combined discrete/scrf models. *Chemical Physics*, 232(1):151 – 159, 1998.
- ⁸⁹ Carlos Alem'an. Solvation of cytosine and thymine using a combined discrete/scrf model. *Chemical Physics Letters*, 302(5):461 – 470, 1999.

Appendix A: Coordenadas XYZ citosina

16

0.000000000

cytosine_phase_gas.out

N	-0.727755000000	-1.065905000000	0.001802000000
N	1.106176000000	0.443283000000	0.000343000000
C	0.619442000000	-0.894587000000	-0.000489000000
C	-1.534724000000	-0.033850000000	-0.002360000000
C	-1.077954000000	1.317839000000	-0.001551000000
C	0.264143000000	1.489626000000	0.000498000000
H	-1.751615000000	2.162494000000	-0.008659000000
H	0.718516000000	2.473891000000	0.001127000000
N	-2.861847000000	-0.288140000000	-0.028739000000
H	-3.530629000000	0.441917000000	0.125258000000
H	-3.151046000000	-1.245402000000	0.071399000000
O	1.435541000000	-1.792419000000	0.000202000000
C	2.543022000000	0.610921000000	0.001968000000
H	2.974786000000	0.134033000000	0.882523000000
H	2.976586000000	0.133236000000	-0.877237000000
H	2.779486000000	1.674823000000	0.001735000000
19			
0.000000000		C+H2O	
H	3.567300000000	-1.910778000000	0.547735000000
O	3.273831000000	-1.289701000000	-0.121054000000
H	2.292345000000	-1.302548000000	-0.085739000000
N	0.657249000000	-0.378286000000	0.021598000000
N	-1.670339000000	0.058738000000	-0.007184000000
C	-0.604991000000	-0.877243000000	0.016361000000
C	0.886461000000	0.921844000000	0.018162000000
C	-0.173061000000	1.877960000000	-0.000783000000
C	-1.430819000000	1.381986000000	-0.014905000000
H	0.008965000000	2.942791000000	-0.005140000000
H	-2.302083000000	2.026798000000	-0.032151000000
N	2.163539000000	1.328044000000	0.037298000000
H	2.390282000000	2.302449000000	-0.009654000000
H	2.895912000000	0.622397000000	0.027797000000
O	-0.878946000000	-2.059634000000	0.029845000000

C	-3.012334000000	-0.482665000000	-0.019826000000
H	-3.150846000000	-1.119952000000	-0.893703000000
H	-3.177742000000	-1.095971000000	0.866533000000
H	-3.727891000000	0.338719000000	-0.042039000000

Contribuciones de cada uno de los coautores al documento.

Francisco E. Rojas González. Investigación, software, escritura inicial manuscrito,
César Castillo Quevedo. Investigación, software, supervisión, financiamiento, escritura inicial del manuscrito, escritura final del manuscrito;
Edgar Paredes Sotelo. Investigación, software, escritura inicial manuscrito;
Eduardo Robles-Chaparro. Investigación, software, escritura inicial manuscrito,
Ana María Mendoza Wilson. Investigación, software, supervisión, financiamiento, escritura inicial manuscrito, escritura final manuscrito;
Anned de León Flores. Investigación, software, supervisión, financiamiento, escritura inicial manuscrito, escritura final manuscrito
Khirbet López Velázquez. Investigación, software, supervisión, financiamiento, escritura inicial manuscrito, escritura final manuscrito,
Edwin Hoil Canul. Investigación, software, escritura inicial manuscrito,
Adolfo López Sánchez. Investigación, software, escritura inicial manuscrito,
Jesús Cob Cantú. Investigación, software, escritura inicial manuscrito,
Luis Maldonado López. Investigación, supervisión, escritura inicial manuscrito,
Gerardo Martínez Guajardo. Investigación, software, escritura inicial manuscrito,
José Luis Cabellos Quiroz. Idea original, escritura final del manuscrito.

Influencia del CHClF_2 durante el proceso de activación de celdas solares de películas delgadas basadas en CdTe^*

Influence of CHClF_2 during the activation process of CdTe -based thin film solar cells

Adolfo López Sánchez^{a*}, Ricardo Mis Fernández^b y José Luis Cabellos Quiroz^a

Resumen / Abstract

En este trabajo se presentan los resultados del efecto del tratamiento térmico o activación de celdas solares de películas delgadas CdS/CdTe tratadas en atmósferas reactivas de cloro (CHClF_2) con una mezcla de gases, Oxígeno y Nitrógeno, variando la presión parcial del CHClF_2 en: 3, 6, 12 y 18 % de la presión total. La presión complementaria del CHClF_2 fue formado por 80% N_2 y 20% O_2 . Después del proceso de activación, se producen cambios morfológicos sobre la superficie de CdTe . Los cambios en la superficie son principalmente erosiones en los límites de granos, esto se determinó por un análisis FE-SEM. Las celdas solares obtenidas se caracterizaron mediante las mediciones de eficiencia cuántica y la curva (J-V) a temperatura ambiente. Las mediciones de eficiencia cuántica dan evidencia que con el aumento de concentración de CHClF_2 mejora la corriente fotogenerada, pero un exceso de CHClF_2 degrada la celda solar. Un resultado similar mostró las curvas de J-V, que las propiedades eléctricas mejoran con el aumento de la presión del CHClF_2 , sin embargo, resulta perjudicial cuando es en exceso.

Palabras clave: CdTe , tratamiento térmico, tecnología fotovoltaica.

This work presents the results of the effect of heat treatment or activation of CdS/CdTe thin film solar cells treated in reactive chlorine atmospheres (CHClF_2) with a mixture of gases, Oxygen, and Nitrogen, varying the partial pressure of CHClF_2 by 3, 6, 12, and 18 % of the total pressure. The complementary pressure of CHClF_2 was formed by 80% N_2 and 20% O_2 . After the activation process, morphological changes occur on the surface of CdTe . The surface changes are mainly erosions at the grain boundaries, this was determined by FE-SEM analysis. The obtained solar cells were characterized by quantum efficiency measurements and the (J-V) curve at room

*. **Agradecimientos.** Los autores agradecen a la Universidad Politécnica de Tapachula y al Cinvestav Unidad Mérida por todas las facilidades otorgadas para la realización de esta investigación.

Declaración de conflicto de intereses. Los autores declaran que no tienen competencia en intereses financieros ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo que se presenta en este documento.

a. Los Doctores López Sánchez y Cabellos Quiroz pertenecen a la Universidad Politécnica de Tapachula, Carretera Tapachula - Puerto Madero, Km. 24 + 300, C.P., 30830, Tapachula, Chiapas, México. Correo electrónico del coautor responsable: adolfo.lopez@uptapachula.edu.mx.

b. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida, Departamento de Física Aplicada, Km. 6 Antigua Carretera a Progreso, A.P. 73-Cordemex, C.P. 97310, Mérida, Yucatán, México.

temperature. The quantum efficiency measurements give evidence that with increasing CHClF_2 concentration the photogenerated current improves, but an excess of CHClF_2 degrades the solar cell. A similar result showed from the J-V curves, that the electrical properties improve with increasing CHClF_2 pressure, however, it is detrimental when in excess of total solids of 80.15 % at 120 min with a distance between electrodes of 1 cm. These conditions were established as optimal and were evaluated on a pilot scale, finding an elimination of 90.12 % of solids. The results highlight the high efficiency under sustainable treatment.

Keywords: CdTe, heat treatment, photovoltaic technology.

Introducción

El CdTe es un semiconductor considerado uno de los principales candidatos rentables para aplicaciones fotovoltaicas [1]. Tiene una banda prohibida de energía directa casi óptima de 1.5 eV y, debido a su alto coeficiente óptica de absorción ($>10^5 \text{ cm}^{-1}$), unos pocos micrómetros pueden absorber más del 90 % del espectro de luz [2, 3]. Estas propiedades lo hacen atractivo para aplicaciones fotovoltaicas, que según el costo nivelado de la electricidad (LCOE) [4, 5, 6], la energía solar fotovoltaica se está convirtiendo en uno de los segmentos de más rápido crecimiento comercial debido a su bajo costo de producción y alto rendimiento [7, 8].

Entre las ventajas que posee los dispositivos fotovoltaicos basados en CdTe con respecto a otros materiales, se encuentra su coeficiente de temperatura y una mejor respuesta espectral, el cual es 3% más en climas cálidos y hasta un 4% en condiciones de humedad [9], respectivamente. Sin embargo, obtener altas eficiencias requiere realizar un tratamiento térmico, conocido como activación. Típicamente, el tratamiento térmico se lleva a cabo depositando CdCl_2 sobre la capa de CdTe y posteriormente un recocido en un rango de temperatura y tiempo de 380 a 500 °C hasta por 90 minutos [10, 11, 12, 13, 14, 15], respectivamente. Dicho proceso, mejora las propiedades eléctricas del CdTe generando una recristalización, lo que conduce a la reducción de los límites de granos y consecuentemente, la pasivación de los centros de recombinación. Así mismo, se propicia una interdifusión entre el CdS y el CdTe que se asocia a la reducción de defectos en la interfase [3, 16, 17, 18]. Por otro lado, se han propuesto algunas alternativas para la activación que parecen ser prometedores, entre ellas se encuentran el cloruro de magnesio (MgCl_2) [19] y difluoroclorometano (CHClF_2) [20], en este último se han realizado en diferentes atmósferas: Ar, O_2 , N_2 , o en aire [20, 21, 22, 23]. Sin embargo, no se ha reportado el efecto de la variación del CHClF_2 . Por lo tanto, en este trabajo se evalúa el efecto de la concentración CHClF_2 utilizada en la mezcla de gases (N_2 - CHClF_2); las presiones parciales del CHClF_2 fueron de 3, 6, 12 y 18 %, de una presión total de 200 mbar. La mezcla de gases se complementará con 80% de Nitrógeno y 20% de Oxígeno. Al término del proceso, se culminó en celda y se caracterizaron las propiedades optoelectrónicas de dichas celdas.

2. Materiales y métodos

Todas las muestras se prepararon en la configuración de sustrato en vidrio de aluminosilicato de boro alcalino comercial de Delta Technology recubierto con óxido de indio y estaño (ITO) de 200 nm. Se depositó una capa de ZnO de 100 nm a partir de un target de Zn (4N) mediante pulverización catódica por RF reactiva en atmósfera de Ar/O₂, a 400 °C. La capa de ventana de CdS también se depositó mediante RF-Sputtering con un espesor de 120 nm en una atmósfera de argón puro a 300°C y la capa de CdTe (8 µm) se depositó mediante sublimación en espacio cercano (CSS), estableciendo la temperatura de la fuente y del sustrato a 590 °C y 550 °C, respectivamente, en atmósfera de Ar/ O₂.

Las activaciones de la estructura Vidrio/ZnO/CdS/CdTe se realizó en un horno tubular de cuarzo, el cual se evacuó hasta una presión base de 10⁵ mbar, en cada proceso de activación se varió las presiones parciales del CHClF₂ como se resume en la Tabla 1, posteriormente se inyecta una mezcla gaseosa de O₂, (20%) y N₂, (80%) de la presión complementaria. La temperatura de activación se mantuvo constante a 400°C durante 30 minutos.

Tabla 1. Presiones parciales porcentual de la mezcla de gases (N₂ - CHClF₂ - O₂)

Nombre	CHClF ₂	N ₂	O ₂	Presión total
	(%)	(%)	(%)	(mbar)
MA	3	80	20	200
MB	6	80	20	200
MC	12	80	20	200
MD	18	80	20	200

Fuente:

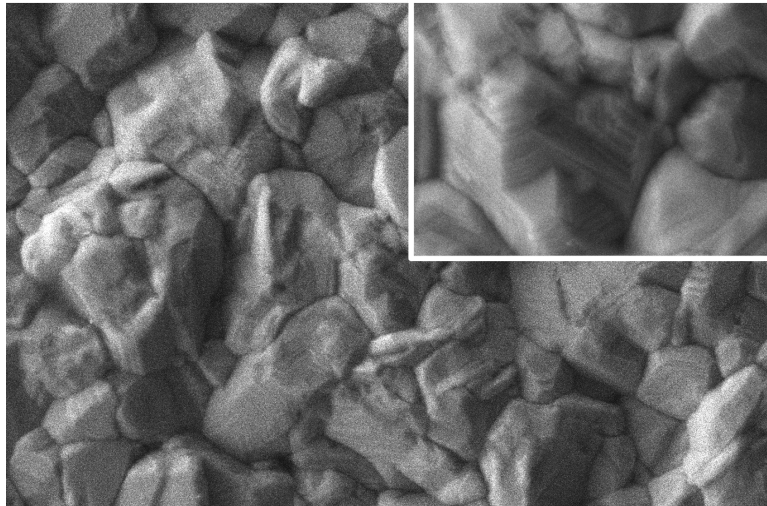
Previo al depósito del contacto posterior, todas las muestras reportadas en la Tabla 1 fueron limpiadas con una solución con bromo/metanol (Br/MeOH) para depositar una bicapa de Cu/Mo con un espesor de 3 nm y 800 nm, respectivamente, por medio de la técnica RF-Sputtering. El área estándar de las células solares se fijó en 18,6 mm², utilizando una fina máscara de molibdeno. Finalmente, las muestras se recocieron a 200 °C durante 20 minutos en una atmósfera de Ar. Los análisis morfológicos se realizaron en un JEOL-FESEM modelo 7600F. La eficiencia de las celdas solares se midió mediante un sistema de lámparas halógenas calibrado por un simulador solar Sol2A de Newport Oriel bajo iluminación AM1.5, donde las mediciones de las curvas J-V se llevaron a cabo utilizando un Source-Meter 2420 de Keithley y un software casero. El EQE se midió mediante una lámpara Xe montada en un Newport 67005 que albergaba un monocromador H20VIS Jobin-Yvon y un filtro Newport 81388 AM1.5 y se utilizó como referencia un diodo de Si calibrado Newport 71560.

3. Resultados y discusiones

3.1 Propiedades morfológicas del CdTe: antes y después del proceso de activación

En la figura 3.1 se muestra la micrografía de la estructura sin activar. La muestra sin activar es homogénea, sin grietas o agujeros; los granos tienen forma irregular, algunos tienen forma alargada con límites de granos muy marcadas. El tamaño de grano varía entre .

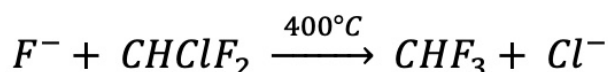
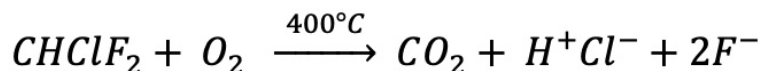
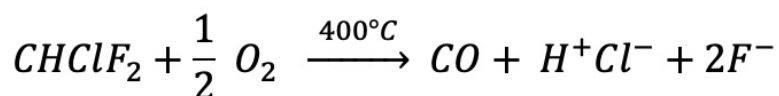
Figura 3.1. Imagen FE-SEM de la estructura de vidrio/ITO/ZnO/CdS sin activar



Fuente:

Después del proceso de activación la superficie de la película de CdTe presentan cambios morfológicas (Figura 3.2). Justamente en el cambio morfológico superficial se encuentra la evidencia experimental de la reactividad del proceso de activación en presencia de los gases CHClF_2 , Oxígeno y Nitrógeno. En la figura 3.2 se muestran las micrografías SEM de las celdas solares activadas. En la muestra MA de la figura 3.2 a), que fue activada con presión parcial de 3% de CHClF_2 , los granos mostraron una superficie en forma de terrazas con una configuración casi hexagonal, y se pueden observar erosiones poco profundas en la superficie de los granos. En la muestra MB de la figura 3.2b, activada con el 6% de presión parcial de CHClF_2 , los granos son ligeramente mayores (entre 2 a 5 μm) que los granos antes del proceso de activación, también presentan erosiones en los límites y en la superficie de los granos. En la muestra MC de la figura 3.2c activada con el 12% de presión parcial de CHClF_2 , presenta granos de forma irregular, erosiones en la superficie y en los límites de granos, además, es evidente la formación de granos en forma de escamas y puntos blancos.

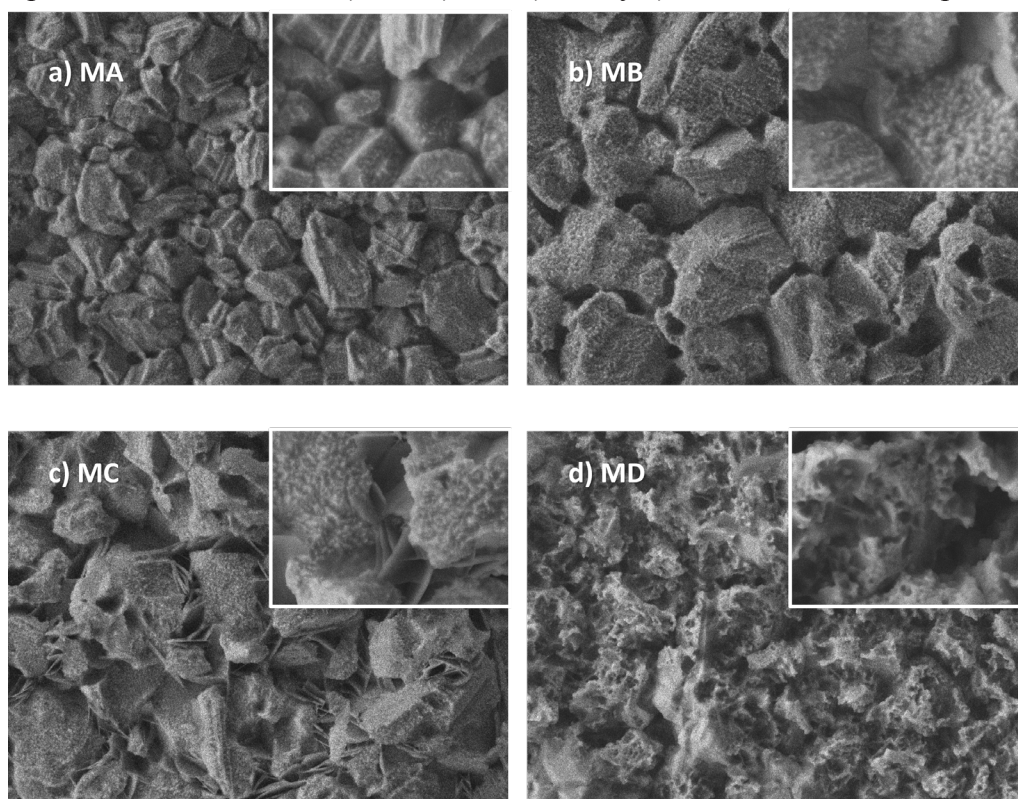
La presencia de puntos blancos sobre los granos de CdTe al incrementar la presión parcial del CHClF_2 en la atmósfera del proceso de activación, fue observada de igual manera por Romeo *et al.* [20] y Hernández-Rodríguez *et al.* [22], quienes atribuyeron a la descomposición parcial del CHClF_2 , causando erosión en la superficie del material y cuyas posibles reacciones son las siguientes [22]:



Por último, en la imagen de la muestra MD de la figura 3.2 d), se puede ver que la morfología fue afectada por erosiones profundas en toda la superficie del CdTe, esto puede deberse al exceso de ácidos durante el proceso de activación, al formarse HCl y HF. Se sabe que estos ácidos son altamente corrosivos, y se forman también por la descomposición del CHClF_2 .

Por lo tanto, dado que nuestras condiciones experimentales fueron diferentes para todas las muestras, atribuimos las diferencias de la figura. 3.2a-d a la formación de iones de cloro y flúor que interactúan con el CdTe, dando lugar a una mayor erosión superficial y formando otros compuestos, como óxidos.

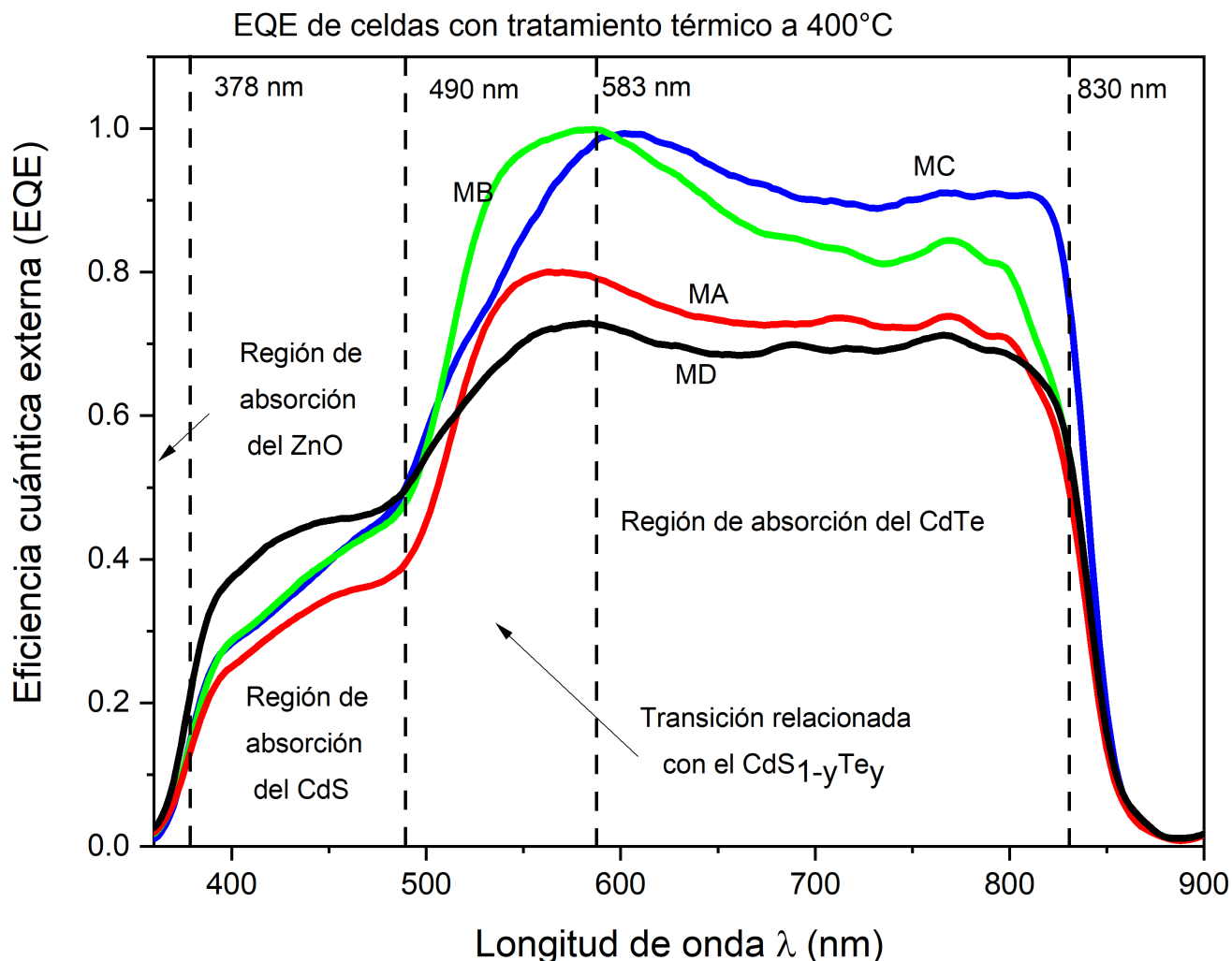
Figura 3.2. Micrografías FE-SEM de la estructura Vidrio/ITO/ZnO/CdS/CdTe activadas con presiones parciales de CHClF_2 a: a) 3%, b) 6%, c) 12% y c) 18%, a 200 mbar de presión total



Fuente:

3.2 Eficiencia cuántica externa (EQE)

En la figura 3.3, se muestran las eficiencias cuánticas externas de las celdas solares activadas a diferentes presiones parciales de CHClF_2 , se puede observar que en la región de menor longitud de onda $\lambda < 378 \text{ nm}$, todas las celdas muestran la misma una transición debido al band gap del ZnO cercano a 3.2 eV. Lo que representa una pérdida asociada con la absorción del ZnO. En la región de longitudes de onda de $378 \text{ nm} < \lambda < 490 \text{ nm}$ corresponde a la región de absorción del CdS, en relación con lo reportado por Burgelman [24], a menor amplitud de EQE mayor espesor de CdS, de acuerdo con los experimentos, la celda MA implicaría que tiene menor del espesor el CdS, y a mayor concentración de CHClF_2 mayor disminución del espesor del CdS, como se puede ver en las muestras MB, MC y MD. De acuerdo con Brian McCandless [25], la interdifusión del Te hacia el CdS, implicaría que el band gap del CdS disminuye, lo cual sugiere la posible formación del ternario $\text{CdS}_{1-y}\text{Te}_y$, por lo tanto, la interdifusión del Te implica una transición hacia la derecha en la EQE en la región de $490 \text{ nm} < \lambda < 583 \text{ nm}$, todas las celdas presentan una transición con diferente pendiente. Cuando la pendiente en la zona de interdifusión es menor indica mayor difusión del Te en el CdS. Se ha reportado que el tratamiento con cloro favorece la difusión del Te hacia el CdS y del S hacia el CdTe [25]. Podemos notar que, aunque los fotones pueden ser absorbidos en toda la estructura de la celda, es en la unión donde aparece el efecto de la absorción de tal forma que se genera un campo eléctrico intenso que es capaz de separar los pares electrón-hueco generados, y esto permite que se produzca el flujo de corriente que son colectados en las terminales eléctricas. Podemos observar en las celdas MB y MC que con el aumento de porcentaje de mejora considerablemente la EQE en la región de longitud de onda entre $583 < \lambda < 830 \text{ nm}$ que corresponde a la región de absorción del CdTe, podemos apreciar una cresta en la curva lo cual indica que la mayoría de los fotones absorbidos generan pares electrón-hueco que contribuye a la fotocorriente, principalmente a la absorción de fotones cercana a la zona de carga espacial del dispositivo. El aumento de la amplitud de la EQE se le atribuye a la incorporación del cloro y oxígeno durante el proceso de activación de la celda solar, el cuál promueve la difusión del Te hacia el CdS y del S hacia el CdTe [21], y como resultado se tiene una buena calidad en la unión. Pero en la medida que la longitud de onda aumenta ($\lambda < 583 \text{ nm}$) para todas las celdas y en particular para la celda MB, el valor de la amplitud de la EQE se ve afectada por la recombinación de pares electrón-hueco en el CdTe. A longitudes de onda , la celda MA y MB tienen una transición muy similar debido a la difusión del S al CdTe, y la EQE de las celdas MC y MD se desplazan ligeramente a la derecha comparadas con las celdas MA y MB, es sabido que bajas concentraciones de S en el CdTe tiende a disminuir su band gap [25]. En caso de exceso de difusión del S en el CdTe ocurre un desplazamiento de la EQE hacia la izquierda por el aumento de band gap.

Figura 3.3. Eficiencia cuántica externa de celdas solares activadas con CHClF_2 

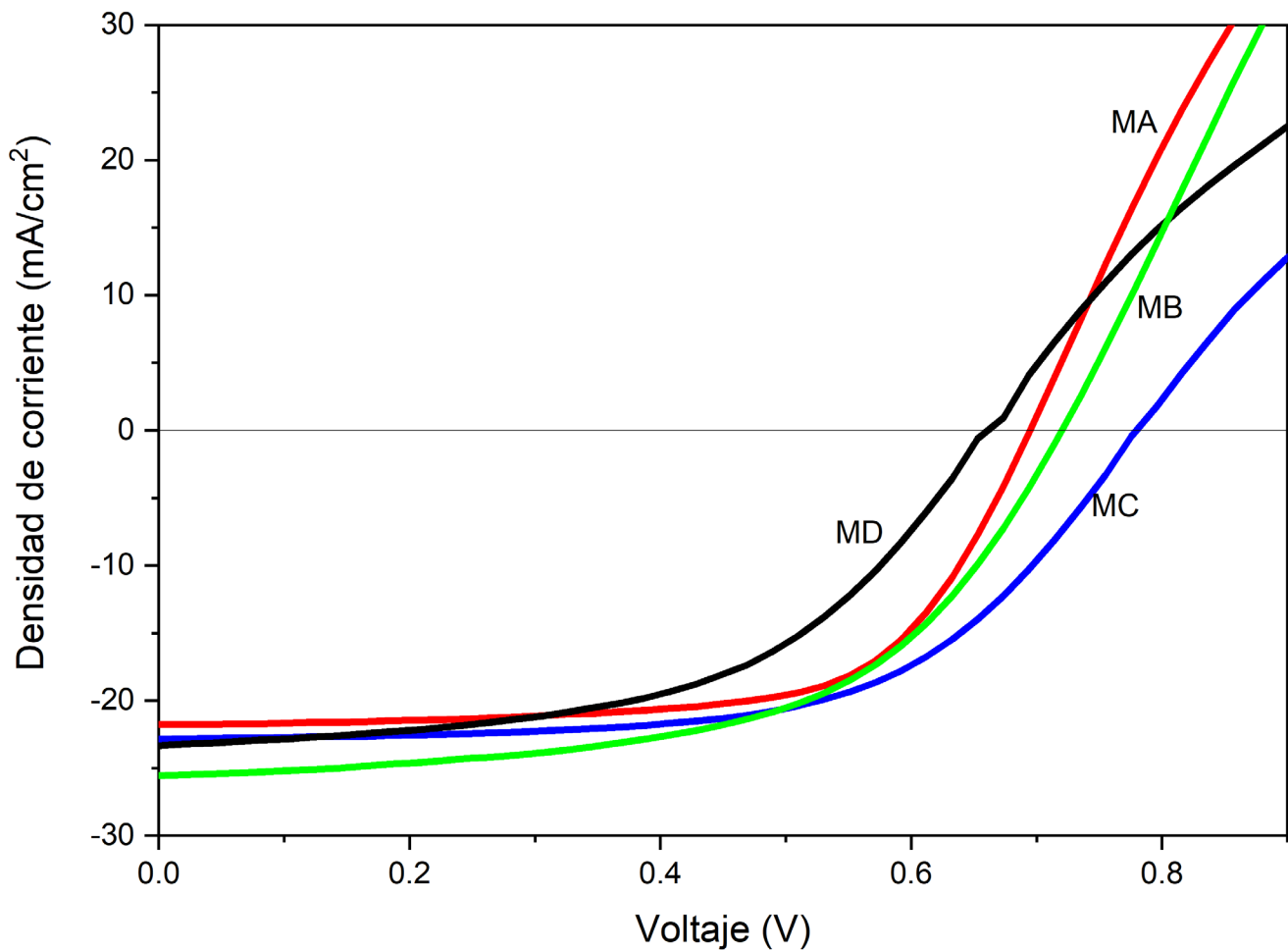
Fuente:

3.3 Análisis de corriente – voltaje (J-V)

En la figura 3.4 se muestran las mediciones de J-V, donde se puede observar la tendencia de las curvas obtenidas de las celdas MA, MB, MC y MD que fueron activadas a diferentes presiones parciales de . En la tabla 3.1 se muestran los parámetros eléctricos, donde se puede observar cambios apreciables en todos los parámetros de las celdas solares. Está claro que, el voltaje de circuito abierto (V_{oc}) cambia significativamente en la medida que el CHClF_2 aumenta de concentración, por otro lado, un ligero aumento en la densidad de corriente de corto circuito (J_{sc}) es observado. Como fue discutido en la sección 3.2 que a mayor amplitud de EQE, mayor es la fotogeneración de portadores de carga, tal como se da evidencia en las celdas MB y MC. De acuerdo con el análisis de la degradación del CHClF_2 los iones cloro y flúor se pueden difundir fácilmente a lo largo de las

fronteras de granos ya que en éstos la compactación no es favorable [26], por lo tanto, el exceso de iones puede degradar las celdas solares, afectando la interfaz del CdS/CdTe. Este efecto se puede observar con la tendencia de los valores del V_{oc} mostrados en la tabla 3.1. Es notorio que el voltaje de circuito abierto y la resistencia de fuga están directamente relacionados con el factor de llenado. Esto puede explicarse por un consumo excesivo de CdS en la película de CdTe [27]. La eficiencia es el parámetro determinante en el rendimiento de la celda sola, en la tabla 3.1 podemos observar la tendencia de aumento de las eficiencias $\geq 10\%$, sin embargo, se ve afectado cuando la presión parcial del CHClF_2 es del 18%. Esta disminución de eficiencia, como ya fue discutido en el apartado 4.1.1 se debe al exceso de ácidos formados durante el proceso de activación, lo cual actuó de manera destructiva en la superficie del CdTe y en la unión p-n de la celda solar.

Figura 3.4. Gráficas de curvas J-V para celdas activadas a una presión total de 200 mbar



Fuente:

Tabla 3.1. Parámetros eléctricos de celdas solares activadas

Muestras	R_s Ωcm^2	R_{sh} Ωcm^2	J_{ph} (mA/cm^2)	V_{oc} mV	FF (%)	$Ef.$ (%)
MA	88	13 336	21.8	695	66.3	10.0
MB	16	3 630	25.3	720	56.4	10.3
MC	128	6 122	22.7	779	59.9	10.6
MD	182	2 375	23.2	661	52.8	8.0

Fuente:

Además, en la mejora de los parámetros eléctricos después del proceso de activación, otro aspecto importante a considerar es el contacto posterior. De acuerdo con la medición J-V, las celdas MC y MD presenta Roll-over en el contacto posterior. La razón del roll-over se les atribuye a las propiedades eléctricas del CdTe, por la presencia de una barrera Schottky (CdTe/Cu/Mo), que afecta principalmente el transporte de huecos por el aumento de la energía de barrera en el contacto posterior [27, 28]. La presencia de la barrera Schottky sugiere que un exceso o baja concentración de Cu que no formaron el compuesto Cu_xTe puede ser la causa del roll-over. Este efecto sugiere que la superficie del CdTe tiene mayor concentración de Cd, esto puede causar la recombinación de los pares electrón-hueco antes de ser recolectados.

4. Conclusiones

En este trabajo se estudiaron los efectos del $CHClF_2$ variando las presiones parciales en el proceso de activación de celdas solares de CdTe, este compuesto es una fuente de Cl alternativa del método convencional ($CdCl_2$). En todos los casos, se estudiaron la morfología y las propiedades optoelectricas. Mostraron que mejora la morfología, sin embargo, el exceso del compuesto de $CHClF_2$ degrada las celdas, este efecto también se observó con la eficiencia cuántica externa y las curvas J-V. Por lo tanto, el control de la cantidad de $CHClF_2$ en el proceso de activación puede ser la clave para obtener celdas solares de altas eficiencias.

Referencias bibliográficas

- [1] S. Rühle, «Tabulated vales of the Shockley-Queisser limit for single juntion solar cells,» *Solar Energy*, vol. 130, pp. 139-147, 2016.
- [2] D. Bonnet y P. Meyers, «Cadmium-telluride -Material for the thin film solar cells,» *Journal of Material Research*, vol. 13, n° 10, pp. 2740-2753, 1998.
- [3] K. Nakamura, T. Fujihara, T. Toyama y H. Okamoto, «Influence of $CdCl_2$ Treatment on

- Structural and Electrical Properties of Highly Efficient 2-mm-Thick CdS/CdTe Thin Film Solar Cells,» *The Japan Society of Applied Physics*, vol. 41, pp. 4474-4480, 2002.
- [4] LAZARD, «www.lazard.com,» October 2021. [En línea]. Available: <https://www.lazard.com/media/451881/lazards-levelized-cost-of-energy-version-150-vf.pdf>. [Último acceso: 26 01 2022].
- [5] L. Sens, U. Neuling y M. Kaltschmitt, «Capital expenditure and levelized cost of electricity of photovoltaic plants and wind turbines - Development by 2050,» *Renewable Energy*, vol. 185, pp. 525-537, 2022.
- [6] T. T. Tran y A. D. Smith, «Incorporating performance-based global sensitivity and uncertainty analysis into LCOE calculations for emerging renewable energy technologies,» *Applied energy*, vol. 216, pp. 157-171, 2018.
- [7] NREL, «NREL Transforming ENERGY,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.nrel.gov/pv/cadmium-telluride-solar-cells.html>. [Último acceso: 19 03 2020].
- [8] N. Strevel, L. Trippel, C. Kotarba, I. Khan, First Solar, Perrysburg, Ohio y USA, «Improvement in CdTe module reliability and long-term degradation through advances in construction and device innovation,» *Photovoltaics International*, vol. 22, pp. 1-8, 2016.
- [9] F. Solar, «www.firstsolar.com,» Enero 2020. [En línea]. Available: <http://www.firstsolar.com/-/media/First-Solar/Technical-Documents/Series-6-Datasheets/Series-6-Datasheet.ashx>. [Último acceso: 02 04 2020].
- [10] H. Bayhan, S. Özden, J. Major, M. Bayhan, E. Dagdeviren y K. Durose, «A comparison of the effect of CdCl₂ and MgCl₂ processing on the transport properties of n-CdS/p-CdTe solar cells and a simple approach to determine their back contact barrier height,» *Solar Energy*, vol. 140, pp. 66-72, 2016.
- [11] A. H. Munshi, J. M. Kephart, A. Abbas, T. M. Shimpi, K. L. Barth, J. M. Walls y w. S. Sampath, «Polycrystalline CdTe photovoltaic with efficiency over 18% through improved absorber passivation and current collection,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 176, pp. 9-18, 2018.
- [12] N. Romeo, A. Bosio, R. Tedeschi y V. Canevari, «Back contacts to CSS CdS/CdTe solar cells and stability of performances,» *Thin Solid Films*, Vols. %1 de %2361-362, pp. 327-329, 2000.
- [13] A. Salavei, I. Rimmaudo, F. Piccinelli, P. Zabierowski y A. Romeo, «Study of difluorochloromethane activation treatment on low substrate temperature deposited CdTe solar cells,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 112, pp. 190-195, 2013.
- [14] E. Regalado-Pérez, M. G. Reyes-Banda y X. Mathew, «Influence of oxygen concentration in the CdCl₂ treatment process on the photovoltaic properties of CdTe/CdS solar cells,» *Thin Solid Films*, vol. 582, pp. 134-138, 2015.
- [15] R. Luo, B. Liu, X. Yang, Z. Bao, B. Li, J. Zhang, W. Li y L. Wu, «The large-area CdTe thin film for CdS/CdTe solar cell prepared by physical vapor deposition in medium pressure,» *Applied Surface Science*, vol. 360, pp. 744-748, 2016.

- [16] B. McCandless, L. Moulton y R. Birkmire, «Recrystallization and Sulfur diffusion in Cd-Cl₂-Treated CdTe/CdS Thin Films,» *Progress in photovoltaic: Research and applications*, vol. 5, pp. 249-260, 1997.
- [17] A. Taylor, J. Major, G. Kartopu, D. Lamb, J. Duenow, R. Dhere, X. Maeder, S. Irvine, K. Durose y B. Mendis, «A comparative study of microstructural stability and sulphur diffusion in CdS/CdTe photovoltaic devices,» *Solar Energy Materials y Solar Cells*, vol. 141, pp. 341-349, 2015.
- [18] S. Mazzamuto, L. Vaillant, A. Bosio, N. Romeo, N. Armani y G. Salvati, «A study of the CdTe treatment with a Freon gas such as CHF₂Cl,» *Thin Solid Film*, vol. 516, pp. 7079-7083, 2008.
- [19] J. Major, R. E. Treharne, L. J. Phillips and K. Durose, «A low-cost-non-toxic post-growth activation step for CdTe solar cells,» *Nature*, pp. 334-337, 2014.
- [20] N. Romeo, A. Bosio y A. Romeo, «An innovative process suitable to produce high-efficiency CdTe/CdS thin-film modules,» *Solar Energy Materials & Solar Cells*, pp. 2-7, 2010.
- [21] V. Rejón, I. Riech y J. Peña, «Study of CdS/CdTe solar cells activated with an oxygen-CHClF₂ gas mixture,» *Solar Energy*, vol. 95, pp. 319-324, 2013.
- [22] E. Hernández-Rodríguez, V. Rejón, I. Riech, M. Acosta y J. Peña, «Morphological and chemical study of CdTe thin films annealed in CHClF₂-O₂ gas mixture,» *Solar Energy*, vol. 107, pp. 305-313, 2014.
- [23] E. Camacho-Espinosa, V. Rejón, E. Hernández-Rodríguez, R. Mis-Fernández, A. I. Oliva, E. Rosendo, I. Rimmaudo y J. L. Peña, «CHClF₂ gas mixture to activate all-sputtered CdS/CdTe solar cells,» *Solar Energy*, vol. 144, pp. 729-734, 2017.
- [24] M. Burgelman, «Cadmium Telluride Thin Film Solar Cell: Characterization, Fabrication and modeling,» de *Thin Film Solar Cells Fabrication, Characterization and Applications*, England, John Wiley y Sons, Ltd, 2006, pp. 277-324.
- [25] B. E. McCandless y J. R. Sites, «Cadmium Telluride Solar Cells,» de *Handbook of photovoltaic science and engineering*, USA, WILEY, 2003, pp. 617-657.
- [26] D. R. Askeland, *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, 3 ed., México: Thomson Editores, 1998.
- [27] A. Salavei, I. Rimmaudo, F. Piccinelli, P. Zabierowski y A. Romeo, «Study of difluorochloromethane activation treatment on low substrate temperature deposited CdTe solar cells,» *Solar Energy Materials & Solar Cells*, pp. 190-195, 2013.
- [28] S. H. Demtsu y J. R. Sites, «Effect of back-contact barrier on thin-film CdTe solar cells,» *Thin Solid Films*, nº 510, pp. 320-324, 2006.

Contribuciones de los coautores al documento

Doctor Adolfo López Sánchez. Idea original, investigación, metodología, financiamiento, escritura de manuscrito, supervisión y escritura final del manuscrito.

Doctor Ricardo Mis-Fernández. Investigación, metodología y escritura inicial del manuscrito.

Doctor José Luis Cabellos Quiroz. Investigación y escritura inicial del manuscrito

Contaminantes emergentes: Problemática, impacto y su tratamiento por procesos de oxidación avanzada

Emerging contaminants: Problems, impact and their treatment by advanced oxidation processes

Daryl Rafael Osuna-Laveaga y Edgar David Moreno-Medran

Resumen / Abstract

Los procesos de oxidación avanzada (POA) son tecnologías prometedoras para la eliminación de contaminantes del agua, utilizando especies oxidantes reactivas como los radicales hidroxilo. A pesar de su eficacia, se necesitan más investigaciones para desarrollar POA rentables, incluyendo nuevos fotocatalizadores y el uso de energía solar. El futuro de los POA se centra en su aplicación a escala industrial, la integración con sistemas fotovoltaicos para una mayor sostenibilidad y su combinación con tratamientos convencionales en las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Palabras clave: fenton, fotocatálisis, ozonación, pesticidas, antibióticos, aditivos.

Advanced oxidation processes (AOP) are promising technologies for the removal of contaminants from water using reactivating oxidant species such as hydroxyl radicals. Despite their effectiveness, more research is needed to develop cost-effective AOPs, including new photocatalysts and the use of solar energy. The future of POAs focuses on their application on an industrial scale, integration with photovoltaic systems for greater sustainability and their combination with conventional treatments in wastewater treatment plants.

Keywords: Fenton, photocatalysis, ozonation, pesticides, antibiotics, additives.

a. Departamento de Ciencias Básicas y Aplicadas, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara. Nuevo Perif. Ote. 555, Ejido San José, Tateposco, Tonalá, Jalisco, CP 45425. México. daryl.osuna@academicos.udg.mx (autor responsable).

Introducción

El presente documento explora el tema de los contaminantes emergentes, un grupo de contaminantes cuya presencia es cada vez mayor en sistemas acuáticos y que debido al efecto negativo a la salud de seres vivos y a la falta de regulación, ha cobrado mayor interés por parte de la comunidad científica. El documento analiza los desafíos que plantean estos contaminantes y destaca la importancia de los procesos de oxidación avanzada como tecnologías eficaces para eliminarlos de las aguas residuales, así como sus características principales tomando en cuenta tratamientos reportados en la literatura sobre algunos contaminantes emergentes, como pesticidas, plastificantes, micro y nanoplásticos y colorantes.

¿Qué son los compuestos emergentes?

Los contaminantes emergentes son una clase de contaminantes que han ganado mucha atención en los últimos años debido a su presencia generalizada en diferentes matrices ambientales y sus posibles efectos adversos sobre la salud humana y los ecosistemas (Giwa et al., 2021). Se trata de sustancias químicas que no se controlan ni regulan habitualmente, pero que se han detectado en diversos cuerpos de agua y abarcan una amplia gama de compuestos sintéticos y naturales, como productos farmacéuticos, productos de cuidado personal, pesticidas, productos químicos industriales y subproductos de desinfección (Rathi et al., 202). A menudo se introducen en el ambiente a través de escorrentías agrícolas y eliminación inadecuada de residuos domésticos e industriales que llegan al sistema de drenaje, terminando en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR).

El creciente uso y producción de estos contaminantes ha llevado a su detección generalizada en el medio ambiente, lo que genera preocupación sobre su impacto en la salud de los seres vivos acuáticos y terrestres, incluidos los seres humanos, ya que hay evidencia de su efecto negativo a la salud en modelos *in vivo* e *in vitro*, aún en pequeñas concentraciones. La presencia de contaminantes emergentes en el ambiente es una preocupación importante debido a su potencial de bioacumulación, persistencia y toxicidad (Richardson y Kimura, 2017; Gomes et al., 2020), provocando efectos adversos en los organismos acuáticos, incluida la alteración de funciones endocrinas, deterioro reproductivo y reducción del crecimiento y la supervivencia. Además, el potencial para el desarrollo de bacterias resistentes a los antibióticos debido a la presencia de residuos farmacéuticos en el ambiente es un problema de salud pública emergente (Khan et al., 2022; Mandarić et al., 2015).

Algunos ejemplos comunes de contaminantes emergentes incluyen productos farmacéuticos como antibióticos, antidepresivos y hormonas; productos de cuidado personal como fragancias, exfoliantes y filtros UV; productos químicos industriales como compuestos de perfluorato y retardantes de llama; aditivos alimenticios; recubrimientos en industria automotriz y textil, así como micro y nanoplásticos (Khan et al., 2022). A la fecha, existe una lista con más de 3000 tipos de contaminantes emergentes (Ouda et al., 2021; Mohammadi et al., 2022).

Procesos de oxidación avanzada

En general, los contaminantes emergentes no se eliminan mediante los procesos convencionales de las PTAR, lo que les permite ingresar a todas las fuentes de agua subterráneas y superficiales en las que se vierten los efluentes tratados (ríos, lagos, lagunas, arroyos y océanos) (Richardson y Kimura, 2017). En los últimos años, los procesos de oxidación avanzada (POA) han surgido como tecnologías prometedoras para la eliminación de contaminantes emergentes del agua y las aguas residuales. Estos procesos implican la generación de especies oxidantes altamente reactivas, como los radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$), que pueden degradar eficazmente y llevar a la mineralización una amplia gama de contaminantes orgánicos, incluidos muchos contaminantes emergentes (Richardson y Kimura, 2017; Khan et al., 2022).

Ejemplos específicos de contaminantes emergentes que se han tratado con éxito mediante POA incluyen productos farmacéuticos, aditivos industriales, productos de cuidado personal y pesticidas (Baskaran et al., 2021).

Algunos de los POA que se han empleado incluyen la fotocatalisis heterogénea, el proceso Fenton, electro-Fenton, ozonación y los procesos de oxidación basados en ultrasonidos. En el proceso Fenton, se emplea una combinación de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y sales de hierro ($\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$) para generar $\bullet\text{OH}$ (Kim et al., 2022); las condiciones experimentales que afectan la eficiencia de este proceso incluyen el pH, la dosis de reactivos, la temperatura y el tiempo de reacción (Bach et al., 2009). Asimismo, se han realizado modificaciones al proceso Fenton, como el foto-Fenton y el electro-Fenton, que incorporan la radiación UV-Visible, o la electroquímica, para mejorar la generación de los radicales (Baskaran et al., 2021). Los procesos de fotocatalisis heterogénea utilizan semiconductores como el TiO_2 , CeO_2 e incluso sales de hierro irradiados con luz UV o visible para producir $\bullet\text{OH}$. Por otro lado, la oxidación electroquímica emplea una corriente eléctrica aplicada a una celda electroquímica para generar especies oxidantes in situ a partir del agua y/o el oxígeno disuelto (Miklos et al., 2018).

Tratamiento de contaminantes emergentes por procesos de oxidación avanzada

Entre los reportes de la degradación de contaminantes emergentes en literatura se encuentra el trabajo de Moreno-Medrano et al., (2021) y colaboradores, quienes degradaron ciprofloxacina por medios electroquímicos empleando materiales porosos de quitosano como catalizador para generar $\bullet\text{OH}$, con un cátodo de malla de carbono perfluoroetileno y un ánodo de Ti/Pt en un reactor con un volumen de 50 mL, y una densidad de corriente constante: 50-100 mA/cm². Los materiales sintetizados, al ser utilizados como soporte para nanopartículas de magnetita, demostraron ser eficientes en la degradación de ciprofloxacina mediante reacciones de tipo electro-Fenton en catálisis heterogénea, alcanzando una remoción de hasta 95% en los primeros 90 min de reacción.

Otro trabajo interesante que evalúa la degradación de pesticidas es el desarrollado por Boukhemkhem et al., (2023), quienes emplearon un proceso Fenton heterogéneo con hierro y cata-

lizadores preparados a partir de arcillas de bentonita y caolinita, y concentraciones de peróxido de hidrógeno de 23.2 y 26.7 mg/L, evaluando temperaturas de reacción de 25, 40 y 55° C. Los pesticidas por degradar fueron nitenpiram y acetamiprid, con porcentajes de remoción de hasta el 100% a los 250 min de reacción, con mejores resultados a una temperatura de 55° C.

Otro contaminante emergente es el colorante naranja G (OG), usado para teñir tejidos animales en citología. Sun et al., (2009) emplearon el proceso Fenton para degradar muestras de agua con este colorante, evaluando parámetros como el pH, dosis de peróxido de hidrógeno y sal de hierro, temperatura y concentración del colorante. La decoloración de OG aumentó con el incremento de la temperatura de reacción, las eficiencias de decoloración dentro de 60 minutos fueron de más del 94.6%.

Llorente-García et al., evaluaron la degradación de microplásticos (MP) de alta y baja densidad en la reacción fotocatalítica empleando TiO₂ como fotocatalizador. Los microplásticos se obtuvieron a partir de exfoliantes faciales comerciales (productos de cuidado personal) y láminas de plástico provenientes de bolsas de supermercado. El estudio se centra en los efectos del tamaño y la forma de los microplásticos, así como la pérdida de masa y el cálculo del índice carbonilo por FTIR, como resultado de la degradación utilizando un recubrimiento mesoporoso de N-TiO₂ y luz visible. Según los resultados presentados por los autores, la degradación fotocatalítica de los MP y láminas de plástico estuvo influenciada por el tamaño (los MP más pequeños se degradan más eficientemente) y por la forma (las películas plásticas mostraron una menor degradación en comparación con los MP esféricos); las películas plásticas mostraron una pérdida de masa de 4.65% a las 50 horas de reacción. La desventaja del tratamiento de micro y nanoplásticos es evidentemente los largos tiempos de reacción y las dificultades que implica la medición y cuantificación de partículas pequeñas por métodos gravimétricos, surgiendo la necesidad de utilizar otras tecnologías para la medición de la forma y del tamaño de partícula.

Flores-Payán et al., (2017) trataron el plastificante Bisfenol A (BPA) con ozonación; este contaminante es un disruptor endócrino. Emplearon un reactor de 5 L con una solución diluida de BPA, con una dosis de ozono de 9 g/L y diferentes pH, entre ellos pH alcalinos para promover la vía de generación de •OH. Los autores reportan una degradación del 100% del contaminante a los 3 segundos de reacción, demostrando que la ozonación puede ser aplicada como una tecnología amigable con el ambiente al no generar subproductos tóxicos a la atmósfera (ya que el ozono se convierte nuevamente en oxígeno), así como una tecnología económica a mediano y largo plazo.

Conclusiones y perspectivas

Existe una gran variedad de CE con diferentes características y que se encuentran en pequeñas concentraciones en diferentes cuerpos de agua, lo que se traduce en la necesidad de desarrollar técnicas muy específicas para su detección. La principal preocupación de los CE es que es imposible contenerlos y son ubicuos, lo que implica que están en contacto con todos los seres vivos, ocasionando efectos negativos a la salud. Para contribuir en la mitigación de estos problemas, se requiere desarrollar POA económicos que involucren nuevos fotocatalizadores o combinación de fotocatalizadores funcionales con la radiación solar, y evitar el empleo de reactivos, como el

peróxido de hidrógeno, que puede incrementar los costos operativos del proceso. Los tratamientos convencionales de las PTAR y de las plantas potabilizadoras no degradan los contaminantes emergentes, y la mayoría de las tecnologías potenciales solo están a nivel laboratorio, por lo que es de vital importancia su evaluación en escala piloto e industrial; también es prudente evaluar la implementación de POA antes y después de las principales etapas de las PTAR para favorecer la biodegradación y depurar el agua antes de verter los efluentes en cuerpos de agua. Finalmente, se requiere implementar tecnologías viables considerando su acoplamiento con sistemas fotovoltaicos para ser considerados tecnologías sostenibles y sustentables.

Bibliografía

- Miklos, D.B., Remy, C., Jekel, M., Linden, K.G., Drewes, J.E. y Hübner, U. (2018), Evaluation of advanced oxidation processes for water and wastewater treatment - A critical review. *Water Res.* 2018, 1;139:118-131. doi: 10.1016/j.watres.2018.03.042
- Baskaran, S., Oumabady, S. y Periasamy, K. (2021), Integrated Advanced Oxidation Process for the Treatment of Pharmaceutical Effluent. *Madras Agricultural Journal* 107(10-12):1-5. DOI: 10.29321/MAJ.10.000521
- Bach, A., Zelmanov, G. y Semiat, R. (2009). Wastewater mineralization using advanced oxidation process. *Desalination and Water Treatment*, 6(1-3), 152-159. <https://doi.org/10.5004/dwt.2009.661>
- Kim, S., Sin, A., Nam, H., Park, Y., Lee, H. y Han, C. (2022), Advanced oxidation processes for microplastics degradation: A recent trend. *Chemical Engineering Journal Advances* 9, 100213. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.100213>
- Mohammadi, A., Dobaradaran, S., Schmidt, T.C. y Spitz, J.S. (2022), Emerging contaminants migration from pipes used in drinking water distribution systems: a review of the scientific literature. *Environmental Science and Pollution Research* 29(50):1-27. 10.1007/s11356-022-23085-7.
- Ouda, M., Kadadou, D., Swaidan, B., Al-Othman, A., Al-Asheh, S., Banat, F. y Hasan, S.W. (2021), Emerging contaminants in the water bodies of the Middle East and North Africa (MENA): A critical review. *Science of The Total Environment*, 754, 142177. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142177>.
- Sun, S., Li, C., Sun, J., Shi, S., Fan, M. y Zhou, Q. (2009), Decolorization of an azo dye Orange G in aqueous solution by Fenton oxidation process: Effect of system parameters and kinetic study. *Journal of Hazardous Materials* 161(2-3), 1052-1057. doi:10.1016/j.jhazmat.2008.04.080
- Peña-Jaramillo, J.P., Moreno-Medrano, E.D., Pérez-García, M.G., Pelayo-Vázquez, J.B. Gutiérrez-Becerra, A. y Medel-Reyes, A. (2021). Emerging Contaminants Removed by Electro-Fenton Heterogeneous Using Porous Material of Chitosan and Magnetite Nanoparticles. *ECS Transactions*, 101(1),101-112. 10.1149/10101.0101ecst.
- Llorente-García, B.E., Hernández-López, J.M., Zaldívar-Cadena, A.A., Siligardi, C. y Cediño-González, E.I. (2020), First Insights into Photocatalytic Degradation of HDPE and LDPE Microplastics by a Mesoporous N-TiO₂ Coating: Effect of Size and Shape of Microplastics. *Coatings*, 10(7), 658. doi:10.3390/coatings10070658

- Boukhemkhem, A., Bedia, J., Belver, C. y Molina, C.B. (2023). Degradation of pesticides by heterogeneous Fenton using iron-exchanged clays. *Catalysis Communications* 183, 106771. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2023.106771>
- Giwa, A., Yusuf, A., Balogun, H A., Sambudi, N S., Bilad, M R., Adeyemi, I., Chakraborty, S. y Curcio, S. (2021). Recent advances in advanced oxidation processes for removal of contaminants from water: A comprehensive review. *Elsevier BV*, 146, 220-256. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.08.015>
- Gomes, I.B., Maillard, J., Simões, L.C. y Simões, M. (2020), Emerging contaminants affect the microbiome of water systems—strategies for their mitigation. *Nature Portfolio*, 3(1). <https://doi.org/10.1038/s41545-020-00086-y>
- Khan, S., Naushad, M., Govarthan, M., Iqbal, J. y Alfadul, S.M. (2022). Emerging contaminants of high concern for the environment: Current trends and future research. *Elsevier BV*, 207, 112609-112609. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112609>
- Mandarić, L., Čelić, M., Marcé, R., y Petrović, M. (2015). Introduction on Emerging Contaminants in Rivers and Their Environmental Risk. *Springer Nature*, 3-25. https://doi.org/10.1007/698_2015_5012
- Rathi, B.S., Kumar, P.S. y Show, P.L. (2021). A review on effective removal of emerging contaminants from aquatic systems: Current trends and scope for further research. *Elsevier BV*, 409, 124413-124413. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124413>
- Richardson, S.D. y Kimura, S.Y. (2017). Emerging environmental contaminants: Challenges facing our next generation and potential engineering solutions. *Elsevier BV*, 8, 40-56. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.04.002>

Descripción petrográfica y composición química de rocas del Soconusco, Chiapas

Petrographic description and chemical composition of rocks from Soconusco, Chiapas

Alexa Rocío Zamora-Martínez^a, Khirbet López-Velázquez^b, Keren Cruz-Andrade^c, Kevin Gerardo Duque-Olivera^d, Edwin Hoil-Canul^e y Luis Maldonado-López^f

Resumen / Abstract

En este trabajo se reporta la descripción petrográfica y la composición química de diversas rocas del Soconusco recolectadas en los municipios de Cacahoatán, Huixtla, Tapachula y Villa Comaltitlán. El análisis petrográfico sugiere que las muestras estudiadas son rocas ígneas cuyo origen está vinculado con la actividad volcánica de la región y en su mayoría se componen de minerales del grupo de las plagioclasas y la clorita con sus características incrustaciones de cuarzo. Además, el análisis de los elementos por EDX confirmó la presencia de distintas fases observadas en la inspección petrográfica, indicando que los elementos más abundantes en las rocas estudiadas fueron O (49.8 – 56.5 wt%), Si (19.1 – 27.0 wt%), Fe (2.0 – 17.4 wt%) y Al (4.3 – 8.4 wt%). De este modo, el presente estudio contribuye al conocimiento de la composición mineral de las rocas del Soconusco, Chiapas.

a. Alexa Rocío Zamora Martínez es Ingeniera en Nanotecnología egresada de la Universidad Politécnica de Tapachula, Chiapas. Carretera Tapachula - Puerto Madero, Km. 24 + 300, C.P. 30830. Tapachula, Chiapas, México.

b. El Doctor López Velázquez es Investigador Posdoctoral en la Universidad Politécnica de Tapachula, Carretera Tapachula - Puerto Madero, Km. 24 + 300, C.P. 30830. Tapachula, Chiapas, México. Es miembro del SNI. Hasido ganador en tres ocasiones del Premio de Investigación UANL (2021-2023). Se ha hecho acreedor al Premio Estatal de Investigación Chiapas 2023.

c. Karen Cruz Andrade es estudiante del Programa Educativo de Ingeniería en Tecnología Ambiental en la Universidad Politécnica de Tapachula, Chiapas.

d. Kevin Gerardo Duque Olivera es estudiante del Programa Educativo de Ingeniería en Nanotecnología en la Universidad Politécnica de Tapachula, Chiapas.

e. El Profesor Hoil R. Hoil Canul tiene un Doctorado en Ciencias en Físicoquímica y es Profesor de Tiempo Completo en la Universidad Politécnica de Tapachula, Chiapas, México. Es en la actualidad Director de Investigación y Posgrado y Coordinador de Ingeniería en Nanotecnología. En este documento es el autor responsable. Correo electrónico: edwin.hoil@uptapachula.edu.mx.

f. El Profesor Maldonado López labora como Investigador en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, IPN, Unidad Mérida, Carretera Mérida - Progreso, Loma Bonita, C.P. 97205 Mérida, Yucatán, México. Su línea de investigación se basa en tópicos de Corrosión metálica y degradación de materiales en ambientes marinos.

Palabras clave: Composición química, minerales, plagioclasa, petrografía, SEM-EDX.

This paper reports the petrographic description and chemical composition of several rocks from Soconusco collected in the municipalities of Cacahoatán, Huixtla, Tapachula and Villa Comaltitlán. The petrographic analysis indicated that the samples studied are igneous rocks whose origin is linked to volcanic activity in the region and are mostly composed of minerals of the plagioclase and chlorite groups with its characteristic quartz incrustations. In addition, the elemental analysis by EDX confirmed the presence of different phases observed in the petrographic study, indicating that the most abundant elements in the rocks studied were O (49.8 - 56.5 wt%), Si (19.1 - 27.0 wt%), Fe (2.0 - 17.4 wt%) and Al (4.3 - 8.4 wt%). Thus, the present study contributes to the knowledge of the mineral composition of the rocks of Soconusco, Chiapas.

Keywords: Chemical composition, minerals, plagioclase, petrography, SEM-EDX.

1. Introducción

México cuenta con una amplia riqueza de recursos naturales, entre ellos los materiales pétreos como las rocas, las cuales están constituidas por agregados de uno o más minerales sólidos con propiedades físicas y químicas definidas, que se agrupan de forma natural (SGM-Rocas, 2017). De acuerdo con su origen, edad y morfología, las rocas pueden clasificarse en tres tipos: ígneas, sedimentarias y metamórficas, y su abundancia en la naturaleza estará en función de diversas combinaciones de variables termodinámicas y múltiples asociaciones minerales posibles (Castro Dorado, 2015). Por lo tanto, se debe destacar que es importante caracterizar la morfología, la composición, propiedades físicas y químicas, así como los mecanismos de degradación de las rocas, dada la trascendencia de sus aplicaciones en diversas actividades antropogénicas como la construcción y la obra civil, entre muchas otras. Un ejemplo de ello es lo reportado por Puy-Alquiza et al., (2013), quienes estudiaron las características y los factores de desgaste (como el intemperismo, ruptura, decoloración y la contaminación) de la piedra natural “Formación Losero” que es el principal elemento arquitectónico en Guanajuato, México. Por otra parte, en la península de Yucatán se ha estudiado y comparado la velocidad de degradación entre la piedra caliza roja y la piedra caliza blanca principalmente por la abundancia de este material en la región y por la gran importancia que representa para las obras de infraestructura y como patrimonio cultural y arquitectónico (Maldonado, L., et al. 2011 y Pérez I., et al., 2021). Los resultados de estas investigaciones han permitido reconocer y seleccionar los materiales pétreos más adecuados para la construcción, reemplazo y restauración de viviendas, edificios y monumentos en distintas ciudades (Puy-Alquiza et al., 2013).

A nivel nacional se han realizado diversos estudios para la caracterización y clasificación de la amplia diversidad de rocas, por ejemplo: en Chiapas se ha reportado que existe uno de los complejos pétreos más grandes de México, el cual está ubicada en el denominado macizo de Chiapas y está compuesto en su mayor parte de rocas ígneas y metaígneas (Weber et al., 2002). Además, de

acuerdo con lo reportado por Estrada-Carmona et al., (2009), en el mismo sistema montañoso se han reconocido dos unidades de rocas metasedimentarias (La Sepultura y Custepec), cuyo estudio ofrece valioso conocimiento para una mejor comprensión de los procesos geológicos que permitieron la configuración actual de este fragmento de la corteza terrestre. En este sentido, se destacan las aportaciones realizadas por Arce et al., (2014), García-Palomo et al., (2006), Macías et al., (2010) y Mora et al., (2004), quienes han estudiado el complejo volcánico Tacaná, el cual se encuentra en el límite entre México y Guatemala a menos de 50 km de nuestra zona de estudio. Ellos reportaron que las rocas estudiadas contienen entre 50 – 64 wt% de SiO₂ y que entre los conjuntos minerales predominan los fenocristales de plagioclasa.

Este trabajo de investigación pretende contribuir al conocimiento acerca de la diversidad geológica del Estado de Chiapas, el cual está conformado por 15 regiones económicas y una de las más importantes es el Soconusco, ubicada sobre toda la costa de Chiapas que colinda con el Océano Pacífico y tiene una extensión de 4,605.7 km², representando el 6.3% de la superficie estatal. Por lo tanto, se hace notar que el objetivo principal de este estudio fue realizar un análisis descriptivo de la composición química y mineral de diversas rocas recolectadas en cuatro municipios del Soconusco: Cacahoatán, Huixtla, Tapachula y Villa Comaltitlán.

2. Metodología

Recolección, preparación y análisis de las muestras

La recolección de las rocas se realizó en julio de 2023 y se seleccionaron sitios de fácil acceso y cercanos a los ríos más representativos de cada uno de los cuatro municipios. En la Figura 1 se muestra la localización geográfica de los puntos donde se recolectaron cuatro rocas por sitio, con tamaños entre 2.5 y 7.0 cm en su parte más ancha (ver Figura 2), en el cuadro 1 se resume la ubicación geográfica de cada uno de los sitios muestreados.

Las rocas recolectadas se cortaron por la mitad utilizando una cortadora de baja velocidad a 150 rpm (IsoMet, BUEHLER) con disco de diamante para corte de precisión, la cual empleó agua destilada como agente lubricante. De cada roca, una mitad se fragmentó en partes más pequeñas para realizar la inspección petrográfica utilizando un microscopio metalográfico (Infinity 1, Nikon) y la otra mitad se pulverizó para su análisis por microscopía electrónica de barrido y espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (SEM-EDX).

La preparación de las muestras para la inspección petrográfica se realizó de la siguiente manera: primeramente, se utilizó una desbastadora a una velocidad de 200 rpm (Spectrum System 1000) equipada con lija de carburo de silicio (#1200) y posteriormente se utilizó una pulidora (Labopol-5, Struers) con paño de pulido impregnado con alúmina (1 µm). Ambos procedimientos fueron similares, iniciando en un punto de la muestra y girando a 90° cada 2 minutos hasta volver al punto inicial. Las mitades restantes se pulverizaron y se tamizaron utilizando una malla de acero inoxidable #250 y los polvos finos de cada roca se analizaron por triplicado mediante la técnica SEM-EDX (JEOL JSM-7600F).



Figura 1. Localización geográfica de los cuatro sitios donde se recolectaron las rocas estudiadas en este trabajo

Fuente: investigación directa.

Cuadro 1. Ubicación geográfica de los puntos de muestreo

Municipio	Sitio	Coordenadas
Cacahoatán	Ejido El Águila	15° 05' 31" N 92° 11' 00" W
Huixtla	Río Huixtla (zona media)	15° 10' 45" N 92° 25' 10" W
Tapachula	Río Coatán (Viva México)	14° 58' 33" N 92° 15' 16" W
Villa Comaltitlán	Río Despoblado (Benito Juárez)	15° 13' 27" N 92° 34' 49" W

Fuente: investigación directa



El Águila, Cacahoatán

Río Huixtla, Huixtla

Río Coatán, Tapachula

Río Despoblado, Villa Comaltitlán

Figura 2. Fotografías de las rocas recolectadas en cuatro municipios del Soconusco

Fuente: investigación directa.

3. Resultados y discusión

La petrografía es un campo de la petrología que se ocupa de la descripción y clasificación de las rocas mediante la observación microscópica de secciones o láminas delgadas derivadas de las rocas en estudio, clasificándolas según su textura y composición mineralógica (Donaire & Pascual, 2012). Este tipo de análisis revela una serie de características y/o propiedades evaluables en los cristales y la relación que existen entre ellos, lo que ayuda a determinar la composición de la roca centrándose en la naturaleza y origen de esta (SGM, 2024). En este trabajo, cada una de las rocas estudiadas se partieron por la mitad y se pulieron para obtener una superficie completamente plana para la inspección petrográfica por microscopía óptica; en la Figura 3 se muestran las imágenes representativas de este análisis.

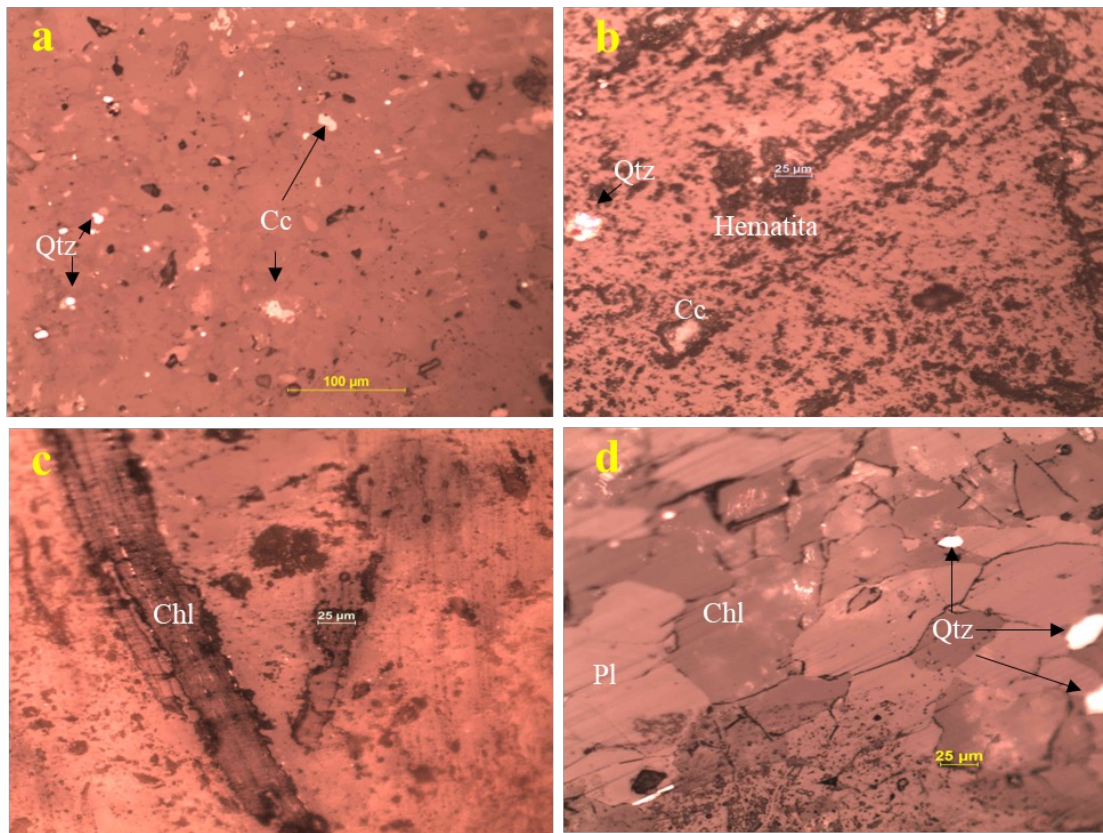


Figura 3. Petrografías de las rocas recolectadas en a) Cacahoatán, b) Huixtla, c) Tapachula, d) Villa Comaltitlán, con una magnificación de 20X

Fuente: investigación directa.

El análisis petrográfico reveló que las rocas estudiadas se componen de distintos minerales como cuarzo (SiO_2) y plagioclasa (albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) - anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)), las plagioclases son minerales formadores de rocas, que se encuentran en la mayoría de las rocas ígneas, las cuales se forman cuando el magma se enfría y se solidifica (SGM, 2020) y esto cobra sentido cuando se destaca que los sitios de muestreo se encuentran en una sección de la Sierra Madre de Chiapas donde se localiza el volcán Tacaná en el límite entre Guatemala y México; de hecho, cada uno de los sitios muestreados se localiza en un radio menor a 50 km del complejo volcánico Tacaná y es evidente que el origen de las rocas estudiadas está vinculado a la actividad volcánica durante la conformación de este sistema montañoso, lo que coincide adecuadamente con lo reportado previamente por Arce et al., (2014), García-Palomo et al., (2006), Macías et al., (2010), Mora et al., (2004) y Macías et al., (2000).

En la Figura 3a, que corresponde a una de las muestras de Cacahoatán se observa una superficie compacta con incrustaciones de cuarzos (Qtz), típicos en la plagioclasa (Pl), además se observan incrustaciones de calcita (Cc) y distintos minerales opacos, entre ellos la hematita (Fe_2O_3). Las rocas recolectadas en Huixtla (Figura 3b) presentan una textura con alta porosi-

dad, notablemente diferente a la muestra de Cacahoatán, presenta además incrustaciones de cuarzo (Qtz) y calcita (Cc) en una matriz de plagioclasa (Pl) y es notoria una mayor abundancia de mineral de hierro, principalmente la hematita (Fe_2O_3). En cuanto a la muestra de Tapachula, la abundancia de cuarzo (Qtz) es menor que en los sitios anteriores y se observa la presencia del mineral clorita (Chl) (chamosita $((\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Al}, \text{Fe}^{3+})_6(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{O})_8)$ - clinocloro $(\text{Mg}_5\text{Al}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_8)$), estos minerales son comunes en diferentes tipos de rocas ígneas por alteración de minerales ferromagnesianos de acuerdo con lo reportado por Pedro Pablo Gil-Crespo, (2024). La textura de las rocas de Villa Comaltitlán es bastante peculiar, mediante la inspección petrográfica se pudo observar una textura compacta tipo mosaico conformada por los límites de grano entre la plagioclasa (Pl) y la clorita (Chl), así como incrustaciones semicirculares de cuarzo (Qtz). Cabe mencionar que en todas las muestras se pueden observar algunas rayas características del proceso de desbaste.

Por otra parte, la morfología y la composición química de las rocas pulverizadas se investigó mediante la técnica SEM-EDX y los resultados se muestran en la Figura 4 y Cuadro 2. Primeramente, la Figura 4 (a, c, e y g) muestra las imágenes obtenidas por SEM a una magnificación de 500X y en ellas se resalta la presencia de fragmentos de cuarzo (SiO_2) típicamente encontrados en la plagioclasa como uno de los principales componentes de las rocas ígneas. Además, los espectros EDX (Figura 4b, d, f y h) indicaron en orden de abundancia la presencia de $\text{O} > \text{Si} > \text{Fe} > \text{Al} > \text{C} > \text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{K} > \text{Ti}$. En el Cuadro 2 se presenta la abundancia promedio de los elementos detectados en las muestras, en ella se observa que la abundancia de Si osciló en un rango de 19.1 – 27.0 wt%, Fe en el rango 2.0 – 17.4 wt%, y Al en el rango de 4.3 – 8.4 wt%. Para el caso de O, este fue el elemento con mayor abundancia entre 49.8 – 56.5 wt% y ello corresponde a su ubicuidad mineral en la formación de óxidos e hidróxidos (O^{2-} , HO^-).

Cabe destacar que los resultados del análisis EDX complementa lo observado mediante la inspección petrográfica. Por ejemplo, las muestras de roca de Cacahoatán y Huixtla contienen los mayores porcentajes de Fe (10.4 y 17.4 wt%, respectivamente) que coincide con la abundancia de la hematita (Fe_2O_3) detectado en las Figuras 3a-b. Además, en las muestras de Cacahoatán y Huixtla, así como en la de Tapachula, la notable abundancia de Si y Fe, así como Al, Na y Ca sugieren la predominancia de minerales del grupo de las plagioclasas, entre ellos la albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) y la anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), lo cual coincide con lo reportado por (Estrada-Carmona et al., 2009) quienes detallaron que la abundancia de Si (como SiO_2), Al (Al_2O_3), Na (Na_2O) y Ca (CaO) se relacionan con la predominancia de las plagioclasas. En adición, el incremento en el porcentaje de Mg (5.3 wt%) para la muestra de Villa Comaltitlán confirma la presencia de minerales ferromagnesianos (del grupo de la clorita) como chamosita $((\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Al}, \text{Fe}^{3+})_6(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{O})_8)$ y/o clinocloro $(\text{Mg}_5\text{Al}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_8)$ (Pedro Pablo Gil-Crespo, 2024), lo cual concuerda adecuadamente con lo observado en la Figura 3d.

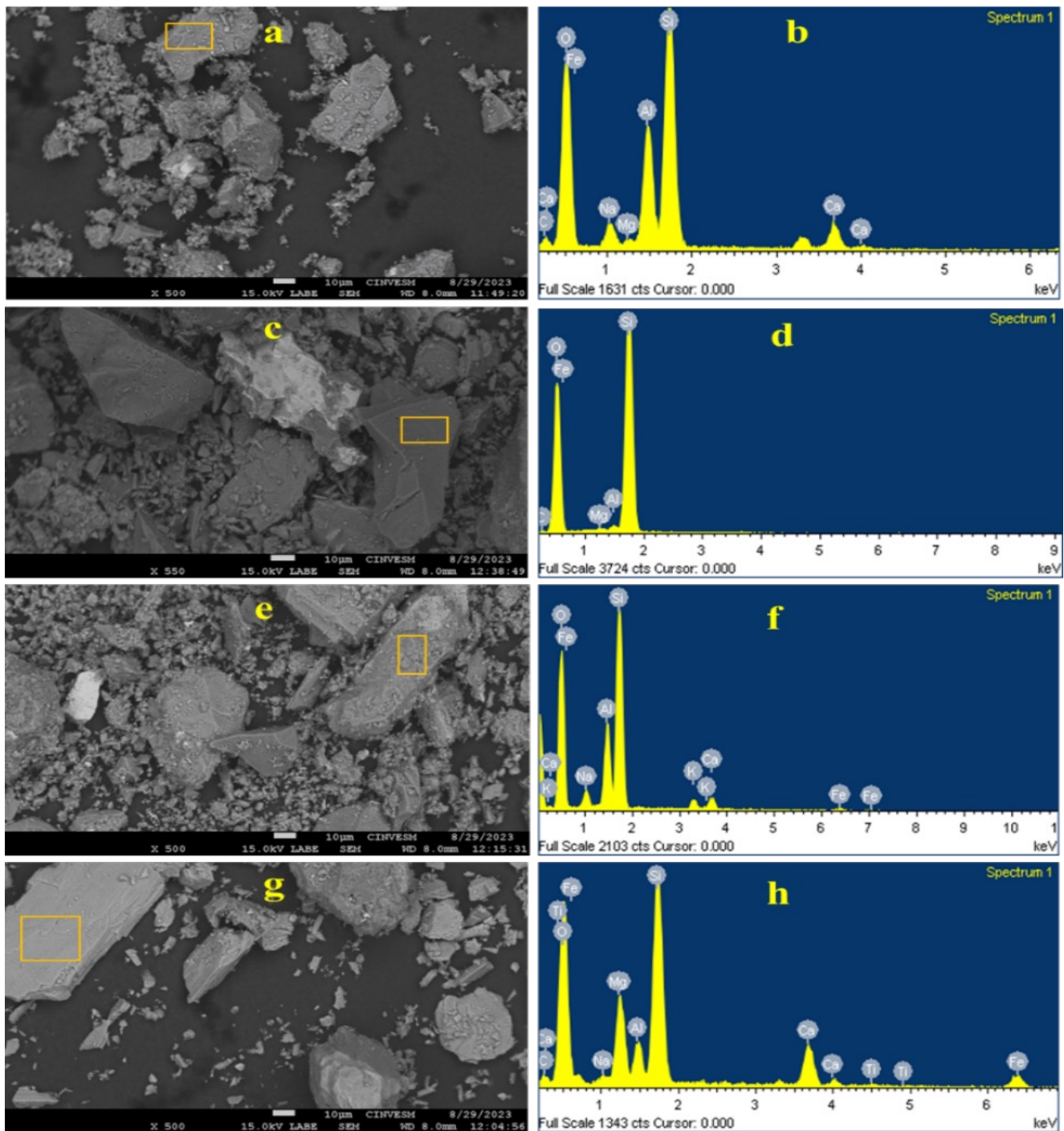


Figura 4. Imágenes SEM y espectros EDX de las rocas trituradas pertenecientes a (a-b) Cacahoatán, (c-d) Huixtla, (e-f) Tapachula y (g-h) Villa Comaltitlán

Fuente: investigación directa.

Cuadro 2. Composición química de las muestras analizadas mediante la técnica EDX (los valores se expresan como promedios de % en masa, n = 3)

Sitio	Al	C	Ca	Fe	K	Mg	Na	O	Si	Ti
Cacahoatán	8.4	8.3	3.3	10.4	0.4	0.6	1.7	49.8	16.1	1.1
Huixtla	4.3	2.1	1.5	17.4	0	0.3	1.8	52.3	20.2	0
Tapachula	8.0	0	2.4	2.0	1.9	0	2.1	56.5	27.0	0
Villa Comaltitlán	4.6	4.1	4.4	5.3	0	5.3	2.3	54.3	19.1	0.5

Fuente: investigación directa.

Finalmente, es importante destacar que los resultados de este trabajo son una primera aproximación en el estudio de la composición química de las rocas del Soconusco. Como se declaró al inicio del documento, el objetivo de este estudio fue aportar conocimiento acerca de composición de diversas rocas recolectadas en cuatro municipios del Soconusco. Cabe mencionar que el número de sitios muestreados, así como el número de rocas analizadas es una de las principales limitaciones de este trabajo en comparación con la amplia extensión de la región de estudio. Por ello, en estudios posteriores se sugiere realizar un muestreo más extenso y con mayores alcances, donde pueden incluirse otras técnicas de caracterización como la difracción de rayos X (DRX) y la espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) para realizar una descripción aún más detallada de la composición mineral de las rocas del Soconusco.

4. Conclusiones

Las muestras analizadas en este trabajo son rocas ígneas cuyo origen está vinculado con la actividad del complejo volcánico Tacaná en la región Soconusco al sur sureste de México. En su mayoría, las rocas recolectadas en Cacahoatán, Huixtla y Tapachula se componen de minerales del grupo de las plagioclasas, como la albita y la anortita, mientras que las rocas de Villa Comaltitlán presentaron notables agregaciones de minerales de la clorita como la chamosita. El análisis EDX complementó lo observado en el análisis petrográfico y reveló que los elementos más abundantes en las rocas estudiadas fueron O, Si, Fe y Al. Finalmente, este trabajo contribuye al conocimiento de la composición mineral de las rocas en el Soconusco, Chiapas.

Bibliografía

- Arce, J. L., Walker, J., & Keppie, J. D. (2014). Petrology of two contrasting Mexican volcanoes, the Chiapanecan (El Chichón) and Central American (Tacaná) volcanic belts: the result of rift-versus subduction-related volcanism. *International Geology Review*, 56(4), 501–524. <https://doi.org/10.1080/00206814.2013.879375>
- Castro Dorado, A. (2015). Petrografía de Rocas Ígneas y Metamórficas. *Ediciones Parainfo, SA.*, 1°.
- Donaire, T., & Pascual, E. (2012). Talleres Propiedades básicas de petrografía óptica aplicadas a la

- clasificación y estudio de las rocas ígneas classification and study of igneous rocks. *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, 2012, 188–197.
- Estrada-Carmona, J., Weber, B., Hecht, L., & Martens, U. (2009). P-T-t trajectory of metamorphic rocks from the central Chiapas Massif Complex: The Custepec Unit, Chiapas, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26(1).
- García-Palomo, A., Macías, J. L., Arce, J. L., Mora, J. C., Saucedo, R., Espíndola, J. M., Escobar, R., & Layer, P. (2006). Geological evolution of the Tacaná Volcanic Complex, México-Guatemala. *Special Paper of the Geological Society of America*, 412(412). [https://doi.org/10.1130/2006.2412\(03\)](https://doi.org/10.1130/2006.2412(03))
- Macías, J. L., Arce, J. L., García-Palomo, A., Mora, J. C., Layer, P. W., & Espíndola, J. M. (2010). Late-Pleistocene flank collapse triggered by dome growth at Tacaná volcano, México-Guatemala, and its relationship to the regional stress regime. *Bulletin of Volcanology*, 72(1). <https://doi.org/10.1007/s00445-009-0303-9>
- Macías, J. L., Espíndola, J. M., García-Palomo, A., Scott, K. M., Hughes, S., & Mora, J. C. (2000). Late Holocene Peléan-style eruption at Tacaná volcano, Mexico and Guatemala: Past, present, and future hazards. *Bulletin of the Geological Society of America*, 112(8). [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2000\)112<1234:LHPEAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2000)112<1234:LHPEAT>2.0.CO;2)
- Mora, J. C., Macías, J. L., García-Palomo, A., Arce, J. L., Espíndola, J. M., Manetti, P., Vaselli, O., & Sánchez, J. M. (2004). Petrology and geochemistry of the Tacaná Volcanic Complex, Mexico-Guatemala: Evidence for the last 40 000 yr of activity. *Geofísica Internacional*, 43(3). <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2004.43.3.963>
- Pedro Pablo Gil-Crespo. (2024). *Atlas de Mineralogía Óptica, Clorita*. <https://www.ehu.eus/mineralogiaoptica/clorita.html>
- Puy-Alquiza María Jesús, Miranda-Avilés Raúl, Salazar-Hernández Carmen, Vega-González Marina, C.-J. J. A. (2013). Characterization Petrophysical of the Losero Formation in the Historical Architecture of the Guanajuato city, Mexico. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 14(2), 191–205. [https://doi.org/10.1016/S1405-7743\(13\)72236-4](https://doi.org/10.1016/S1405-7743(13)72236-4)
- SGM, S. G. M. (2020). *Rocas ígneas*. Servicio Geológico Mexicano. <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Rocas/Rocas-igneas.html>
- SGM, S. G. M. (2024). *Petrografía*. Servicio Geológico Mexicano. <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Rocas/Petrografia.html>
- Weber, B., Hecht, L., Molina-Garza, R., & Köhler, H. (2002). El descubrimiento de basamento metasedimentario en el macizo de Chiapas: la “unidad la sepultura. *GEOS*, 22(1).

Roles de los coautores en el proceso de investigación que condujo al presente documento.

Zamora Martínez, López Velázquez y Cruz Andrade. Responsables del cuidado del proceso de investigación, su metodología y la experimentación

El Profesor López Velázquez. Responsable de la validación de los resultados, seguimiento del proceso de la investigación, su supervisión y manuscrito original.

El Profesor Hoil Canul. Administrador del proyecto, análisis formal de los datos y resultados, su-

pervisión del proceso de investigación, redacción, revisión y edición del documento final.
El Profesor Maldonado López. Adquisición de fondos para la investigación, análisis formal de datos y resultados, su supervisión, redacción, revisión y edición del documento final.

ESTUDIOS DE LA CIÉNEGA

enero-junio 2024

07

ISSN : 2992-6963

Transdisciplinary Journal for Development

Tercera época | Año 03

Estudios de la Ciénega Año 3, No. 7, enero-junio 2024, es una publicación semestral editada por la Universidad de Guadalajara, a través de la Coordinación de Investigación, por la Secretaría Académica, del CUCIÉNEGA. Av. Universidad # 1115, Col. Linda Vista, C.P. 47860. Ocotlán, Jalisco. México, 392 92 5 94 00, <https://revistaestudiosdelacienega.com>, estudiosdelacienega@gmail.com y larturo.macias@academicos.udg.mx, Editor responsable: Luis Arturo Macías García. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo 04–2023–021210461100–102, ISSN: 2992-6963, otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de éste número: Coordinación de Investigación, Secretaría Académica del centro Universitario de la Ciénega. Av. Universidad # 1115 Col. Linda Vista, Ocotlán, Jalisco. México. C.P. 47860. Diseño, maquetación y sitio web: Fidel Romero, fidelromeromx@gmail.com, <https://www.movendesign.com/>. Diseño de portada: Fidel Romero. Fecha de la última modificación 7 de enero de 2024.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Universidad de Guadalajara.



UNIVERSIDAD DE
GUADALAJARA
Red Universitaria de Jalisco

Centro Universitario de la Ciénega

www.revistaestudiosdelacienega.com