

 *Ciencia
Nicolaita* 90



Abril de 2024

Revista Científica

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Ciencia Nicolaita

ISSN: 2007-7068

Jesús Campos García

Coordinador de la Investigación Científica

José López Bucio

Editor

Comité Editorial

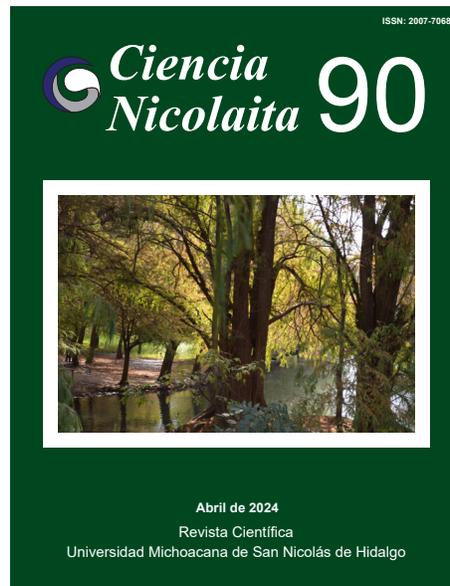
Luca Tessieri, Instituto de Física y Matemáticas; **Sabina Irene Lara Cabrera**, Facultad de Biología; **María de Lourdes González Arqueros**, CONAHCyT – Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra; **Jeannette Sofía Bayuelo Jiménez**, Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Fores-ales; **José Miguel Cervantes Alfaro**, Facultad de Medicina; **Jesús Cirilo Trujillo Jiménez**, Facultad de Ingeniería Mecánica; **Elia Mercedes Alonso Guzmán**, Facultad de Ingeniería Civil; **Rosa Elva Norma del Rio Torres**, Instituto de Investigaciones Químico Biológicas; **Joel Edmundo López Meza**, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia; **Héctor Eduardo Martínez Flores**, Facultad de Químico Farmacobiología; **Francisco Shidhartha Guzmán Murillo**, Instituto de Física y Matemáticas; **José Antonio González Cervera**, Instituto de Física y Matemáticas; **José María Ponce Ortega**, Facultad de Ingeniería Química; **Ernesto García Pineda**, Instituto de Investigaciones Químico Biológicas.

Comité Editorial Externo

Daniele Colosi, Escuela Nacional de Estudios Superiores, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, México; **Carlos Alonso Maya Lastra**, Columbia University, Department of Ecology, Evolution and Environmental Biology, USA; **Rafael Ángel Reyna Hurtado**, Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Campeche, México; **Zayre Ivonne González Acevedo**, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Baja California, México; **Ramón Marcos Soto Hernández**, Colegio de Postgraduados, Postgrado en Botánica, Estado de México; **María Esther Olvera Cortés**, Centro de Investigación Biomédica de Michoacán, Instituto Mexicano del Seguro Social, México; **Ignacio Alejandro Figueroa Vargas**, Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México; **Enrique Acha Daza**, Profesor Emérito de la Universidad de Tampere, Finlandia; **Víctor Manuel Ambríz Díaz**, Instituto Tecnológico de Chihuahua; **Luis Fernando Guerrero Baca**, Universidad Autónoma Metropolitana, México.

Equipo Editorial: Fidel Anguiano Rodríguez, Naborina Villaseñor Santoyo.

Administrador página web: Hugo César Guzmán Rivera.



Ciencia Nicolaita

ISSN: 20007-7068

Revista Ciencia Nicolaita número 90, abril de 2024

<https://www.cic.cn.umich.mx/cn>

Directorio	1
Contenido	2
Presentación	5
Caracterización polínica de especies de <i>Salvia</i> subgénero <i>Calosphace</i> Bertha Susana Raygadas Torres, Gabriela Domínguez Vázquez, Sabina Irene Lara Cabrera DOI: https://doi.org/10.35830/cn.vi90.750	7
Cálculo de la conductividad hidráulica a partir de un estudio litológico en el Valle de Aguascalientes, México y comparativa del rendimiento del modelo subterráneo con su uso Roxana Nicté-Ha Hughes Lomelín, Marco Antonio Martínez Cinco, Sonia Tatiana Sánchez Quispe, Joel Hernández Bedolla DOI: https://doi.org/10.35830/cn.vi90.780	17
Implementación de las líneas de trabajo en la correlación de especialidades para la generación de un modelo geológico íntegro actualizado para el estado de Aguascalientes Karla Rocío Juárez López, Luis Fernando Médicis De Birón Valdepeña, Erick Iván Acevedo Cerón DOI: https://doi.org/10.35830/cn.vi90.781	29

<p>Contaminación del aire por partículas suspendidas PM_{2.5} en Morelia, Michoacán Armando Correa García DOI: https://doi.org/10.35830/cn.vi90.796</p>	41
<p>Análisis termodinámico y económico de un sistema geotérmico de trigeneración de energía, integrado con los ciclos Flash, Kalina y Stirling Alejandra Belem Mendoza Maldonado, Luis Felipe Pasillas Villalobos, Jesús Ricardo Rosado Fierro, Luis Manuel Lazos Durán, Jeandery Alexandra Jurado Chávez, Víctor M. Ambriz-Díaz DOI: https://doi.org/10.35830/cn.vi90.725</p>	57
<p>Análisis del rotor de una turbina eólica de eje vertical híbrida H-Savonius mediante dinámica de fluidos computacional Gerardo Javier Marín Téllez, Víctor López Garza, Gildardo Solorio Díaz, J. Jesús Pacheco Ibarra DOI: https://doi.org/10.35830/cn.vi90.734</p>	72
<p>Modelado hidrológico superficial de la cuenca tributaria de la estación hidrométrica 12378 en Aguascalientes, México mediante el modelo de precipitación-escorrentamiento HBV Roxana Nichte-Há Hughes Lomelín, Sonia Tatiana Sánchez Quispe, Liliana García Romero DOI: https://doi.org/10.35830/cn.vi90.738</p>	86
<p>Efecto del IHX sobre el rendimiento energético de un sistema de refrigeración por absorción híbrido Jasson Ortega Rojas, Edgar Amador López, José Luis Rodríguez Muñoz, José Sergio Pacheco Cedeño, Carlos Ernesto Borja Soto, Jorge Zuno Silva DOI: https://doi.org/10.35830/cn.vi90.741</p>	95
<p>Simulación numérica de un álabe de una turbina eólica de 600 W aplicando la norma IEC 61400-2 Paulina Marín Téllez, Víctor López Garza, Juan Felipe Soriano Peña, Gilberto González Avalos, Gerardo Javier Marín Téllez, Adrián Santibáñez Maldonado DOI: https://doi.org/10.35830/cn.vi90.742</p>	105
<p>Simulación numérica y propuesta de ensayos estructurales de aspas de turbinas de viento de baja capacidad de doble raíz con base en la norma IEC 61400-2 Adrián Santibáñez Maldonado, Víctor López Garza, Juan Felipe Soriano Peña, Paulina Marín Téllez, Gerardo Javier Marín Téllez DOI: https://doi.org/10.35830/cn.vi90.743</p>	117
<p>Revisión hidráulica e hidrológica de la lluvia del 22 de octubre de 2018 en Morelia empleando análisis forense Jorge E. Ochoa García y Juan Pablo Molina Aguilar DOI: https://doi.org/10.35830/cn.vi90.744</p>	127
<p>Indicadores de flexibilidad de madera laminada, densificada y reforzada con fibra de carbono Javier Ramón Sotomayor Castellanos, Koji Adachi, Kayo Kudo DOI: https://doi.org/10.35830/cn.vi90.782</p>	143

Gestión de residuos sólidos y la inteligencia artificial en el contexto mexicano	
Juan Manuel Sánchez Yáñez y Liliana Márquez Benavides	
DOI: https://doi.org/10.35830/cn.vi90.722	157
Modelo de liderazgo e implementación del cambio para equipos de trabajo profesionales en México	
Andrés Guerra Álvarez y Felipe Ángeles Puc Hernández	
DOI: https://doi.org/10.35830/cn.vi90.726	169
PRIMER INFORME Dra. Yarabí Ávila González Rectora	
Redacción	
DOI: https://doi.org/10.35830/cn.vi90.801	190

Presentación

Estimados lectores:

El desarrollo tecnológico y vanguardista alcanzado a partir de la revolución industrial ha contribuido enormemente al bienestar, con la provisión de nuevas y mejores alternativas terapéuticas, de movilidad, acceso a los alimentos y satisfactores, impensados en épocas anteriores. No obstante, el impacto causado con la sobreexplotación de ecosistemas terrestres y marinos está causando daños potencialmente irreversibles, el aumento de fenómenos meteorológicos extremos, contaminación del agua, y la desaparición de especies, además de impactos de orden global en el clima y la estacionalidad de las lluvias. El balance entre el consumo y la recuperación del planeta en esta nueva era denominada ya por especialistas como Antropoceno, plantea un reto muy serio para la continuidad de la especie humana.

En el año 2018, el paso del Huracán Willa por territorio nacional ocasionó lluvias torrenciales, dejando inundaciones y encharcamientos en colonias, calles y avenidas principales de la Ciudad de Morelia. El artículo de Ochoa García y Molina Aguilar presenta la modelación hidrológica de la zona afectada, identificando y representando el comportamiento de los flujos de agua durante y después de la tormenta, complementándose con el estudio del contexto socioeconómico que define las afectaciones demográficas y poblacionales.

En este número también se incluyen trabajos de gran relevancia ambiental, que abordan la contaminación del aire por partículas derivadas de quemados estacionales, emisiones industriales y de automóviles, la gestión de residuos sólidos, así como el establecimiento de modelos de liderazgo para la conformación de equipos profesionales de trabajo. Dichos equipos son ahora una necesidad urgente para revertir el deterioro ambiental de nuestro tiempo.

En su estudio microscópico del polen, estructura reproductiva de los vegetales, Raygadas Torres y col. analizan bajo el microscopio óptico las morfologías de 28 especies del género *Salvia*, lo que permite su utilización como una fuente de información taxonómica. Por otra parte, Sotomayor Castellanos y col. realizan

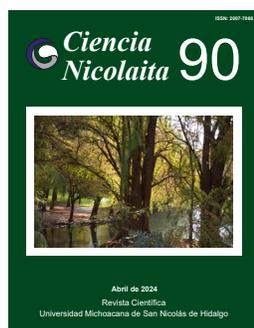
estudios estructurales de la madera de *Cryptomeria japonica*, utilizando probetas de madera sólida y densificada, laminada con resina epoxi y reforzada con fibra de carbono. El densificado, laminado y reforzado de la madera incrementa su módulo de elasticidad y de ruptura, pero disminuye sus índices de ductilidad y de flexibilidad, lo cual impacta directamente en los usos que se le puedan dar en la elaboración de muebles y en la industria de la construcción.

El uso eficiente del agua y el tratamiento de aguas residuales es crucial para la salud y el medio ambiente. Aquí se presentan trabajos como el modelado hidrológico superficial, que permite una mejor comprensión del comportamiento, propiedades y características de los sistemas hidrológicos.

Varios trabajos en el área de Ingenierías presentan innovaciones en el rendimiento energético de sistemas de refrigeración y de generación de energía, y la simulación numérica de álabes, que se utilizan para diversas aplicaciones y dispositivos, incluyendo aviones, barcos, automóviles y turbinas eólicas, estudios que contaron con los importantes aportes de Jesús Cirilo Trujillo Jiménez y Víctor Daniel Jiménez Macedo, como editores de sección.

Los trabajos aquí presentados permiten establecer recomendaciones para mejorar la resiliencia ante los cambios en el ciclo del agua, la contaminación del aire, apreciar la diversidad biológica, e incrementar la eficiencia energética, por lo que en conjunto suman al enorme reto de construir un mundo mejor.

José López Bucio
Editor



Ciencia Nicolaita 90

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Caracterización polínica de especies de *Salvia* subgénero *Calosphace*

Pollen characterization of *Salvia* species subgenus *Calosphace*

Bertha Susana Raygadas Torres, Gabriela Domínguez Vázquez, Sabina Irene Lara Cabrera*

Para citar este artículo: Raygadas Torres BS, Domínguez Vázquez G, Lara Cabrera SI (2024). Caracterización polínica de especies de *Salvia* subgénero *Calosphace*. *Ciencia Nicolaita* 90: 7-16.

DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi90.750>

Historial del artículo



Recibido: 23 de octubre de 2023

Aceptado: 8 de enero de 2024

Publicado en línea: abril 2024



Ver material suplementario



***Correspondencia de autor:** sabina.lara@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Caracterización polínica de especies de *Salvia* subgénero *Calosphace*

Pollen characterization of *Salvia* species subgenus *Calosphace*

Bertha Susana Raygadas Torres, Gabriela Domínguez Vázquez, Sabina Irene Lara Cabrera*

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Biología, Laboratorio de Sistemática Molecular de Plantas, Ciudad Universitaria, Francisco J. Mújica, s/n, Edif. B2-3er piso, Colonia Felicitas del Río, C.P. 58066, Morelia, Michoacán, México.

Resumen

Los caracteres polínicos constituyen una fuente de información importante en campos afines a la biología, en varios grupos de plantas incluso constituyen caracteres de importancia taxonómica. En *Salvia*, el polen está formado por mónadas, radiales, isopolares, de ámbito circular, oblato a oblato-esferoidales, hexacolpados, con exina microrreticulada. En este estudio se evalúa la morfología polínica con un microscopio óptico para 28 especies clasificadas en 19 secciones *sensu* Epling del género *Salvia* subgénero *Calosphace*; para determinar si los caracteres polínicos son distintivos para alguna de las especies y si hay similitud entre especies clasificadas en la misma sección del subgénero. Se reporta por primera vez la descripción morfológica del grano de polen para 19 especies. De las 28 especies únicamente se observan diferencias en el tamaño del grano, encontrándose los granos más pequeños de 25 μm en vista polar y 22 μm en vista ecuatorial (*S. breviflora*, *S. connivens*, *S. curviflora* y *S. polystachia*) y los más grandes de 42.5 μm en vista polar y 40 μm en vista ecuatorial (*S. amarissima*, *S. cinnabarina*, *S. clarckowanii* y *S. lavanduloides*). El dendrograma Neighbor Joining, no agrupa a las especies de ninguna de las secciones representadas por más de una especie. Aunque la morfología polínica no constituye un carácter de valor taxonómico para estas especies, ni las agrupa en secciones; es necesario continuar la exploración polínica a más especies para lograr un muestreo más amplio que incremente el conocimiento de este subgénero tan diverso, antes de desechar esta fuente de evidencia taxonómica.

Palabras clave: morfología del polen, Lamiaceae, sección, taxonómico.

*Autor de correspondencia: sabina.lara@umich.mx
Copyright © Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Abstract

Pollen characters are an important source of information in many fields of biology, for some species groups these may have taxonomic significance. *Salvia* pollen are monads, radial, isopolar, circular, oblate to oblate-spheroidal shape, hexacolpate with microrreticulate exine. Here we describe pollen morphology under light microscopy for 28 *Salvia* belonging to subgenus *Calosphace*, including 19 of Epling's sections and assess if there are pollen differences between species and whether the species classified in a section are similar. We report morphological descriptions of the pollen grain for 19 species, which had not previously been evaluated. Of the 28 species studied we could only observe size differences, with smallest grains of 25 μm in polar view and 22 μm in equatorial (*S. breviflora*, *S. connivens*, *S. curviflora* and *S. polystachia*) whereas the largest pollen grains are of 42.5 μm in polar view and 40 μm in equatorial (*S. amarissima*, *S. cinnabarina*, *S. clarckowanii* y *S. lavanduloides*). Neighbor Joining dendrogram does not cluster the species within the five sections where more than one species is present. Although pollen morphology for these species has no taxonomic value or clusters species classified within the same section; we find it necessary to keep on reporting these findings and eventually reach a sampling correspondent to the subgenus diversity, before giving up on these kinds of taxonomic evidence.

Key words: Pollen morphology, Lamiaceae, section, taxonomic.

Introducción

El género *Salvia* es un género gigante (Frodin, 2004), con hasta 1,000 especies a nivel mundial si se sigue la clasificación de Drew *et al.* (2017), que incorpora las especies previamente clasificadas bajo los géneros *Dorystaechas* Boiss. and Hendr. ex Benth, *Meriandra* Benth., *Perovskia* Kar., *Rosmarinus* L. y *Zhumeria* Rech f. and Wendelbo. En México se distribuyen los subgéneros *Audibertia* y *Calosphace* (1939), siendo nuestro país y Centroamérica un centro de diversidad para *Calosphace* (Ramamoorthy y Elliot 1989; Fragoso-Martínez *et al.*, 2018) con 275 (Jenks *et al.*, 2013) a 312 especies clasificadas en 59 secciones (Ramamoorthy y Elliot 1989) *sensu* Epling.

Como género gigante su sistemática enfrenta numerosos retos; desde la identificación, circunscripción y caracterización de las especies, hasta la obtención de propuestas filogenéticas robustas. En la búsqueda de caracteres diagnóstico se ha explorado la morfología de los granos de polen, que en grupos como Ranunculaceae (Salim *et al.*, 2016), Cucurbitaceae (Levi *et al.*, 2010) y Verbenaceae (Rajh, 1983) han ayudado a resolver problemáticas y concepciones para algunas especies. En Lamiaceae, la morfología polínica ha sido evaluada en va-

rios grupos y niveles taxonómicos (Erdtman, 1945; Henderson *et al.*, 1968; Pozhidaev, 1992; Trudel y Morton, 1992; Wagstaff, 1992), así, la utilidad de los caracteres polínicos para delimitar grupos taxonómicos ha ayudado a reconocer géneros a nivel subtribu (Moon *et al.*, 2008a; Moon *et al.*, 2008b; Wagstaff 1992). Las observaciones para rangos infragenéricos han dado pocos resultados (Rudall, 1980). Hasta ahora se han analizado palinológicamente doce géneros de la subtribu Nepetinae (Moon *et al.*, 2008a); ocho géneros en la subtribu Salviinae (Moon *et al.*, 2008b); y la subtribu Hyptidinae (Rudall, 1980) por mencionar algunos; además de especies del género *Salvia* para distintas regiones del mundo (Henderson *et al.*, 1968; Hassan *et al.* 2009; Özler *et al.*, 2011; Özler *et al.*, 2013; Akta *et al.*, 2020; Fişne y Bagherpour, 2020; Kiliç 2021).

El género *Salvia* tiene polen oblado hexacolpado, con los cuatro colpi laterales más cortos que los dos terminales (Trudel y Morton, 1992), la forma para el género también incluye polen suboblado, oblado-esferoidal y prolado-esferoidal en varias especies de Turquía (Özler *et al.*, 2011; Özler *et al.*, 2013; Akta *et al.*, 2020; Fişne y Bagherpour 2020; Kiliç 2021) y variación del tamaño en vista polar 27.8-65.3 μm y en ecuatorial 29.0-66.2 μm (Özler *et al.*, 2020). Sin embargo, el muestreo específico

es apenas una fracción de la diversidad del género. Por ejemplo, para el subgénero *Calosphace* que es el más diverso y taxonómicamente complejo, a la fecha se han descrito ca. 33 especies de las ca. 317 del subgénero (Moon *et al.*, 2008b; Trudel y Morton 1992; Henderson *et al.*, 1968; Orsini *et al.*, 2006). Es decir, el 10%; de manera que es necesario seguir la exploración polínica incluyendo muestreos dirigidos a secciones *sensu* Epling (Epling 1939, 1940, 1941, 1944, 1947, 1951; Epling y Jativa 1963, 1964, 1965; Epling y Mathias, 1957). De las 104 secciones en México se calcula que hay 59 secciones, 25 endémicas a México y 34 con elementos compartidos con América Central y del Sur (Ramamoorthy y Elliot, 1998).

En este trabajo se incluyen 28 especies, de las cuales 19 especies no habían sido previamente evaluadas. Adicionalmente se incorpora un muestreo para 19 secciones *sensu* Epling (**Tabla 1**) incluyendo más de una especie para cinco secciones para contribuir al avance de los estudios palinológicos en el subgénero *Calosphace*.

Metodología

Se evaluaron 28 especies del género *Salvia* subgénero *Calosphace* (**Tabla 1**) representando a 19

secciones de las 59 distribuidas en México (Ramamoorthy y Elliot, 1989). Cinco secciones (*Incarinatae*, *Lavanduloideae*, *Purpureae*, *Polystachyae* y *Scorodoniae*) están representadas por más de una especie y 14 secciones por una especie, incluyendo las secciones monotípicas *Axillares* e *Iodanthae*. Los ejemplares de soporte se encuentran depositados en el Herbario EBUM.

Se obtuvieron botones florales maduros previo a la antesis, de material fresco y de ejemplares de herbario. Las anteras se procesaron de acuerdo a la técnica de acetólisis de Erdtman (1960). Los granos se observaron en un microscopio Olympus Bymax 50. Las preparaciones se montaron en glicerina líquida. Se midieron 10 granos de polen seleccionados al azar de cada ejemplar, con observaciones en vistas polar y ecuatorial, además se observaron las aperturas y la ornamentación de la exina, de las medidas obtenidas se presentan los promedios y la desviación estándar, adicionalmente se tomaron fotografías en un aumento de 40 X.

Las medidas de los ejes polar, ecuatorial, P/E y grosor de la capa de exina, se analizaron en el programa PAST 4.14 (Hammer *et al.*, 2001-2023) generando una matriz de similitud utilizando la distancia euclidiana, para generar un árbol Neighbor Joining.

Tabla 1. Procedencia de las muestras evaluadas, se incluye la sección en que se clasifica *sensu* Epling y el número de especies evaluadas respecto al total de especies clasificadas en la misma.

Sección s. Epling (número de especies evaluadas/número de especies en la sección)	Especie	Localidad
Axillares 1/1	<i>Salvia axillaris</i> Moc. y Sessé ex. Benth.	Bedolla 32, México, Guanajuato: Pasando la localidad de Emiliano Zapata, cerca del Jaral, en las faldas del Cerro Verde.
Angulatae 1/52	<i>Salvia longispicata</i> M. Martens y Galeotti	Lara Cabrera 116, México, Guerrero. A 19 km en carretera Chilpancingo a Chichihualco, a 3 km de El Palmar.
Briquetia 1/5	<i>Salvia mexicana</i> L.	Lara Cabrera 162, México, Hidalgo: Camino de los Prismas Basálticos a Ex Hacienda Santa María Regla.
Cardinales (1/9)	<i>Salvia wagneriana</i> Pol.	Lara Cabrera 310, México, Chiapas: Unión Juárez, Chiquihuites.
Carneae	<i>Salvia carnea</i> Kunth.	Lara Cabrera 367, México Guerrero. El Paraíso, Camino El Paraíso-Puerto del Gallo.
Curtiflorae (1/9)	<i>Salvia longistyla</i> Benth.	Bedolla 62, México, Michoacán: Uruapan, parque Nacional Cupatitzio.



Fulgentes (1/6)	<i>Salvia microphylla</i> Kunth.	<i>Lara Cabrera 345</i> , México, Querétaro: Exequiel Montes, San Joaquín-Toluquilla.
Iodanthae (1/1)	<i>Salvia iodantha</i> Fern	<i>Lara Cabrera 157</i> . México, Morelos: San Juan Tlacotenco.
Incarnatae (2/2)	<i>Salvia cinnabarina</i> M. Martens y Galleoti	<i>Bedolla 87</i> , México, Chiapas: Zinacantán, sobre carretera pasando Navenchauc.
	<i>Salvia elegans</i> Vahl.	<i>Lara Cabrera 136</i> , México, Hidalgo: camino a Mineral del Chico.
Lavanduloides (2/18)	<i>Salvia helianthemifolia</i> Benth.	<i>Lara Cabrera 121</i> , México, Jalisco: Carretera Guadalajara-Cocotlán a 2 km del Basurero Tecnificado. Atrás del Templo de la Oración Monticello.
	<i>Salvia lavaduloides</i> Kunth.	<i>Lara Cabrera 334</i> , México, Chiapas: San Cristóbal de las Casas, Camino a Comitán.
Membranaceae	<i>Salvia mocinoi</i> Benth.	<i>Lara Cabrera 316</i> , México, Chiapas: Unión Villaflores.
Microspheae	<i>Salvia misella</i> Kunth.	<i>Lara Cabrera 307</i> , México Chiapas: 1 km al S de Cacahoatán.
Polystachyae (5/16)	<i>Salvia brachydontha</i>	<i>Bedolla 51</i> , México, Jalisco: Guadalajara, Parque Mirador Independencia.
	<i>Salvia connivens</i> Epl.	<i>Bedolla 60</i> , México, Hidalgo: Jacala, carretera Zimapán a Jacala.
	<i>Salvia filipes</i> Benth.	<i>Lara Cabrera 161</i> , México, Hidalgo: Camino de los Prismas Basálticos a Ex Hacienda Santa María Regla.
	<i>Salvia plurispicata</i> Epling.	<i>Bedolla 41</i> , México, Michoacán: Municipio de Tlazazalca. Yendo hacia Jerécuaro, pasando Laguna Verde a 3 km sobre la carretera
	<i>Salvia polystachia</i> Cav.	<i>Lara Cabrera 336</i> , México, Chiapas: San Cristóbal de las Casas, Camino a Comitán.
Purpureae (4/9)	<i>Salvia curviflora</i> Benth.	<i>Bedolla 71</i> , México, Guanajuato: Jerécuaro, Piedras de Lumbre.
	<i>Salvia clarckowanii</i>	<i>Lara Cabrera 365</i> , México Guerrero: El Paraíso, Camino El Paraíso-Puerto del Gallo.
	<i>Salvia purpurea</i>	<i>Lara Cabrera 315</i> , México, Chiapas: Unión Juárez, Chiquihuites.
Scorodoniae (3/16)	<i>Salvia breviflora</i> Moc. & Sessé ex Beth.	<i>Lara Cabrera 169</i> , México, Morelos: Jonacatepec, 600m al N de Tlayca.
	<i>Salvia keerlii</i> Benth.	<i>Lara Cabrera 323</i> , México, Chiapas: La Trinitaria, Ruinas de Chinkultic.
	<i>Salvia melissodora</i> Lag.	<i>Lara Cabrera 223</i> , México, Michoacán: Zacapu, Los Espinos.
Silvicolae	<i>Salvia miniata</i> Fernald	<i>Lara Cabrera 321</i> , México, Chiapas: La Trinitaria, Ruinas de Chinkultic.
Uliginosae	<i>Salvia prunelloides</i> Kunth.	<i>Lara Cabrera 343</i> , México, Querétaro: Exequiel Montes, San Joaquín-Toluquilla.
Uricae (1/2)	<i>Salvia amarissima</i> Ortega	<i>Lara Cabrera 131</i> , México, Michoacán, 1.5 km al NE de San José Coapa.

Resultados

Los caracteres evaluados son poco variables en estas especies de *Salvia*, los granos de polen observados tienen una morfología similar, la ornamentación de la capa de exina no presenta variación entre especies, siendo microrreticulada bajo el microscopio óptico (**Figura 1**). La principal variación se observa en términos del tamaño del grano, del radio polar/ecuatorial y el grosor de la capa de exina (**Tabla 2**).

Los granos más pequeños: *S. breviflora* (secc. *Scorodoniae*), *S. connivens* (secc. *Polystachiae*), *S. curviflora* (secc. *Purpureae*) y *S. polystachia* (secc. *Polystachiae*), tuvieron en promedio 25 µm en vista polar y 22 µm en vista ecuatorial. Mientras que *S. amarissima* (secc. *Uricae*), *S. cinnabarina* (secc. *Incarnatae*), *S. clarckowanii* (secc. *Purpureae*) y *S. lavanduloides* (secc. *Lavanduloideae*), tuvieron los granos más grandes alcanzando 42.5 µm en su vista polar y 40 µm en vista ecuatorial. El radio polar/

ecuatorial se ubica entre 1 y 1.13 correspondiendo con forma oblado a oblado esferoidal; la pared de exina más angosta (1.25 µm) se encuentra en *S. wagneriana* (secc. *Cardinales*) y la más gruesa (3.75 µm) en *S. breviflora* (secc. *Scorodoniae*), *S. elegans* (secc. *Incarnatae*), *S. iodantha* (secc. *Iodanthae*) y *S. plurispicata* (secc. *Polystachiae*). La mayoría de las especies tuvo un grosor de la exina de 2.5 µm.

En el dendrograma (**Figura 2**) no se agrupan las especies clasificadas bajo la misma sección *sensu* Epling, para ninguna de las cinco secciones representadas por más de una especie.

Discusión

Los caracteres polínicos evaluados han sido útiles para reconocer géneros en Lamiaceae (Emboden, 1969), pero hacen imposible la determinación a nivel de especies. Este resultado, sin embargo, no

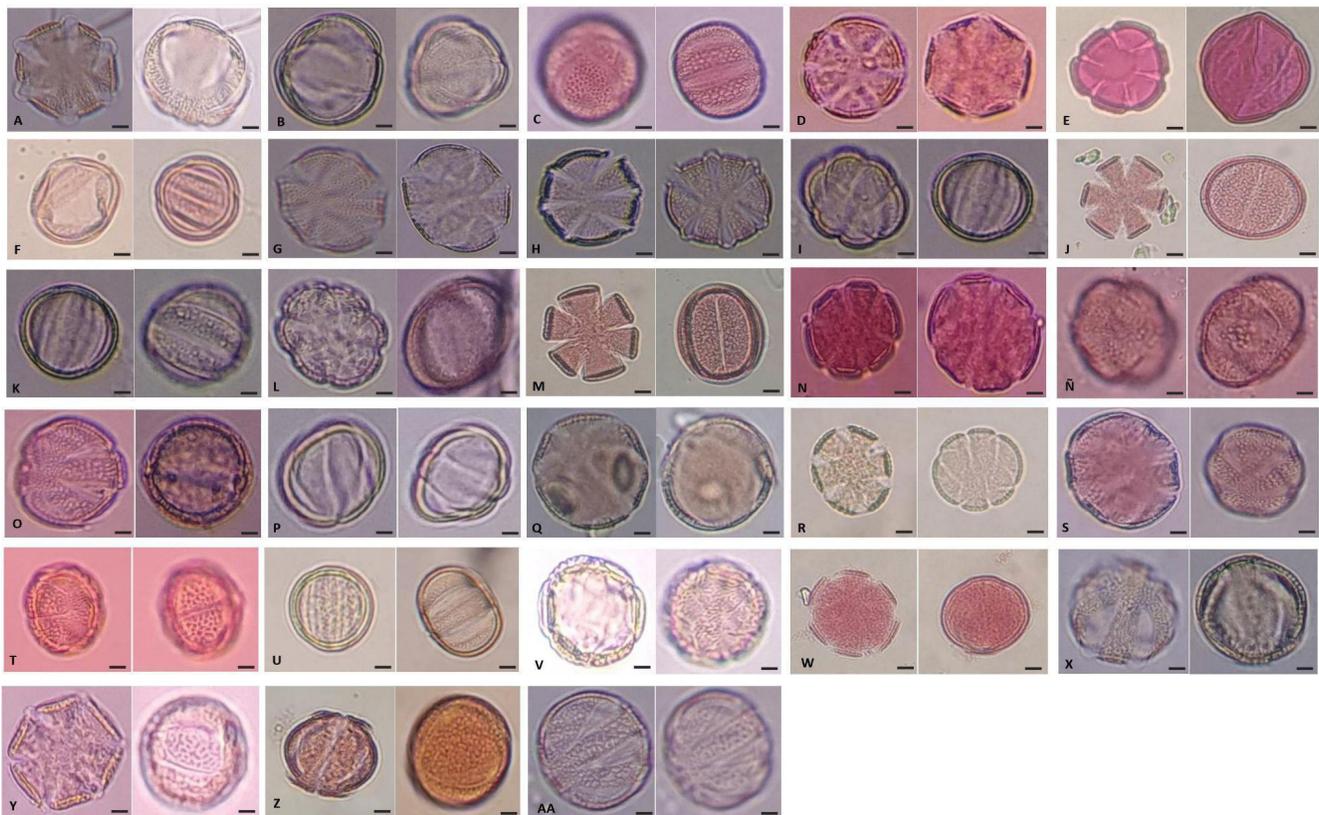


Figura 1. Vista polar (izquierda) y ecuatorial (derecha) del grano de polen de especies de *Salvia* escala a 10 µm, ordenadas de acuerdo a la sección *sensu* Epling. **A:** *S. axillaris* **B:** *S. longispicata* **C:** *S. mexicana* **D:** *S. carnea* **E:** *S. longistyla* **F:** *S. wagneriana* **G:** *S. cinnabarina* **H:** *S. elegans* **I:** *S. iodantha* **J:** *S. microphylla* **K:** *S. helianthemifolia* **L:** *S. lavanduloides* **M:** *S. mocinoii* **N:** *S. micella* **Ñ:** *S. brachyodontha* **O:** *S. connivens* **P:** *S. filipes* **Q:** *S. plurispicata* **R:** *S. polystachya* **S:** *S. clarckowanii* **T:** *S. curviflora* **U:** *S. purpurea* **V:** *S. breviflora* **W:** *S. keerlii* **X:** *S. melissodora* **Y:** *S. miniate* **Z:** *S. prunelloides* **AA:** *S. amarissima*.

Tabla 2. Características del polen evaluado comparando con resultados previos de Moon *et al.* 2008b¹ (entre corchetes). La forma se reporta siguiendo la codificación de Moon *et al.* (2008b), O (oblado), SO (suboblado), OS (oblado esferoidal), S (esferoidal) PS (prolado esferoidal, SP (subprolado), P (prolado).

Secc. s. Epling	Especie	Eje polar (μm). Media y DS	Eje ecuatorial (μm). Media y DS	Radio P/E	Pared de la exina (μm)	Forma
Axillares	<i>S. axillaris</i>	40 \pm 38.5	37.5 \pm 36	1.05	2.5	O, OS
Angulatae	<i>S. longispicata</i>	35 \pm 34.5	32.5 \pm 31	1.09	2.5	O, OS
Briquetia	<i>S. mexicana</i>	37.5 \pm 36.5	35 \pm 34.5	1.06	2.5	O, OS
Carneae	<i>S. carnea</i>	27.5 \pm 27	25 \pm 24.5	1.1	2.5	O, OS
Curtiflorae	<i>S. longistyla</i>	35 \pm 34.5	30 \pm 29	1.17	2.5	O, OS
Cardinales	<i>S. wagneriana</i>	27.5 \pm 26.5	25 \pm 24.5	1.09	1.25	O, OS
Incarnatae	<i>S. cinnabarina</i>	42.5 \pm 41.5	40 \pm 39.5	1.05	2.5	O, OS
Incarnatae	<i>S. elegans</i>	40 \pm 39.5 [38.3 (33.3 - 41.6)] ¹	37.5 \pm 36 [33.1 (26.6 - 36.9)] ¹	1.08	7.75	O, OS [PS, SP, P] ¹
Iodanthae	<i>S. iodantha</i>	35 \pm 34.5	[33.1 (26.6-36.9)] ¹	1	3.75	O, OS
Fulgentes	<i>S. microphylla</i>	35 \pm 34.5 [33.6 (29.0-37.6)] ¹	32.5 \pm 31 [30.6 (27.8-35.0)] ¹	1.09	2.5	O, OS [SO, OS PS, SP] ¹
Lavanduloides	<i>S. helianthemifolia</i>	35 \pm 34.5	32.5 \pm 31	1.09	2.5	O, OS
Lavanduloides	<i>S. lavanduloides</i>	42.5 \pm 41.5	40 \pm 39.5	1.05	2.5	O, OS
Membranaceae	<i>S. mocinoii</i>	27.5 \pm 26.5	25 \pm 24.5	1.09	3.75	O, OS
Microspheae	<i>S. misella</i>	40 \pm 39.5	37.5 \pm 36	1.08	2.5	O, OS
Polystachyae	<i>S. brachyodonta</i>	27.5 \pm 26.5	25 \pm 24.5	1.09	2.5	O, OS
Polystachyae	<i>S. connivens</i>	25 \pm 24.5	22.5 \pm 22	1.11	2.5	O, OS
Polystachyae	<i>S. filipes</i>	27.5 \pm 26	25 \pm 24.5	1.08	2.5	O, OS
Polystachyae	<i>S. plurispicata</i>	27.5 \pm 26	25 \pm 24.5	1.08	3.75	O, OS
Polystachyae	<i>S. polystachia</i>	25 \pm 24.5 [21.8 (20.5-23.9)] ¹	22.5 \pm 21 [22.4 (18.4-24.8)] ¹	1.13	2.5	O, OS [PS, SP, P] ¹
Purpureae	<i>S. clarkowanii</i>	42.5 \pm 41.5	40 \pm 39.5	1.05	2.5	O, OS
Purpureae	<i>S. curviflora</i>	25 \pm 24.5	22.5 \pm 22	1.11	2.5	O, OS
Purpureae	<i>S. purpurea</i>	40 \pm 39.5	30 \pm 29.5	1.33	3.0	O, OS
Scorodoniae	<i>S. breviflora</i>	25 \pm 24.5	22.5 \pm 21.5	1.12	3.75	O, OS
Scorodoniae	<i>S. keerlii</i>	32.5 \pm 31	30 \pm 29.5	1.06	2.5	O, OS
Scorodoniae	<i>S. melissodora</i>	30 \pm 29.5	27.5 \pm 26	1.11	2.5	O, OS
Silvicolae	<i>S. miniata</i>	37.5 \pm 36.5	35 \pm 34	1.07	2.5	O, OS
Uliginosae	<i>S. prunelloides</i>	40 \pm 39.5	32.5 \pm 31	1.25	2.5	O, OS
Uricae	<i>S. amarissima</i>	42.5 \pm 41 [29.6 (26.4-31.8); 28.1 (25.3-31.3)] ¹	40 \pm 39.5 [27.2 (23.1-29.6); 27.6 (24.9-29.1)] ¹	1.05	2.5	O, OS [OS] ¹

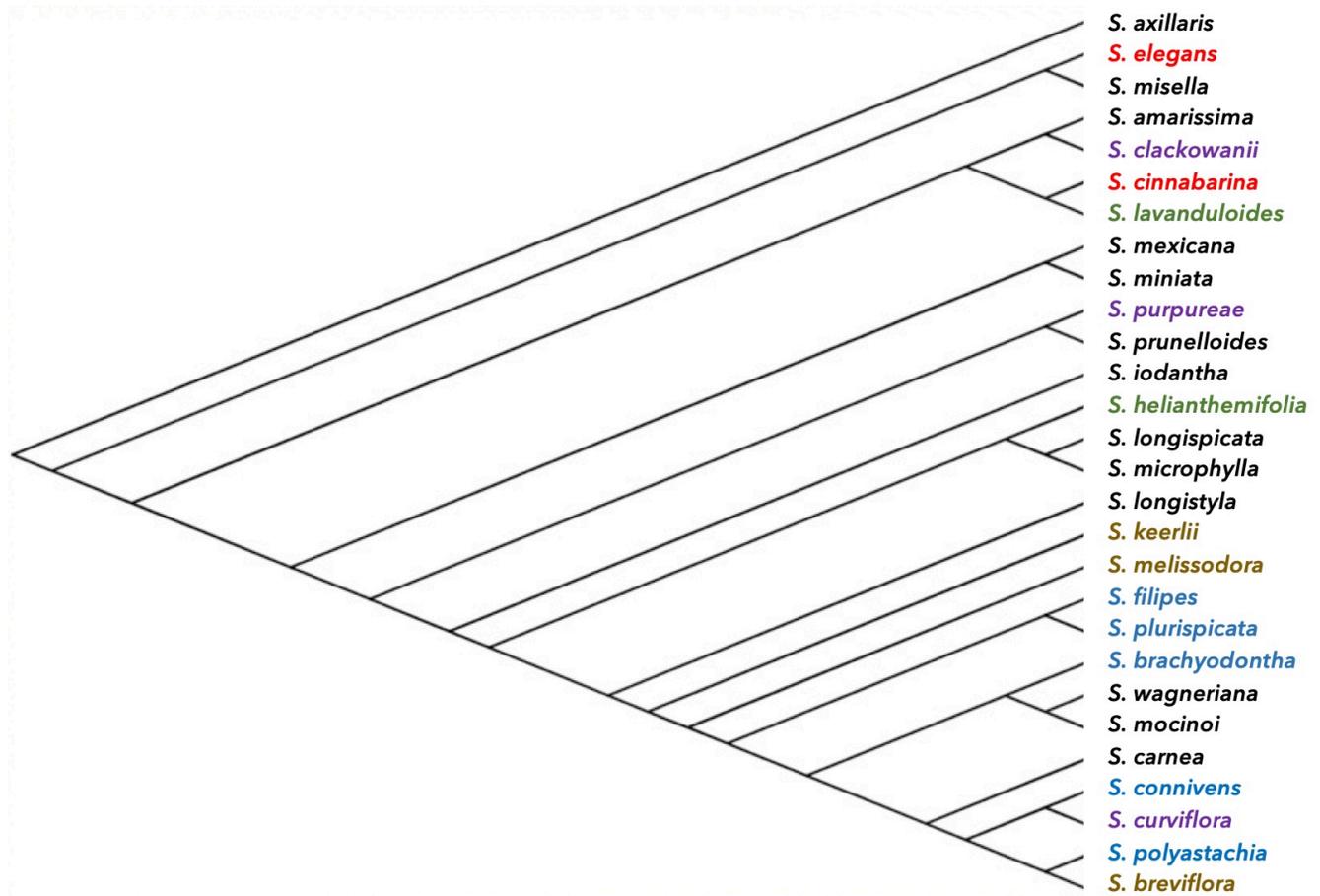


Figura 2. Dendrograma Neighbor Joining. Las especies clasificadas en la misma sección *sensu* Epling, están indicadas en azul (secc. *Polystachyae*), café (secc. *Scorodoniae*), verde (secc. *Lavanduloides*), morado (secc. *Purpureae*) y rojo (secc. *Incarinatae*).

es de extrañar en un género tan diverso, la misma tendencia se ha observado en otro de los géneros más diversos de Lamiaceae, *Hyptis* (Rudall, 1980).

Se presentan observaciones para 19 especies de *Salvia* subgénero *Calosphace* que no habían sido previamente estudiadas (**Figura 1**). Es de resaltar que las medidas en vista polar, ecuatorial, radio polar/ecuatorial y grosor de la capa de exina (**Tabla 2**) corresponden con mediciones previas de Moon y colaboradores (2008b) para *S. elegans*, *S. microphylla* y *S. polystachia*, indicando que el procedimiento utilizado aquí es robusto; en el caso de *S. amarissima* ellos reportan dos mediciones, ninguna de las cuales coincide con las aquí obtenidas, esto deberá revisarse con mayor detalle y muestreo. Respecto a la forma del grano, aquí reportamos para todos oblado y oblado esferoidal, mientras que Moon y colaboradores (2008b) incluyen en *S. elegans* (**Figura 1 H**), *S. microphylla*

(**Figura 1 K**) y *S. polystachia* (**Figura 1 R**) la forma prolado esferoidal e incluso suboblado en el caso de *S. microphylla*.

La información palinológica aquí expresada, abona al conocimiento del género. Adicionalmente para las especies clasificadas bajo una misma sección (*Incarinatae*, *Lavanduloides*, *Polystachyae*, *Purpureae* y *Scorodoniae*) no hay agrupamiento en el dendrograma. De estas secciones *sensu* Epling, solo la sección *Incarinatae* se ha demostrado que es monofilética (Jenks *et al.*, 2013; Fragosó-Martínez *et al.*, 2018; Lara-Cabrera *et al.*, 2021; Andrés Hernández *et al.*, 2021) y morfológicamente sencilla de identificar, aunque el polen no refleja la relación de parentesco entre sus especies *S. cinnabarina* (**Figura 1 G**) y *S. elegans* (**Figura 1 H**). De manera que la información palinológica con microscopio óptico no constituye un carácter de valor taxonómico para agrupar especies



clasificadas bajo la misma sección.

Siendo la palinología una de las herramientas más útiles en estudios sobre reconstrucción paleoambiental, monitoreo ecológico ó palinología forense (Ertman, 1945; Jackson y William, 2004) es necesario continuar evaluando y reportando la morfología del polen; ya que en el caso de géneros mega diversos como *Salvia* y el subgénero *Calosphace* no es suficiente con evaluar sólo el 10% de sus especies. Nuestros resultados sugieren que es necesario ser cuidadosos al intentar utilizar la morfología polínica como un carácter taxonómico pero es importante seguirlos reportando, con miras claro está, a que esta fuente de evidencia taxonómica sea de utilidad en otras especies del género.

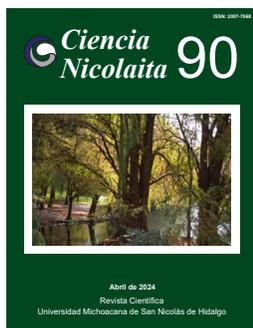
Agradecimientos

Este trabajo incluyendo parte de la colecta, ha involucrado numerosos tesis de los estudiantes del Laboratorio de Sistemática Molecular y el financiamiento de proyectos financiados por la Coordinación de la Investigación Científica (U.M.S.N.H.) [Estudio Micromorfológico de *Salvia* secc. *Polystachyae*, Filogenia y filogeografía de *Salvia* secc. *Polystachyae*; Filogenia de *Salvia* complejo *Polystachyae/Puepureae/Iodanthae*; Filogenia de complejos de especies de *Salvia* (Lamiaceae)]. Además de proyectos financiados por el CONAHCYT J-48731 y 319466.

Bibliografía

- Akta K, Özdemir C, Özkan M y Baran P (2020). Pollen Morphology of Some Turkish *Salvia* L. (Lamiaceae: Mentheae) Species. *Planta daninha* 38.
- Andrés Hernández L, Pérez García ML, Lara Cabrera SI (2021). La sección *Incarinatae* de *Salvia* subgénero *Calosphace* (Lamiaceae) En: Abraham Peñaloza P y Lara Cabrera S (Coordinadoras). Ciencias e Ingenierías: de la investigación a la innovación. pp 33- 42. ISBN 978-607-542-205-3
- Drew BT, González-Gallegos JG, Xiang C-L, Kriebel R, Drummond CP, Walker JB, Sytsma KJ (2017). *Salvia* united: The greatest good for the greatest number. *Taxon* 66: 133-145. DOI: 10.12705/661.7
- Emboden WA (1969). Pollen morphology of the genus *Salvia*, section *Audibertia*. *Pollen et spores* 6: 427-536.
- Epling CC (1939). A revision of *Salvia*, subgenus *Calosphace*. *Repertorium specierum novarum regni vegetabilis, Beiheftenov. Regni Vegetabilis* 110: 1-383.
- Epling CC (1940). Supplementary notes on American Labiatae. *Bulletin of the Torrey Botanical Club* 67(6): 509-534.
- Epling CC (1941). Supplementary notes on American Labiatae II. *Bulletin of the Torrey Botanical Club* 68: 552-568.
- Epling CC (1944). Supplementary notes on American Labiatae III. *Bulletin of the Torrey Botanical Club* 71: 484-497.
- Epling CC (1947). Supplementary notes on American Labiatae IV. *Bulletin of the Torrey Botanical Club* 74: 512-518.
- Epling CC (1951). Supplementary notes on American Labiatae V. *Brittonia* 7: 129-142.
- Epling CC y Jativa C (1964). Revisión del género *Satureja* en América del Sur. *Brittonia* 16: 393-416.
- Epling CC, Jativa C (1963). Supplementary notes on American Labiatae VIII. *Brittonia* 15: 393-416.
- Epling CC, Jativa C (1965). Supplementary notes on American Labiatae X. *Brittonia* 20: 295-312.
- Epling CC, Mathias ME (1957). Supplementary notes on American Labiatae VI. *Brittonia* 8: 297-313.
- Erdtman G (1945). Pollen morphology and plant taxonomy, IV, Labiatae, Verbenaceae and Avicenniaceae. *Svensk Botanisk Tidskrift* 39: 279-285.
- Erdtman G (1960). The acetolysis method, A revised description, *Svensk Botanisk Tidskrift* 54: 561-564.
- Fişne Y, Bagherpour S (2020). Contribution to the knowledge of the pollen morphology of the genus *Salvia* (Lamiaceae). *Phytotaxa* 428 (3): 228-240.
- Fragoso-Martínez I, Martínez-Gordillo M, Salazar GA, Sazatornil F, Jenks AA, García Peña MR, Barrera-Aveleida G, Benitez-Vieyra S, Magallón S, Cornejo-Tenorio G, Granados Mendoza C (2018). Phylogeny of the Neotropical sages (*Salvia* subg. *Calosphace*; Lamiaceae) and insights into pollinator and area shifts. *Plant Systematics and Evolution* 304: 43-55. <https://doi.org/10.1007/s00606-017-1445-4>
- Frodin DG (2004). History and concepts of big plant genera. *Taxon* 53 (3) 753-776.
- Kiliç FM (2021). Pollen morphological investigations of *Salvia* L. in southeastern Turkey and its taxonomic implication. *Bangladesh Journal of Plant Taxonomy* 28(2): 395-403.

- Hammer Ø, Harper DAR, Ryan PD (2001). PAST: Paleontological Statistics software package for education and data analysis. *Palaentologica Electrónica* 4(1): 9pp.
- Hassan N, Osman AK, El Garf IA (2009). Pollen types of the Egyptian species of the genus *Salvia* (Lamiaceae). *Feddes Repertorium* 120 (7-8): 394-404. doi:10.1002/fedr.200911118
- Henderson DM, Prentice H, Hedge IC (1968). Pollen Morphology of *Salvia* and Some Related Genera. *Grana Palynologica* 8 (1):70-85. doi:10.1080/00173136809427461
- Jackson ST, Williams JW (2004). Modern analogs in quaternary paleoecology: here today, gone yesterday, gone tomorrow?. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 32:495-537.
- Jenks AA, Walker JB, Kim SC (2013). Phylogeny of New World *Salvia* subgenus *Calosphace* (Lamiaceae) based on cpDNA (*psbA-trnH*) and nrDNA (ITS) sequence data. *Journal of Plant Research* 126: 483-496.
- Lara-Cabrera SI, Pérez-García ML, Maya-Lastra CA, Montero-Castro JC, Godden GT, Cibrián-Jaramillo A, Fisher AE, Porter JM (2021). Phylogenomics of *Salvia* L. subgenus *Calosphace* (Lamiaceae). *Frontiers in Plant Science* 12: 1-17. doi:10.3389/fpls.2021.725900.
- Levi A, Harris KR, Wechter WP, Kousik CS, Thies JA (2010). DNA markers and pollen morphology reveal that *Praecitrullus fistulosus* is more closely related to *Benincasa hispida* than to *Citrullus* spp. *Genet Resour Crop Evol* 57: 1191-1205. doi:10.1007/s10722-010-9559-3.
- Moon HK, Vinckier S, Smets E, Huysmans S (2008a). Comparative pollen morphology and ultrastructure of Menthae subtribe Nepetinae (Lamiaceae). *Review of Paleobotany and palinology* 149: 174-186.
- Moon HK, Vinckier S, Walker JB, Smets E, Huysmans S (2008b). A search for phylogenetically informative pollen characters in the subtribe Salviinae (Menthae: Lamiaceae). *International Journal of Plant Sciences* 169(3): 455-471.
- Orsini G, Rinaldi M, Velázquez D (2006). Estudio palinológico de los géneros *Hyptis* y *Salvia* (Lamiaceae) en el Parque Nacional El Avila, Venezuela. *Ernstia* 16(1): 1-30.
- Özler H, Pehlivan S, Kahraman A, Doğan M, Celep F, Başer B, Yavru A, Bagherpour S (2011). Pollen morphology of the genus *Salvia* L. (Lamiaceae) in Turkey. *Flora* 206: 316-327.
- Özler H, Pehlivan S, Celep F, Doğan M, Kahraman A, Fişne A, Baser B, Bagherpour S (2013). Pollen morphology of Hymenosphace and Aethiopsis sections of the genus *Salvia* (Lamiaceae) in Turkey. *Turkish Journal of Botany* 37(6): 1070-1084. doi:10.3906/bot-1209-50.
- Pozhidaev A (1992). The origin of three- and six colpate pollen grains in the Lamiaceae. *Grana* 31(1): 49-52.
- Raj B (1983). A contribution to the pollen morphology of Verbenaceae. *Review of Palaeobotany and Palynology* 39: 343-422.
- Ramamoorthy TP, Elliott M (1998). Lamiaceae de México, diversidad, distribución, endemismo y evolución P 501-526, En: Ramamoorthy TP, Bye R, Lot A, Fa J (eds), Diversidad biológica de México, orígenes y distribución, Instituto de Biología, UNAM.México.
- Rudall P (1980). Pollen morphology in the subtribe Hyptidinae (Lamiaceae). *Kew bulletin* 35(3): 452-458
- Salim MA, Mohamed AH, Tantawy ME (2016). Morphological study of some taxa of Ranunculaceae Juss in Egypt (anatomy and pollen grains). *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences* 5: 310-319.
- Trudel MC, Morton JK (1992). Pollen morphology and taxonomy in North American Lamiaceae. *Canadian Journal of Botany* 70: 975-995.
- Wagstaff SJ (1992). A phylogenetic interpretation of pollen morphology in tribe Menthae (Labiatae). En: Harley RM, Reynolds T (Eds.) *Advances in Labiatae science*, Royal Botanic Gardens, Kew. pp. 113-124



Ciencia Nicolaita 90

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Cálculo de la conductividad hidráulica a partir de un estudio litológico en el Valle de Aguascalientes, México y comparativa del rendimiento del modelo subterráneo con su uso

Calculation of hydraulic conductivity from a lithological study in the Aguascalientes Valley, Mexico and comparison of the performance of the underground model with its use

Roxana Nichte-Ha Hughes Lomelin, Marco Antonio Martínez Cinco*, Sonia Tatiana Sánchez Quispe, Joel Hernández Bedolla

Para citar este artículo: Hughes Lomelin RN, Martínez Cinco MA, Sánchez Quispe ST, y Hernández Bedolla J (2024). Cálculo de la conductividad hidráulica a partir de un estudio litológico en el Valle de Aguascalientes, México y comparativa del rendimiento del modelo subterráneo con su uso. *Ciencia Nicolaita* 90: 17-28.
DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi90.780>

Historial del artículo



Recibido: 8 de diciembre de 2023
Aceptado: 28 de febrero de 2024
Publicado en línea: abril 2024



Ver material suplementario



***Correspondencia de autor:** marco.martinez@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Cálculo de la conductividad hidráulica a partir de un estudio litológico en el Valle de Aguascalientes, México y comparativa del rendimiento del modelo subterráneo con su uso

Calculation of hydraulic conductivity from a lithological study in the Aguascalientes Valley, Mexico and comparison of the performance of the underground model with its use

Roxana Nichte-Ha Hughes-Lomelín^a, Marco Antonio Martínez Cinco^{b*}, Sonia Tatiana Sánchez Quispe^c, Joel Hernández Bedolla^d

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, ^a2147703@umich.mx, ORCID: 0009-0000-0406-0826; ^bmarco.martinez@umich.mx, ORCID: 0000-0001-8931-4169; ^cquispe@umich.mx, ORCID: 0000-0002-8394-495X; ^djoel.hernandez@umich.mx, ORCID: 0000-0002-8797-518X

Resumen

En este trabajo se comparan los rendimientos de los modelos subterráneos del acuífero Valle de Aguascalientes, México realizados en MODFLOW utilizando conductividades hidráulicas (K_h) equivalentes, determinadas a partir de estudios litológicos, y K_h supuestas. Se configuró y se calibró el modelo, y se calcularon y compararon los índices de calidad de ajuste para cada simulación, así como los niveles piezométricos del acuífero. Se encontró que el rendimiento global del modelo utilizando K_h equivalentes es mejor que el modelo utilizando K_h supuestas, tanto en la distribución espacial de flujos como en los índices, por lo que invertir trabajo previo en la determinación de parámetros da como resultado modelos más robustos.

Palabras clave: Conductividad hidráulica, aguas subterráneas, MODFLOW, Aguascalientes



Abstract

In this work, two groundwater MODFLOW models of the Aguascalientes Valley aquifer in Mexico, one using equivalent hydraulic conductivities (K_h) based on lithologic reports, and another using assumed K_h , are compared. The models were configured and calibrated, and the model performance evaluation statistics were obtained for each simulation and compared. A visual comparison of head levels in the aquifer was carried out as well. The global performance of the model using equivalent K_h was better than the model using assumed K_h , both in the spatial distribution of flows and in the evaluation statistics; therefore, investing previous work in determining parameters results in more robust models.

Keywords: Hydraulic conductivity, groundwater, MODFLOW, Aguascalientes

Introducción

El agua subterránea es una fuente esencial de agua para consumo humano debido a su calidad (generalmente buena) y frecuencia de ocurrencia. Es necesario evaluar los planes propuestos de gestión de este recurso y comprender cómo diferentes fenómenos pueden afectar su calidad y cantidad, por ejemplo, la extracción intensiva de acuíferos. Esta evaluación requiere el entendimiento del comportamiento de los sistemas hidrogeológicos, además de la cuantificación de su flujo, para poder observar la respuesta del sistema ante cambios en diferentes factores hidrológicos e hidrogeológicos (Ehtiat *et al.*, 2018). Para esto, es factible apoyarse en el modelado matemático.

El modelado matemático es una herramienta versátil y de suma utilidad en el estudio de la hidrogeología, dado que permite la manipulación de ciertos parámetros para observar su impacto en diferentes fenómenos de interés y ayuda a reducir la incertidumbre al tomar decisiones en la gestión integral de los recursos hídricos.

Uno de los modelos matemáticos utilizados más comúnmente para la simulación de flujo subterráneo es el MODFLOW (Harbaugh, 2005) debido a su facilidad de comprensión y modificación, y su sencillez de uso, además de su bajo impacto en recursos computacionales. MODFLOW es un modelo modular (sus funciones se encuentran en “paquetes”), y aproxima las soluciones a la ecuación diferencial parcial que describe el movimiento tridimensional de un flujo de densidad constante a través de un medio poroso usando el método de diferencias finitas, a partir de una malla tridimensional conformada por celdas.

Un parámetro indispensable en el modelo subterráneo es la conductividad hidráulica, que indica en general la capacidad de un medio para transmitir agua. Este parámetro depende en gran medida del material del cual está conformado el medio que contiene el agua, pero es difícil de cuantificar sin estudios litográficos que describan la composición geológica del acuífero en cuestión. En estos medios estratificados, se produce el flujo a través de varias capas distintas. No obstante, para simplificar el sistema, se recurre a determinar el flujo global en el conjunto de capas, por lo que se considera que el sistema se conforma por una capa única homogénea, en la cual se asigna una conductividad hidráulica equivalente (Sánchez San Román, 2022). Sin embargo, en ocasiones es necesario realizar supuestos para el valor de este parámetro por falta de información.

El objetivo del presente trabajo es comparar los rendimientos de los modelos generados en MODFLOW del acuífero Valle de Aguascalientes, uno utilizando conductividades hidráulicas horizontales equivalentes obtenidas a partir de perfiles litológicos disponibles de la zona, y otro suponiendo una conductividad hidráulica horizontal constante basado en el informe de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2020), para verificar el valor de invertir trabajo previo en la determinación de este parámetro.

Materiales y métodos

Descripción de la zona de estudio

El Valle de Aguascalientes es uno de los 653 acuíferos administrativos de México, ubicado en el

estado de Aguascalientes (**Figura 1**). Este acuífero provee hasta el 94% de la demanda total de agua potable del estado (Hernández-Marín *et al.*, 2018), ya que el clima semiárido de la región resulta en pocas fuentes naturales de agua superficial.

En el Valle de Aguascalientes se ubica la ciudad de Aguascalientes, capital del estado, además de varios centros urbanos importantes. El estado tiene una población de cerca de 1.5 millones de habitantes, de los cuales aproximadamente el 60% vive en la capital (INEGI, 2021). El 95% de las actividades económicas del estado se concentran en el Valle (Sainz-Santamaria y Martínez-Cruz, 2019), entre las cuales se encuentra la agricultura y la industria automotriz.

El sistema hidrogeológico se define como libre, pero exhibe comportamientos hidráulicos

propios de semiconfinamiento en algunas zonas (Hernández-Marín *et al.*, 2018). Tiene una extensión de 3129 km². El flujo predominante es de norte a sur, confirmado por datos de la CONAGUA (2020). Desafortunadamente, los niveles de agua en el acuífero han ido decreciendo considerablemente en las últimas décadas, dada la extracción intensiva requerida para solventar la demanda creciente de recursos hídricos para usos agrícolas, municipales e industriales (Pacheco-Martínez *et al.*, 2013).

Por la ubicación de datos disponibles para medición de niveles piezométricos, fue necesario realizar una discretización del área del acuífero, delimitándolo a una sección en el Graben de Aguascalientes (**Figura 1**). Esta discretización está basada en trabajos realizados en el acuífero Valle de Aguascalientes (Guerrero Martínez 2016,

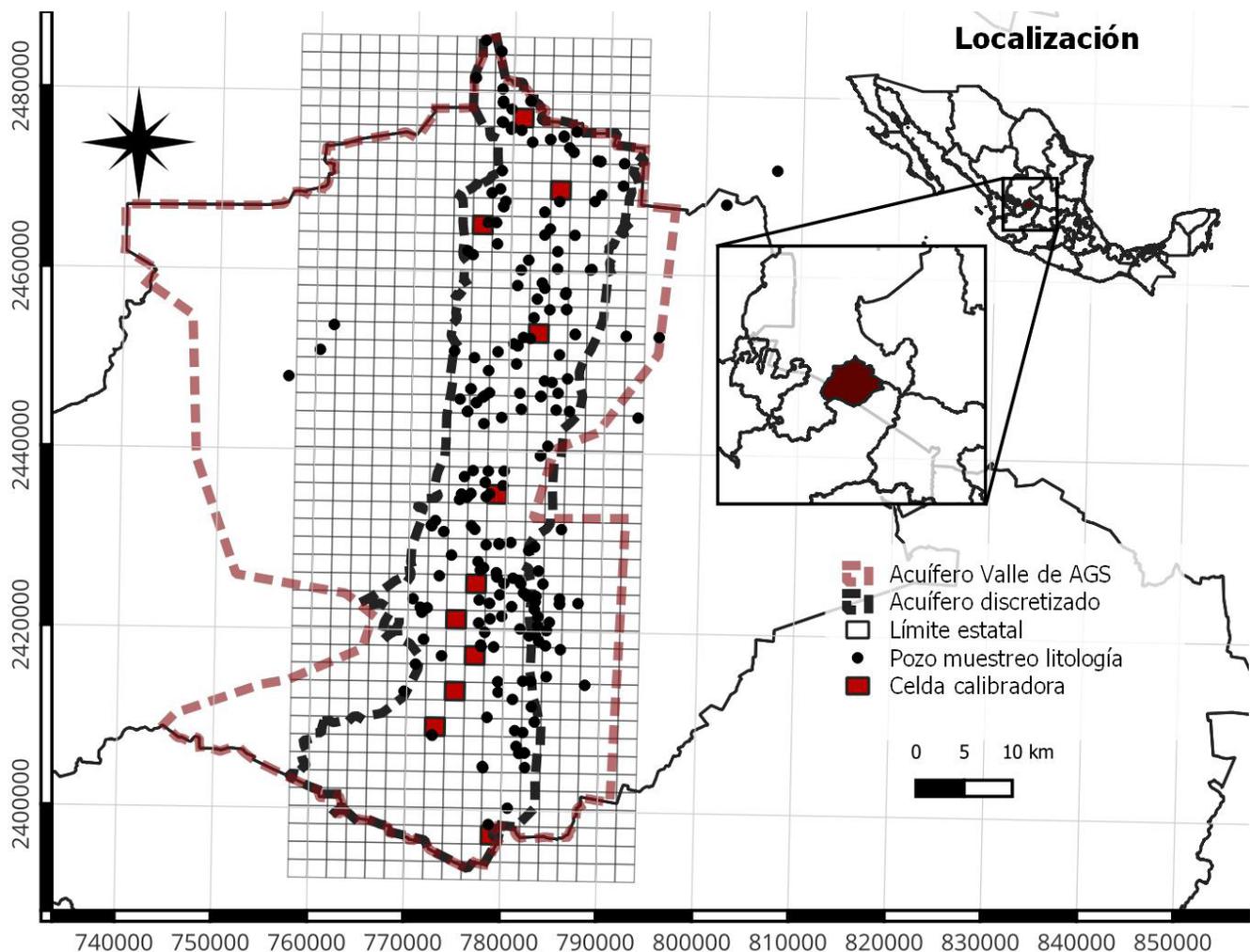


Figura 1. Ubicación del acuífero Valle de Aguascalientes (coordenadas UTM 13N en m). Se señalan también la ubicación de los pozos con información litológica y las celdas calibradoras con respecto a la cuadrícula utilizada en la configuración del modelo.

2020; CONAGUA 2020).

La metodología seguida en el presente trabajo se resume en la **Figura 2**.

Configuración del modelo subterráneo

La geometría del modelo realizado en MODFLOW con el programa de ModelMuse (Winston, 2022) se compone de una malla de 828 celdas de 2 km x 2 km, arregladas en 46 renglones x 18 columnas. De estas 828 celdas, 335 se consideraron como “celdas activas”; esto le indica a MODFLOW por dónde pasa el flujo subterráneo (**Figura 3a**).

El modelo del acuífero tiene un espesor variable, de 300 m al poniente a 450 m al oriente, conforme lo encontrado en la literatura (Pacheco-Martínez *et al.*, 2013), y se consideró como una sola capa homogénea.

El modelo se simuló en estado transitorio, con unidad de tiempo en años, durante un periodo de 29 años, empezando en 1985 y terminando en 2014.

Se asignó un valor específico para cada parámetro hidrodinámico requerido por el modelo a cada celda activa que lo conforma. Estos parámetros corresponden a:

- La elevación del terreno natural (**Figura 3b**), obtenida del procesamiento del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de la región (INEGI, 2013).

- El rendimiento específico, distribuido en dos zonas (**Figura 3c**). Se basó en el valor oficial propuesto por la CONAGUA (2020) (0.16), y se utilizó como parámetro de calibración.
- El coeficiente de almacenamiento, repartido en tres zonas (**Figura 3d**). Al igual que el rendimiento específico, se consideraron como parámetros de calibración del modelo.
- El nivel piezométrico inicial, considerando los del año 1985 (datos sin publicar de la CONAGUA).

El modelo también requiere de datos de entrada que representen los flujos naturales y/o antropogénicas del agua subterránea, como son la recarga proveniente de precipitación (recarga vertical), flujos horizontales subterráneos, y extracción de pozos. En el modelo se consideró un cambio anual en las recargas verticales (**Figura 4a**), obtenidas de las infiltraciones del modelo de precipitación-escurrimiento HBV (Hydrologiska Bryans Vattenbalsavdelning; Bergström, 1976) a escala mensual realizada para la zona, y en la extracción de pozos (**Figura 4b**), manteniendo un flujo horizontal subterráneo constante (**Figura 4c**).

El balance de entradas y salidas de agua subterránea al acuífero, en términos generales, es de:

- Recarga vertical por precipitación: en prome-

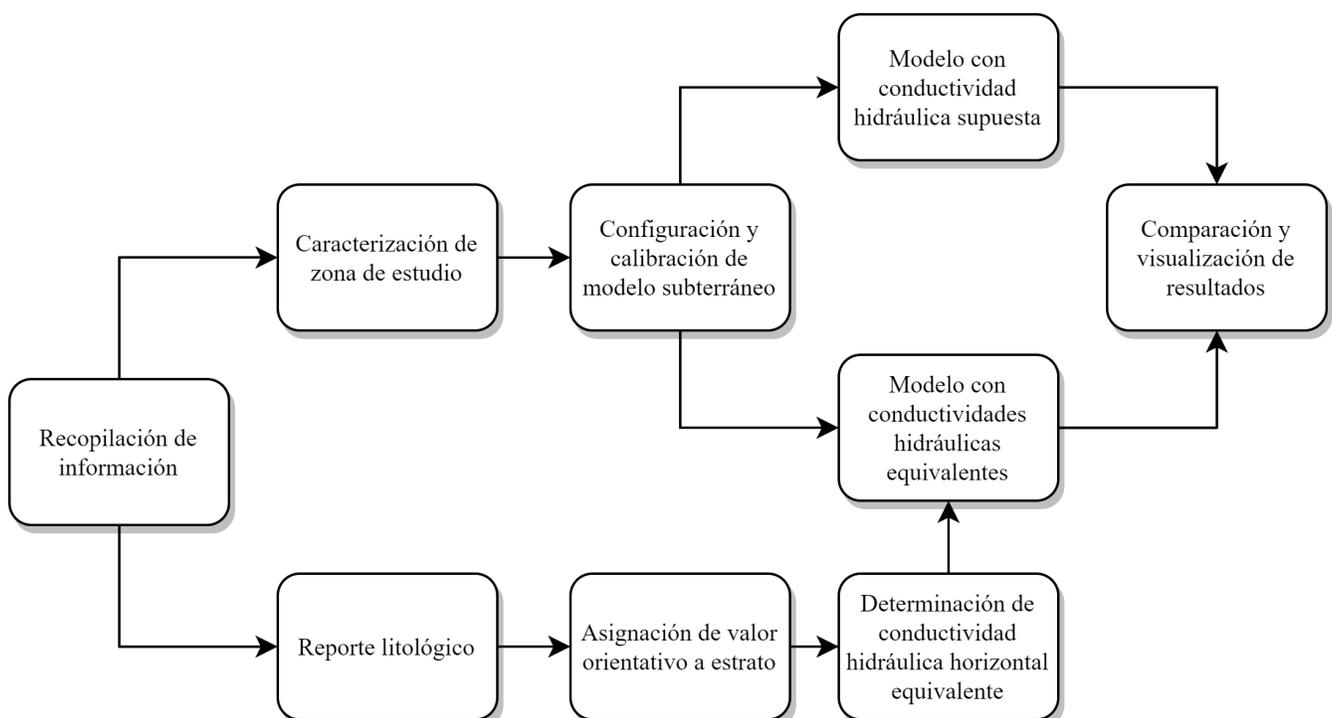


Figura 2. Metodología general del trabajo.

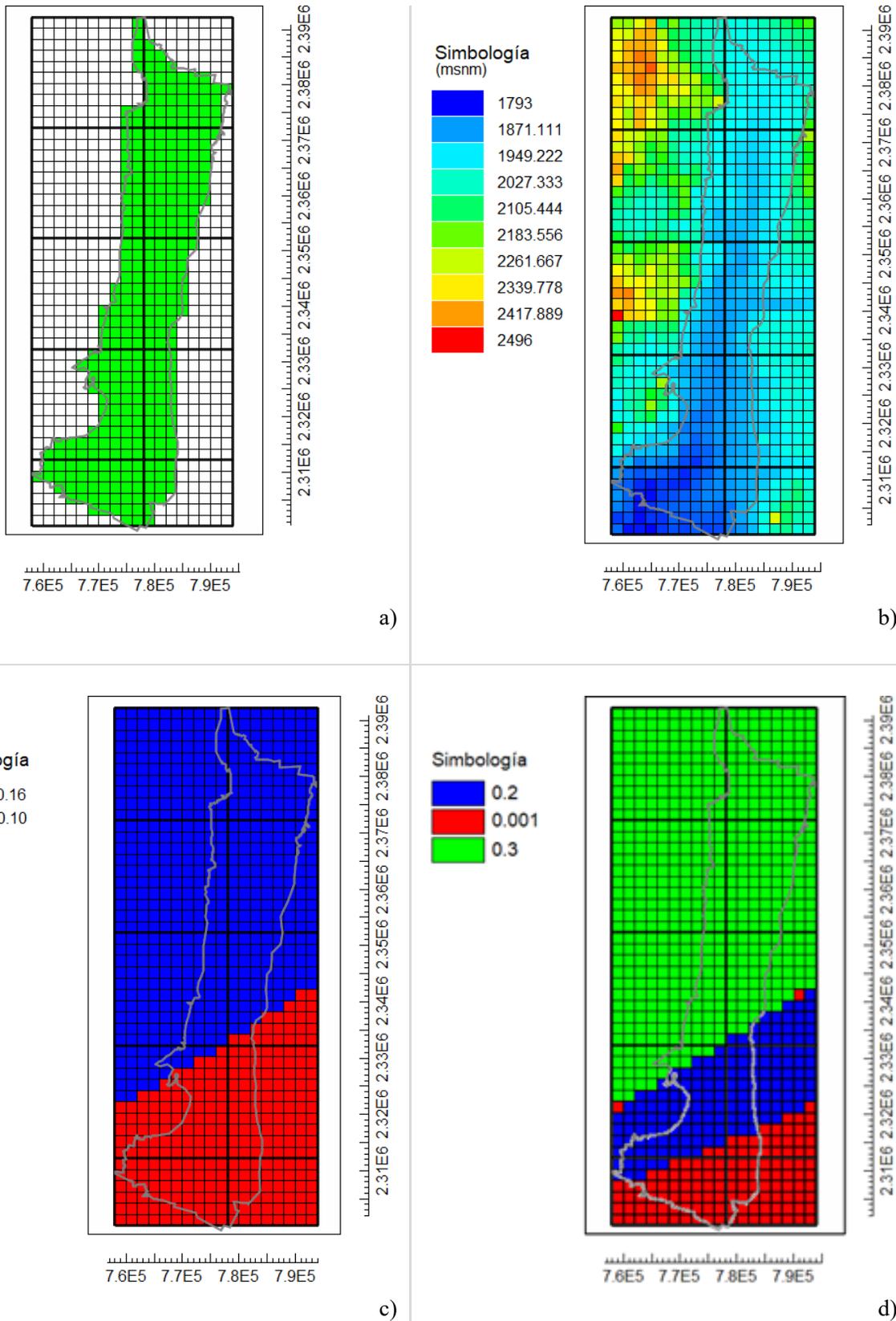


Figura 3. Configuración del modelo en MODFLOW y asignación de parámetros (calibrados), donde a) celdas activas del modelo; b) elevación natural del terreno; c) el rendimiento específico; y d) el coeficiente de almacenamiento. Fuente(s): Modificado de INEGI (2013) y CONAGUA (2020). Visualización gráfica en ModelMuse.

dio, 0.85 ± 0.98 mm/año (2.36 ± 2.73 hm³/año) en la zona norte y 2.25 ± 2.35 mm/año (1.80 ± 1.88 hm³/año) en la zona sur.

- Extracción de pozos: 427 hm³/año (CONAGUA, 2021)
- Recarga por flujo horizontal: 83.10 hm³/año (CONAGUA, 2020)

Determinación de conductividades hidráulicas horizontales equivalentes

Se basó en un reporte litológico (datos sin publicar) proporcionado por la Universidad Autónoma de Aguascalientes. En él, se especifica el número de pozo, la latitud y la longitud a las que se ubica, y la elevación del brocal de este. Contiene la descripción litológica de todos los estratos que conforman la zona en donde se encuentra el pozo, indicando el

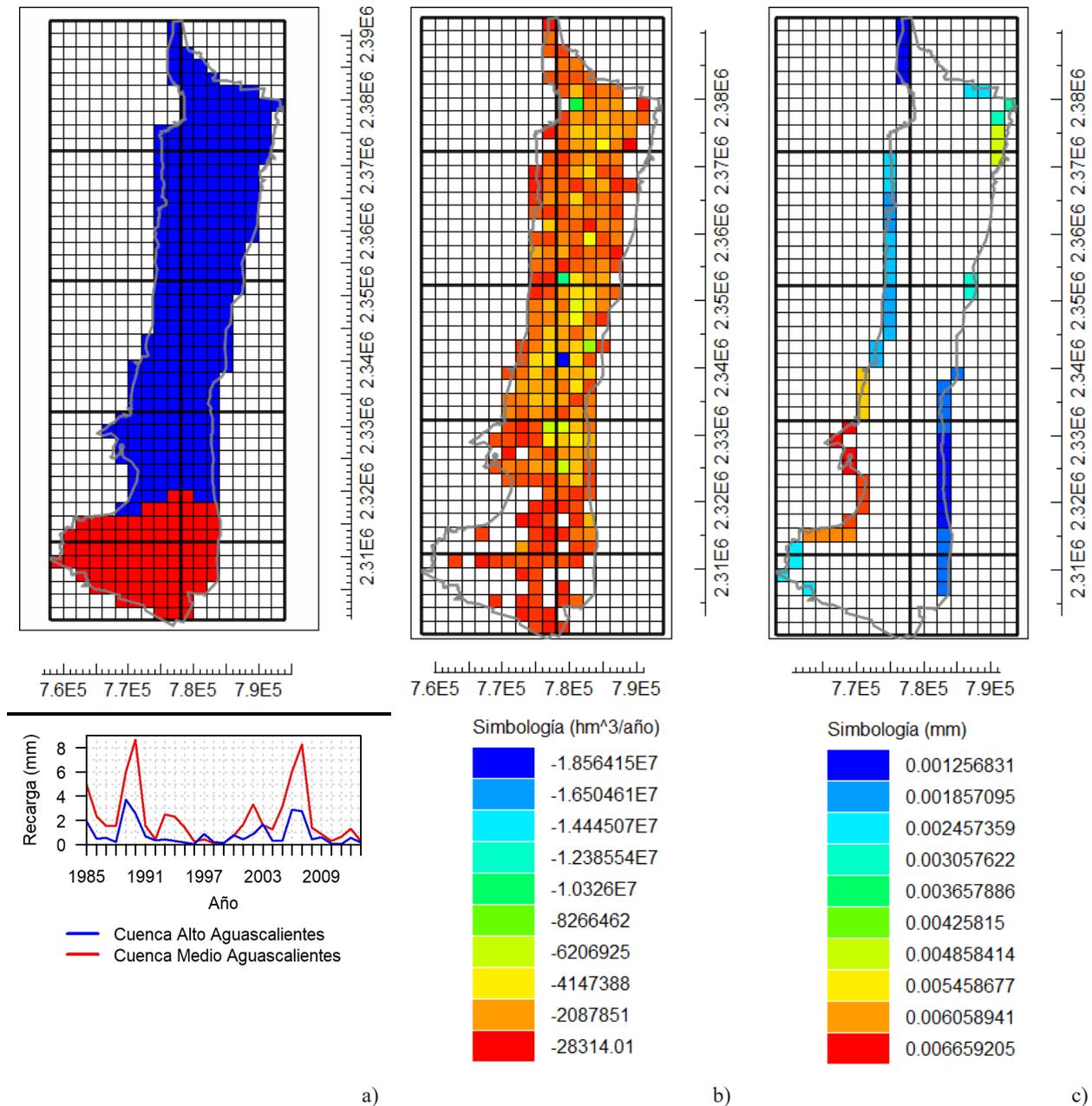


Figura 4. Datos de flujos de entrada y salida del modelo. a) Distribución de la recarga vertical. b) Extracciones de pozos para el año 2014. c) Distribución de la recarga por flujo subterráneo horizontal. Fuente(s): Modificado de CONAGUA (2020, 2021). Visualización gráfica en ModelMuse.

espesor de cada estrato y la profundidad a la que se encuentra. La ubicación de los pozos de muestreo contenidas en el reporte se muestra en la **Figura 1**.

A cada estrato se le asignó un valor con base en los valores orientativos de conductividades hidráulicas para diferentes medios porosos propuestos por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2002).

Al considerar el acuífero como una sola capa homogénea, fue necesario encontrar una conductividad hidráulica equivalente, la cual es un valor global asignada al conjunto de capas para considerarlas como una unidad (Sánchez San Román, 2022). Para determinar la conductividad hidráulica equivalente horizontal, se supone que el flujo es paralelo a las capas, y se calcula con la ecuación (1).

$$K_{eq} = \frac{\sum K_i \cdot b_i}{B} \tag{1}$$

donde:

K_i = conductividad hidráulica de cada una de las capas

b_i = espesor de cada una de las capas

B = espesor total, suma de todos los espesores

Aplicando la ecuación (1) a cada pozo de muestreo litológico, se obtuvo un único valor de conductividad hidráulica horizontal equivalente; a partir de estos datos, se realizó una interpolación mediante Kriging para obtener una distribución espacial de las conductividades hidráulicas.

Calibración del modelo subterráneo

El modelo se inicializó y se calibró utilizando los valores de conductividad hidráulica equivalentes calculados. Se asignaron celdas “calibradoras” (**Figura 1**), eligiéndolas con base a su cercanía a una determinada sección de corte, y donde se ubicaban los pozos de observación con más datos de niveles piezométricos. En estas celdas, se compararon los niveles simulados por MODFLOW contra los observados, y se fueron ajustando los parámetros de coeficiente de almacenamiento y rendimiento específico hasta obtener índices de calidad de ajuste de modelo satisfactorios con base en la **Tabla 1**.

Se calcularon estos índices para cada año, tanto para las series obtenidas en las celdas calibradoras,

como en las series obtenidas al realizar un corte longitudinal, y se promediaron para obtener valores globales.

Se volvió a simular el modelo calibrado, pero ahora con un valor uniforme de conductividad hidráulica de 730 m/año; valor indicado en el informe de la CONAGUA (2020), y se calcularon los mismos índices y se promediaron para poder comparar estos contra los obtenidos al utilizar las conductividades hidráulicas equivalentes.

Resultados

La distribución espacial de las conductividades hidráulicas horizontales equivalentes, resultado de aplicar la interpolación Kriging, se muestra en la **Figura 5**.

En la **Tabla 2**, se exponen los valores para los índices de calidad de ajuste promediados, tanto para las celdas calibradoras como para el corte

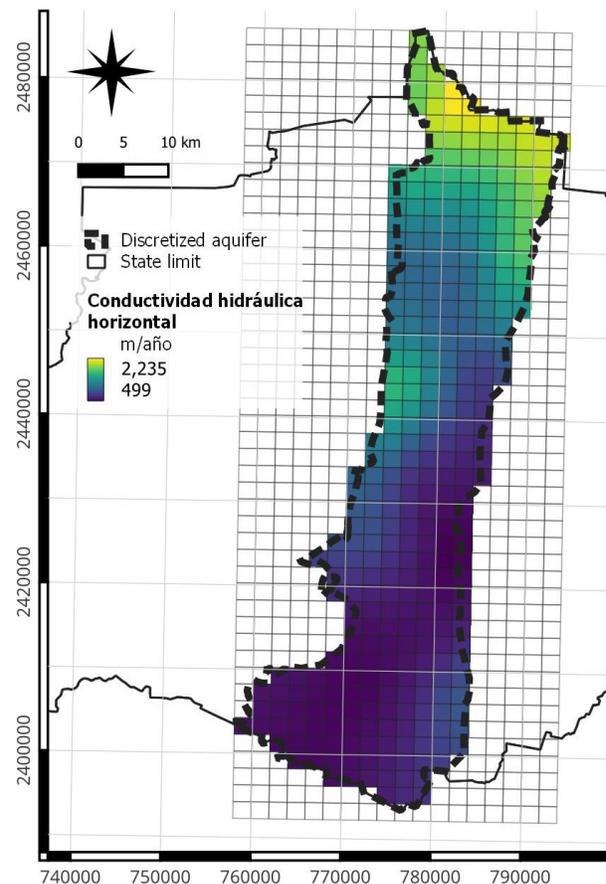


Figura 5. Distribución y valores de conductividades hidráulicas horizontales equivalentes (resolución 2 km x 2 km, coordenadas UTM 13N en m).

Tabla 1. Índices de calidad de ajuste utilizados en la calibración del modelo.

Índice	Descripción	Valor buscado	Unidad	Referencia
MAE	<i>Error absoluto medio.</i> Representa la media de errores absolutos entre datos simulados y observados.	0	La misma que la serie evaluada	(Willmott y Matsuura, 2005)
RMSE	<i>Raíz del error medio cuadrado.</i> Similar al MAE, pero al elevar los errores al cuadrado, permite que los errores de mayor magnitud tengan mayor influencia en el total.	0	La misma que la serie evaluada	(Willmott y Matsuura, 2005)
PE	<i>Porcentaje de error.</i> Indica el porcentaje de variabilidad entre la serie simulada y la observada.	0	%	(Moriassi et al., 2015)
NSE	<i>Eficiencia de Nash-Sutcliffe.</i> Compara la magnitud relativa de la varianza residual simulada con la varianza de la serie observada, e indica qué tanto se ajusta la gráfica de datos observados vs simulados a la línea 1:1.	≥ 0.75	adim	(Moriassi et al., 2015)
lnNSE	Equivalente a la NSE, normaliza los datos con ln, permitiendo que los valores bajos tengan mayor impacto en el total.	≥ 0.75	adim	(Moriassi et al., 2015)
R	<i>Correlación de Pearson.</i> Muestra la similitud que se tiene entre la serie simulada y la observada.	≥ 0.90	adim	(Moriassi et al., 2015)
Simetría	Permite evaluar el comportamiento de la serie simulada con respecto a la serie observada.	≥ 0.75	adim	(Moriassi et al., 2015)

longitudinal A-A'. Este corte se señala en la **Figura 6**, donde también se observa el comportamiento de los niveles piezométricos observados y simulados para el año 2007. El corte se demuestra en la **Figura 7**.

En la **Figura 8**, se puede observar el ajuste a la línea 1:1 que se presenta al graficar los datos observados contra los simulados para diferentes años en las celdas calibradoras al modelar utilizando conductividades hidráulicas equivalentes y utilizando una supuesta.

Discusión

Se observa que simular el acuífero usando conductividades hidráulicas equivalentes mejora la distri-

bución de los niveles piezométricos (**Figura 6b**), permitiendo que éstos se comporten de manera similar a lo medido (**Figura 6a**); en cambio, utilizar conductividades hidráulicas supuestas, aun siendo de fuentes fidedignas, resulta en una peor distribución de los niveles (**Figura 6c**) con respecto a los medidos.

Esto se aprecia en el corte de la **Figura 7**; los niveles piezométricos simulados con conductividades equivalentes se ajustan de mejor manera al nivel observado, ya que el nivel simulado con conductividades supuestas sobreestima los valores bajos.

Observando los valores de los índices de calidad de ajuste, las dos propuestas de modelo cumplen con los valores esperados, y se pueden denominar modelos "muy buenos". Sin embargo, se aprecia que, al simular con conductividades

Tabla 2. Índices de calidad de ajuste para los modelos.

		MAE (m)	RMSE (m)	PE (%)	NSE (adim)	lnNSE (adim)	R (adim)	Simetría (adim)
K_{eq}	Corte A-A'	9.515 ± 9.968	18.530 ± 3.102	0.677 ± 0.280	0.828 ± 0.060	0.827 ± 0.062	0.959 ± 0.034	0.960 ± 0.015
	Celdas	7.485 ± 6.133	20.548 ± 4.344	0.478 ± 0.204	0.872 ± 0.047	0.873 ± 0.046	0.948 ± 0.026	0.966 ± 0.014
K_{sup}	Corte A-A'	15.585 ± 8.776	21.049 ± 3.804	0.863 ± 0.486	0.783 ± 0.069	0.781 ± 0.070	0.962 ± 0.028	0.946 ± 0.016
	Celdas	9.721 ± 6.032	21.678 ± 4.710	0.547 ± 0.309	0.862 ± 0.046	0.861 ± 0.045	0.947 ± 0.020	0.961 ± 0.015

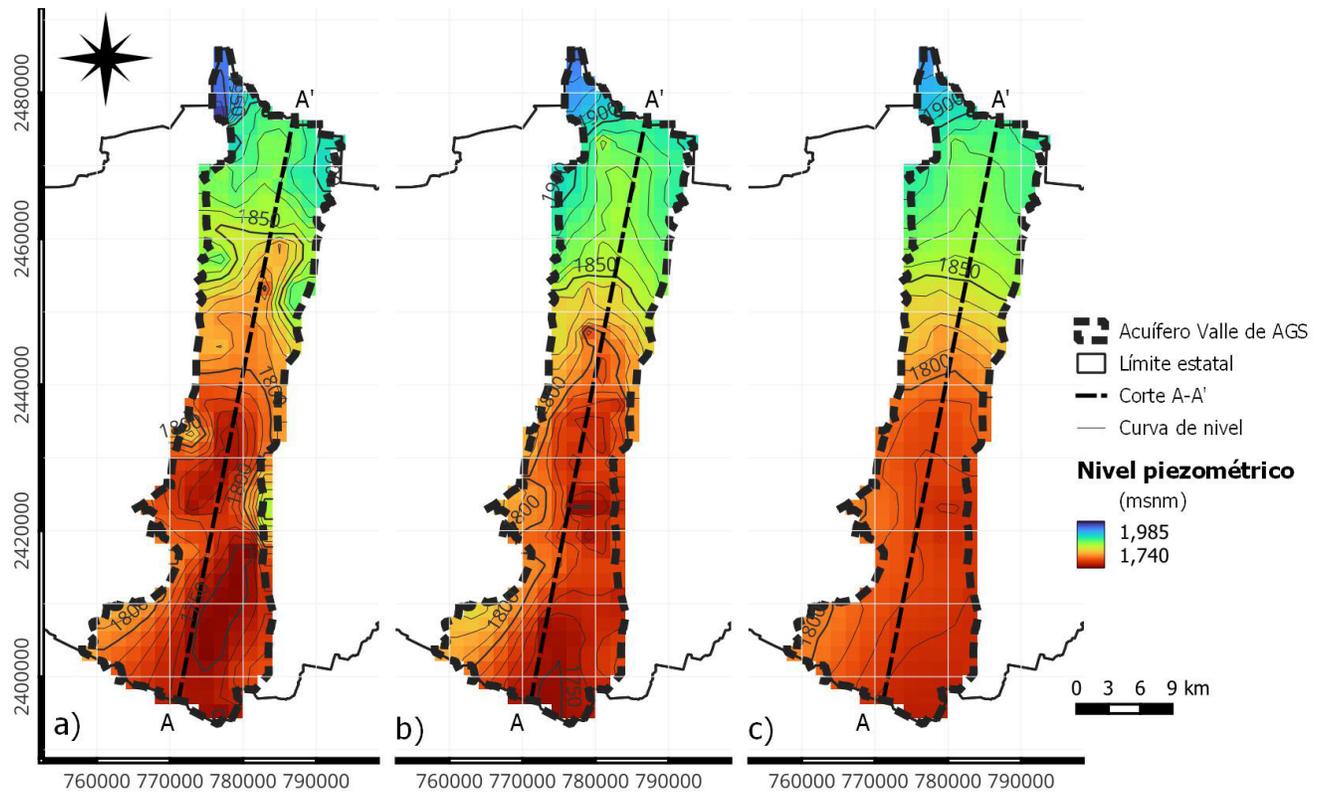


Figura 6. Niveles piezométricos para el año 2007 (resolución 2 km 2 km, coordenadas UTM 13N en m). a) Niveles medidos (observados). B) Niveles simulados con conductividades hidráulicas equivalentes. C) Niveles simulados con conductividades hidráulicas supuestas. Fuente(s): Elaboración propia a partir de datos de la CONAGUA (datos sin publicar) y el modelo en MODFLOW realizado.

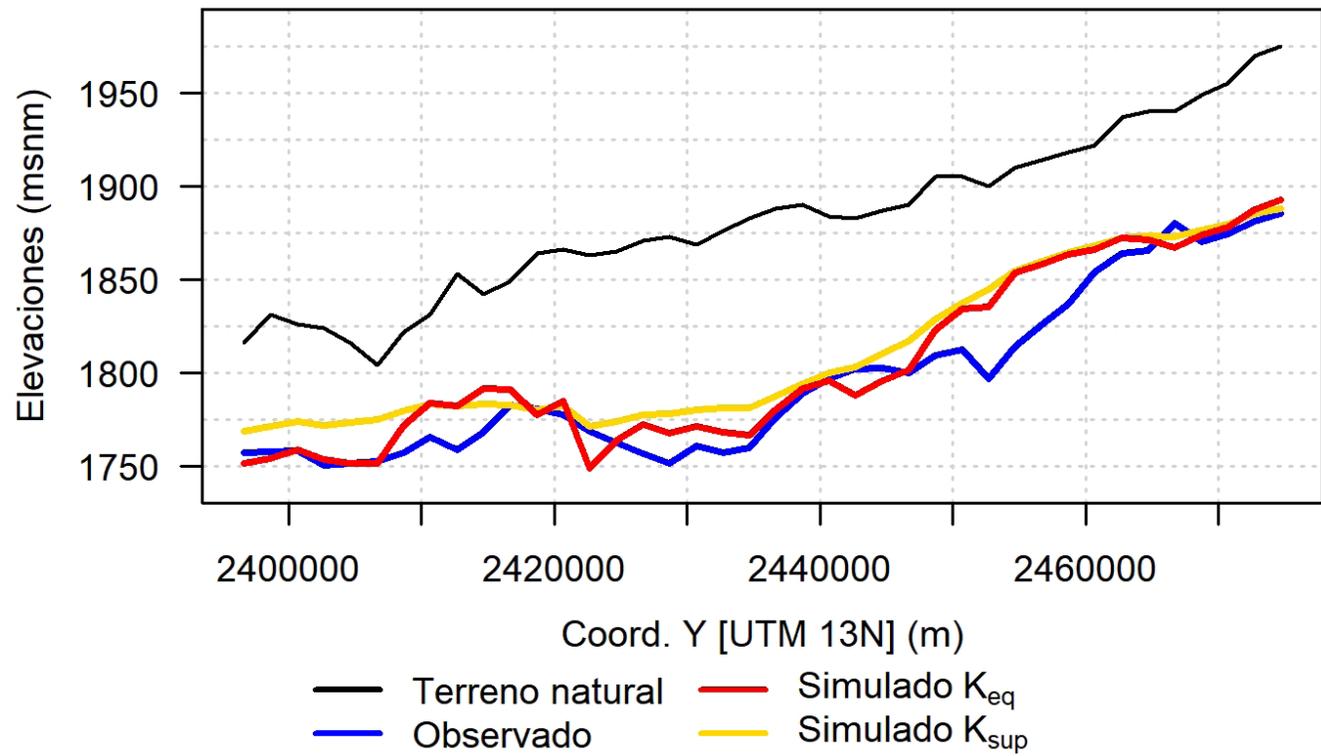


Figura 7. Sección longitudinal del acuífero y los niveles piezométricos correspondientes (corte A-A').

hidráulicas equivalentes, se logran mejores valores en los índices, comparando un porcentaje de error en las celdas calibradoras de 0.478% utilizando conductividades equivalentes contra 0.547% utilizando conductividades supuestas (una mejora de 0.069%) y un porcentaje de error en la sección de corte de 0.677% utilizando conductividades equivalentes contra 0.863% utilizando conductividades supuestas (una mejora de 0.186%). Además, al tomar en cuenta la distribución espacial de los niveles, se puede decir que su rendimiento global es mejor que al simular con conductividades supuestas. Se aprecia también, en las gráficas de la **Figura 8**, que el ajuste a la línea 1:1 del modelo obtenido con conductividades hidráulicas equivalentes es ligeramente mejor, aparte de mostrar una menor dispersión en los datos en general.

Conclusiones

El modelo obtenido utilizando conductividades hidráulicas horizontales equivalentes demostró tener un mejor rendimiento que utilizar conductividades supuestas, aun cuando éstas hayan sido fundamentadas en el informe oficial de la CONAGUA (2020).

Cuando se tenga acceso a datos que describan la litología de la zona de estudio, es recomendable utilizar valores de conductividades hidráulicas horizontales que correspondan a la composición litológica, ya que permite obtener un mejor ajuste del modelo. Sin embargo, también se puede obtener un buen modelo utilizando valores supuestos, en el caso de no contar con este tipo de información, pero se deberán tener consideraciones extras al momento de calibrar (e.g., zonificar el parámetro de conductividad hidráulica) y requerirá de mayor tiempo de calibración.

Invertir trabajo previo en determinar parámetros, tales como la conductividad hidráulica, influye de manera positiva en los valores simulados de un modelo subterráneo, siempre y cuando se tiene la información con la cual trabajar. Esto resulta en un modelo más robusto y fidedigno, e implica menos incertidumbre en su procesamiento posterior.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de

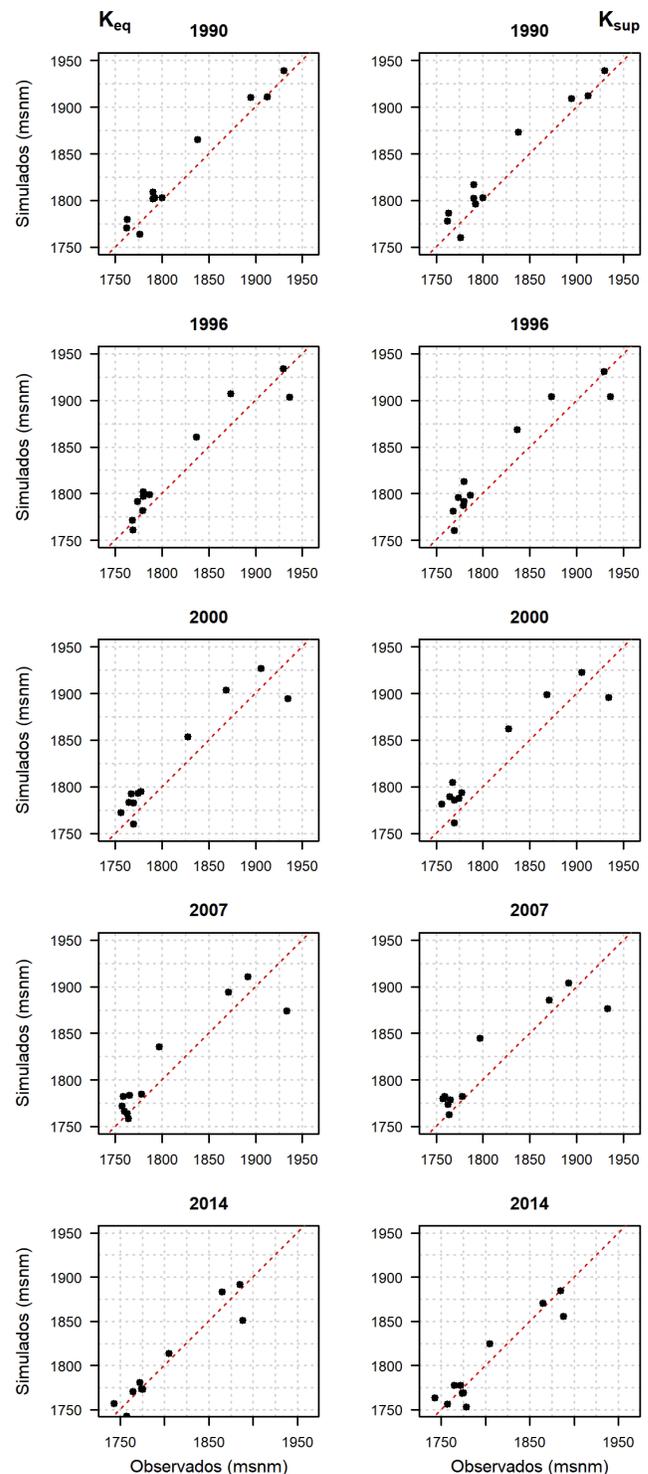


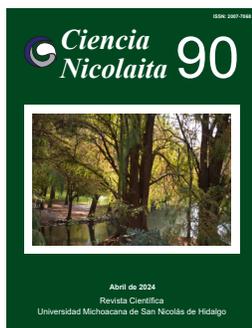
Figura 8. Ajuste entre niveles observados y niveles simulados con conductividades equivalentes (K_{eq}) y conductividades supuestas (K_{sup}).

Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por el apoyo financiero otorgado al primer autor del presente trabajo. Además, a la CONAGUA, a la Comisión Ciudadana de Agua Potable y

Alcantarillado del Municipio de Aguascalientes (CCAPAMA) y a la Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA) por la información que permitió el desarrollo de la investigación; a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) y su programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental por las facilidades para realizar el trabajo; y a la Maestría en Ingeniería en Recursos Hídricos de la UMSNH y a su Congreso por la oportunidad de divulgar los resultados obtenidos.

Referencias

- Bergström S (1976). Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. *Norrköping, Sweden*.
- Comisión Nacional del Agua (2020). “Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero del Valle de Aguascalientes (0101), Estado de Aguascalientes”, https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/Aguascalientes/DR_0101.pdf, [consultado el 20 de octubre 2021].
- Comisión Nacional del Agua (2021). “Registro Público de Derechos de Agua (REDPA)”, <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=usos-Agua&ver=mapa&o=1&n=nacional>. [consultado el 25 de julio 2023].
- Ehtiat M, Jamshid Mousavi S, Srinivasan R (2018). Groundwater Modeling Under Variable Operating Conditions Using SWAT, MODFLOW and MT3DMS: a Catchment Scale Approach to Water Resources Management. *Water Resources Management* 32(5): 1631-1649. doi: <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1895-z>
- Guerrero Martínez L (2016). *Evaluación de la recarga natural del acuífero del Valle de Aguascalientes mediante el análisis de variación de niveles de agua subterránea y datos de precipitación* [Universidad Autónoma de Aguascalientes]. <http://bdigital.dgse.uaa.mx:8080/xmlui/handle/11317/669>
- Guerrero Martínez L (2020). Comportamiento hidrodinámico de acuífero del Valle de Aguascalientes y su relación con las discontinuidades superficiales: Ph.D. thesis, *Universidad Autónoma de Aguascalientes*.
- Harbaugh AW (2005). MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process (Vol. 6). *US Department of the Interior, US Geological Survey Reston, VA, USA*.
- Hernández-Marín M, Guerrero-Martínez L, Zermeño-Villalobos A, Rodríguez-González L, Burbey TJ, Pacheco-Martínez J, Martínez-Martínez SI, González-Cervantes N (2018). Spatial and temporal variation of natural recharge in the semi-arid valley of Aguascalientes, Mexico. *Hydrogeology Journal* 26(8): 2811-2826. doi: <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1819-x>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2013). “Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0”, <https://www.inegi.org.mx/temas/relieve/continental/#Mapa>, [consultado el 25 de julio de 2023].
- INEGI (2021). “Sesión Extraordinaria 2021 Presentación de Resultados Censo de Población y Vivienda 2020”, <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>, [consultado el 20 de octubre 2020].
- Moriasi DN, Gitau MW, Pai N, Daggupati P (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE* 58(6): 1763–1785. doi: <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>
- Pacheco-Martínez J, Hernández-Marín M, Burbey TJ, González-Cervantes N, Ortíz-Lozano JÁ, Zermeño-De-Leon ME, Solís-Pinto A (2013). Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México. *Engineering Geology* 164: 172–186. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.06.015>
- Sainz-Santamaria J, Martínez-Cruz AL (2019). How far can investment in efficient irrigation technologies reduce aquifer overdraft? Insights from an expert elicitation in Aguascalientes, Mexico. *Water resources and economics* 25: 42–55. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wre.2017.10.003>
- Sánchez San Román FJ (2022). *Hidrología Superficial y Subterránea* (2a ed.). *Kindle Direct Publishing*. <https://hidrologia.usal.es/Libro.htm>. [consultado el 26 de julio 2023].
- United States Geological Survey (2002). *Basic Ground-Water Hydrology*.
- Willmott CJ, Matsuura K (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate research* 30(1): 79-82. doi: <https://doi.org/10.3354/cr030079>
- Winston RB (2022). ModelMuse (5.1.1). *U.S. Geological Survey Software Release*. doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.5066/P90QQ94D>



Ciencia Nicolaita 90

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Implementación de las líneas de trabajo en la correlación de especialidades para la generación de un modelo geológico íntegro actualizado para el estado de Aguascalientes

Implementation of the lines of work in the correlation of specialties for the generation of an updated comprehensive geological model for the state of Aguascalientes

Karla Rocío Juárez López*, Luis Fernando Médicis De Birón Valdepeña, Erick Iván Acevedo Cerón

Para citar este artículo: Juárez López KR, Médicis De Birón Valdepeña LF, Acevedo Cerón EI (2024). Implementación de las líneas de trabajo en la correlación de especialidades para la generación de un modelo geológico íntegro actualizado para el estado de Aguascalientes. *Ciencia Nicolaita* 90: 29-40.

DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi90.781>

Historial del artículo



Recibido: 8 de diciembre de 2023

Aceptado: 28 de febrero de 2024

Publicado en línea: abril 2024



Ver material suplementario



***Correspondencia de autor:** kr23jl@gmail.com



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Implementación de las líneas de trabajo en la correlación de especialidades para la generación de un modelo geológico íntegro actualizado para el estado de Aguascalientes

Implementation of the lines of work in the correlation of specialties for the generation of an updated comprehensive geological model for the state of Aguascalientes

Karla Rocío Juárez López^{a*}, Luis Fernando Médicis De Birón Valdepeña^b, Erick Iván Acevedo Cerón^c

^a Ing. Geofísico del Departamento de Perforación de Pozos e Hidrogeología de la Dirección de Operación y Mantenimiento del Instituto del Agua del Estado (INAGUA); calle 18 de Marzo número 98, Fraccionamiento Las Hadas, C.P. 20140, Aguascalientes, Ags.; kr23jl@gmail.com; 5576375125

^b Jefe del Departamento de Perforación de Pozos e Hidrogeología de la Dirección de Operación y Mantenimiento del Instituto del Agua del Estado (INAGUA); calle 18 de Marzo número 98, Fraccionamiento Las Hadas, C.P. 20140, Aguascalientes, Ags.; medicisdebiron@gmail.com; 4492082147

^c Encargado del Programa del Comité Interinstitucional de Fallas y Grietas Geológicas del Estado de Aguascalientes de la Secretaría de Planeación, Participación y Desarrollo; calle Cristóbal Colón No. 110, Zona Centro, C.P. 20000, Aguascalientes, Ags.; acevedoivan45@gmail.com; 5518751600.

Resumen

En el marco del análisis de las fallas y grietas geológicas que existen en el Estado de Aguascalientes, se ha conformado el Comité Interinstitucional de Fallas y Grietas Geológicas del Estado de Aguascalientes (CIFGGEA), constituido por 4 grupos de trabajo multidisciplinarios, siendo el grupo 2 “Equilibrio del Acuífero” el que busca generar un modelo geológico integral que correlacione los datos e información con la que cuentan los diferentes especialistas en el área de la Geología, Geofísica, Química, Ingeniería Civil, Biología y Peritos Particulares, para definir las estrategias necesarias para la preservación, en la medida de lo posible, de la reserva de agua subterránea actual en el Estado de Aguascalientes.

Palabras clave: CIFGGEA, agua subterránea, modelo geológico integral, fallas geológicas.

Abstract

In the framework of the analysis of the geological faults and cracks that exist in Aguascalientes, the Comité Interinstitucional de Fallas Geológicas y Grietas del Estado de Aguascalientes (CIFGGEA), has been formed by four multidisciplinary working groups, being the second “Equilibrio del Acuífero” the one that intends to generate an integral geological model that correlates the data and information available with that belonging to the different specialists in the areas of Geology, Geophysics, Chemistry Civil Engineering, Biology and Private Experts, in order to define the necessary strategies for the preservation, as far as possible, of the current groundwater reserve in Aguascalientes.

Keywords: CIFGGEA, groundwater, integral geologic model, geological faults.

Introducción

En el año 2004 se formó el Comité Interinstitucional de Fallas y Grietas Geológicas del Estado de Aguascalientes (CIFGGEA), con carácter legal mediante Decreto publicado en el Periódico Oficial del Estado de Aguascalientes el 23 de febrero de ese año, tomando como base la necesidad de la población ante una contingencia atípica. El CIFGGEA se conforma por instituciones de los tres ámbitos de gobierno, cámaras y colegios de profesionistas, actualmente es liderada por la Secretaría de Planeación, Participación y Desarrollo (SEPLADE).

El objetivo global del CIFGGEA es la coordinación, la interacción e integración de los trabajos a generar por parte de los 4 grupos especializados que conforman al CIFGGEA, con el propósito de analizar, estudiar el origen y las causas de las fallas geológicas, así como el agrietamiento del suelo en el territorio del Estado de Aguascalientes, de tal manera que las acciones a ejecutar deriven en la propuesta de programas y acciones multisectoriales para mitigar el impacto social y urbanístico de dichos fenómenos para lograr la convivencia plena con éstos; así mismo, que el Gobierno del Estado de Aguascalientes, como salvaguarda de la seguridad e integridad física de los habitantes, comparte, junto con la sociedad, la preocupación sobre este problema y que, en el ámbito de su competencia y atribuciones, encuentra necesario crear los mecanismos necesarios para dar respuesta a la demanda social generada por el agrietamiento del suelo.

En el Marco Legal, el 20 de diciembre de 2022 se publicó el Código Urbano para el Estado de Aguascalientes, cuyo texto original se desprende de

la Edición Extraordinaria del Periódico Oficial del Estado de Aguascalientes, del Decreto Número 251, Capítulo IV “Organismo y Órganos de Deliberación y Auxiliares, en su Sección Cuarta, dónde se expone las generalidades del Comité (Periódico Oficial del Estado de Aguascalientes, 2022):

ARTÍCULO 47. El Comité Interinstitucional de Fallas y Grietas Geológicas en el Estado, tiene por objeto analizar y estudiar el origen y las causas de las fallas geológicas junto con los agrietamientos del suelo que se manifiesten en su territorio, con la finalidad de que dichos análisis y estudios que se realicen, deriven en la propuesta de programas y acciones multisectoriales para disminuir el impacto social y urbanístico de dichos fenómenos y lograr la convivencia plena.

ARTÍCULO 48. El Comité Interinstitucional de Fallas y Grietas Geológicas en el Estado estará integrado por instituciones de los tres órdenes de gobierno y deberá contar con la representación social y privada en el Estado. Su organización, integración y funcionamiento se regulará a través de la normatividad que, para tal efecto, expida el Titular del Poder Ejecutivo del Estado.

Dentro de las atribuciones que competen al Comité, destacan:

1. Coordinar los trabajos de los 4 Grupos Especializados (**Tabla 1**) que conforman al Comité Interinstitucional de Fallas y Grietas Geológicas del Estado de Aguascalientes (CIFGGEA), para el adecuado uso de las tecnologías y sistemas de medición, monitoreo, control y prevención

Tabla 1. Grupos de Trabajo del CIFGGEA, SEPLADE.

Grupo		Coordinador
1	Estudios Técnicos	Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA)
2	Equilibrio del Acuífero	Instituto del Agua del Estado (INAGUA)
3	Normatividad y Cartografía	Secretaría de Planeación, Participación y Desarrollo (SEPLADE)
4	Atención a la infraestructura afectada	Secretaría de Obras Públicas del Estado (SOP)

de las alteraciones geohidrológicas del territorio que ocupa el Estado de Aguascalientes.

2. Informar a la población y a las instancias de gobierno correspondientes, sobre los resultados de todos los estudios y análisis de interés público realizados por los grupos de trabajo del Comité sugiriendo las acciones y programas a realizar.
3. Colaborar en la instrumentación de programas y acciones en todo lo relacionado con las causas y consecuencias del agrietamiento del suelo en el Estado.
4. Evaluar las opiniones y propuestas de los representantes de las diferentes Dependencias y Entidades Públicas involucradas en la problemática del agrietamiento del suelo en el Estado, así como aquéllas que surjan de los Organismos representativos de la sociedad civil y particulares, para integrarlas a los planes y programas diseñados por el Comité.
5. Emitir opinión sobre la pertinencia de nuevos asentamientos humanos en zonas con riesgo de agrietamiento del suelo a las autoridades Estatales y Municipales competentes.

Materiales

El Grupo 2 denominado “Equilibrio del Acuífero”, está integrado por diferentes Instituciones de carácter Estatal y Federal (**Tabla 2**), cuyos representantes son especialistas en temas del agua y, que han sido designados para proporcionar, organizar e integrar la información en beneficio de la generación de proyectos que permitan su implementación como parte de los esquemas iniciales en beneficio de la búsqueda de estrategias para la estabilización de acuíferos sobreexplotados

y la aplicación de la tecnología de la recarga artificial para preservar, en la medida de lo posible, la reserva de agua subterránea actual con la que cuenta el Estado.

Dentro de las actividades programadas por el Grupo 2, se encuentra la generación, la evaluación y la aprobación de aquellos proyectos que permitan abonar en lo correspondiente al tema del agua subterránea, destacando actualmente, el trabajo en conjunto para la generación de un modelo geológico integro, que surge de la necesidad de

Tabla 2. Instituciones que conforman al Grupo 2 “Equilibrio del Acuífero”, coordinado por el Instituto del Agua del Estado de Aguascalientes.

Dependencias
Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA)
Secretaría de Sustentabilidad, Medio Ambiente y Agua (SSMAA)
Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Dirección Local de Aguascalientes
Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI)
Colegio de Ingenieros Civiles del Estado de Aguascalientes (CICA)
Secretaría de Desarrollo Rural y Agroempresarial del Estado de Aguascalientes (SEDRAE)
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)
Colegio de Biólogos del Estado de Aguascalientes (COBEA)
Asociación Mexicana de Hidráulica (AMH)
Organismos Operadores de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de los Municipios del Estado de Aguascalientes
Distrito de Riego 001, Pabellón, Dirección Local Aguascalientes
Secretaría de Planeación, Participación y Desarrollo (SEPLADE)
Colegio de Ciencias de la Tierra

conjuntar, homologar, correlacionar y actualizar la información con las que cuentan los diferentes especialistas en el ámbito de la Ingeniería Geofísica, Geológica, Civil, Químicos, Biólogos, Hidrogeólogos, Hidrólogos y Peritos Particulares (**Figura 1**).

Métodos

El proyecto para la implementación de las líneas de trabajo en la correlación de especialidades para la generación de un modelo geológico íntegro actualizado para el Estado de Aguascalientes, cuenta con la propuesta del cumplimiento de los 5 escalones básicos para su desarrollo y conclusión:

1. Iniciación: mediante la ejecución del plan de trabajo (**Figura 2**), conjuntar y analizar la información multidisciplinaria existente para que, cada subgrupo comience a homologarla por especialidad.

Durante la primera etapa se contemplan las siguientes actividades:

- Revisión, análisis e ingreso a un Sistema de Información Geográfica de la información geológica, inicialmente de los datos históricos existentes de los cortes litológicos correspondientes a algunas perforaciones de pozos de agua potable ejecutadas en el Estado.
- Correlación de la geofísica (estudios geofísicos y registros eléctricos) con la representación visual del resultado geológico, para comenzar el análisis regional a partir de las caracterizaciones particulares de la información.

Dentro de la programación para continuar con la recopilación e incorporación de la información que retroalimentará al modelo inicial geológico-geofísico, se contemplan las siguientes actividades para la segunda etapa:

- Integrar la información a nivel Estatal de las mediciones piezométricas del periodo de 2018 a 2023 (**Figura 3**), inicialmente de los valores de los niveles estáticos (**Tabla 3**), que fungirán como el indicador principal para conocer la profundidad a la que se encuentra actualmente el agua en los diferentes pozos monitoreados. Esto es esencial para evaluar la disponibilidad de agua subterránea en una ubicación específica.

La importancia de la actualización de los niveles estáticos permitirá obtener información valiosa para generar las estimaciones de la recarga y descarga en los acuíferos presentes en el Estado, con el fin de comprender la dinámica del sistema acuífero y planificar un uso sostenible del agua. De igual manera, su implementación en el modelo posibilitará la planificación y la gestión del recurso hídrico, mejorando las bases para la toma de decisiones en beneficio de garantizar un uso sostenible.

- Incorporar la información de los datos fisicoquímicos y de metales al modelo inicial no solo mejorará su precisión en diversas ubicaciones y condiciones, sino que también facilitará la identificación de patrones y tendencias, que son los aspectos fundamentales en la planificación y gestión del recurso

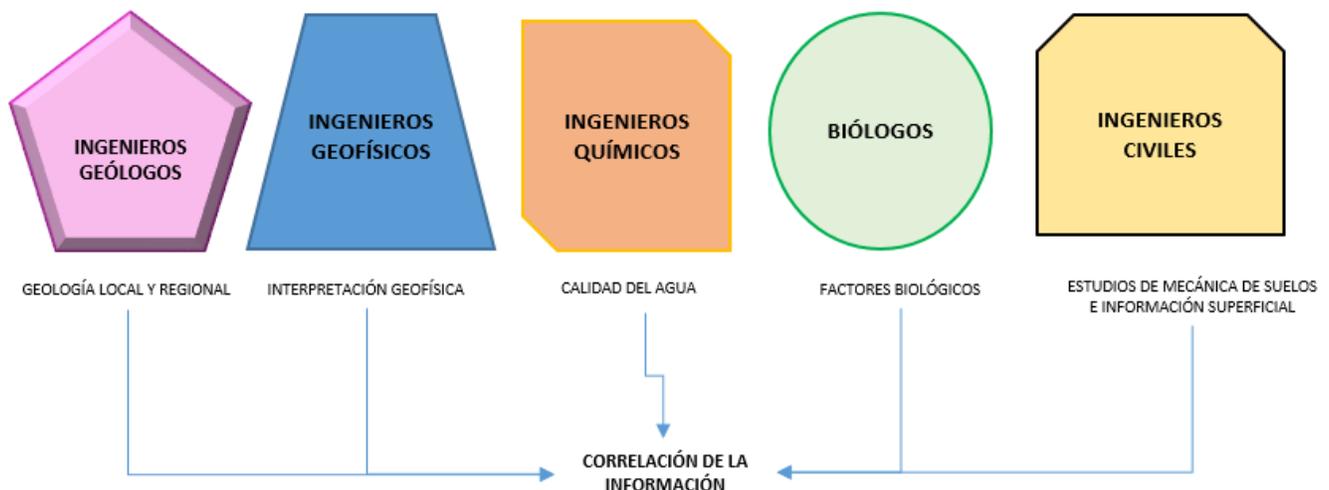


Figura 1. Participación de especialistas que conforman al Grupo 2, INAGUA 2023.

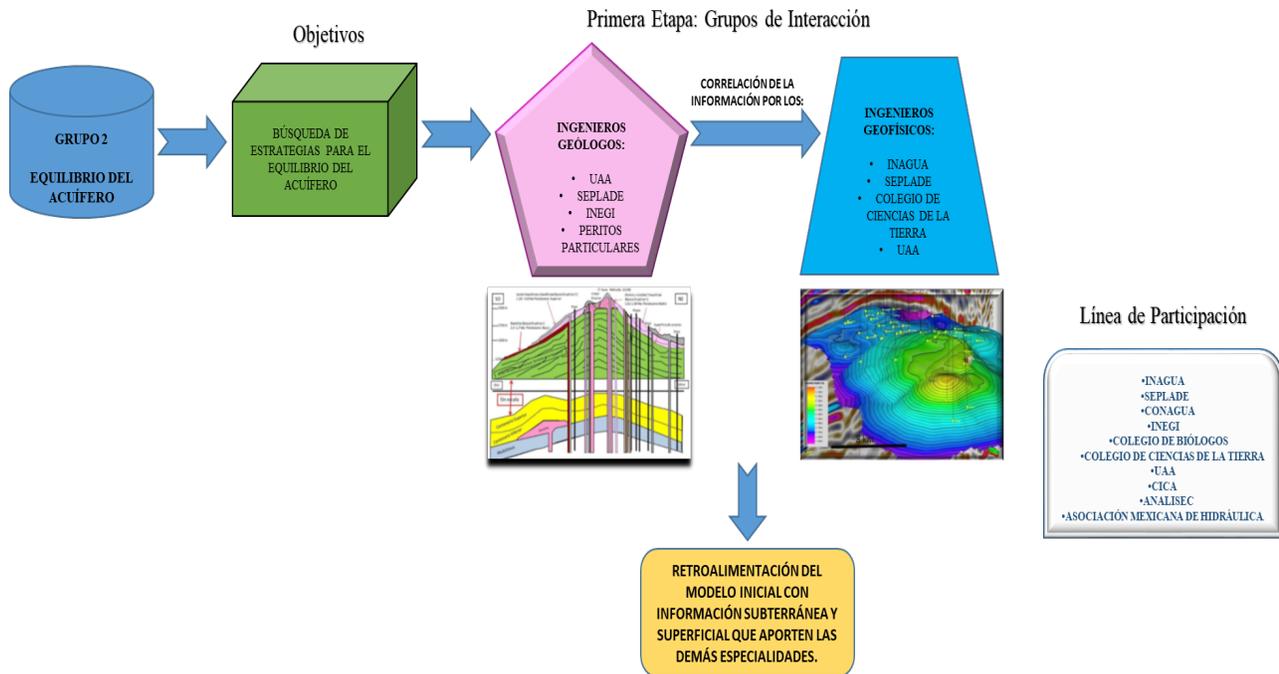


Figura 2. Plan de trabajo de la primera etapa, INAGUA 2023.

hídrico, brindando un apoyo esencial para la toma de decisiones. Este enfoque respalda la implementación efectiva de políticas y prácticas destinadas a mejorar y proteger la calidad del agua, asegurando al mismo tiempo el cumplimiento de regulaciones ambientales y normativas que es el proceso crucial para garantizar la salud pública y fomentar la sostenibilidad ambiental.

- Integrar los datos de agua subterránea históricos por la Dirección Local de la Comisión Nacional del Agua, sede en Aguascalientes, proporcionará varios beneficios como el complementar a identificación de tendencias en el comportamiento del agua subterránea, comprender las variabilidades para su inclusión en los parámetros hidrogeológicos y la promoción de la transparencia al compartir una visión más completa de la evolución de los recursos hídricos subterráneos.
- En lo concerniente a la implementación del Marco Legal en los diferentes proyectos enfocados a la búsqueda de las estrategias necesarias en beneficio al equilibrio del acuífero, la Comisión Nacional del Agua, sede en Aguascalientes, es la Dependencia que apoyará en el análisis de vincular lo operativo y técnico con las Leyes aplicables a respetar, como lo es:

Claridad normativa: permite operar proyectos dentro de los límites legales establecidos y garantiza el cumplimiento de las regulaciones aplicables.

Protección del recurso: enfocado a proteger los recursos hídricos, incluidos los acuíferos. Al asegurar el cumplimiento de estas leyes, se contribuye a preservar y conservar la cantidad y calidad del agua en el acuífero.

Sostenibilidad a largo plazo: esto implica la implementación de prácticas y medidas que no solo abordan las necesidades actuales, sino que también protegen el recurso para las generaciones futuras.

Gestión eficiente: Incluye aspectos como la asignación equitativa de derechos de agua, la prevención de la sobreexplotación del acuífero y la implementación de medidas de conservación.

Coordinación interinstitucional: La participación de la Comisión Nacional del Agua garantiza una coordinación efectiva entre las autoridades locales y nacionales en la implementación de proyectos relacionados con el agua. Esto asegura una aplicación coherente de las leyes y regulaciones en todos los niveles de gobierno.

Transparencia y rendición de cuentas: refiere

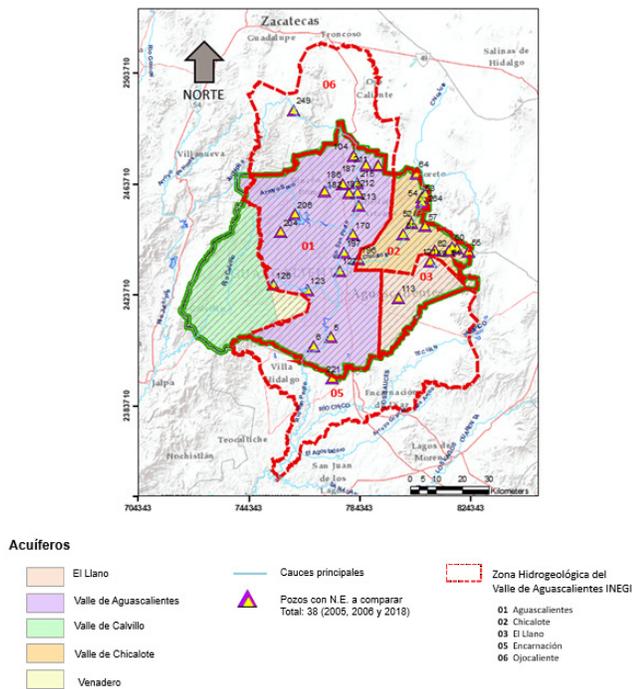


Figura 3. Mapa de la distribución de los pozos de agua potable que conforman a la red de monitoreo de niveles estáticos 2018, Instituto del Agua del Estado (INAGUA).

al cumplimiento de los requisitos legales, la documentación adecuada y la divulgación pública de información relevante relacionada con el manejo del acuífero.

- Generar vínculos académicos mediante convenios de colaboración, iniciando lazos con el Instituto Tecnológico de Aguascalientes (ITA) para incluirlo como miembro activo del Grupo 2 del Comité Interinstitucional de Fallas Grietas Geológicas del Estado de Aguascalientes (CIFGGEA), con el propósito de trabajar en conjunto para lo relacionado a la búsqueda de estrategias que permitan alcanzar un aprovechamiento sustentable del acuífero a través del agua de lluvia, el agua superficial y el agua tratada con una planeación integral a largo plazo (**Figura 4**):

Entre los trabajos generados por la vinculación entre Dependencias destacan:

- La programación para la continuidad en los proyectos que lidera el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) correspondientes a la caracterización de zonas permeables, que contribuirá al conocimiento de la geología superficial y a la clasificación de las zonas apropiadas para ser consideradas

Pozo	Municipio	ID	AÑO 2018
El Niagara	Ags	5	48.50
San Pedro Cieneguillas	Ags	6	68.63
El Tule	Asientos	51	56.10
San José del Río	Asientos	52	66.19
San Gil	Asientos	53	94.25
Ciénega Grande	Asientos	54	88.94
El Salitre, Los Campos	Asientos	55	38.64
San Rafael de Ocampo	Asientos	57	131.71
Tanque de Guadalupe	Asientos	59	105.47
Las Adjuntas	Asientos	60	46.50
Ojo de Agua	Asientos	61	25.02
La Esperanza	Asientos	62	96.40
Norias del Borrego	Asientos	64	118.87
Refugio De Providencia	Cosío	104	122.10
Sandoval	El Llano	113	149.63
La Luz	El Llano	121	133.65
La Tomatina	Jesús María	123	95.35
Milpillas de Arriba	Jesús María	126	161.10
Paso Blanco	Jesús María	127	155.00
Las Animas	Pabellón de Arteaga	170	126.24
Ejido Morelos R. R	Rincón de Romos	182	97.30
Estacion Rincon	Rincón de Romos	183	104.88
El Saucillo	Rincón de Romos	186	112.98
Valle de las Delicias	Rincón de Romos	187	110.60
La Boquilla	Rincón de Romos	191	50.50
El Chicalote	SnFco. de los Romo	196	130.20
La Concepcion	Sn Fco. de los Romo	197	118.00
Potrero de los Lopez	San Jose de Gracia	204	99.50
San Antonio de los Rios	San Jose de Gracia	206	16.98
Mesillas	Tepezalá	211	124.62
San Antonio Tepezala	Tepezalá	212	87.24
Carboneras	Tepezala	213	117.52
Alamitos	Tepezalá	215	93.07
San Marcos del Río	Encarnación de Díaz	221	63.32
Paso de Mendez	Genaro Codina	249	104.04
Crisostomos	Loreto	264	91.50
La Concepcion	Ojo Caliente	281	82.93
Berriozabal. Zac	Ojo Caliente	284	120.10

Tabla 3. Datos de los niveles estáticos adquiridos en el año 2018 de los pozos de agua potable que conforman a la red de monitoreo piezométrico visualizados en la Figura 3.

como puntos de recarga a nivel Estatal.

- Apoyo por parte de la Universidad Autónoma de Aguascalientes para el préstamo del equipo necesario a utilizar para la ejecución de estudios geofísicos en zonas consideradas a analizar e interpretar su comportamiento subterráneo, particularmente de los sitios con los que no se cuenta con información de ninguna índole.
- Iniciar la colaboración con el Grupo 1 “Estudios

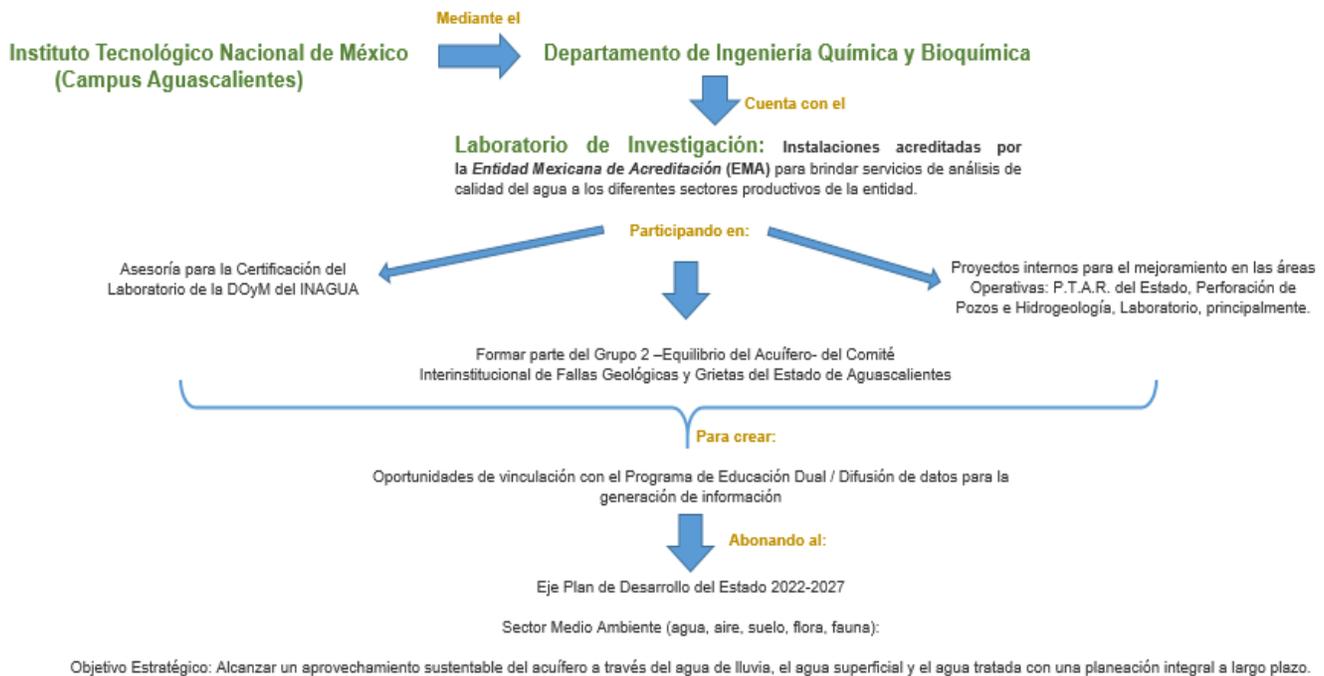


Figura 4. Líneas de trabajo: vínculo Institucional entre el Instituto del Agua del Estado (INAGUA) e Instituto Tecnológico de Aguascalientes (ITA) 2023 en beneficio de la sociedad.

Técnicos” para analizar la correlación entre el déficit de agua subterránea y la presencia de problemas como agrietamiento y subsidencia en el Estado de Aguascalientes.

Para la tercera etapa, que englobará específicamente la integración de la información superficial y su impacto con los factores subterráneos, se considera lo siguiente:

- La información aportada por los representantes del Colegio de Biólogos posibilitará la incorporación de factores superficiales al modelo geológico. Entre estos factores se incluyen la edafología, el tipo de suelo, la vegetación, los escurrimientos superficiales, los cauces principales, entre otros, y serán los biólogos quienes determinarán las ponderaciones de cada uno de estos factores, asegurando así una caracterización precisa e integración efectiva en el modelo resultante durante la segunda etapa.
- La colaboración de los Ingenieros Civiles en los estudios de mecánica de suelos, se centra especialmente en compartir sus interpretaciones para caracterizar los sitios que se identificarán como susceptibles debido a su proximidad a fallas geológicas activas. Esto posibilitará la correlación de dicha

información con el área geológica y geofísica correspondiente.

- La participación de la Asociación Mexicana de Hidráulica como miembro activo en compartir el conocimiento de la ciencia y la técnica al servicio del sector agua, siendo su eslogan el cohesionar a todas las disciplinas relacionadas con la divulgación y la gestión de los recursos hídricos, así mismo, se integrarán los datos superficiales con los que sus representantes abonen al proyecto.

Para la cuarta etapa, que será enfocado a la difusión de los resultados que constantemente se obtengan, se planea realizar:

- Sesiones informativas facilitadas por el Colegio de Ciencias de la Tierra, donde se presentarán discusiones sobre la información para fomentar la retroalimentación continua y la mejora constante del modelo resultante.
- Participación activa en congresos, sesiones y talleres a nivel nacional para presentar los proyectos y los avances relacionados con el sector del agua.

Se enfatiza que el modelo integral estará sujeto a modificaciones con el fin de mejorar y actualizar su desempeño. Esto facilitará la continuación del

análisis del estudio sobre el origen de las fallas y fracturas geológicas en el Estado, que constituye la razón de ser del CIFGGEA.

- Planificación: establecimiento de un calendario (**Figura 5**) para la programación de actividades que llevarán a cabo los diversos representantes de las dependencias gubernamentales y particulares en relación con el agua subterránea. Estas actividades incluirán el análisis y revisión de información, talleres multidisciplinarios tanto en gabinete como en recorridos de campo, entre otros.
- Ejecución: Iniciamos las actividades correspondientes a la primera fase del proyecto, que implica recopilar la información geológica, digitalizarla y comenzar con el análisis visual a cargo de especialistas en el campo de la Geología.
- Desarrollo: A través de trabajos grupales que incluyen análisis, depuración, actualización y correlación de información mediante las tecnologías disponibles en diversas dependencias, se planificará la ejecución de talleres y visitas de campo para actualizar la información geológica. El objetivo es fortalecer la retroalimentación de las metodologías utilizadas por los especialistas, utilizando las reuniones grupales como sesiones para compartir los avances obtenidos durante las acciones realizadas.

- Conclusión: Examinar la ejecución de las actividades propuestas y evaluar su viabilidad en la evolución del modelo geológico actualizado. El propósito es someterlo a una validación oficial ante el CIFGGEA, con el objetivo de establecerlo como pilar esencial para la planificación y ejecución de proyectos a cargo de distintas dependencias e instituciones gubernamentales o privadas en el Estado de Aguascalientes.

Resultados

Correspondiente a los avances de la primera etapa del proyecto del Grupo 2, el Dr. Jesús Pacheco Martínez, Profesor Investigador de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, Coordinador del Grupo 1 “Estudios Técnicos” del CIFGGEA, colaboró en proporcionar información geofísica de gran importancia correspondiente a la visualización de los mapas 2D del resultado del procesamiento de datos gravimétricos que generó mediante su análisis correspondientes al año 2010 (**Figura 6**), así mismo, compartió una representación en 3D, información con la cual se dará inicio la correlación entre las disciplinas iniciales: la geología con la geofísica.

Por parte del Instituto del Agua del Estado, se compartió un compendio de información subterránea y superficial (**Tabla 4**) que ha sido descargada del portal del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2002), la cual fue organizada y proporcionada para comenzar con el análisis de la misma por parte de los especialistas y con ello, fomentar la distribución del material que sirva al grupo de trabajo.

Actualmente, se trabaja en conjunto los Ingenieros Geólogos y con los Ingenieros Geofísicos en la digitalización, organización y la clasificación de la información litológica recopilada de las diferentes perforaciones de pozos de agua potable que se realizaron en el Estado, para su ingreso en un Sistema de Información Geográfica que permite su análisis y procesamiento en la obtención de una representación visual que permita la constante integración de la información correspondiente a las demás disciplinas que conformarán al modelo integral.



Figura 5. Calendario propuesto para las reuniones del CIFGGEA, SEPLADE 2023.

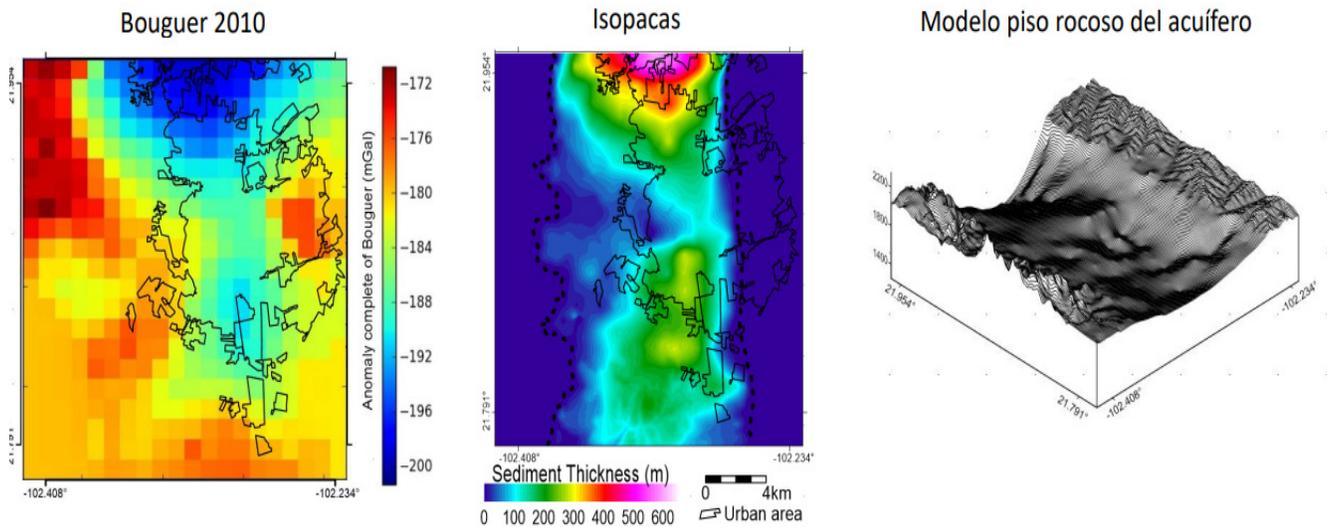


Figura 6. Resultados del procesamiento de datos gravimétricos: mapa de Bouguer, mapa de isopacas y representación 3D de la estimación del piso rocoso del acuífero granular del Valle de Aguascalientes (Pacheco-Martínez *et al.*, 2013).

Información
Geología
Geomorfología
División Municipal
Cuerpos de Agua
Edafología
Uso de suelo y vegetación

Tabla 4. Compendio de información geológica superficial, INEGI 2002, <https://www.inegi.org.mx/temas>.

Discusión

La problemática hídrica que se manifiesta en el Estado de Aguascalientes constituye un desafío de relevancia no solo a nivel local, sino también a escala nacional e internacional, encontrando paralelismos en diversas regiones alrededor del mundo. Es crucial reconocer que esta problemática no es exclusiva de Aguascalientes, sino que es un fenómeno global que requiere atención y acción coordinada. Entre las situaciones análogas que se identificaron en algunos artículos publicados de otros países, destacan los siguientes:

- Descenso del nivel del agua, hundimiento del terreno y compactación específica cerca de Apache Junction, Arizona Centro-Sur (Carpenter, 1987).
- Subsistencia del terreno por bombeo de aguas

subterráneas (Leake, 2016).

- Vinculación de la calidad y la cantidad de las aguas subterráneas: Una evaluación de las anomalías de almacenamiento de aguas subterráneas por satélite de GRACE frente a las mediciones de contaminantes en el suelo en California (Rezaie Boroon y Fisher, 2012).
- Investigación de hidrogeología, hundimiento del terreno y fisuras terrestres, Base Luke de las Fuerzas Aéreas, Arizona (Schumann y O'Day, 1995).
- Información sobre riesgos geológicos en los planes generales: problemas y recomendaciones (Smith 1985).

La actual participación activa de los miembros que conforman al CIFGGEA, ha generado el impulso requerido para el comienzo del análisis de viabilidad de los proyectos en beneficio de la sociedad ante la necesidad latente del recurso hídrico en el Estado. La incursión de las diferentes disciplinas para la correlación de la información, el análisis de la misma, la homologación de los criterios en las interpretaciones de los trabajos de gabinete junto con los de campo, ha permitido enfocar el objetivo de los especialistas en los diferentes temas superficiales y subterráneos a abordar: el coadyuvar con base en sus conocimientos, en las propuestas de los proyectos que permitan solucionar y abordar de una forma más completa y



con mejores bases, la problemática actual en el que estamos inmersos en los temas de sobreexplotación del agua subterránea. Al ser los servidores públicos la gran mayoría de los miembros que conforman al CIFGGEA, el desafío principal a enfrentar es la falta de recurso financiero que permita la adquisición del equipo especializado necesario para que se realicen los diferentes estudios: geofísicos, calidad del agua, hidrogeológicos, entre otros, los cuales completarían la obtención de información referente a conocer el comportamiento subterráneo actual de las áreas de importancia a considerar.

El trabajo alcanzado es el resultado de la colaboración, participación y apoyo que han proporcionado las diferentes Dependencias y Peritos Particulares, con el préstamo de los equipos, instrumentos especializados, materiales de investigación y proyectos de manera individual que se han realizado en el Estado pero que actualmente se están compilando y están enfocados a un mismo fin: el beneficio a la sociedad de Aguascalientes.

Conclusiones

La obtención, la implementación, la validación y la difusión del modelo geológico integral, permitirá disminuir la incógnita del conocimiento que se tiene a nivel subterráneo, lo que posibilitará el complementar la información actualmente existente con la homologación y correlación de la misma, esto habilitará una mejora en la toma de decisiones de los diferentes proyectos que las Dependencias Estatales requieren ejecutar, con el principal objetivo de proporcionar la información necesaria para que cuenten con los fundamentos y realizar los análisis necesarios para salvaguardar la seguridad de los habitantes del Estado.

Agradecimientos

Al Instituto del Agua del Estado, representado por el Ing. Arq. Humberto Cruz Hernández, Director de Operación y Mantenimiento, y al Ing. Luis Fernando Méndez de Birón Valdepeña, Jefe del Departamento de Perforación de Pozos e Hidrogeología, por su colaboración invaluable. Su disposición para facilitar la interacción entre diferentes dependencias demuestra un compromiso genuino con el progreso y el bienestar de la sociedad de Aguascalientes, esta colaboración no solo permitirá la implementación

eficaz de proyectos destinados a abordar desafíos en el sector hídrico, sino que también fomentará la difusión de conocimientos y experiencias a través del intercambio con el Grupo 2 "Equilibrio del Acuífero". La retroalimentación proporcionada por expertos adicionales enriquecerá significativamente la planificación y ejecución de futuros proyectos, al considerar aspectos que podrían no haber sido contemplados inicialmente. Este es un paso crucial hacia la mejora continua y la eficacia en la gestión de los recursos hídricos en nuestro Estado.

A la Secretaría de Planeación, Participación y Desarrollo que coordina al CIFGGEA a través de su Departamento de Fallas y Grietas Geológicas, expresamos nuestro más sincero reconocimiento específicamente, queremos destacar el liderazgo del Ingeniero Erick Iván Acevedo Cerón y su equipo de trabajo, su iniciativa de fomentar la participación activa de diversas Dependencias y Peritos Particulares merece especial reconocimiento. Gracias a este esfuerzo, se ha logrado una valiosa aportación de información, conocimiento y equipamiento de investigación. Este intercambio ha sido fundamental para el progreso alcanzado hasta el momento, tanto en el ámbito del monitoreo como en el desarrollo de proyectos que redundan en beneficio directo de la sociedad del Estado.

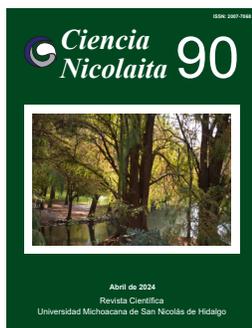
Expresamos nuestro más profundo reconocimiento al Ingeniero Francisco Javier Aguilar Valdéz, Perito Particular, cuyo compromiso ha sido fundamental para promover el adecuado entendimiento de la relevancia de la Ingeniería Geofísica en diversos sectores y proyectos a nivel nacional. Valoramos enormemente el privilegio de contar con sus conocimientos y experiencia, los cuales han contribuido de manera significativa al avance que hemos alcanzado. Su dedicación y disposición para compartir su experiencia han sido de inestimable valor. Gracias a su colaboración, hemos logrado obtener un conocimiento más profundo y preciso del entorno subterráneo en nuestro Estado, es indudable que, sin su ayuda, no habríamos podido avanzar tanto en el entendimiento de las complejidades geológicas y ambientales que enfrentamos, su compromiso ejemplifica el poder transformador que tiene la cooperación entre profesionales comprometidos, su contribución ha sido un pilar fundamental para el progreso alcanzado hasta la fecha y representa un modelo inspirador para futuras colaboraciones interinstitucionales.

Al Dr. Jesús Pacheco Martínez, Profesor Inves-

tigador de la Universidad Autónoma de Aguascalientes por su disponibilidad, información y el compartir su conocimiento en beneficio del desarrollo del Proyecto en cuestión. Su compromiso y disponibilidad al brindar información valiosa y orientación experta ha sido fundamental para impulsar el avance y la calidad del proyecto. Su compromiso con el progreso académico y científico, así como su dedicación en el área de la investigación han sido importantes.

Referencias

- Carpenter MC (1987) Water-level declines, land subsidence, and specific compaction near Apache Junction, south-central Arizona. Water-Resources Investigations Report. Geological Survey, U. S. doi:10.3133/wri864071
- Leake SA (2016) Land Subsidence from Ground-Water Pumping. 9 edn. Geological Survey, U.S. <https://geochange.er.usgs.gov/sw/changes/anthropogenic/subside/>
- Pacheco-Martínez J, Hernandez-Marín M, Burbey TJ, González-Cervantes N, Ortíz-Lozano JÁ, Zermeño-De-Leon ME, Solís-Pinto A (2013) Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México. *Engineering Geology* 164:172-186. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.06.015>
- Periódico Oficial del Estado de Aguascalientes (2022) Código Urbano para el Estado de Aguascalientes, Edición Extraordinaria del Periódico Oficial del Estado de Aguascalientes. Tomo XXIII, Núm. 70 del Decreto Número 251, Capítulo IV "Organismo y Órganos de Deliberación y Auxiliares, en su Sección Cuarta, Comité Interinstitucional de Fallas y Grietas Geológicas en el Estado. <https://eservicios2.aguascalientes.gob.mx/PeriodicoOficial/web/viewer.html?file=../Archivos/9542.pdf>
- Rezaie Boroon M, Fisher J (2012) Linking Groundwater Quality and Quantity: An Assessment of Satellite-Based Groundwater Storage Anomalies from GRACE against Ground Measurements of Contaminants in California. *Journal of Environmental Science and Engineering B* 1:1271-1284
- Schumann HH, O'Day CM (1995) Investigation of hydrogeology, land subsidence, and earth-fissures, Luke Air Force Base, Arizona. Geological Survey Administrative Report, U.S.
- Smith TC (1985) Geohazards information in general plans: problems and recommendations. Master's thesis, Consortium of the California State University and Colleges, Unpublished



Ciencia Nicolaita 90

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Contaminación del aire por partículas suspendidas $PM_{2.5}$ en Morelia, Michoacán

Air pollution due to suspended particles $PM_{2.5}$ in Morelia, Michoacán

Armando Correa García

Para citar este artículo: Correa García A (2024). Contaminación del aire por partículas suspendidas $PM_{2.5}$ en Morelia, Michoacán. *Ciencia Nicolaita* 90: 41-56.

DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi90.796>

Historial del artículo



Recibido: 8 de febrero de 2024

Aceptado: 8 de enero de 2024

Publicado en línea: abril 2024



Ver material suplementario



***Correspondencia de autor:** cientifico148@gmail.com



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Contaminación del aire por partículas suspendidas PM_{2.5} en Morelia, Michoacán

Air pollution due to suspended particles PM_{2.5} in Morelia, Michoacán

Armando Correa García*

Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Av. Francisco J. Múgica s/n, Ciudad Universitaria, CP. 58030. Morelia, Michoacán, México.

Resumen

En este estudio se analizó la contaminación atmosférica por partículas suspendidas PM_{2.5} en la ciudad de Morelia, Michoacán, México. Para evaluar la relación entre las PM_{2.5} con monóxido de carbono (CO), y ozono (O₃) registrados en dos sitios de monitoreo en Morelia y uno más en la Zona Metropolitana de la ciudad de México, se realizaron análisis de varianza (ANOVA) no paramétrico y métodos de correlación y regresión. En términos generales, el centro de Morelia predominó con altas concentraciones de PM_{2.5} en comparación con los observados en la ENES-UNAM, campus Morelia y la estación Merced del centro de la ciudad de México. Asimismo, la contaminación por PM_{2.5} en Morelia, aumentó 53% del periodo 2015-2023. Los meses con mayor incremento fueron enero, febrero y marzo de 2023 con 84%, 65% y 106%, respectivamente. También se reporta el incremento histórico de 46 días por encima de la norma oficial mexicana NOM-025-SSA1-2021, que establece como límite 41 µg/m³ de PM_{2.5} como promedio diario, de los cuales ocho días fueron consecutivos, sobre todo en mayo 2023, debido en parte a las quemas agrícolas e incendios forestales ocurridos en la periferia de Morelia. Pero el número de días, se debió al cambio del valor anterior de 45 µg/m³ reglamentado en la NOM-025-SSA1-2014.

Palabras clave: partículas suspendidas, monóxido de carbono, ozono, quemas agrícolas.

Abstract

In this study, air pollution by suspended $PM_{2.5}$ particles in the city of Morelia, Michoacán, Mexico was analyzed. To evaluate the relationship between $PM_{2.5}$ with carbon monoxide (CO), and ozone (O_3) recorded at two monitoring sites in Morelia, and one more in the Metropolitan Zone of Mexico City, non-parametric analysis of variance (ANOVA), correlation and regression methods were carried out. In general terms, the center of Morelia predominated with high concentrations of $PM_{2.5}$ compared to the observed in the ENES-UNAM, Morelia campus and the Merced station in the center of Mexico City. Likewise, $PM_{2.5}$ pollution in Morelia increased 53% from the period 2015-2023. The months with the greatest increase were January, February and March 2023 with 84%, 65% and 106%, respectively. In addition, the historical increase of 46 days above the official Mexican standard NOM-025-SSA1-2021 is reported, which establishes a limit of $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ of $PM_{2.5}$ as a daily average, of which eight days were consecutive, especially in May 2023 due in part to agricultural burning and forest fires that occurred on the outskirts of Morelia, but the number of days was due to the change from the previous value of $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ regulated in NOM-025-SSA1-2014.

Keywords: Suspended particles, carbon monoxide, ozone, agricultural burning

Introducción

Las partículas son cualquier sustancia, qué bajo condiciones normales, pueden estar presentes en estado sólido o líquido en la atmósfera y tienen tamaño microscópico (Whitby y Cantrell 1976, De Nevers, 1997). Se clasifican según el diámetro de las mismas en partículas suspendidas totales (PST) de hasta 100 micras; inhalables o respirables menores a 10 micras (PM_{10}), finas de menos de 2.5 micras ($PM_{2.5}$) y ultra finas con diámetro menor a 1 micra (PM_1). Las fuentes de partículas suspendidas son diversas y abarcan desde las naturales, como polvo volcánico y tolveneras, hasta de origen antropogénico, que incluyen fábricas de acero, plantas de generación de energía, cementeras, fundidoras, obras de construcción y demolición, hornos y chimeneas que utilizan madera como combustible, áreas sujetas a erosión y motores a diésel (Bravo, 1984; Báez, 1987; Wadden, 1987; Manoli *et al.*, 2004).

La composición química de las partículas se divide en dos porciones, una orgánica y otra inorgánica; la fracción orgánica contiene compuestos como el carbono elemental, carbón orgánico y material biológico que incluye endotoxinas, bacterias, esporas, alérgenos y polen. La fracción inorgánica se compone principalmente de sulfatos, amonio, nitratos, metales de transición

y metales térreos (Badillo, 2012; Mancilla *et al.*, 2014; Manzanares *et al.*, 2011). Un antecedente sobre la distribución de dichas partículas fue documentado por Chow *et al.* (2002), quienes midieron las concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en la ciudad de México en 1997, y descubrieron que alrededor del 50% de las $PM_{2.5}$ formaban parte de las PM_{10} . También, observaron que estas partículas contenían carbono, sulfato, nitrato y amonio.

El aumento en la concentración de partículas PM_{10} y ozono están relacionadas con el incremento en la tasa de mortalidad prematura, daño a la vegetación y edificios, así como la reducción de la visibilidad (HEI, 2000; O'Neill *et al.*, 2004 a, b; De Pablo *et al.*, 2006; Filleul *et al.*, 2006; Ritz *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2006). Las fracciones que representan un mayor riesgo para la salud son las PM_{10} y $PM_{2.5}$, las cuales por su tamaño pueden penetrar a la región torácica y ser tóxicas (Pope *et al.*, 1995). Varios estudios epidemiológicos han demostrado que existe una importante relación entre altos valores de partículas y el aumento de muertes y hospitalizaciones debidas a enfermedades pulmonares (Dockery *et al.*, 1993; Ostro *et al.*, 1999, McDonnell *et al.*, 2000, Pohjola *et al.*, 2000).

El impacto social de la contaminación atmosférica, sobre todo en la salud de las poblaciones humanas, ha dado lugar al planteamiento de

estrategias de control. Entre ellas, se encuentran Normas de Calidad del Aire, las cuáles con base en una serie de estudios, establecen concentraciones máximas permisibles de contaminantes en la atmósfera, de modo que no exista riesgo para la salud (Bravo Álvarez, en Villegas, 1986, en Correa-García, 2004) (**Tabla 1**). En México, las normas de calidad existen desde 1982 (SEDUE, 1986, en Correa-García, 2004). Por ejemplo, para PM_{10} la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993, establece una concentración promedio de 24 h de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (**Tabla 1**). Dicho valor fue rebasado ocho días en Cunduacán, Tabasco, México. Esto ocurrió en mayo de 2023 durante la época de sequía, periodo en que se prepara la tierra para el cultivo y comúnmente se realiza la quema de pastizales, lo que causa una gran emisión de partículas (Pérez-Vidal *et al.*, 2010).

La NOM-025-SSA1-1993 citada previamente, fue modificada a un promedio diario y anual de PM_{10} : $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente (Diario Oficial de la Federación, DOF, 2005 en Correa-García, 2022). Esta norma, de nuevo fue cambiada a NOM-025-SSA1-2014 (DOF, 2014), la cual estableció ahora una concentración media diaria y anual de PM_{10} : $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$; para $PM_{2.5}$: $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente (**Tabla 1**). Este último criterio, fue rebasado 1 día (PM_{10}) y 9 días para $PM_{2.5}$ en Morelia, Michoacán, México, el cual se debió al efecto combinado de emisión de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas, móviles, quemas agrícolas e incendios forestales que ocurrieron en la periferia de Morelia, durante la primavera de 2019 (Correa-García, 2020). Recientemente, en marzo de 2023, se reportaron al menos 3 incendios en los alrededores de esta área urbana; uno en la zona de Altozano, otro en la loma de Santa María, un tercero en un corralón

con 17 vehículos incendiados, y el último en un pastizal a la altura de la comunidad de Uruapilla, los cuales pudieron haber influido en los niveles de contaminación atmosférica (Morales-Pérez, 2023).

A mediados de abril, aumentaron los incendios forestales, sin embargo, la topografía del municipio favorece la dispersión de los contaminantes en el corto plazo, evitando así los problemas que enfrentan, por ejemplo, las ciudades de México, Monterrey o Guadalajara, derivados de la contaminación del aire según reporte recibido por Fátima-Alfaro (2023). Por todo lo anterior, en este estudio se analiza la información de las partículas suspendidas $PM_{2.5}$ registrada en el centro de Morelia, con el propósito de identificar los factores que influyeron en el aumento de la contaminación atmosférica por $PM_{2.5}$ del año 2022-2023 y evaluar la nueva norma oficial mexicana NOM-025-SSA1-2021 (DOF, 2021) que fija una concentración media diaria y anual de $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (**Tabla 1**).

Metodología

Los datos del año 2022-2023 de las partículas suspendidas $PM_{2.5}$, las variables meteorológicas: temperatura (Temp), humedad relativa (HR), radiación solar (RAD), presión atmosférica (BP), precipitación pluvial (Lluvia), velocidad (WS) y dirección del viento (WD) de la caseta ubicada en la azotea de Palacio Municipal de Morelia (PMN) (**Figura 1A**), se obtuvieron del Sistema Nacional de Información de Calidad del Aire (SINAICA) adscrita al Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) en <https://www.sinaica.inecc.gob.mx>, del Gobierno de México.

Los datos de monóxido de carbono (CO), ozono

Tabla 1. Norma oficial mexicana vigente en materia de salud para partículas suspendidas PM_{10} y $PM_{2.5}$.

Fuente: <http://186.96.0.232/aire/descargas/monitoreo/normatividad/nom-025-ssa1-2021.pdf>.

Año de publicación	Norma	Años de vigencia	PM ₁₀		PM _{2.5}	
			Promedio 24 hrs	Promedio anual	Promedio 24 hrs	Promedio anual
	NOM-025-SSA1-1993		$150 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$50 \mu\text{g}/\text{m}^3$		
2005	NOM-025-SSA1-1993		$120 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$50 \mu\text{g}/\text{m}^3$		
2014	NOM-025-SSA1-2014	2015-2021	$75 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$40 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$45 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$12 \mu\text{g}/\text{m}^3$
2021	NOM-025-SSA1-2021	2022-2023	$70 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$36 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$41 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$10 \mu\text{g}/\text{m}^3$
		2024-2025	$60 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$28 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$33 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$10 \mu\text{g}/\text{m}^3$
A partir del 2026			$50 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$20 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$25 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$10 \mu\text{g}/\text{m}^3$

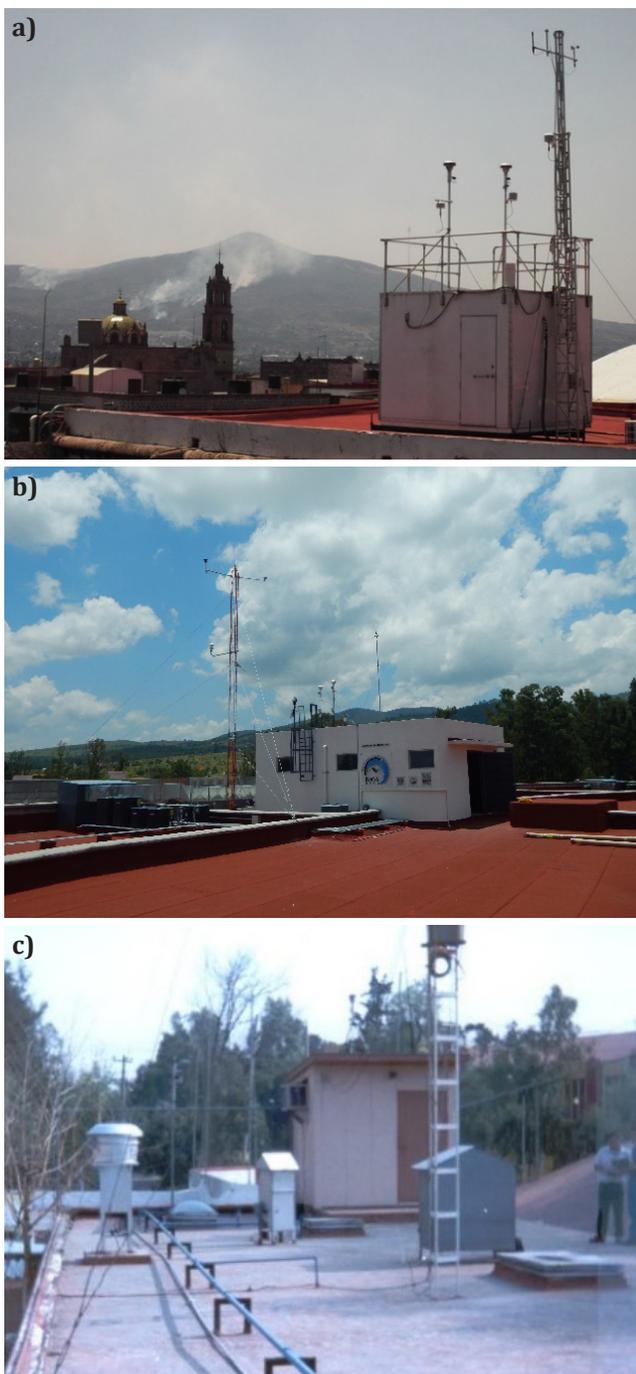


Figura 1. Estaciones de monitoreo atmosférico en Morelia, Michoacán y México Distrito Federal. En a) Palacio Municipal del centro de Morelia, b) ENES-UNAM, al suroeste en las inmediaciones de Morelia y c) Merced cercana al centro histórico de la ciudad de México.

(O₃) y PM_{2.5} del 2022-2023 de la estación situada en las instalaciones de la Escuela Nacional de Estudios Superiores de la Universidad Nacional Autónoma de México (ENES-UNAM) sede Morelia (**Figura 1B**) se adquirieron de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos de la UNAM (RUOA)

disponible en <https://www.ruoa.unam.mx>. Esta información, se empleó para sustituir la falta de datos del centro de la ciudad en PMN; incluso, se tiene reportado que la caseta de la ENES-UNAM es una guía de referencia, para diferenciar los cambios en la contaminación atmosférica y meteorología, entre el medio ambiente urbano y campestre de Morelia (Correa-García, 2022), misma que se localiza alrededor de 15 Km., al suroeste del centro, hacia las afueras de la ciudad de Morelia.

Asimismo, los datos de PM_{2.5} perteneciente a mayo de 2022 y de enero-marzo de 2023 de la estación de monitoreo Merced (MER) que se ubica en las instalaciones del edificio principal del centro de salud Luis E. Ruíz” Alcaldía Venustiano Carranza en el centro de la ciudad de México (**Figura 1C**) se consiguieron de la Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal (SMADF) disponible en <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27YqBhnmI=%27>. Esta información se empleó para evaluar los cambios en las concentraciones de PM_{2.5} entre la ciudad de Morelia y México, Distrito Federal.

El área de estudio es el centro histórico de Morelia (**Figura 1A**), la información se organizó en una hoja de cálculo por mes y día del año, bajo el criterio del 75% de suficiencia diaria; es decir, los días que reunieron 18 de 24 registros por día, y una muestra total esperada de 744 datos por mes (31 días *24horas = 744 datos; 30* 24 = 720; 28* 24= 672). Después, se realizaron análisis de correlación y regresión para indagar la relación entre las partículas suspendidas y las variables meteorológicas ya mencionadas, y de esta forma proponer un modelo de regresión lineal que permita describir los factores que influyeron en los niveles de PM_{2.5} registrados en la primavera de 2022-2023. En seguida se puntualizan algunos principios básicos de esta metodología (Balzarini *et al.*, 2008). El coeficiente de correlación de Pearson es un índice adimensional acotado entre -1,0 y 1,0, el cual refleja el grado de dependencia lineal entre dos conjuntos de datos. Su fórmula se escribe como:

$$r = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}} \dots\dots\dots (1)$$

Por otra parte, si X e Y son dos variables en cuestión, un diagrama de dispersión muestra la

localización de los puntos (X, Y) sobre un sistema rectangular de coordenadas. Si todos los puntos del diagrama parecen estar en una recta, la correlación es lineal entre las variables; sin embargo, aunque las variables estén relacionadas, no siempre se extienden sobre una línea recta y se dice que es una relación no lineal. Una línea recta, es el tipo más sencillo de una curva de ajuste (Spiegel, 1991) y su ecuación puede escribirse:

$$Y = a_0 + a_1X \quad \text{..... Ecuación (2)}$$

Dados cualesquiera dos puntos (X_1, Y_1) y (X_2, Y_2) sobre la recta, se pueden determinar las constantes. La ecuación así obtenida se puede expresar.

Donde:

$$Y - Y_1 = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} (X - X_1)$$

$$m = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$$

Se llama la pendiente de la recta y representa el cambio en Y dividido por el correspondiente cambio en X. Cuando la ecuación se escribe en la forma (2), la constante es la pendiente m. La constante a_0 , que es el valor de Y cuando $X = 0$, se nombra la Y-intersección.

Los problemas que involucran más de tres variables, se tratan de manera análoga a las descritas previamente de dos variables y pueden escribirse:

$$X_1 = b_{1.234} + b_{12.34}X_2 + b_{13.24}X_3 + b_{14.23}X_4 \quad \text{Ecuación (3)}$$

En donde Y representa un hiperplano en el espacio de cuatro dimensiones. Multiplicando ambos miembros de la ecuación (3) por 1, X_2 , X_3 y X_4 sucesivamente y sumando se llega a las ecuaciones normales para determinar $b_{1.234}$, $b_{12.34}$, $b_{13.24}$ y $b_{14.23}$ sustituyendo estas en la ecuación (3) nos da la ecuación de regresión de mínimos cuadrados de X_1 sobre X_2 , X_3 y X_4 .

También se realizaron pruebas estadísticas para detectar, si los lotes de datos pertenecen a

una distribución normal, y en su caso efectuar el análisis de varianza (ANOVA). Para lograr lo anterior, se utilizó el estadístico Shapiro-Wilks (W); el cual se obtiene en función del valor medio y desviación estándar, calculados a partir de una muestra de datos. Si el estadístico es significativo, entonces la probabilidad de que los datos resulten de una distribución normal, podría rechazarse. A la inversa, si no es significativo, se acepta la hipótesis y se efectúa el análisis de varianza (ANOVA) paramétrico. Las medidas de tendencia central que utilizan estos dos análisis son la media aritmética y la mediana respectivamente. Cuando la muestra de los datos no procede de una población con curva normal, se puede aplicar la prueba (H) de Kruskal-Wallis (Kruskal and Wallis, 1952). El software estadístico Infostat versión libre 2008 usado este estudio, tiene los módulos que efectúan los análisis mencionados anteriormente.

Resultados

La **Tabla 2** indica que la asociación de las $PM_{2.5}$ en el Palacio Municipal de Morelia, con la temperatura fue positiva al principio de la primavera, sobre todo en marzo con valor de 0.73. En tanto que, con la humedad relativa, la relación fue positiva y negativa con valores bajos en un rango de -0.09 a -0.34. La velocidad del viento fue negativa, principalmente en enero-febrero con un valor de -0.55, y la asociación con la presión atmosférica fue positiva y negativa, sobre todo al inicio de la primavera en un rango de -0.32 a -0.18. Asimismo, la relación de las $PM_{2.5}$ con el CO de la ENES-UNAM fue positiva en febrero y mayo con 0.77 y 0.83. En el caso de O_3 , también fue positiva sobre todo en enero y marzo con 0.79 y 0.63, respectivamente. En cambio, la relación de las $PM_{2.5}$ de Palacio Municipal con el sitio Merced fue positiva en un rango de 0.27 a 0.55, sin embargo, esta dependencia fue mayor con la estación ENES-UNAM en abril y mayo con cifras de 0.90 (**Tabla 2**).

A partir de los valores de asociación descritos previamente, la **Figura 2A** presenta el promedio horario de las $PM_{2.5}$ de mayo de 2022 registradas entre el centro de la ciudad de Morelia, y la caseta Merced ubicada cerca del centro histórico de la ciudad de México. El promedio mensual más alto de $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ se presentó en Morelia con una muestra de 55%, y Merced con 82%,

respectivamente. El valor máximo correspondió a Morelia con $96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ alrededor de las 04:00 h del lunes 02 de mayo, mientras que la **Figura 2B** demuestra una contaminación mayor en Morelia durante la primera quincena de mayo, que en la ciudad de México. También se observa que la norma NOM-025-SSA1-2021 (**Tabla 1**) se rebasó del 02 al 04 de mayo con $53 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente (**Figura 2B**); incluso, el promedio diario más alto de $53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ coincidió con el día 02 de mayo, en que se registró el valor máximo de $96 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por otra parte, los cambios en la concentración promedio diaria de $\text{PM}_{2.5}$ en la capital de Michoacán, podrían atribuirse al incremento de CO registrado en la ENES-UNAM con factor de determinación $R = 0.80$, un ajuste $R^2 = 0.79$ y nivel de confianza $p < 0.0001$ (**Figura 2C**). Este modelo puede ser correcto, porque el humo en realidad son emisiones en las que se hallan tanto partículas sólidas como líquidas. Estas últimas son, con frecuencia los condensados de procesos incompletos de combustión, como son los gases azulados provenientes del escape del transporte vehicular (Chovin y Roussel, 1970), el cual podría transitar en los alrededores de la caseta de monitoreo de PMN, o bien a la incorporación de CO, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y dióxido de azufre (SO_2), derivados de los incendios forestales (Chow, 1995).

La **Figura 3A** presenta la media aritmética horaria de las $\text{PM}_{2.5}$, de enero 2023 registradas en las mismas estaciones de monitoreo referidas previamente. El promedio mensual más alto de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$, se presentó en Morelia con una muestra de 100% (**Figura 3D**) y Merced con 97%. El valor máximo de $166 \mu\text{g}/\text{m}^3$, se registró otra vez en Morelia el jueves 05 de enero alrededor de las 22:00 h, pero en la ciudad de México el valor máximo de $146 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aconteció el domingo 01 de enero alrededor de las 10:00 h, precedido de altas concentraciones, cercanas a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en horas de la madrugada del mismo día. Asimismo, la **Figura 3B**, demuestra nuevamente, que la contaminación fue mayor en Morelia, y la norma oficial se rebasó el día 5, 7 y 10 con $43 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $43 \mu\text{g}/\text{m}^3$, del 13 al 16 con $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $43 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. En total 7 días, de los cuales 4 fueron consecutivos, mientras que, en el Distrito Federal, el criterio se rebasó el 01 de enero con $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y el día 20 con $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$, presentándose en esta última zona urbana el promedio más alto de

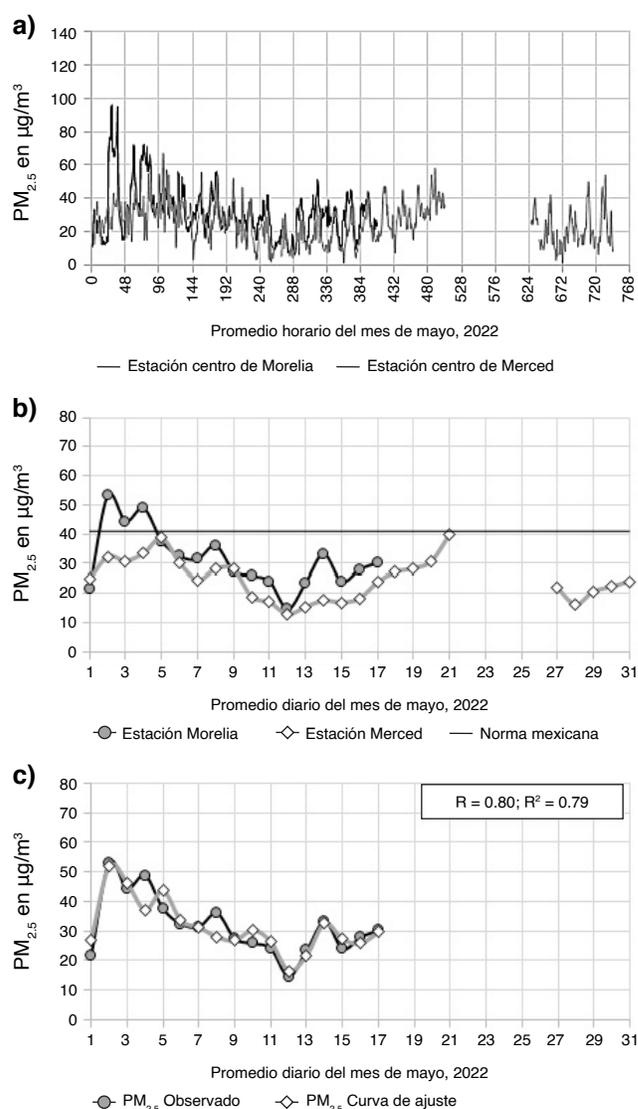


Figura 2. Promedio horario mensual y por día del mes de mayo 2022 de las $\text{PM}_{2.5}$ registradas en 2 sitios de monitoreo de México. En **a)** Promedio horario, **b)** Promedio diario y **c)** Modelo de regresión para la ciudad de Morelia.

$61 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el cual coincidió con el 01 de enero, en que se registró el valor máximo de $146 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por otra parte, los cambios en la concentración diaria de $\text{PM}_{2.5}$ en Morelia, podrían atribuirse al efecto combinado del aumento de CO y O_3 registrados en la estación ENES-UNAM con factor de determinación $R = 0.60$, un ajuste $R^2 = 0.57$ y nivel de confianza $p < 0.0001$ (**Figura 3C**). Este modelo podría considerarse, adicional al descrito anteriormente, pues el aporte de CO en la producción de O_3 está documentado (Caselli, 1992) mediante la siguiente reacción química:

Tabla 2. Matriz de correlación entre los contaminantes del aire y meteorología registradas en dos sitios de monitoreo atmosférico de la ciudad de Morelia y uno de México, Distrito Federal, año 2023.

Palacio municipal PM _{2.5} Enero		Palacio municipal PM _{2.5} Febrero		Palacio municipal PM _{2.5} Marzo		Palacio municipal PM _{2.5} Abril		Palacio municipal PM _{2.5} Mayo	
PM _{2.5}	1	PM _{2.5}	1	PM _{2.5}	1	PM _{2.5}	1	PM _{2.5}	1
Temp	-0.07	Temp	0.02	Temp	0.73	Temp	0.47	Temp	0.50
HR	-0.09	HR	0.2	HR	-0.21	HR	0.02	HR	-0.34
WS	-0.55	WS	-0.55	WS	-0.30	WS	-0.12	WS	-0.23
BP	0.36	BP	0.32	BP	-0.32	BP	-0.22	BP	-0.18
CO*	0.24	CO*	0.77	CO*	0.24	CO*	0.47	CO*	0.83
O3*	0.79	O3*		O3*	0.63	O3*	0.27	O3*	0.00
PM _{2.5} **	0.27	PM _{2.5} **	0.55	PM _{2.5} **	0.35	PM _{2.5} **	0.88	PM _{2.5} **	0.90

Nota:

* Estación de monitoreo ENES-UNAM, sede Morelia

** Estación de monitoreo Merced, Cd. de México

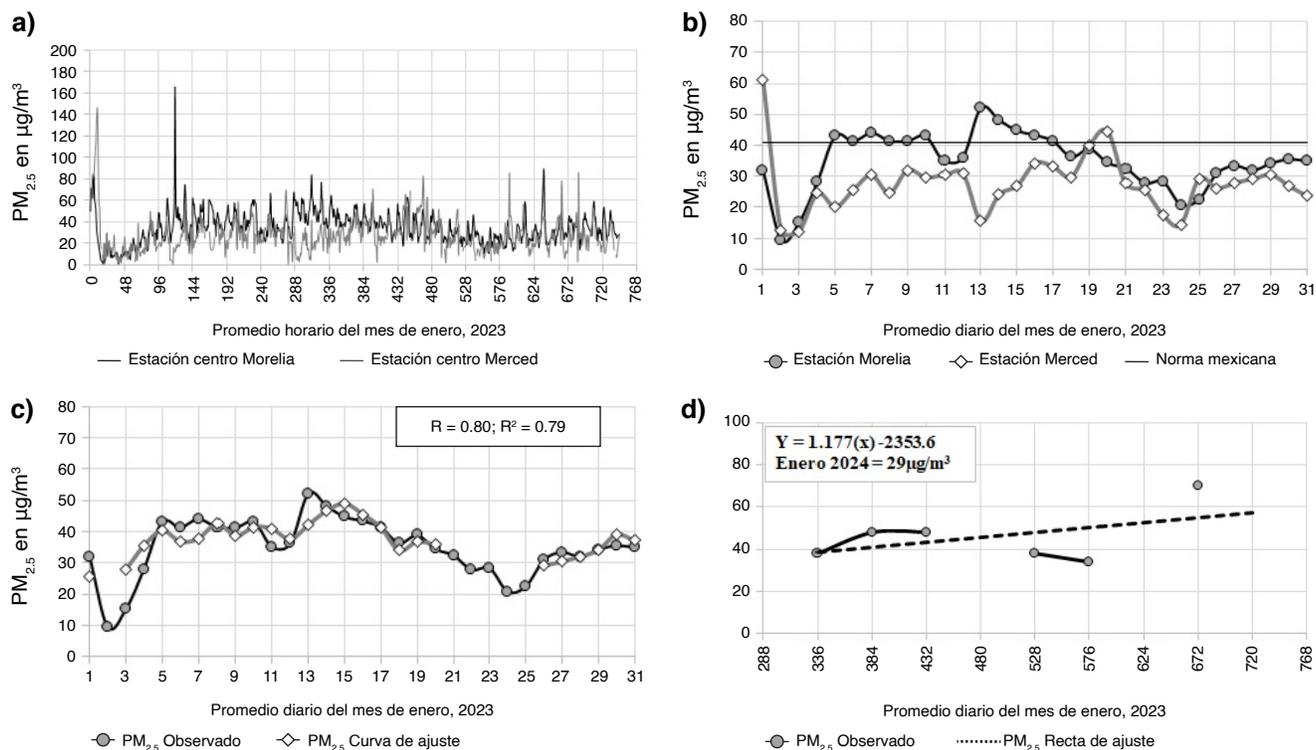
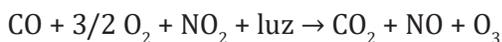


Figura 3. Promedio horario mensual y por día del mes de enero 2023 de las PM_{2.5} registradas en 2 sitios de monitoreo de México. En b) Promedio horario, b) Promedio diario, c) Modelo de regresión para la ciudad de Morelia y d) Valor estimado para enero, 2024 en Morelia.



De esta forma, los niveles de contaminación por PM_{2.5} observados en enero, 2023 puede atribuirse otra vez a las emisiones de CO por fuentes móviles y en consecuencia mayor cantidad de O₃. Además,

de un posible aporte de PM_{2.5} derivado del siniestro ocurrido en una recicladora de llantas; pues dos días antes, durante y después del incendio ocurrido el sábado 7 de enero en dicho predio ubicado en la salida a Salamanca, en <https://www.morelia.gob.mx/2023/01/09/>.

La norma oficial mexicana como ya se mencionó fue rebasada; incluso, en presencia de lluvia el 10 de enero con 0.13 mm . Por otra parte, en enero de 2023 las $\text{PM}_{2.5}$ alcanzaron el promedio más alto de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con respecto de los $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ registrado en 2016 (**Figura 3D**); un aumento de 80% que podría amortiguarse en el 2024, utilizando el tipo más sencillo de una curva de ajuste, el cual predice un valor de $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

De igual forma la **Figura 4A**, presenta el promedio horario de las $\text{PM}_{2.5}$ de febrero de 2023 registradas en los mismos sitios de monitoreo descritos anteriormente. El promedio mensual más alto de $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ se presentó en Morelia con un muestreo de 87%, y Merced con 71%; el valor máximo de $84 \mu\text{g}/\text{m}^3$, se registró otra vez en Morelia el viernes 24 de febrero alrededor de las 13:00 h, pero el promedio diario más alto de $53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ocurrió el 18 de febrero (**Figura 4B**). Otros valores menores a dicho promedio, pero por encima de la norma mexicana acontecieron en los días 3-4 con $47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el 07-08 con $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 24-25 con $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, y el 28 de febrero con $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en total ocho días. Asimismo, en la ciudad de México, el valor máximo de $69 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ocurrió el viernes 17 de febrero alrededor de las 12:00 h, y ningún día por arriba de la norma. Por otra parte, los cambios en la concentración diaria de $\text{PM}_{2.5}$ en el centro de Morelia, podrían atribuirse al aumento de CO registrado en la estación ENES-UNAM con factor de correlación $R = 0.59$, un ajuste $R^2 = 0.57$ y nivel de confianza $p < 0.0001$ (**Figura 4C**). Este modelo es similar al propuesto en mayo de 2022 y la explicación al respecto es la misma que se abordó en dicho mes.

Para febrero de 2023 alcanzó la concentración media más alta de $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en relación con los $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ registrados en 2016 (**Figura 4D**); un aumento de 65 %, el cual podría bajar a $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el 2024.

Por último, en la **Figura 5A** se presenta el promedio horario de las $\text{PM}_{2.5}$ de marzo de 2023 registradas en las mismas estaciones de monitoreo descritas en los párrafos anteriores. El promedio mensual más alto de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aconteció en Morelia con un muestreo de 97% y Merced con 92%. El valor máximo de $87 \mu\text{g}/\text{m}^3$, se registró de nuevo en Morelia el viernes 10 de marzo alrededor de las 23:00 h, pero el promedio diario más alto de $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ocurrió el 11 de marzo (**Figura 5B**).

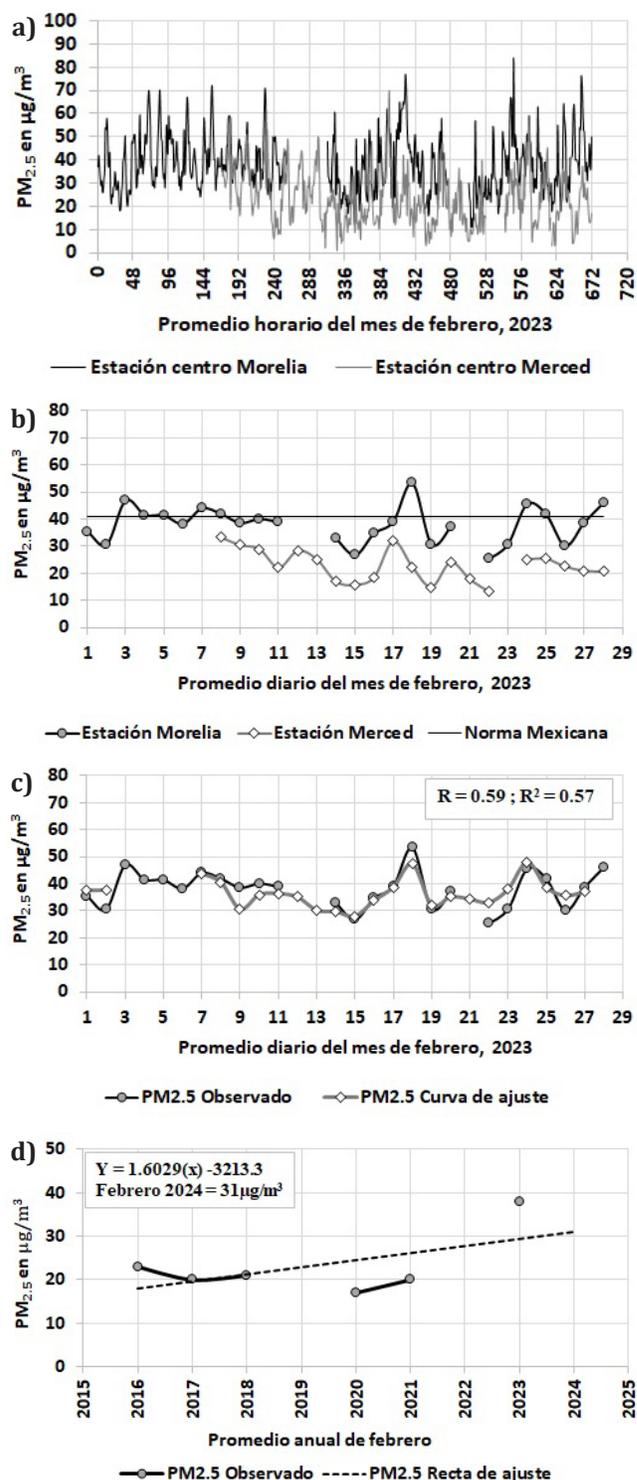


Figura 4. Promedio horario mensual y por día del mes de febrero de 2023 de las $\text{PM}_{2.5}$ registradas en dos sitios de monitoreo de México. En a) Promedio horario, b) Promedio diario, c) Modelo de regresión para la ciudad de Morelia y d) Valor estimado para febrero de 2024 en Morelia.

Otros valores menores a dicho promedio, pero por encima de la norma mexicana, se registraron del 6 al 10 de marzo con $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. El día 12 con $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y del 28-29 de marzo con $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $43 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. En total nueve días, de los cuales siete fueron consecutivos. En tanto que, en la ciudad de México, el valor máximo de $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ se presentó el lunes 27 de marzo, alrededor de las 13:00h y ningún día por encima de la norma. Por otra parte, los cambios en la concentración diaria de $\text{PM}_{2.5}$ en Morelia, se debió al aumento de la temperatura y descenso de la humedad relativa registrada en el centro de la ciudad con factor de determinación $R = 0.65$, un ajuste $R^2 = 0.62$ y nivel de confianza $p < 0.0001$ (Figura 5C).

Este modelo podría ser correcto, debido a que las $\text{PM}_{2.5}$ aumentaron al inicio de marzo por los incendios ocurridos en la periferia de la ciudad (Morales-Pérez, 2023) y a fines de marzo, subieron otra vez junto con el calor y descenso de la humedad relativa, por la proximidad de la primavera y quemas agrícolas ocurridas al final del mes. Por otra parte, en marzo de 2023 fue el mes con el mayor promedio de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con respecto de los $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ registrados en 2016 (Figura 5D); un aumento de 106 %, el cual podría bajar a $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2024.

Para el mes de abril de 2023 la (Figura 6A) presenta la media aritmética horaria de las $\text{PM}_{2.5}$ registradas ahora en la estación PMN del centro urbano y la ENES-UNAM al suroeste en la periferia de Morelia. El promedio mensual más alto de $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aconteció en PMN con un muestreo de 90% y ENES-UNAM con 97%, respectivamente. El valor máximo de $76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ocurrió en la ENES-UNAM el jueves 27 de abril alrededor de las 4:00 h, y ningún día por arriba de la norma, mientras que en PMN el valor máximo de $72 \mu\text{g}/\text{m}^3$, se registró el martes 04 de abril alrededor de las 10:00 h. Pero el promedio diario más alto de $47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ se presentó el 1 y 22 de abril (Figura 6B). Otros valores menores a dicho promedio, pero por encima del criterio oficial, acontecieron del 02-04 de abril, con $43 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. El día 11 con $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el día 17 con $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$, del 27-28 con $43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En total nueve días, de los cuales cuatro fueron continuos; incluso, en los días 11 y 22 de abril se presentó lluvia con 0.11 mm y 0.40 mm, respectivamente.

Por otra parte, los cambios en la concentración

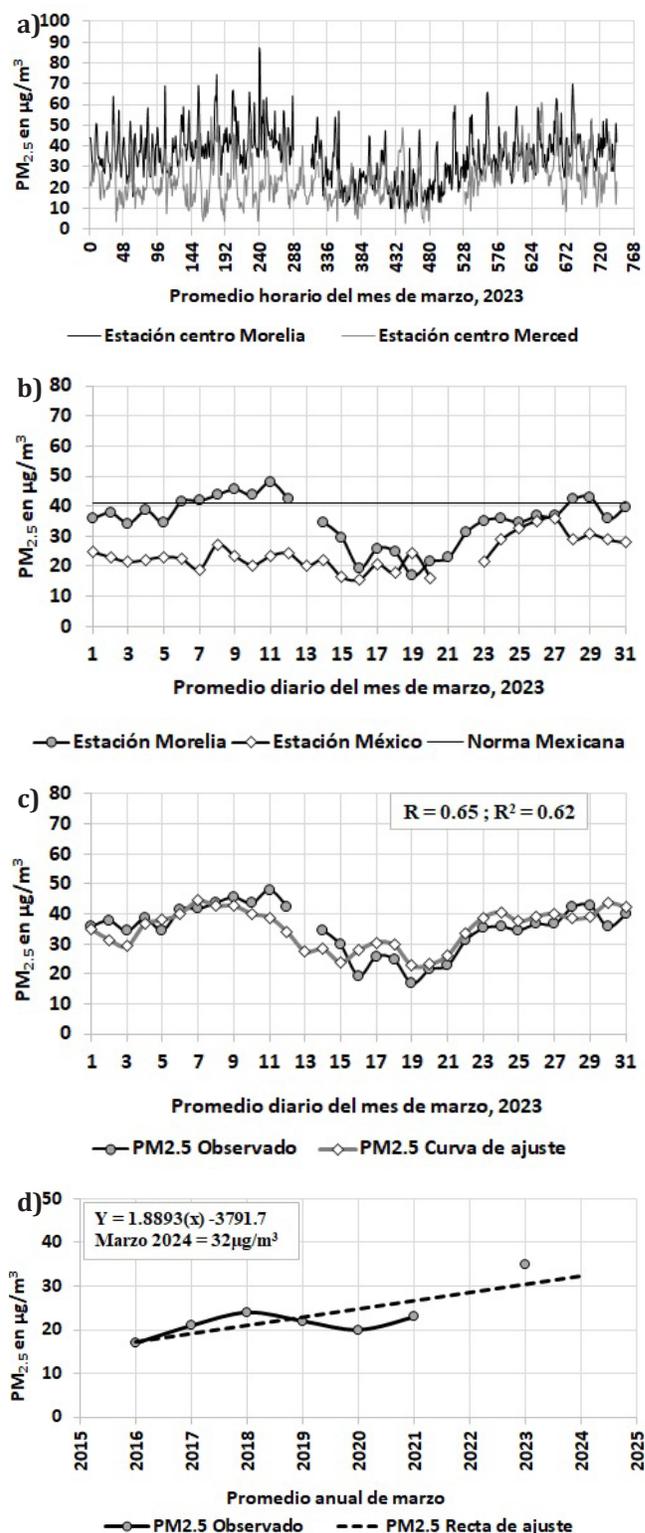


Figura 5. Promedio horario mensual y por día del mes de marzo 2023 de las $\text{PM}_{2.5}$ registradas en 2 sitios de monitoreo de México. En a) Promedio horario, b) Promedio diario, c) Modelo de regresión para la ciudad de Morelia y d) Valor estimado para marzo, 2024 en Morelia.

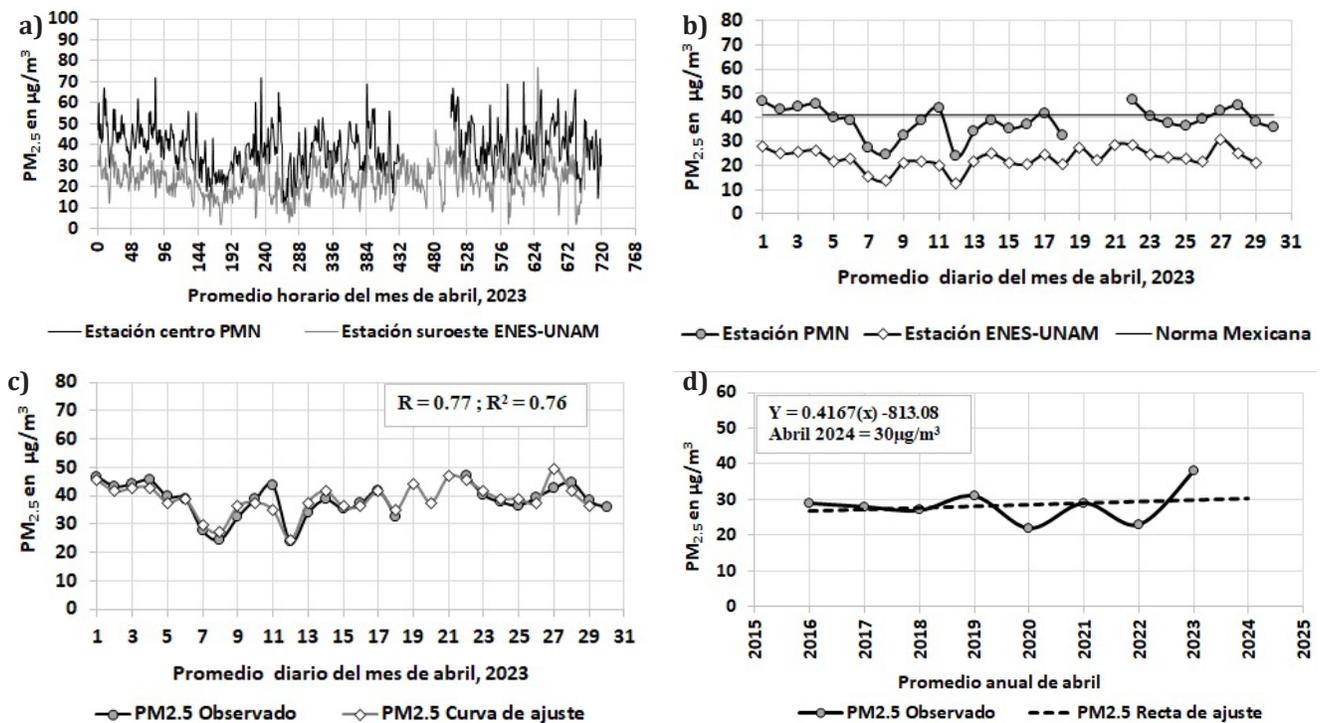


Figura 6. Promedio horario mensual y por día del mes de abril de 2023 de las $PM_{2.5}$, registradas en dos sitios de monitoreo de Morelia. En a) Promedio horario, b) Promedio diario, c) Modelo de regresión para la ciudad de Morelia y d) Valor estimado para abril de 2024.

diaria de $PM_{2.5}$ en Morelia, se debió al aumento de las $PM_{2.5}$ registradas en la ENES-UNAM con factor de correlación $R=0.77$, un ajuste $R^2=0.76$ y nivel de confianza $p<0.0001$ (**Figura 6C**). Este modelo podría ser válido, porque a mediados de abril aumentaron los incendios forestales (Fátima-Alfaro, 2023), o bien al exceso de $PM_{2.5}$ transportadas por el viento desde el sitio ENES-UNAM que se localiza al suroeste de Morelia. Esto podría ser un indicador del impacto que también tienen las actividades agrícolas, de rosa tumba y quema en esta zona alejada, unos 15 km de la ciudad (**Figura 6B**). Por otra parte, abril de 2023 fue el mes con el mayor promedio, con $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respecto de los $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ registrados en 2016 (**Figura 6D**); un aumento de 31 %, el cual podría bajar a $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el 2024.

Igualmente, para el mes de mayo de 2023, la **Figura 7A** presenta el promedio horario de las $PM_{2.5}$, registradas en las mismas estaciones de monitoreo referidas en los párrafos anteriores. El promedio mensual más alto de $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aconteció en PMN con un muestreo de 100 % y ENES-UNAM con 77%, respectivamente. El valor máximo de $112 \mu\text{g}/\text{m}^3$ se presentó en PMN el domingo 07 de mayo alrededor de las 15:00 h. Dicho valor, coincidió

con el promedio diario más alto de $56 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el domingo 07 y lunes 08. Otros valores, menores de dicho promedio, pero por arriba del criterio oficial sucedieron del 03-06 con $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $53 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Del 09-10 con $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, el 12 con $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el 18 con $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el 22-23 con $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $47 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y 31 con $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$; en total 13 días. De estos, ocho fueron consecutivos; incluso, en los días 12 y 23 de mayo se registró lluvia con 0.030 mm y 0.13 mm, respectivamente, mientras que en la ENES-UNAM el valor máximo de $93 \mu\text{g}/\text{m}^3$, se registró el domingo 07 de mayo alrededor de las 14:00hrs. Pero el promedio diario más alto de $43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ se presentó el 10 de mayo (**Figura 7B**); teniendo en consecuencia, un día por encima del criterio oficial.

Por otra parte, los cambios en la concentración diaria de $PM_{2.5}$ en Morelia, se debió al aumento de las $PM_{2.5}$ registradas en la ENES-UNAM con factor de correlación $R=0.81$, un ajuste $R^2=0.81$ y nivel de confianza $p<0.0001$ (**Figura 7C**). Este modelo es similar al referido anteriormente y la explicación al respecto es la misma que se abordó para el mes de abril. Por otra parte, mayo 2023 fue el mes con el mayor promedio de $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con respecto de

los 34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ registrados en 2016 (**Figura 7D**); un aumento de 21 %, el cual podría estabilizar la pendiente al aumento en 33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el 2024.

Discusión

Los resultados obtenidos del ANOVA no paramétrico, podrían confirmar que la contaminación por $\text{PM}_{2.5}$ fue más alta en el centro, que en la periferia de Morelia (**Tabla 3:1-2**) esta diferencia, está documentada en (Correa-García, 2022), quien reportó 31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$ en PMN y ENES-UNAM, respectivamente, en mayo 2016. Mientras que el valor de la mediana de las $\text{PM}_{2.5}$, también fue mayor en la capital de Michoacán, con respecto del sitio Merced de la ciudad de México (**Tabla 3:3-6**). Esto podría deberse a la exposición más inmediata del centro de Morelia con las actividades agrícolas, situación que no es común que suceda, como actividad en los alrededores de la estación Merced, o bien, que esta discrepancia, podría atribuirse a varios factores: La distancia en kilómetros entre ambos sitios, altitud sobre el nivel del mar, el tamaño del parque vehicular, las industrias, los servicios públicos, la población, etc.

Por otra parte, la sustitución de los datos de monóxido de carbono (CO) y ozono (O_3) de la estación ENES-UNAM, debido a la falta de datos en la estación de PMN, proporcionaron curvas de ajuste muy estrechas, en donde los valores estimados lograron describir adecuadamente los promedios diarios observados de las $\text{PM}_{2.5}$ en el centro de la ciudad. De hecho, los valores residuales (valor estimado menos el observado) cumplieron con el principio de normalidad. Además, la incorporación de las $\text{PM}_{2.5}$ de la ENES-UNAM, sobre todo en abril y mayo de 2023, para explicar los niveles de $\text{PM}_{2.5}$ en PMN, demuestra que la alta correlación hallada entre ambos sitios, se debe al tamaño de su diámetro y la distancia en kilómetros entre las casetas. Sin embargo, la diferencia hallada (**Tabla 3:1-2**) podría atribuirse a la naturaleza y composición química de las partículas, la cual depende del entorno físico y tipos de fuentes de emisión. Esto último, también puede ser válido para la estación Merced del centro de la ciudad de México (**Tabla 3:3-6**).

La evaluación de la norma oficial mexicana NOM-025-SSA1-2021 mostró que Morelia en el 2023, contabilizó 46 días por encima de la

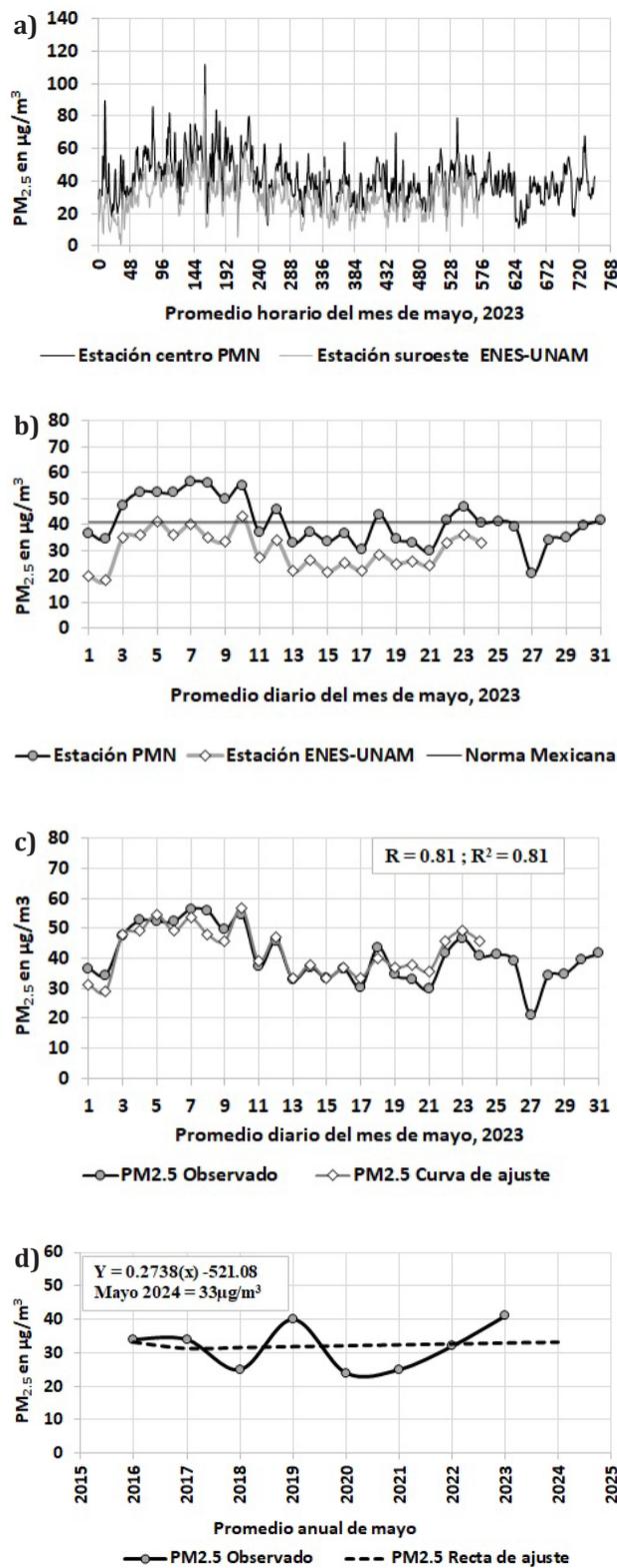


Figura 7. Promedio horario mensual y por día del mes de mayo de 2023 de las $\text{PM}_{2.5}$ registradas en dos sitios de monitoreo de Morelia. En a) Promedio horario, b) Promedio diario, c) Modelo de regresión para la ciudad de Morelia y d) Valor estimado para mayo, 2024.



Tabla 3. Resumen ANOVA no paramétrico Kruskal-Wallis para detectar cambios en la mediana mensual de partículas suspendidas $PM_{2.5}$ en $\mu g/m^3$ entre sitios de muestreo en Morelia y la ciudad de México. Los sitios en diferentes casillas, son distintos con nivel de significación mínimo de 99%.

1	Año- mes	Sitio de muestreo	1 ENES-UNAM	2 PMN	2	Año- mes	Sitio de muestreo	1 ENES-UNAM	2 PMN
	2023	Contaminante	$PM_{2.5}$	$PM_{2.5}$		2023	Contaminante	$PM_{2.5}$	$PM_{2.5}$
	abril	Mediana	$23\mu g/m^3$	$38\mu g/m^3$		mayo	Mediana	$30\mu g/m^3$	$40\mu g/m^3$
		Mediana global					Mediana global		
			$29\mu g/m^3$					$35\mu g/m^3$	
		Número de datos	696	648			Número de datos	576	743
	Muestra en %	97%	90%		Muestra en %	77%	100%		
3	Año- mes	Sitio de muestreo	1 Cd. México	2 Cd. Morelia	4	Año- mes	Sitio de muestreo	1 Cd. México	2 Cd. Morelia
	2022	Contaminante	$PM_{2.5}$	$PM_{2.5}$		2023	Contaminante	$PM_{2.5}$	$PM_{2.5}$
	mayo	Mediana	$25\mu g/m^3$	$30\mu g/m^3$		enero	Mediana	$25\mu g/m^3$	$34\mu g/m^3$
		Mediana global					Mediana global		
			$27\mu g/m^3$					$30\mu g/m^3$	
		Número de datos	607	408			Número de datos	719	744
	Muestra en %	82%	55%		Muestra en %	97%	100%		
5	Año- mes	Sitio de muestreo	1 Cd. México	2 Cd. Morelia	6	Año- mes	Sitio de muestreo	1 Cd. México	2 Cd. Morelia
	2023	Contaminante	$PM_{2.5}$	$PM_{2.5}$		2023	Contaminante	$PM_{2.5}$	$PM_{2.5}$
	febrero	Mediana	$21\mu g/m^3$	$36\mu g/m^3$		marzo	Mediana	$23\mu g/m^3$	$35\mu g/m^3$
		Mediana global					Mediana global		
			$30\mu g/m^3$					$29\mu g/m^3$	
		Número de datos	476	587			Número de datos	682	720
	Muestra en %	71%	87%		Muestra en %	92%	97%		

norma; cifra que representa cerca de 120% más, en comparación con los 21 días computados con la NOM-025-SSA1-2014. Este porcentaje de incremento parece enorme, pero los 21 días también constituyen alrededor de 130% más, con respecto de los 9 días reportados en 2019 con la misma NOM-025-SSA1-2014 (Correa-García, 2020). En el año 2020, no hubo ningún registro por encima del reglamento, y para el año 2021, el criterio fue superado el 23 y 24 de abril con $47 \mu g/m^3$ y $51 \mu g/m^3$, respectivamente (Correa-García, 2022). Esta última descripción, demuestra que las $PM_{2.5}$ alcanzaron por primera vez concentraciones con tendencia al aumento en el promedio mensual y anual, sobre todo, en los primeros cinco meses de 2023, aún con el cambio de $12 \mu g/m^3$ a $10 \mu g/m^3$ del promedio anual. La experiencia enseña otra vez, una diferencia grande entre el valor reglamentado,

y el obtenido del 2015 al 2023 (Tabla 4). Pese a esto, parece evidente que Morelia enfrenta hoy un problema de contaminación por $PM_{2.5}$, debido en parte a las quemas agrícolas e incendios forestales. Sin embargo, una limitación al respecto, es la falta de información de PM_{10} en los dos últimos años.

Por otra parte, según el (DOF, 2021) los cambios de la NOM-025-SSA1-2021, se hicieron porque los valores fijados en la NOM-025-SSA1-2014, eran ampliamente mayores a las guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS) [PM_{10} : $50 \mu g/m^3$ y $PM_{2.5}$: $25 \mu g/m^3$], y la nueva norma, tiene como objetivo alcanzar gradualmente la recomendación de la OMS, con el fin de proteger la salud de la población. Pero este argumento, tiene limitaciones porque el establecimiento de una norma, no tiene su base en una recomendación, sino en una serie de estudios

Tabla 4. Resumen de las concentraciones promedio anual y mensual de las partículas suspendidas PM_{2.5} en µg/m³ registradas en el centro de la ciudad de Morelia. Periodo 2015-2023. Fuente: Periodo 2015-2021 reproducido de (Correa-García, 2022). El tono gris, indica muestreo suficiente ≥50 % y <75 %.

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio año
2015							16	17	12	14	21	21	17
2016	19	23	17	29	34	18	16	16	14	16	19	21	20
2017	24	20	21	28	34	18	18	13	11	14	22	28	21
2018	24	21	24	27	25	13	19	14	13	12	14		19
2019			22	31	40	16	15	15	15	13	18	22	21
2020	19	17	20	22	24	14	11	10	11	15	16	17	16
2021	17	20	23	29	25	12	14	13	10	12			17
2022				23	32					15	22	20	
2023	35	38	35	38	41	21	15	15	18	15	19	20	26
2024													
% de aumento	84	65	106	31	21	17	-6	-12	50	7	-10	-5	53

que ajustan concentraciones máximas permisibles de contaminantes en la atmósfera. De modo que no exista riesgo para la salud de las poblaciones, humanas, sobre todo porque en Morelia no se tienen estudios epidemiológicos al respecto. Por otra parte, las expectativas para el 2024 con base en la información de la **Tabla 4** y la función lineal correspondiente [$Y = 0.4787(x) - 946.68$] indican un descenso mínimo del promedio anual a 22 µg/m³. Pero debido a lo extenso de este estudio el gráfico no se exhibe en ningún apartado. Mientras que, para los primeros cinco meses del año, los valores estimados también disminuirán, pero la pendiente seguirá hacia arriba. Los pronósticos aquí mostrados, no están exentos de fallar, debido a los procesos de operación, calibración y mantenimiento de los equipos de monitoreo de PM_{2.5}, así como la entrada en vigor de la NOM-025-SSA1-2021 para el 2024 que fija un valor de 33 µg/m³ y 10 µg/m³ de promedio diario y anual. Significa rebasar el límite establecido con mayor frecuencia, lo cual es tema de preocupación, ya que esta norma es de observancia obligatoria en todo el territorio nacional, para las autoridades federales y locales que tengan a su cargo la vigilancia y evaluación de la calidad del aire.

Conclusiones

En el año 2023 la contaminación atmosférica por partículas suspendidas PM_{2.5}, se incrementó 53%

en la ciudad de Morelia, con respecto al 2015. Enero, febrero, marzo y septiembre, fueron los meses con mayor incremento, 84%, 65%, 106% y 50%, respectivamente. Por lo tanto, se recomienda, a las autoridades encargadas del tema, elaborar políticas encaminadas a reducir la tendencia actual de estos contaminantes. Actualmente la ciudad de Morelia, puede alcanzar concentraciones de PM_{2.5} más altas que en la ciudad de México, al menos respecto a la estación Merced, que se ubica cerca del centro histórico del Distrito Federal. La evaluación de la norma mexicana vigente en materia de salud NOM-025-SSA1-2021 para PM_{2.5}, contabilizó 46 días por encima de esta norma, y la comparación con la NOM-025-SSA1-2014 dio como resultado 21 días fuera del criterio. En cualquier caso, el número de eventos registrados en el 2023 es histórico y tema de preocupación. Los modelos propuestos en este estudio, sugieren que el monóxido de carbono (CO) y ozono (O₃) contribuyen a la contaminación atmosférica por partículas suspendidas PM_{2.5}, como resultado de las quemas agrícolas que ocurren en la periferia de la ciudad de Morelia.

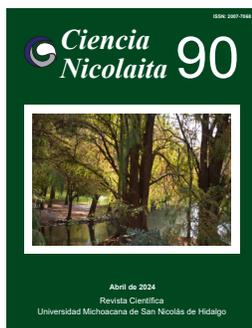
Dedicatoria

Este estudio está dedicado en memoria de Miguel Agustín Chapela Mendoza, del Departamento de Difusión y Divulgación de la Facultad de Biología, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, fallecido en enero de 2024.

Referencias

- Badillo Castañeda CT (2012). Caracterización del Contenido de Metales en Partículas $PM_{2.5}$ en dos zonas del Área Metropolitana de Monterrey. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma de Nuevo León. Pp. 114.
- Báez A (1987). La calidad del aire serie Medio Ambiente en Coahuila Volumen II. Centro de Eco-desarrollo. México D.F. Pp. 56.
- Balzarini MG, González L, Tablada M, Casanoves F, Di Rienzo JA, Robledo CW (2008). Manual del Usuario, Editorial Brujas, Córdoba, Argentina.
- Bravo AH (1984). La contaminación del aire en México. Fundación Universo Veintiuno, México D.F. 64 pp.
- Caselli M (1992). La contaminación atmosférica. Causas y fuentes. Efectos sobre el clima la vegetación y los animales. Siglo XXI Editores, México. Pp. 192.
- Correa-García A (2022). Contaminación atmosférica y meteorología en Morelia Michoacán, México. Una década evaluando la atmosfera urbana de la ciudad de Morelia. Publicado en noviembre 14, 2022. Pp. 228. Editorial Académica Española. ISBN 978-620-2-25130-3
- Correa-García A (2020). Contaminación atmosférica por incendios forestales en Morelia, Michoacán. Ciencia Nicolaita. Número 80, Pp. 56-75. Agosto de 2020. Publicado el 04 de diciembre de 2020. <https://cic.cn.umich.mx>.
- Correa-García A (2004). Contaminantes atmosféricos en la zona metropolitana de la ciudad de México. Universidad Autónoma Metropolitana-Instituto Politécnico Nacional. Pp. 280. Impreso en México. Primera edición 2004., Primera reimpresión 2009. ISBN 970-36-0349-2; ISBN 970-36-0199-5. <http://www.publicaciones.ipn.mx>.
- Chow JC, Watson JG, Edgerton SA, Vega E (2002). Chemical composition of PM_{10} in Mexico City during winter 1997. *Sci. Total Environ.* 287(3): 177-201.
- De Nevers (1997). Ingeniería y Control de la Contaminación del Aire, Editorial Mc Graw Hill, México D.F. Pp. 546.
- De Pablo F, López A, Rivas Soriano L, Tomás C, Diego L, González M, Barrueco M. (2006). Relationships of daily mortality and hospital admissions to air pollution in Castilla-León Spain. *Atmósfera* 19: 23-39.
- Diario Oficial de la Federación. (DOF, 2021). NORMA Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas suspendidas PM_{10} y $PM_{2.5}$. Valores normados para la concentración de partículas suspendidas PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. Publicado el miércoles 27 de octubre, 2021.
- Dockery DW, Pope III CA, Xu MD, Spengler JD, Ware JH, Fay ME, Ferris BG, Speizer FE (1993). An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *N. Engl. J. Med.* 329: 1753-1759.
- Fátima-Alfaro (2023). Calidad del aire en Morelia sin afectaciones por incendios forestales. Agencia Quadratín. Publicado el 18 de abril, 2023. <https://www.quadratin.com.mx/municipios/morelia/calidad-del-aire-en-morelia-sinafectaciones-por-incendios-forestales/>
- Filleul L, Cassadou S, Medina S, Fabres P, Lefranc A, Eiltein D, Le Tertre A, Pascal L, Chardon B, Blanchard M, Declercq C, Jusot JF, Prouvost H, Ledrans M (2006). The relation between temperature, ozone, and mortality in nine French cities during the heat wave of 2003. *Env. Health Pers.* 114: 1344-1347.
- Gobierno Municipal monitorea calidad del aire debido a incendio registrado en Tarímbaro. Publicado en enero 09, 2023 en <https://www.morelia.gob.mx/2023/01/09/>.
- Health Effects Institute (HEI, 2000). Reanalysis of the Harvard Six Cities Study and the American Cancer Society Study of Particulate Air Pollution and Mortality. Synopsis of the Particle Epidemiology Reanalysis Project. Health Effects Institute.
- Mancilla Y, Mendoza A, Herckes P y Fraser M (2014). Source Apportionment of $PM_{2.5}$ based on molecular organic marker in Monterrey, Mexico. En: A&WMA's 107th Annual Conference & Exhibition. 24-27 de Junio de 2014. California, Estados Unidos. Paper 33604.
- Manoli E, Kouras A, Samara C (2004). Profile analysis of ambient and source emitted particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons from three sites in northern Greece. *Chemosphere* 56: 867-878.
- Manzanares L, Echániz G, López MA, Pérez IK y Garibay V (2011). Guía metodológica para la estimación de emisiones de $PM_{2.5}$. INE, México. 103 pp.
- McDonnell WF, Nishino-Ishikawa N, Peterson FF, Chen LH, Abbey DE (2000). Relationship of mortality with the fine and coarse fraction of long term ambient PM_{10} concentrations in nonsmokers. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* 10: 427-436.

- Morales-Pérez U (2023). Reportan a Morelia con calidad del aire extremadamente mala. Agencia Quadratín. Publicado el 07 de marzo, 2023. <https://www.quadratín.com.mx/principal/reportan-a-morelia-con-calidad-del-aire-extremadamente-mala/>
- Ostro BD, Eskeland GS, Sánchez JM, Feyzioglu T (1999). Air Pollution and health effects: a study of medical visits among children in Santiago, Chile. *Environmental Health Perspective* 107: 69-73.
- O'Neill MS, Loomis D, Borja-Aburto VH (2004a). Ozone, area social conditions, and mortality in Mexico City. *Environ. Res.* 94: 234-242.
- O'Neill MS, Loomis D, Borja-Aburto VH, Gold D, Hertz-Picciotto I, Castillejos M (2004b). Do associations between airborne particles and daily mortality in Mexico City differ by measurement method, region, or modeling strategy? *J. Exp. Anal. Environ. Epidemiol.* 14: 429-439.
- Ritz B, Wilhelm M and Zhao Y (2006). Air Pollution and infant death in southern California, 1989-2000. *Pediatrics* 118: 493-502.
- Pérez-Vidal H, Lunagómez-Rocha MA, Acosta-Pérez Ll (2010) Análisis de partículas suspendidas totales (PST) y partículas fracción respirable (PM10), en Cunduacán, Tabasco. *Universidad y ciencia* 26(2): 151-162
- Pohjola M, Kousa A, Aarnio P, Koskentalo T, Kukkonen J, Harkonen J, Karppinen A (2000). Meteorological interpretation of measured urban PM2.5 and PM10 concentrations in the Helsinki Metropolitan Area. *Air Pollution VIII* 689-698.
- Pope CA, Thun MJ, Namboodiri MM, Dockery DW, Evans JS, Speizer FE, Heath CW (1995). Particulate Air Pollution as a Predictor of Mortality in a Prospective Study of U.S. Adults. *Am. J. Respir. Crit. Care. Med.* 151: 669-674.
- Spiegel, Murray R (1991). Estadística. Segunda Edición. Editorial McGraw-Hill. Impreso en España.
- Wadden AR, Scheff A (1987). Contaminación del aire en interiores, editorial Limusa, México D.F. 67 pp.
- Whitby K, Cantrell B (1976). Fine particles. In International conference on environmental sensing and assessments, Las Vegas, NV, Institute of Electric and Electronic Engineers.
- Zhang Y, Huang W, London SJ, Song G, Chen G, Jiang I, Zhao N, Chen B, Kan H (2006). Ozone and daily mortality in Shanghai, China. *Environ. Hel. Persp.* 114: 1227-1232.



Ciencia Nicolaita 90

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Análisis termodinámico y económico de un sistema geotérmico de trigeneración de energía, integrado con los ciclos Flash, Kalina y Stirling

Thermodynamic and economic analysis of a geothermal trigeneration energy system, integrated with the Flash, Kalina and Stirling cycles

Alejandra Belem Mendoza Maldonado*, Luis Felipe Pasillas Villalobos, Jesús Ricardo Rosado Fierro, Luis Manuel Lazos Durán, Jeandery Alexandra Jurado Chávez, Víctor M. Ambriz-Díaz

Para citar este artículo: Mendoza Maldonado AB*, Pasillas Villalobos LF, Rosado Fierro JR, Lazos Durán LM, Jurado Chávez JA, Ambriz-Díaz VM (2024). Análisis termodinámico y económico de un sistema geotérmico de trigeneración de energía, integrado con los ciclos Flash, Kalina y Stirling. *Ciencia Nicolaita* 90: 57-71.
DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi90.725>

Historial del artículo



Recibido: 30 de junio de 2023
Aceptado: 15 de diciembre de 2023
Publicado en línea: abril 2024



Ver material suplementario



***Correspondencia de autor:** alejandra.mendoza.md@gmail.com



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Análisis termodinámico y económico de un sistema geotérmico de trigeneración de energía, integrado con los ciclos Flash, Kalina y Stirling

Thermodynamic and economic analysis of a geothermal trigeneration energy system, integrated with the Flash, Kalina and Stirling cycles

Alejandra Belem Mendoza Maldonado*, Luis Felipe Pasillas Villalobos, Jesús Ricardo Rosado Fierro, Luis Manuel Lazos Durán, Jeandery Alexandra Jurado Chávez, Víctor M. Ambriz-Díaz

Tecnológico Nacional de México/I.T. Chihuahua, Av. Tecnológico, 2909, 31310, Chihuahua, México.

Resumen

En la presente investigación se realiza un análisis de desempeño termodinámico y económico de los ciclos Kalina, Flash y el motor Stirling, integrados de una forma innovadora para el aprovechamiento de los recursos geotérmicos en la generación de energía. Se establece un modelo basado en la primera ley de la termodinámica, con la finalidad de presentar las potencias netas entregadas de cada ciclo y del motor Stirling. Los resultados indican una potencia neta del sistema de 31.35 MW, el cual comparado en términos de potencia con otros métodos para obtención de energía es relevante. Por otro lado, a través de un modelo económico basado en indicadores económicos, se tiene la conclusión de que el sistema tiene una viabilidad favorable alcanzando valores en el tiempo de recuperación de la inversión y el valor presente neto de 1.5 años y 139,100,000 USD, respectivamente.

Palabras clave: Sistema geotérmico, Trigeneración, Ciclo Flash, Ciclo Kalina, Motor Stirling

Abstract

In the present investigation an analysis of the thermodynamic and economic performance of the Kalina cycle, Flash cycle and Stirling engine is made, integrated in an innovative way to take advantage of the geothermal resources in power generation. A model based on the first law of thermodynamics presents the net power output of each cycle and the Stirling engine. The results indicate a net power output of 31.35MW from the system, which compared with other methods to obtain energy, in terms of power is relevant. On the other hand, through an economic model based on economic indicators, it is concluded that the system has a favorable viability with a return of investment in 1.5 years, and a net value of 139,100,000 USD.

Keywords: Geothermal system, Trigeneration, Flash Cycle, Kalina Cycle, Stirling Engine

*Autor de correspondencia: alejandra.mendoza.md@gmail.com
Copyright © Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



1. Introducción

La energía geotérmica cuenta con múltiples ventajas, dentro de ellas se encuentra que no necesita combustible, pues aprovecha cualidades de la tierra, por ende, puede reducir de 90% hasta 100% las emisiones de gases de efecto invernadero. Durante casi 100 años, la energía geotérmica ha sido empleada para generar electricidad, para fines domésticos, agrícolas, entre otros. Sin embargo, no ha logrado el alcance merecido, dado que algunos recursos, en su mayoría contaminantes son comercializados con mayor facilidad (Gupta y Roy, 2007a; Glassley, 2014). Por otra parte, una de las aplicaciones más relevantes de la energía geotérmica, es el aprovechamiento para la generación de electricidad mediante las plantas de simple flash, las cuáles se distinguen por su cámara flash, encargada de disminuir la presión del recurso de activación extraído, donde luego de ello, el fluido en forma de mezcla llega a un separador, ahí el líquido se reinyecta y el vapor es enviado a la turbina para generar electricidad. El vapor saliente de la turbina es enviado al condensador, que se encarga de convertir el recurso a líquido saturado y a la vez disipa el calor al medio ambiente (Gupta y Roy, 2007a). Esta descripción es una característica típica de una planta simple flash en su esquema de operación tradicional.

En la actualidad, diseños innovadores de plantas geotérmicas implican la recuperación de calor del condensador para generar electricidad nuevamente a través de tecnologías con menores requerimientos de temperatura, tal es el caso del motor Stirling y el ciclo Kalina (Roeinfard y Moosavi, 2022). Este último, utiliza una mezcla de amoníaco y agua como fluido de trabajo (Zare y Palideh, 2018), y donde la temperatura de activación del ciclo generalmente oscila desde 100 a 130 °C (Lan *et al.*, 2022). Dentro de sus ventajas se tiene que; su eficiencia térmica otorga un 36% más que un generador termoeléctrico (Lan *et al.*, 2022). También se ha comprobado que tiene una alta eficiencia para fuentes de calor de bajo grado de temperatura, y logra disminuir el uso de energía entre 20 y 30 %, lo que se traduce como un muy alto rendimiento, esto lo posiciona incluso mejor que el bien conocido ciclo Rankine orgánico (ORC) (Roeinfard y Moosavi, 2022). El motor Stirling, propuesto por Robert Stirling en 1816, de igual manera es conocido por su alta eficiencia en aplicaciones de energía, tal es el caso de la

geotérmica (Tavakolpour-Saleh *et al.*, 2021).

En la actualidad, la energía geotérmica también se emplea en la calefacción, electricidad y refrigeración. A dicho esquema de aplicación simultánea, se le conoce como trigeneración. Dicho sistema también puede ser definido por la cantidad de productos que es capaz de producir, por ejemplo, tres productos de electricidad. Un esquema de trigeneración de energía otorga mejoras monetarias, ecológicas y tecnológicas (Zare, 2016). Estos sistemas tienen un potencial para mejorar e involucrar nuevas configuraciones e interconexiones de tecnologías que permiten incrementar el ahorro energético y el uso eficiente de la energía. Por ejemplo, Batenin *et al.* (2014) demostraron los beneficios de la trigeneración en comparación con plantas de vapor convencionales. En el estudio, encontraron que el ahorro anual de recursos energéticos puede llegar a un 24% y el gasto anual de estos recursos es un 30% menor. En la misma dirección, Ren *et al.* (2021), integraron un sistema implementando el ciclo flash y un ciclo que opera con el par de trabajo agua-amoniaco (cogeneración). Con base en simulaciones realizadas, el sistema a una temperatura de activación de 170 °C alcanza una eficiencia del 81.8% en el ciclo flash y 46.99% en el ciclo que opera con el par de trabajo agua-amoniaco. Por otro lado, Cao *et al.* (2021), realizaron un estudio de un sistema de trigeneración, entre sus elementos destacables está el ciclo Kalina modificado. Uno de los puntos más importantes es en la mejora de eficiencia donde se obtuvo un 51.3%.

Fan *et al.* (2021), se centraron en la producción de energía limpia mediante el ciclo flash con una fuente geotérmica y otras energías, obteniendo valores en la eficiencia energética de 58.03%. En términos económicos, encontraron que la planta tiene un retorno de inversión de 5.6 años. Ansarinasab y Hajabdollahi (2020), presentaron un sistema con capacidad de producir 7,774 kW mediante los ciclos Kalina y Stirling. Moradpoor y Ebrahimi (2019), analizaron un sistema de trigeneración que integra tecnologías como el ciclo Kalina y motor Stirling, que tiene un ahorro de combustible de 45%, y una eficiencia eléctrica del 50%. Musharavati *et al.* (2021), presentaron un sistema con capacidad de producir electricidad y otros productos utilizando el ciclo Kalina, con un análisis termodinámico a partir del software *Engineering Equation Solver* (EES).

Kaczmarczyk *et al.* (2020), evaluaron un

sistema que aprovecha la energía geotérmica de baja entalpía para la producción de electricidad, utilizando el ciclo Rankine y el Kalina, obteniendo resultados que indican que el ciclo Kalina es capaz de producir 6.3 GWh/año de electricidad. Nasruddin *et al.* (2009), presentaron un análisis de una instalación práctica de un ciclo Kalina que se encuentra en Husavik, Islandia, con la finalidad de aprovechar el calor desperdiciado para incrementar la eficiencia de la planta. Zhili *et al.* (2023), detectaron un área de oportunidad del motor Stirling activado con energía geotérmica, encontrando que el sistema alcanza una eficiencia de conversión térmica de 38%.

La literatura estudiada muestra un vacío existente en el análisis termodinámico y económico enfocado en la fusión de las plantas Flash, Kalina y Stirling. Este trabajo pretende llenar ese vacío existente y se desarrolla por la necesidad de integrar una planta geotérmica con capacidad de generar tres productos de electricidad a partir de diferentes tecnologías de conversión de energía térmica. Analizar y enlazar por primera vez un ciclo Kalina, Simple Flash y un Motor Stirling, representa la innovación dentro de este proyecto, el cual como en cualquier modelado de esta índole, tiene la intención de obtener una eficiencia y potencia significativa de una manera sustentable. Los autores del presente artículo se ven motivados por encontrar un nuevo modelo donde la entrega de potencia total sea competente con otros métodos de generación de electricidad a partir de energía limpia, así como económicamente más conveniente que ciclos activados con combustible. Por lo tanto, el propósito de este estudio es llevar a cabo la implementación de un análisis termodinámico exhaustivo enfocado en determinar la viabilidad energética y económica del sistema para la generación eficiente de energía eléctrica, utilizando tecnologías de conversión de energía térmica como lo son el ciclo de simple flash, Kalina y Stirling. De esta manera, se busca que el sistema geotérmico sea diseñado y operado de manera óptima, maximizando la eficiencia energética y obteniendo un retorno de inversión conveniente. El análisis se basará en la utilización de herramientas teóricas y metodologías adecuadas, aprovechando los fundamentos de investigación y los avances en la tecnología de generación de energía geotérmica.

2. Descripción del sistema

La planta es impulsada por un recurso geotérmico para producir tres productos de electricidad utilizando como subsistemas diferentes configuraciones termodinámicas. Las configuraciones se integran en diferentes niveles térmicos de temperatura en la planta geotérmica. El recurso geotérmico utilizado para la activación de la planta cuenta con una temperatura de 295 °C y un flujo masico de 104 kg/s (Zhou *et al.*, 2020). De acuerdo a la **Figura 1**, la planta de trigeneración cuenta con tres ciclos termodinámicos o subsistemas para su funcionamiento. Entre los ciclos que se activan con un régimen de mayor temperatura (295 °C) se encuentran el motor Stirling (estados 2-3) y la configuración geotérmica de simple Flash (estados 3-10). En un régimen de activación de menor temperatura se encuentra el ciclo Kalina (estados 11-19). El ciclo Kalina que opera con el par de trabajo $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$, representa una relevancia en la integración en la planta geotérmica debido a que es activado con calor residual de la configuración de simple Flash, mientras que la innovación de la integración del motor Stirling, se centra en la integración en este tipo de plantas, tratando de implementar y explorar un área de oportunidad para la implementación de los motores Stirling en geotermia.

2.1. Consideraciones generales para el modelado

En la **Tabla 1**, se muestran las condiciones iniciales con las que fue modelado este sistema, cuyo recurso de activación es un recurso geotérmico. Para el modelado de dicha planta se consideró valores típicos de operación de plantas geotérmicas, también se contempló estado estable, sin pérdidas de energía cinética ni pérdidas por energía potencial.

3. Modelo termodinámico y económico

Los modelos termodinámico y económico se han establecido a partir de la primera ley de la termodinámica y de conceptos e indicadores económicos. Ambos modelos se han implementado utilizando el software *Engineering Equation Solver* (EES).

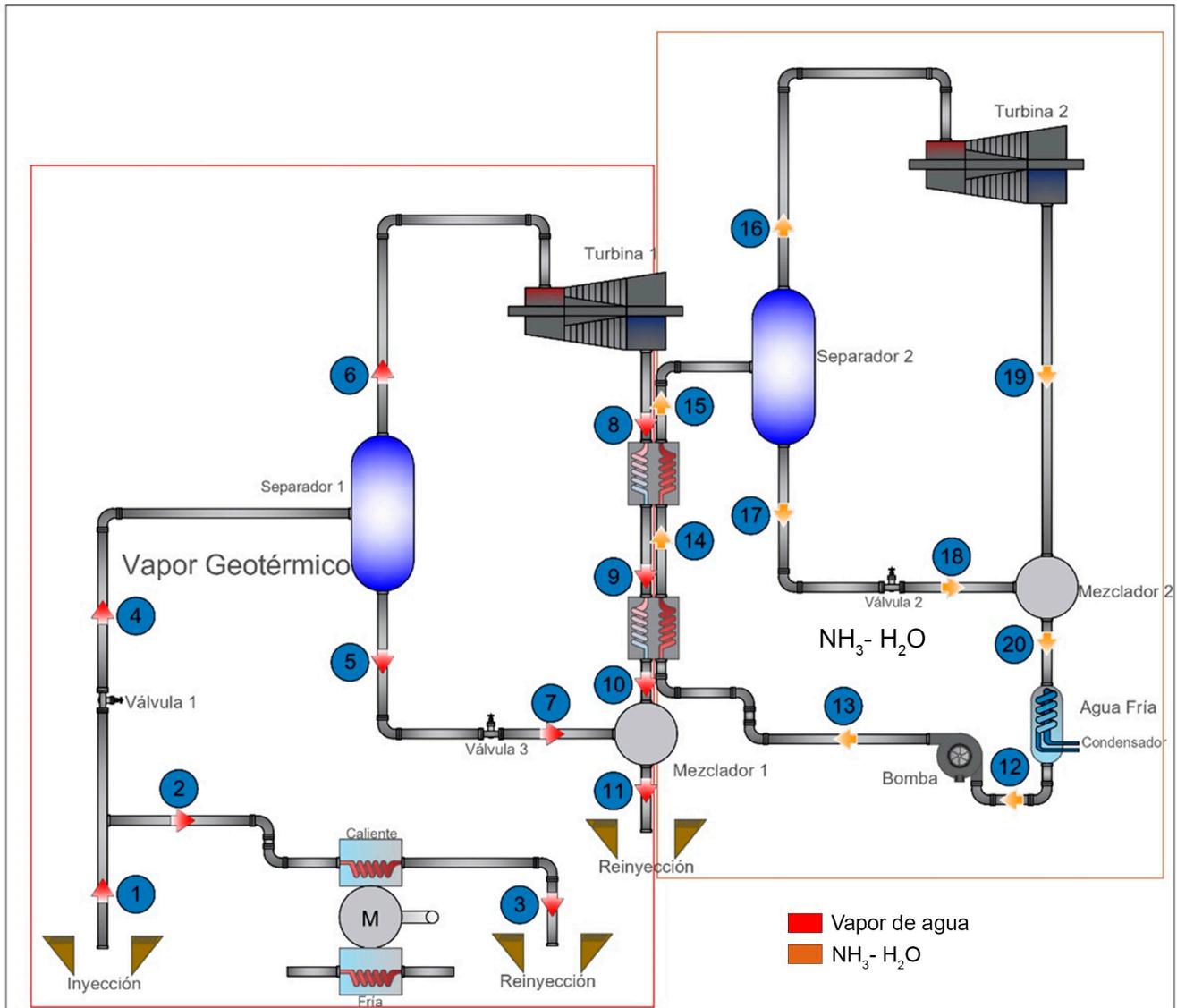


Figura 1. Diagrama general del sistema geotérmico de trigeneración.

3.1. Modelo termodinámico

3.1.1. Balances de masa y energía

Tomando como base la primera ley de la termodinámica, la **Tabla 2** muestra los balances de los flujos de masa y energía que están involucrados en cada uno de los componentes de los ciclos termodinámicos que integran la planta geotérmica.

3.1.2. Parámetros de eficiencia

En esta sección se muestran las ecuaciones utilizadas para calcular la eficiencia del ciclo Kalina y del motor Stirling, dentro de la **Tabla 3**.

3.1.3. Áreas de transferencia de calor

Las tecnologías que integran la planta de trigeneración incluyen componentes que involucran transferencia de calor, la cual es la encargada de transformar el recurso principal en productos. Para obtener una estimación de las áreas de transferencia de calor de los componentes que componen al ciclo Kalina y al Ciclo Flash se utilizaron las ecuaciones que se encuentran en la **Tabla 4**.

3.2. Modelo económico

3.2.1. Inversión inicial

La inversión depende directamente de distintos

Tabla 1. Condiciones iniciales en el sistema.

Ciclo	Condición	Símbolo	Valor	Ref.
Simple flash	Flujo masico del recurso geotérmico	\dot{m}_1	104 kg/s	(Zhou <i>et al.</i> , 2020)
	Temperatura del recurso geotérmico	T_1	295 °C	(Zhou <i>et al.</i> , 2020)
	Calidad del recurso geotérmico	x_1	0.45	(Zhou <i>et al.</i> , 2020)
	Temperatura inicio simple flash	T_4	173 °C	(Mohammadzadeh Bina <i>et al.</i> , 2018)
	Presión salida de la turbina 1	P_8	150 KPa	(Mohammadzadeh Bina <i>et al.</i> , 2018)
	Temperatura salida precalentador	T_{10}	65 °C	(Mohammadzadeh Bina <i>et al.</i> , 2018)
Stirling	Relación de compresión	RV	1.23	(Du <i>et al.</i> , 2019)
	Efectividad ST	ϵ_{ST}	0.94	(Du <i>et al.</i> , 2019)
	Temperatura baja del Stirling	T_{LS}	25 °C	(Zhu <i>et al.</i> , 2021)
	Temperatura alta del Stirling	T_{HS}	295 °C	(Zhou <i>et al.</i> , 2020)
	Diferencial de temperatura baja	ΔT_L	40 °C	(Du <i>et al.</i> , 2019)
	Diferencial temperatura alta	ΔT_H	90 °C	(Du <i>et al.</i> , 2019)
	Eficiencia mecánica del Stirling	η_{mech}	0.88	(Du <i>et al.</i> , 2019)
	Gamma	γ	1.667	(Du <i>et al.</i> , 2019)
	Corriente del Stirling	\dot{m}_2	1 kg/s	(Hasanpour Omam, 2021)
Kalina	Temperatura inicial	T_{12}	35 °C	(Du <i>et al.</i> , 2019)
	Fracción de masa	x_{12}	0.82	(Du <i>et al.</i> , 2019)
	Presión de la bomba	P_{13}	3000 kPa	(Ambriz-Díaz <i>et al.</i> , 2021)
	Temperatura de salida del evaporador	T_{15}	85.6 °C	(Ambriz-Díaz <i>et al.</i> , 2021)

parámetros específicos como lo es la ubicación, tiempo, demanda, oferta, entre otros. En las **Tablas 5**, y **6** se abordan las ecuaciones encargadas de lograr un cálculo aproximado de cada elemento, y por ende del sistema total.

Para la proyección del gasto y la inversión de esta planta, es de suma importancia contemplar los pozos involucrados en ella. En la **Tabla 6**, se presenta la ecuación específica para el cálculo del costo de pozo de reinyección, así como extracción.

Para el modelado del costo total, se comenzó modelando el costo por ciclo, donde se sumó el costo de cada elemento que lo compone. En el flash se contempla su turbina, válvulas, y separador, por otro lado, para el Kalina se contempla; el precalentador, evaporador, turbina, bomba, condensador, separador, mezclador y válvula, y por último el costo del motor Stirling se predice directamente en base a su potencia, como se

observa en la **Tabla 5**. Todos los costos anteriores se encuentran en dólares, por ende, el costo por KW se representa como el cociente del costo de cada ciclo que compone esta planta, entre la potencia neta respectiva. Finalmente, para calcular el costo total del sistema se sumó el costo total del ciclo flash, ciclo Kalina, motor Stirling y el costo implicado por los pozos de la **Tabla 6**.

3.2.2. Viabilidad económica

Una vez conocidos los costos globales del ciclo Kalina, Ciclo Flash y el motor Stirling, se tienen las herramientas suficientes para predecir la viabilidad del proyecto, la cual se rige por las ecuaciones especificadas en la **Tabla 7**, donde se contempla que los ingresos serán por la venta de electricidad en kWh.

Tabla 2. Ecuaciones de balance de energía y masa en los diferentes componentes del sistema.

Ciclo	Componente	Masa	Energía
Simple Flash	Separador	$\dot{m}_1 = \dot{m}_5 + \dot{m}_6$	$\dot{m}_4 \cdot h_4 = \dot{m}_5 \cdot h_5 + \dot{m}_6 \cdot h_6$
	Turbina	$\dot{m}_6 = \dot{m}_8$	$\dot{W}_t = \dot{m}_6 \cdot (h_6 - h_7)$
	Mezclador	$\dot{m}_{11} = \dot{m}_7 + \dot{m}_{10}$	$\dot{m}_{11} \cdot h_{11} = \dot{m}_7 \cdot h_7 + \dot{m}_{10} \cdot h_{10}$
	Evaporador	$\dot{m}_8 = \dot{m}_9$	$\dot{Q}_{inS} = \dot{m}_8 \cdot (h_8 - h_{10})$
	Precaentador	$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10}$	$\dot{Q}_{pre} = \dot{m}_9 \cdot (h_9 - h_{10})$
Kalina	Separador	$\dot{m}_{15} = \dot{m}_{16} + \dot{m}_{17}$	$\dot{m}_{15} \cdot h_{15} = \dot{m}_{16} \cdot h_{16} + \dot{m}_{17} \cdot h_{17}$
	Turbina	$\dot{m}_{16} = \dot{m}_{19}$	$\dot{W}_t = \dot{m}_{16} \cdot (h_{16} - h_{19})$
	Mezclador	$\dot{m}_{20} = \dot{m}_{18} + \dot{m}_{19}$	$\dot{m}_{20} \cdot h_{20} = \dot{m}_{18} \cdot h_{18} + \dot{m}_{19} \cdot h_{19}$
	Condensador	$\dot{m}_{20} = \dot{m}_{12}$	$\dot{Q}_{Cond} = \dot{m}_{20} \cdot (h_{20} - h_{12})$
	Bomba	$\dot{m}_{12} = \dot{m}_{13}$	$\dot{W}_B = \dot{m}_{12} \cdot (h_{12} - h_{12})$
Motor Stirling	Motor Stirling	$\dot{m}_2 = \dot{m}_3$	$\dot{Q}_{High} = \dot{m}_2 \cdot C\dot{P} \cdot \Delta TH$
			$\dot{Q}_{Low} = \dot{Q}_{High} \cdot (1 - \eta_{Mech})$
			$\dot{W}_M = \eta_{PCY} \cdot (\dot{Q}_{High} - \dot{Q}_{Low})$

Tabla 3. Ecuaciones de eficiencia de ciclo Kalina y motor Stirling.

Ciclo	Ecuación	Ref.
Ciclo Kalina	$\eta_{Kal} = \frac{\dot{W}_{n\,Kal}}{\dot{Q}_{Intercambiador}}$	(Akimoto <i>et al.</i> , 2021)
Motor Stirling	$\eta_{PCY} = \frac{1 - RV^{1-r} - \zeta \cdot (RV^{r-1} - 1)}{1 - RV^{1-r} + (1 - \zeta) \cdot (1 - \varepsilon_{st})}$	(Ansarinassab <i>et al.</i> , 2021)

Tabla 4. DMLT y diferencia de temperatura.

Componente	Diferencial de temperatura	DMLT	Área	Ref.
Precaentador	$\Delta T_1 = T_{10} - T_{13}$	$DMLT_{Pre} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$	$A = \frac{\dot{Q}_{Pre}}{U_{Pre} \cdot DMLT_{Pre}}$	(Holman, 1998)
	$\Delta T_2 = T_9 - T_{14}$			
Evaporador	$\Delta T_3 = T_9 - T_{14}$	$DMLT_{Evap} = \frac{\Delta T_3 - \Delta T_4}{\ln\left(\frac{\Delta T_3}{\Delta T_4}\right)}$	$A = \frac{\dot{Q}_{Evap}}{U_{Evap} \cdot DMLT_{Evap}}$	
	$\Delta T_4 = T_8 - T_{15}$			
Condensador	$\Delta T_5 = T_{12} - T_{1\,agua}$	$DMLT_{Cond} = \frac{\Delta T_5 - \Delta T_6}{\ln\left(\frac{\Delta T_5}{\Delta T_6}\right)}$	$A = \frac{\dot{Q}_{Cond}}{U_{Cond} \cdot DMLT_{Cond}}$	
	$\Delta T_6 = T_{20} - T_{2\,agua}$			

Tabla 5. Modelado costos de componentes.

Componente	Ecuación Costos	Ref.
Turbina ciclo flash	$Z_{TurbinaFlash} = 4405 \cdot (\dot{W}_{TurbinaSimpleFlash})^{0.89}$	(Fan, Gao, <i>et al.</i> , 2021)
Válvula de entrada ciclo flash	$Z_{ValvulaInFlash} = 114.5 \cdot \dot{m}_4$	(Fan, Gao, <i>et al.</i> , 2021)
Válvula de salida ciclo flash	$Z_{ValvulaOutFlash} = 114.5 \cdot \dot{m}_5$	(Fan, Gao, <i>et al.</i> , 2021)
Separador ciclo flash	$Z_{SeparadorFlash} = 280.3 \cdot (\dot{m}_4)^{0.67}$	(Fan, Gao, <i>et al.</i> , 2021)
Precalentador	$Z_{Precalentador} = 309.14 \cdot (A_{precalentador})^{0.85}$	(Fan, Yang, <i>et al.</i> , 2021)
Evaporador	$Z_{Evaporador} = 309.14 \cdot (A_{Evaporador})^{0.85}$	(Fan, Yang, <i>et al.</i> , 2021)
Turbina ciclo Kalina	$Z_{TurbinaKalina} = 4405 \cdot (\dot{W}_{TurbinaKalina})^{0.7}$	(Fan, Gao, <i>et al.</i> , 2021)
Bomba ciclo Kalina	$Z_{BombaKalina} = 1120 \cdot (\dot{W}_{BombaKalina})^{0.6}$	(Abam <i>et al.</i> , 2020)
Condensador ciclo Kalina	$Z_{CondensadorKalina} = 516.62 \cdot A_{Condensador}$	(Abam <i>et al.</i> , 2020)
Separador ciclo Kalina	$Z_{SeparadorKalina} = 280.3 \cdot (\dot{m}_{15})^{0.67}$	(Fan, Gao, <i>et al.</i> , 2021)
Mezclador ciclo Kalina	0	(Fan, Gao, <i>et al.</i> , 2021)
Válvula ciclo Kalina	$Z_{ValvulaKalina} = 114.5 \cdot \dot{m}_{17}$	(Fan, Yang, <i>et al.</i> , 2021)
Motor Stirling	$Z_{MotorStirling} = 2200 \cdot \dot{W}_{Stirling}$	(Ansarinab <i>et al.</i> , 2021)

Tabla 6. Modelado costos de pozos.

Tipo de Pozo	Ecuación	Ref.
Pozo de extracción/ Reinyección	$Z_{PerforacionExtraccion} = a \cdot n_p \cdot \text{Log}_{10}(d) + (b \cdot n_p \cdot d^{2+c}) [USD]$ <p style="text-align: center;">Donde:</p> $a = 5.218 \cdot 10^5; b = 0.1982; c = 1.977 \cdot 10^6; n_p = 1; d = 800 \text{ a } 2800 \text{ m}$	(Gupta y Roy, 2007b; Shamoushaki <i>et al.</i> , 2021)
$Z_{TotalPozos} = Z_{PerforacionExtraccion} + Z_{PerforacionReinyeccion} [USD]$		

4. Resultados y discusión

En esta Sección 4, primero se discuten los resultados de todos los estados termodinámicos obtenidos para los ciclos Kalina, simple flash, motor Stirling y del sistema geotérmico de trigeneración en general. Posteriormente, se presentan los resultados del análisis termodinámico y, finalmente los resultados y discusiones del modelado económico. Estos resultados permiten conocer las prestaciones energéticas y económicas de la integración del ciclo Kalina, ciclo simple flash y del motor Stirling, en un esquema de trigeneración geotérmico.

4.1. Análisis termodinámico

4.1.1. Propiedades termo físicas

En esta Subsubsección 4.1.1, se muestran las propiedades termofísicas del sistema geotérmico

de trigeneración haciendo referencia a los estados mostrados en la **Figura 1**, bajo las condiciones de activación planteadas anteriormente. En la **Tabla 8**, se agrupan estas propiedades y se puede distinguir las características relevantes de todos los estados termodinámicos del sistema geotérmico, y de los ciclos que lo integran.

4.1.2. Flujos de energía

A continuación, en la **Tabla 9**, se muestran los resultados obtenidos de todas las potencias netas del sistema. Se puede apreciar que la potencia de la turbina del ciclo simple flash es mayor que la del ciclo Kalina y del motor Stirling. El ciclo simple flash aporta alrededor de 18.79 MW siendo así más de la mitad de la potencia total del sistema de trigeneración. Por otro lado, el motor Stirling a pesar de que aporta muy poca potencia en comparación a los otros dos ciclos, 54.93 kW es una

Tabla 7. Ecuaciones viabilidad económica.

Costo anual	$Z_{Anual} = Z_{Total} \cdot \frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$ <p>Donde: $i = 0.15; n = 20$</p>	(Farsi y Rosen, 2021; Köse <i>et al.</i> , 2021)
Ingresos por venta de electricidad	<p>Ingresos = $\dot{W}_{neta} \cdot T_o \cdot p$</p> <p>Donde: $T_o = 7800$ [Horas]; $p = 0.15 \left[\frac{USD}{kW \cdot h} \right]$</p>	(Ambriz-Díaz <i>et al.</i> , 2022; Fan, Yang, <i>et al.</i> , 2021; Köse <i>et al.</i> , 2021)
Beneficio anual	$BA = Ingresos - Z_{Anual} - Z_{O\&M}$ $Z_{O\&M} = Z_{Anual} \cdot \frac{\varphi \cdot Z_{Total}}{T_o}$ <p>Donde: $\varphi = 1.06$</p>	(Ambriz-Díaz <i>et al.</i> , 2022; Farsi y Rosen, 2021; Parikhani <i>et al.</i> , 2021)
Recuperación	$R = \frac{Z_{Total}}{BA}$	(Ambriz-Díaz <i>et al.</i> , 2022)
Valor presente neto	$VPN = BA \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{(1+i)^n \cdot i} - Z_{Total}$	(Ambriz-Díaz <i>et al.</i> , 2022)

Tabla 8. Estados termodinámicos de la planta de trigeneración.

#	T (°C)	P (KPa)	h $\left(\frac{kJ}{Kg} \right)$	s $\left(\frac{kJ}{Kg \cdot k} \right)$	\dot{m}	Qu	x
1	295	7,995	1,965	4.348	104	0.45	-
2	295	7,995	1,965	4.348	1	0.45	-
3	295	7,995	1,965	4.348	1	0.45	-
4	173	850.5	1,965	4.834	103	0.6045	-
5	173	850.5	732.4	2.072	40.73	0	-
6	173	850.5	2771	6.642	62.27	1	-
7	111.4	150	732.4	2.124	40.73	0	-
8	111.4	150	2470	6.642	62.27	0.8995	-
9	111.4	150	467.1	1.433	62.27	0	-
10	65	150	272.2	0.8934	62.27	0	-
11	108.3	150	454.2	1.4	103	0	-
12	35	11.15	35.96	0.4904	140.6	0	0.82
13	35.5	3,000	38.74	0.4904	140.6	-	0.82
14	74.7	3,000	231.7	1.079	140.6	0	0.82
15	102.5	3,000	1,012	3.249	140.6	0.6329	0.8198
16	102.5	3,000	1,450	4.358	88.97	1	0.9808
17	102.5	3,000	256.6	1.337	51.61	0	0.5423
18	102.5	3,000	256.6	1.337	51.61	0	0.5423
19	52.9	1,115	1,305	4.358	88.97	0.9577	0.9808
20	66.3	1,115	920.2	3.265	140.6	0.6404	0.82

potencia aceptable debido a que se está buscando un área de oportunidad para la utilización de los motores Stirling en esquemas geotérmicos. Los motores Stirling, actualmente se fabrican en el orden de capacidad nominal de 1 – 50 kW. Algunos fabricantes han optado por integrar diferentes motores en un solo modulo para alcanzar mayores potencias según sea la demanda. Por otra parte, contemplando los productos de los ciclos Kalina, flash y Stirling, el sistema geotérmico total logra obtener una potencia neta final de 31.359 MW.

Con la finalidad observar variaciones en la potencia de salida de los diferentes ciclos termodinámicos, la **Figura 2** muestra el comportamiento de la potencia del ciclo Kalina, al aumentar la presión a la salida de la turbina flash. La potencia del ciclo Kalina aumenta de manera significativa, pero, por otro lado, la potencia del ciclo flash decrece y, en consecuencia, la potencia neta también decrece (**Figuras 3 y 4**). Aunque no sea de manera lineal es notable que, si la presión a la salida de la turbina del ciclo simple flash aumenta habrá menos kW producidos. Es por ello que se recomienda una presión de descarga de entre 140-160 kPa de la turbina del ciclo simple flash, ya que es en este rango donde la potencia del ciclo flash no tiene una caída tan abrupta, cuidando así también la potencia neta del sistema geotérmico.

4.1.3. Parámetros de eficiencia

Dentro del análisis termodinámico realizado, se evaluaron tres ciclos diferentes: comenzando por el ciclo Kalina y el motor Stirling. Estos ciclos se distinguen por su propia eficiencia energética, lo que los hace sobresalir en términos de rendimiento en la generación de energía. En el caso del ciclo Kalina, se logró una eficiencia de 9.146%. Este valor de eficiencia es debido a la baja temperatura de activación del ciclo Kalina y, que está limitada por la temperatura de descarga de vapor de la

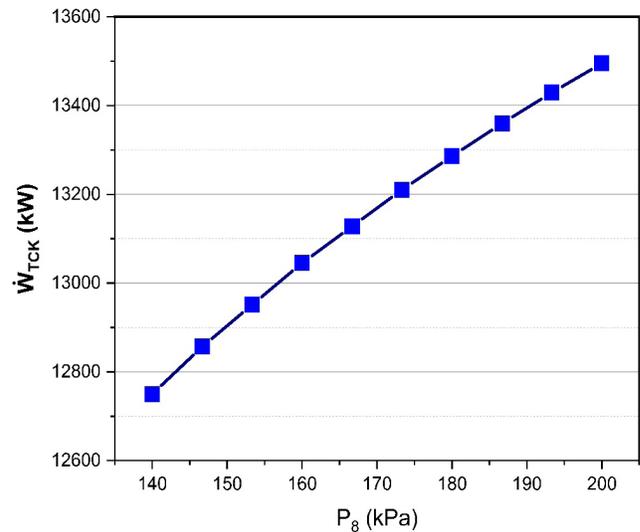


Figura 2. Comportamiento de la potencia del ciclo Kalina.

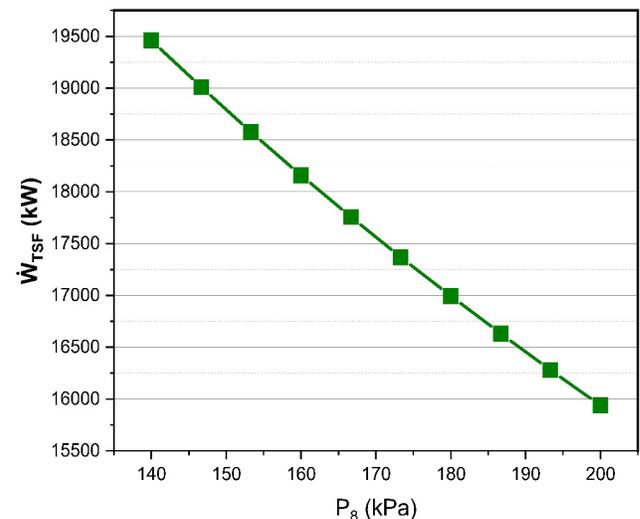


Figura 3. Comportamiento de la potencia de la turbina simple flash.

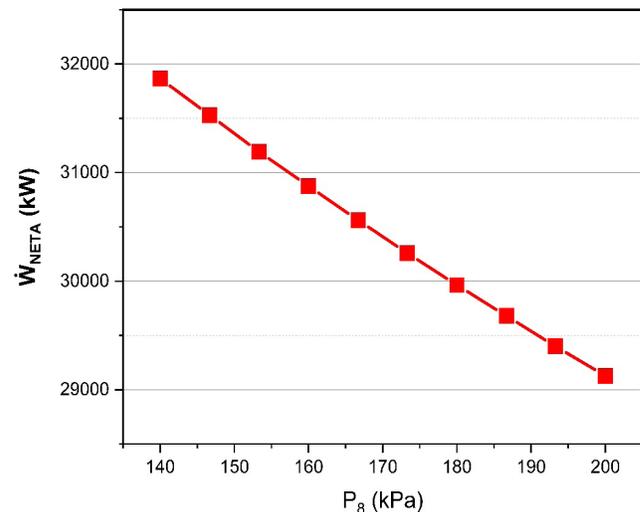


Figura 4. Comportamiento de la potencia neta del sistema geotérmico.

Tabla 9. Resultados potencias netas.

Componente	Potencia neta
Turbina simple Flash	18.79 MW
Turbina ciclo Kalina	12.514 MW
Motor Stirling	54.93 KW
Potencia total de planta	31.359 MW

turbina del ciclo simple flash. Sin embargo, la eficiencia energética de 9.146%, también indica que es posible convertir una fuente de bajo grado de temperatura en trabajo útil. Por otro lado, el motor Stirling mostró una eficiencia de 16.55%, lo que destaca su practicidad para aprovechar el calor y convertirlo en trabajo mecánico de manera más efectiva. Finalmente, la eficiencia del ciclo simple flash, no ha sido evaluada debido a que es necesario realizar un análisis por segunda ley de la termodinámica y no se encuentra dentro del alcance de este trabajo. La evaluación del sistema de trigeneración geotérmico desde una perspectiva exergética se tiene contemplada como una meta futura de la presente investigación.

4.1.4. Áreas de transferencia de calor

Dentro de este apartado, se presenta una descripción de las áreas de transferencia de calor correspondientes a cada componente del sistema (**Tabla 10**). Estas áreas se presentan en metros cuadrados y reflejan las áreas designadas a la transferencia eficiente de calor en el sistema. Analizando los resultados obtenidos, se puede observar que el condensador es el componente que tiene el área de transferencia de calor más grande de todo el sistema, por otro lado, el precalentador es el que ocupa el área más pequeña.

4.2. Análisis económico

4.2.1. Costos de inversión

Basándose en el modelado económico especificado en el apartado 3.2, se obtuvo los siguientes costos contenidos en la **Tabla 11**. Cabe destacar que se están contemplando 2 pozos, uno encargado de reinyección y otro de extracción, con 800 y 2800 metros de profundidad respectivamente, ubicados en los Azufres, Michoacán.

Los valores en la **Figura 5** representan los costos de cada ciclo respecto al costo total, donde; $Z_{\text{Total Flash}}$ es el costo total del ciclo flash y tiene un valor de 28,060,000 USD, $Z_{\text{Total Kalina}}$ es el costo total del ciclo Kalina y es de aproximadamente 6,989,000 USD, y el motor Stirling el cual tiene un costo final de 120,849 USD. El costo total de los pozos es de 8,948,000 USD, donde aproximadamente el 60% (5,330,000 USD) corresponde al pozo de extracción, y el 40% restante (3,619,000 USD) corresponde al pozo de reinyección. Tomando en cuenta los costos mencionados se obtiene el costo total del sistema

Tabla 10. Resultados áreas de intercambiadores.

Áreas de transferencia de calor	
Componente	Área en m ²
Evaporador	4,904
Precalentador	334.1
Condensador	6,090

Tabla 11. Costos de componentes.

Componente	Costos [USD]
Turbina ciclo flash	28,040,000
Válvula de entrada ciclo flash	11,794
Válvula de salida ciclo flash	4,664
Separador ciclo flash	6,255
Precalentador	43,199
Evaporador	423,746
Turbina ciclo Kalina	3,323,000
Bomba ciclo Kalina	40,198
Condensador ciclo Kalina	3,146,000
Separador ciclo Kalina	7,704
Mezclador ciclo Kalina	0
Válvula ciclo Kalina	5,910
Motor Stirling	120,849

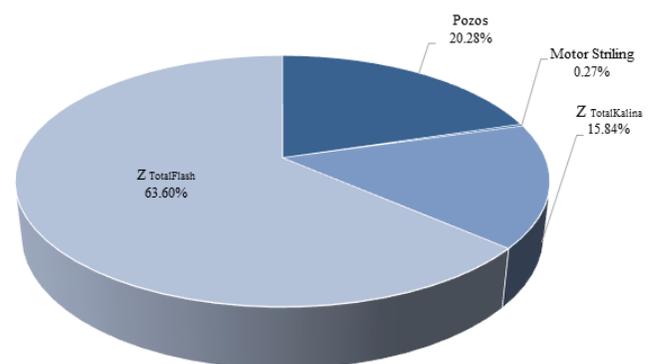


Figura 5. Contribuyentes del costo Total. Distribución de costos de los ciclos en el sistema geotérmico.

de trigeneración que representa el 100% de los gastos y es de 44,120,000 USD.

La **Figura 6**, muestra una representación gráfica de los costos en función de la capacidad

nominal de cada ciclo. El ciclo flash tiene un costo unitario de 1,493 USD/kW, mientras que el costo del ciclo Kalina por unidad de potencia generada es de 558.5 USD/kW, y el costo del Motor Stirling por unidad de potencia generada es de 2,200 USD/kW.

4.2.2. Viabilidad económica

A continuación, se presentan los resultados de la aplicación del modelado de viabilidad económica, donde se está contemplando una tasa de interés del 15% y vida útil de 20 años para el cálculo del costo anual, además se considera el precio de venta de electricidad en 0.15 USD/kWh para el ingreso por venta de esta energía, y finalmente un factor de mantenimiento de 1.06 para el beneficio anual. Los datos obtenidos y representados en la **Figura 7**, representan una viabilidad económica favorable del sistema. Bajo las condiciones de operación establecidas, el sistema de trigeneración alcanza un periodo de recuperación de la inversión de 1.507 años, con un valor presente neto de 139,100,000 USD.

5. Conclusiones

El modelado de esta nueva propuesta demostró que una nueva configuración es capaz de entregar 31.359 MW en total, los cuales pueden ser implementados en varias aplicaciones. Dicha potencia por ciclo o total, se ve afectada directamente por el ciclo flash, puesto que, al variar propiedades de sus elementos, como ejemplo la turbina; la eficiencia y la potencia neta del ciclo Kalina sufre un cambio significativo. Al analizar dicho comportamiento es fácil entender la importancia de encontrar un balance, el cual dependerá directamente de las necesidades que cubra la planta. Puesto que si la energía eléctrica entregada por el ciclo Kalina sostiene una alta demanda se recomienda aumentar la presión de salida en la turbina del ciclo flash, sin embargo, si se espera una mayor carga para el ciclo flash, bajar la presión de salida de la turbina de este ciclo sería lo adecuado. Finalmente, al tener un retorno de inversión de aproximadamente 1.5 años y obteniendo un VPN positivo es fácil confirmar que esta configuración es viable bajo las condiciones especificadas en este artículo.

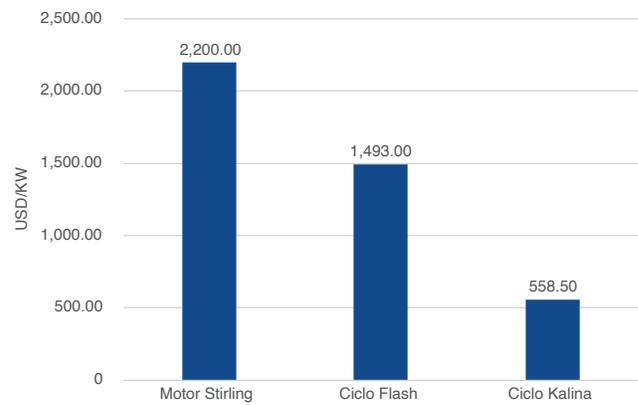


Figura 6. Costos unitarios de los ciclos flash, Kalina y Stirling por kW.

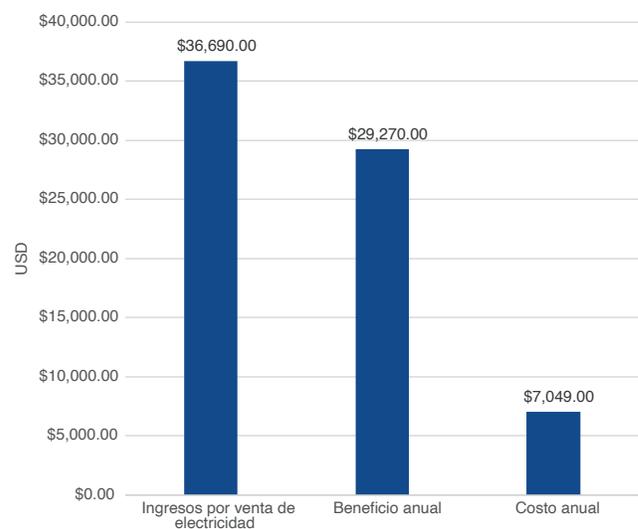


Figura 7. Resultados de la viabilidad económica del sistema geotérmico.

6. Referencias

Abam FI, Briggs, Tobinson A, Diemuodeke OE, Ekwe EB, Ujoatuonu KN, Isaac J, Ndukwu MC (2020). Thermodynamic and economic analysis of a Kalina system with integrated lithium-bromide-absorption cycle for power and cooling production. *Energy Reports* 6: 1992–2005. doi:10.1016/j.egy.2020.07.021

Akimoto R, Yamaki T, Nakaiwa M, Matsuda K (2021). Applicability study of micro Kalina cycle for regional low grade geothermal heat in Japan. *Case Studies in Thermal Engineering* 28: 101506. doi:10.1016/j.csite.2021.101506

Ambriz-Díaz VM, Rosas IY, Chávez O, Rubio-Maya C (2022). 4E Assessment of an Organic Rankine Cycle (ORC) Activated with Waste Heat of a Flash-Binary Geothermal Power Plant. *Entropy*



- 24(12). doi:10.3390/e24121832
- Ambriz-Díaz VM, Rubio-Maya C, Chávez O, Ruiz-Casanova E, Pastor-Martínez E (2021). Thermodynamic performance and economic feasibility of Kalina, Goswami and Organic Rankine Cycles coupled to a polygeneration plant using geothermal energy of low-grade temperature. *Energy Conversion and Management* 243. doi:10.1016/j.enconman.2021.114362
- Ansarinassab H, Hajabdollahi H (2020). Multi-objective optimization of a geothermal-based multigeneration system for heating, power and purified water production purpose using evolutionary algorithm. *Energy Conversion and Management* 223. doi:10.1016/j.enconman.2020.113476
- Ansarinassab H, Hajabdollahi H, Fatimah M (2021). Life cycle assessment (LCA) of a novel geothermal-based multigeneration system using LNG cold energy- integration of Kalina cycle, stirling engine, desalination unit and magnetic refrigeration system. *Energy* 231: 120888. doi:10.1016/j.energy.2021.120888
- Batenin VM, Maslennikov VM, Vyskubenko YA, Tsalko EA, Shterenberg VY (2014). A steam-gas power plant for combined generation of electricity, heat, and cold (Trigeneration). *High Temperature* 52(6): 913–919. doi:10.1134/S0018151X14060030
- Cao Y, Xu D, Togun H, Dhahad HA, Azariyan H, Farouk N (2021). Feasibility analysis and capability characterization of a novel hybrid flash-binary geothermal power plant and trigeneration system through a case study. *International Journal of Hydrogen Energy* 46(52): 26241–26262. doi:10.1016/j.ijhydene.2021.05.146
- Du Y, Chen K, Dai Y (2019). A study of the optimal control approach for a Kalina cycle system using a radial-inflow turbine with variable nozzles at off-design conditions. *Applied Thermal Engineering* 149: 1008–1022. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.12.117
- Fan G, Gao Y, Ayed H, Marzouki R, Aryanfar Y, Jarad F, Guo P (2021). Energy and exergy and economic (3E) analysis of a two-stage organic Rankine cycle for single flash geothermal power plant exhaust exergy recovery. *Case Studies in Thermal Engineering* 28: 101554. doi:10.1016/j.csite.2021.101554
- Fan G, Yang B, Guo P, Lin S, Farkoush SG, Afshar N (2021). Comprehensive analysis and multi-objective optimization of a power and hydrogen production system based on a combination of flash-binary geothermal and PEM electrolyzer. *International Journal of Hydrogen Energy* 46(68): 33718–33737. doi:10.1016/j.ijhydene.2021.07.206
- Farsi A, Rosen MA (2021). Exergoeconomic analysis of a geothermal steam turbine combined with multi-effect desalination and reverse osmosis. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy* 1: 100022. doi:10.1016/j.prime.2021.100022
- Glassley WE (2015). *Geothermal Energy: Renewable Energy and the Environment*, Second Edition (2nd ed.). CRC Press. doi:10.1201/b17521
- Gupta H, Roy S (2007a). *Geothermal Energy. An Alternative Resource for the 21st Century*. Elsevier, Amsterdam. doi:10.1016/B978-0-444-52875-9.X5000-X
- Gupta H, Roy S (2007b). Chapter 7 - THE CERRO PRIETO GEOTHERMAL FIELD, MEXICO. In: Gupta H, Roy S (eds) *Geothermal Energy*. Elsevier, Amsterdam, pp 165–197. doi:10.1016/B978-044452875-9/50007-1
- Hasanpour Omam S (2021). Exhaust waste energy recovery using Otto-ATEG-Stirling engine combined cycle. *Applied Thermal Engineering* 183: 116210. doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.116210
- Holman JP (1998). *Transferencia de Calor* (Octava edición).
- Kaczmarczyk M, Tomaszewska B, Pajak L (2020). Geological and thermodynamic analysis of low enthalpy geothermal resources to electricity generation using ORC and Kalina cycle technology. *Energies* 16(3): doi:10.3390/en13061335
- Köse Ö, Koç Y, Yağlı H (2021). Energy, exergy, economy and environmental (4E) analysis and optimization of single, dual and triple configurations of the power systems: Rankine Cycle/Kalina Cycle, driven by a gas turbine. *Energy Conversion and Management* 227: 113604. doi:10.1016/j.enconman.2020.113604
- Lan Y, Wang S, Lu J, Zhai H, Mu L (2022). Comparative analysis of organic rankine cycle, Kalina cycle and thermoelectric generator to recover waste heat based on energy, exergy, economic and environmental analysis method. *Energy Conversion and Management* 273: 116401. doi:10.1016/j.enconman.2022.116401
- Mohammadzadeh Bina S, Jalilinasrabady S, Fujii H (2018). Exergoeconomic analysis and optimization of single and double flash cycles for Sabalan geothermal power plant. *Geothermics* 72: 74–82. doi:10.1016/j.geothermics.2017.10.013

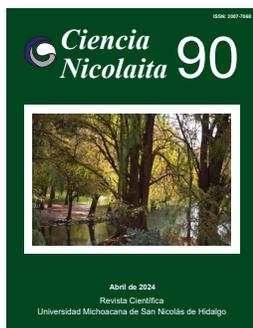
- Moradpoor I, Ebrahimi M (2019). Thermo-environmental analyses of a novel trigeneration cycle based on clean technologies of molten carbonate fuel cell, stirling engine and Kalina cycle. *Energy* 185: 1005–1016. doi:10.1016/j.energy.2019.07.112
- Musharavati F, Khanmohammadi S, Pakseresht A (2021). Proposed a new geothermal based poly-generation energy system including Kalina cycle, reverse osmosis desalination, electrolyzer amplified with thermoelectric: 3E analysis and optimization. *Applied Thermal Engineering* 187. doi:10.1016/j.applthermaleng.2021.116596
- Nasruddin, Usvika R, Rifaldi M, Noor A (2009). Energy and exergy analysis of kalina cycle system (KCS) 34 with mass fraction ammonia-water mixture variation. *Journal of Mechanical Science and Technology* 23(7): 1871-1876. doi:10.1007/s12206-009-0617-8
- Parikhani T, Delpisheh M, Haghghi MA, Holagh SG, Athari H (2021). Performance enhancement and multi-objective optimization of a double-flash binary geothermal power plant. *Energy Nexus* 2: 100012. doi:10.1016/j.nexus.2021.100012
- Ren C, Wang J, Chen H, Liu X, An M (2021). Thermodynamic analysis and comparative investigation of a new combined heating and power system driving by medium-and-high temperature geothermal water. *Energy Conversion and Management*, 233. doi:10.1016/j.enconman.2021.113914
- Roeinfard N, Moosavi A (2022). Thermodynamic analysis and optimization of the organic Rankine and high-temperature Kalina cycles for recovering the waste heat of a bi-fuel engine. *Fuel* 322: 124174. doi:10.1016/j.fuel.2022.124174
- Shamoushaki M, Fiaschi D, Manfrida G, Niknam PH, Talluri L (2021). Feasibility study and economic analysis of geothermal well drilling. *International Journal of Environmental Studies* 78(6): 1022–1036. doi:10.1080/00207233.2021.1905309
- Tavakolpour-Saleh AR, Hamzavi A, Omidvar A (2021). A novel solar-powered self-blowing air heating system with active control based on a quasi-Stirling cycle. *Energy* 227: 120454. doi:10.1016/j.energy.2021.120454
- Zare V (2016). A comparative thermodynamic analysis of two tri-generation systems utilizing low-grade geothermal energy. *Energy Conversion and Management* 118: 264–274. doi:10.1016/j.enconman.2016.04.011
- Zare V, Palideh V (2018). Employing thermoelectric generator for power generation enhancement in a Kalina cycle driven by low-grade geothermal energy. *Applied Thermal Engineering* 130: 418–428. doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.10.160
- Zhili T, Dongjiao Z, Yong L, Feng Y (2023). Modelling and control strategy of a distributed small-scale low-temperature geothermal power generation system. *IET Renewable Power Generation* 17(3): 539–554. doi:10.1049/rpg2.12613
- Zhou Y, Li S, Sun L, Zhao S, Ashraf Talesh SS (2020). Optimization and thermodynamic performance analysis of a power generation system based on geothermal flash and dual-pressure evaporation organic Rankine cycles using zeotropic mixtures. *Energy* 194: 116785. doi:10.1016/j.energy.2019.116785
- Zhu S, Yu G, Liang K, Dai W, Luo E (2021). A review of Stirling-engine-based combined heat and power technology. *Applied Energy* 294: 116965. doi:10.1016/j.apenergy.2021.116965

7. Nomenclatura

BA	Beneficio anual [USD]
d	Profundidad del pozo [m]
ε	Efectividad [%]
i	Tasa de interés [%]
\dot{m}	Flujo masico [kg/seg]
n	Vida útil [años]
η	Eficiencia [%]
n_p	Numero de pozos
p	Precio energía eléctrica $\left[\frac{USD}{kw \cdot h} \right]$
P	Presión [KPa]
φ	Factor de mantenimiento
\dot{Q}	Calor [Watts]
Qu	Calidad



R	Recuperación de la inversión [años]	T_o	Tiempo de operación anual [Horas]
RV	Relación de compresión	VPN	Valor presente neto [USD]
s	Entropía $\left[\frac{KJ}{Kg \cdot k} \right]$	W	Potencia [Watts]
h	Entalpia $\left[\frac{KJ}{Kg} \right]$	x	Fracción de masa
T	Temperatura [°C]	Z	Costos [USD]
		$Z_{O\&M}$	Costos de operación y mantenimiento [USD]



Ciencia Nicolaita 90

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Análisis del rotor de una turbina eólica de eje vertical híbrida H-Savonius mediante dinámica de fluidos computacional

Analysis of the rotor of an H-Savonius hybrid vertical axis wind turbine using computational fluid dynamics

Gerardo Javier Marín Téllez*, Víctor López Garza, Gildardo Solorio Díaz, J. Jesús Pacheco Ibarra

Para citar este artículo: Marín Téllez GJ, López Garza V, Solorio Díaz G, Pacheco Ibarra JJ (2024). Análisis del rotor de una turbina eólica de eje vertical híbrida H-Savonius mediante dinámica de fluidos computacional. *Ciencia Nicolaita* no. 90: 72-85.

DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi90.734>

Historial del artículo



Recibido: 16 de agosto de 2023

Aceptado: 18 de diciembre de 2023

Publicado en línea: abril 2024



Ver material suplementario



*Correspondencia de autor: gerardo.marin@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Análisis del rotor de una turbina eólica de eje vertical híbrida H-Savonius mediante dinámica de fluidos computacional

Analysis of the rotor of an H-Savonius hybrid vertical axis wind turbine using computational fluid dynamics

Gerardo Javier Marín Téllez*, Víctor López Garza, Gildardo Solorio Díaz, J. Jesús Pacheco Ibarra

Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Resumen

La simulación es una herramienta versátil y potente para el diseño que permite anticiparse al comportamiento real de los diversos fenómenos físicos, evaluarlos y analizarlos para obtener su mejor configuración. Esta investigación tiene como objetivo validar el diseño de una turbina eólica de eje vertical (VAWT) del Centro de Investigación y Asistencia Técnica del Estado de Querétaro (CIATEQ) mediante su simulación CFD en 2D para estimar el coeficiente de potencia (C_p), el torque y la potencia generada de la turbina para una velocidad del viento uniforme de 7m/s. La turbina del CIATEQ corresponde a un diseño innovador híbrido H-Savonius de baja capacidad. El dimensionamiento del dominio computacional siguió recomendaciones de la literatura, utilizando mallas estructuradas y no estructuradas. Aparte del análisis de independencia de malla, la estrategia de simulación incluyó la inicialización RANS en estado estacionario mediante la técnica Single Frame Motion y simulaciones URANS en estado no estacionario empleando la técnica de Sliding Mesh, modelando el aire por medio de modelos de turbulencia $k-\omega$ SST de dos ecuaciones (SST) y SST de 4 ecuaciones (TSST), respectivamente. Se logró afirmar la fiabilidad de la metodología de simulación en 2D, correlacionando los resultados con la literatura a pesar de la falta de datos experimentales. Los resultados indican un comportamiento sinusoidal del torque del rotor H y de la turbina híbrida, y un torque neto negativo para la turbina Savonius, validado con la literatura. Además, la turbina eólica de eje vertical exhibe una potencia de 200.1W y un C_p de 0.245, alineándose con las expectativas. El estudio proporciona perspectivas sobre el rendimiento de la turbina, validando el enfoque de simulación y destacando su potencial para investigaciones y refinamientos en el diseño.

Palabras clave: VAWT, CFD, Sliding Mesh, Turbina híbrida H-Savonius, Simulación

Abstract

Simulation is a versatile and powerful tool when designing, since it allows the anticipation, evaluation and analysis of the real behavior of various physical phenomena to obtain their optimal configuration. This research aims to validate a vertical-axis wind turbine (VAWT) designed by the Technical Assistance and Research Center of Queretaro State (CIATEQ) by means of a 2D CFD simulation, estimating the power coefficient (C_p), torque and generated power of the turbine at a uniform wind speed of 7m/s. The CIATEQ turbine corresponds to an innovative low-capacity H-Savonius hybrid design. The computational domain sizing was defined by literature recommendations and used both structured and unstructured meshes. Besides mesh independence analysis, the simulation strategy included RANS steady-state initialization using the Single Frame Motion technique and unsteady-state URANS simulations using the Sliding Mesh technique, modeling the air with a two-equation $k-\omega$ SST turbulence model (SST) and a four-equation SST transition model (TSST), respectively. The reliability of the 2D simulation methodology was confirmed by correlating the results with the literature despite the lack of experimental data. The results indicate that both the H rotor and the hybrid rotor display a sinusoidal torque behavior, whereas the Savonius turbine exhibits a net negative torque; both behaviors are validated by the literature. Additionally, the VAWT presents a generated power of 200.1W and a C_p of 0.245, aligning with expectations. The study provides insights into turbine performance, validating the simulation approach and highlighting its potential for further research and design refinements.

Keywords: VAWT, CFD, Sliding Mesh, H-Savonius hybrid turbine, Simulation

Introducción

En el 2019, el Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología de Jalisco (COECYTJAL) en conjunto con el Centro de Investigación y Asistencia Técnica del Estado de Querétaro (CIATEQ), participaron en la convocatoria del Fondo de Desarrollo Científico de Jalisco (FODECIJAL) para Atender Problemas Estatales con el proyecto “Diseño y desarrollo de turbina eólica de eje vertical para ambientes urbanos”, en la cual su proyecto fue seleccionado (CIATEQ, 2020).

En el marco de este proyecto, se le extendió una invitación al programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica de la UMSNH a colaborar en la simulación mediante software CFD de la turbina eólica diseñada por el CIATEQ. Parte del trabajo de investigación realizado, se presenta en este artículo.

El rango operativo de la turbina es de 2.5 m/s a 10 m/s, el presente trabajo se centra en desarrollar la simulación para una velocidad de entrada de viento uniforme de 7 m/s, empleando la técnica Sliding Mesh para estimar el C_p (coeficiente de

potencia) y potencia generada por la turbina (ANSYS Inc., 2021b). La técnica de Sliding Mesh implica el uso de dos mallas, denominadas “rotor” y “estator”. En la malla “rotor”, se encuentra la geometría del rotor de la turbina eólica y es la que tendrá movimiento a una determinada velocidad angular; en cambio, la malla “estator” es estática (Tu *et al.*, 1995).

Las simulaciones son una aproximación de la realidad, que permiten una mejor comprensión de los fenómenos físicos al ofrecer más datos y una gran facilidad para visualizarlos en comparación con la experimentación (Versteeg y Malalasekera, 2007). La técnica de Sliding Mesh se basa en girar el rotor a una velocidad angular programada y ofrece resultados confiables cuando esta velocidad es idéntica o próxima a la velocidad angular real (Marin Tellez, 2022). Sin embargo, se recomienda el uso de otra técnica de simulación, como las mallas dinámicas, para predecir con mayor certeza el desempeño de una turbina y obtener mayor variedad de datos, como la velocidad angular de la turbina para determinada velocidad de viento

(ANSYS Inc., 2021a).

Las simulaciones se pueden realizar tanto en dos dimensiones (2D) como en tres (3D). No obstante, las simulaciones en 3D no son recomendadas para fines de diseño debido a que demandan una gran cantidad de tiempo y recursos computacionales, lo que ha llevado históricamente a los investigadores a emplear modelos de 2D (Franchina *et al.*, 2019). Las mallas computacionales empleadas en la mayoría de los estudios en 3D parecen bastante toscas si se comparan con sus contrapartes en 2D debido a las restricciones por el costo computacional. Desde una perspectiva técnica, los modelos 2D permiten capturar los efectos físicos relevantes de la dinámica de fluidos; sin embargo, estos modelos tienden a sobrestimar la potencia generada por la turbina y su coeficiente de potencia, C_p , que se define como la relación de la potencia generada por el rotor entre la potencia disponible del viento (Franchina *et al.*, 2019; Letcher, s/f).

La confiabilidad de los resultados obtenidos se fundamenta en varios aspectos, entre los cuales se incluyen la malla del dominio computacional, el modelo de turbulencia, el tipo de simulación (dependiente del tiempo o no dependiente del tiempo) y la técnica de simulación (Sliding Mesh, Dynamic Mesh, Single Reference Frame).

Preferentemente, se debe validar la simulación con datos experimentales; sin embargo, ante la falta de datos experimentales, la simulación realizada se respalda fuertemente en la literatura (Marin Tellez, 2022). El objetivo de la presente investigación es corroborar el diseño de la turbina propuesta por CIATEQ mediante la simulación del rotor de la turbina en 2D, obteniendo la potencia generada para la velocidad de viento uniforme de 7 m/s y el coeficiente de potencia C_p . Además, se busca demostrar que, ante la falta de datos experimentales, la validación de simulaciones de turbinas eólicas de eje vertical se puede basar fuertemente en la literatura.

Materiales y métodos

CIATEQ proporcionó el modelo geométrico de la turbina, algunos parámetros de diseño y la ubicación donde será instalada. La turbina eólica evaluada es un diseño híbrido H-Savonius, y consta de dos rotores: un rotor H y un rotor Savonius; la **Figura 1a** muestra todos los detalles geométricos. El rotor H está compuesto por tres álabes rectos con un perfil asimétrico NACA2415 (Airfoil Tools, 2022) distribuidos uniformemente, tiene una

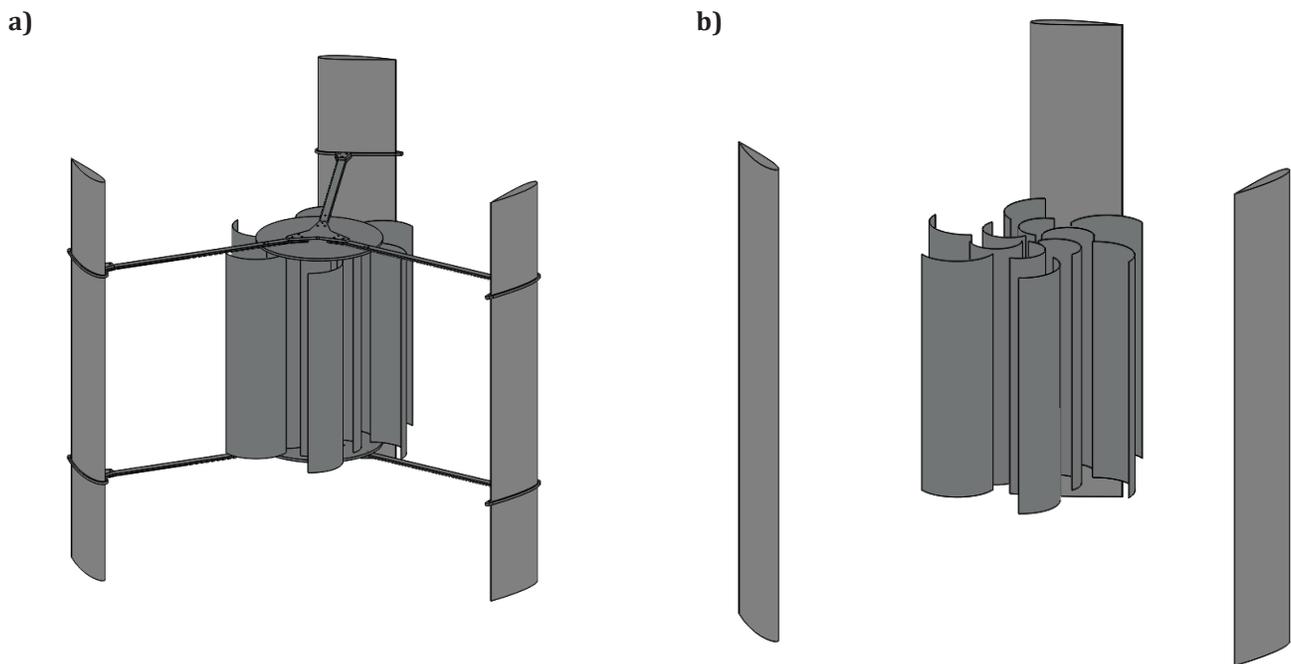


Figura 1. a) Vista dimétrica del rotor de la turbina H-Savonius con los elementos de soporte y sujeción. b) Vista dimétrica del rotor H-Savonius sin los elementos de soporte y sujeción.

altura de 2 m y un diámetro de 2.4 m. El rotor tipo Savonius cuenta con un total de 12 álabes semicirculares, distribuidos en dos niveles; cada nivel tiene 6 álabes (**Figura 1b**) y está ubicado en el centro del rotor. Tiene una altura de 1 m y un diámetro de 96 cm.

La ubicación de la turbina eólica será en la sede de CIATEQ Zapopan, Jalisco, México. El fluido de trabajo es el aire. La literatura especializada para simulaciones de turbinas eólicas de eje vertical

(VAWT) de baja potencia indican que el aire se modela en régimen turbulento e incompresible (Franchina *et al.*, 2019).

La metodología empleada para el desarrollo del proyecto es la que comúnmente se emplea para la resolución de problemas con CFD (Tu *et al.*, 1995) y se ilustra en la **Figura 2**. No se cuenta con datos experimentales del rotor eólico, por lo que para validar la simulación se debe apegar obligatoriamente a las recomendaciones marcadas

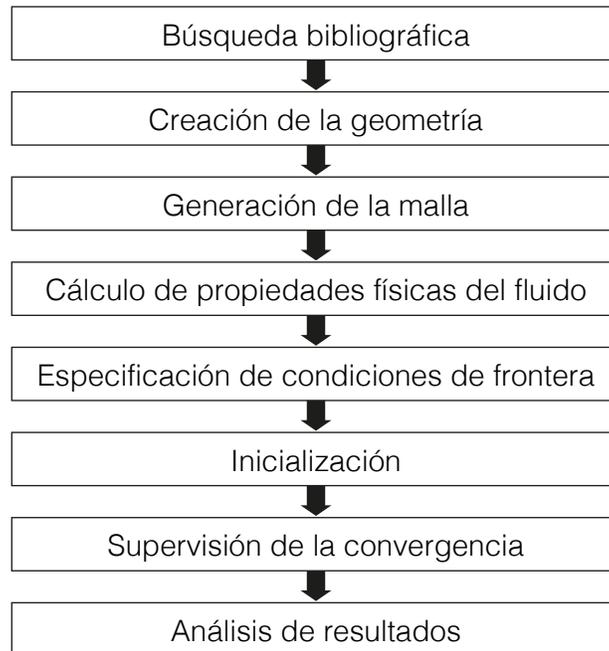


Figura 2. Metodología para el desarrollo de la investigación.

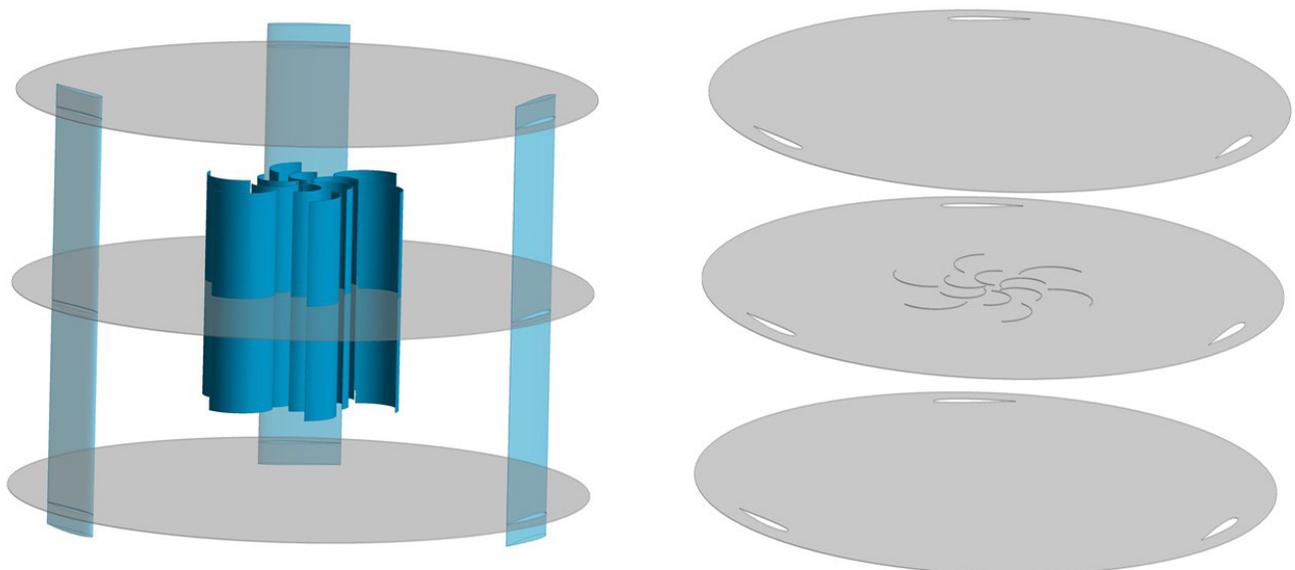


Figura 3. Planos perpendiculares al eje de rotación de la turbina híbrida.

en la literatura y al uso de las buenas prácticas. Así mismo, se añadió al proceso de trabajo la validación de la configuración del solucionador de CFD mediante la simulación de una turbina eólica reportada en la literatura que contara tanto con datos experimentales (Tescione *et al.*, 2014) como con su respectiva simulación (Rezaeiha *et al.*, 2017). Para evitar problemas de compatibilidad entre softwares se realizan todas las actividades con el software de ANSYS Workbench.

Resultados y discusión

Creación de la geometría

Se realizó una primera simplificación quitando todos los elementos de soporte que no contribuyeran o afectaran de forma sustancial a la aerodinámica de la turbina, dejando únicamente los 12 álabes de la turbina Savonius y los 3 álabes de la turbina H. El rotor simplificado se muestra en la **Figura 1b**. La simplificación se realizó para ahorrar recursos computacionales. Se puede apreciar en la **Figura 3** que la turbina híbrida no mantiene la misma sección a lo largo del eje de rotación, debido a las distintas alturas de los rotores.

Para calcular la potencia y el C_p de la turbina híbrida se emplearon dos simulaciones, la primera simuló la turbina híbrida, sección central, en 2D bajo la suposición de que la altura de ambos rotores (H y Savonius) es de 1 m y la segunda correspondió a la parte restante de la turbina (0.5 m del rotor

H superior a la sección de la turbina híbrida y 0.5 m del rotor H inferior a la sección de la turbina híbrida) y se aproximó mediante la simulación en 2D de un rotor H con una altura de 1 m (**Figura 4**).

El dimensionamiento del dominio computacional se realizó con base en una amplia búsqueda en la literatura (Durrani *et al.*, 2011; Ghasemian *et al.*, 2017; Hosseini y Goudarzi, 2019; Lam y Peng, 2016; Liang *et al.*, 2017; Orlandi *et al.*, 2015; Ostos *et al.*, 2019a; Rezaeiha *et al.*, 2017, 2018b, 2019; Untaroiu *et al.*, 2011; Zhu *et al.*, 2015), utilizando principalmente las recomendaciones de Rezaeiha *et al.* (2017). El diámetro del dominio para el rotor fue de $1.5 D$. Para el estator se hizo un rectángulo con un hueco circular; las dimensiones utilizadas se muestran en la **Figura 5**, siendo D el diámetro del rotor. Las diferentes partes del dominio del rotor y del estator se nombraron como se muestra en la **Figura 6**.

Generación de la malla

Se elaboraron tres mallas para el rotor y tres mallas para el estator, con base en las cuales se evaluaron distintas combinaciones para realizar el estudio de independencia de malla. El número de elementos y nodos de encuentran en la **Tabla 1**.

Se elaboraron 5 combinaciones de malla a partir de las tres mallas para el rotor y las tres mallas para el estator (**Tabla 2**).

Para mellar el dominio computacional del estator se usó una malla estructurada con elementos

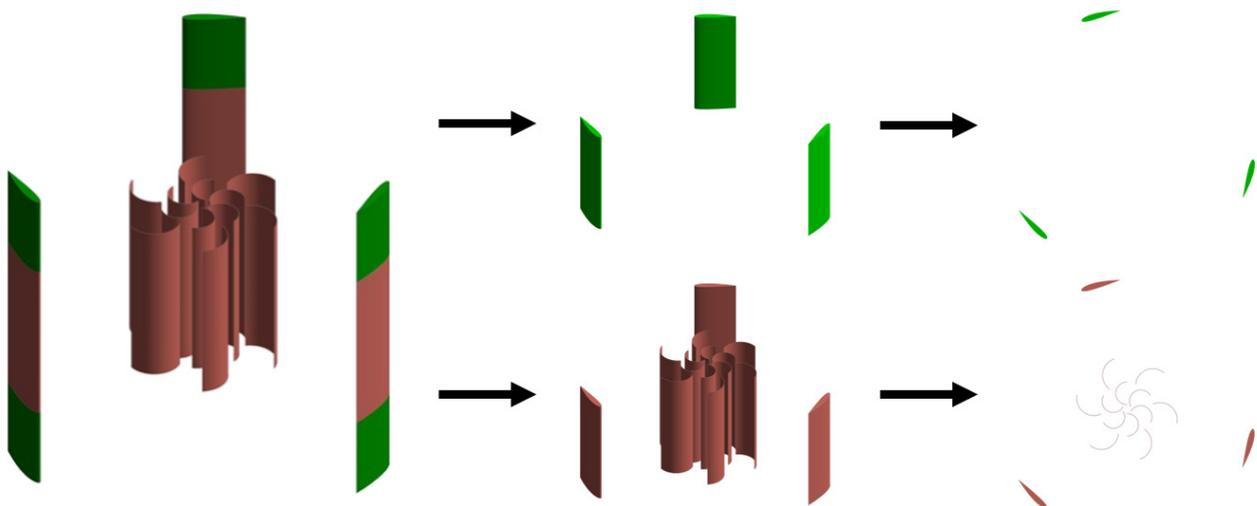


Figura 4. Proceso de simplificación para la simulación de la turbina híbrida en 2D.

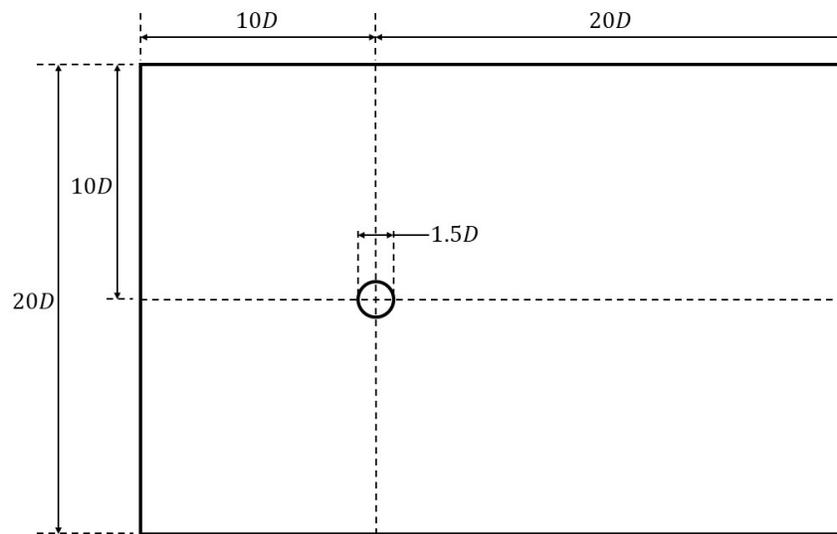


Figura 5. Plano del dominio computacional del estator.

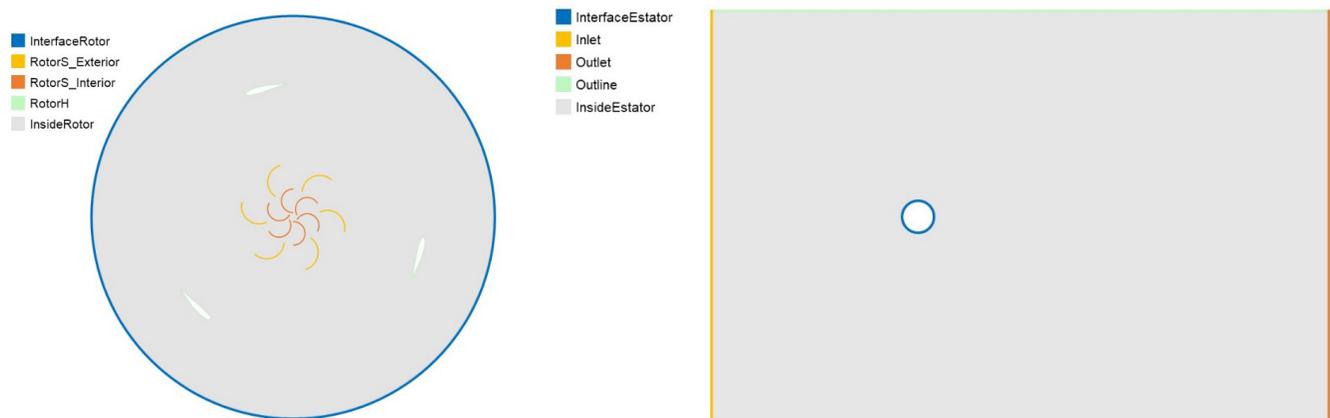


Figura 6. Nomenclatura del dominio computacional del rotor (izquierda) y dominio computacional del estator (derecha).

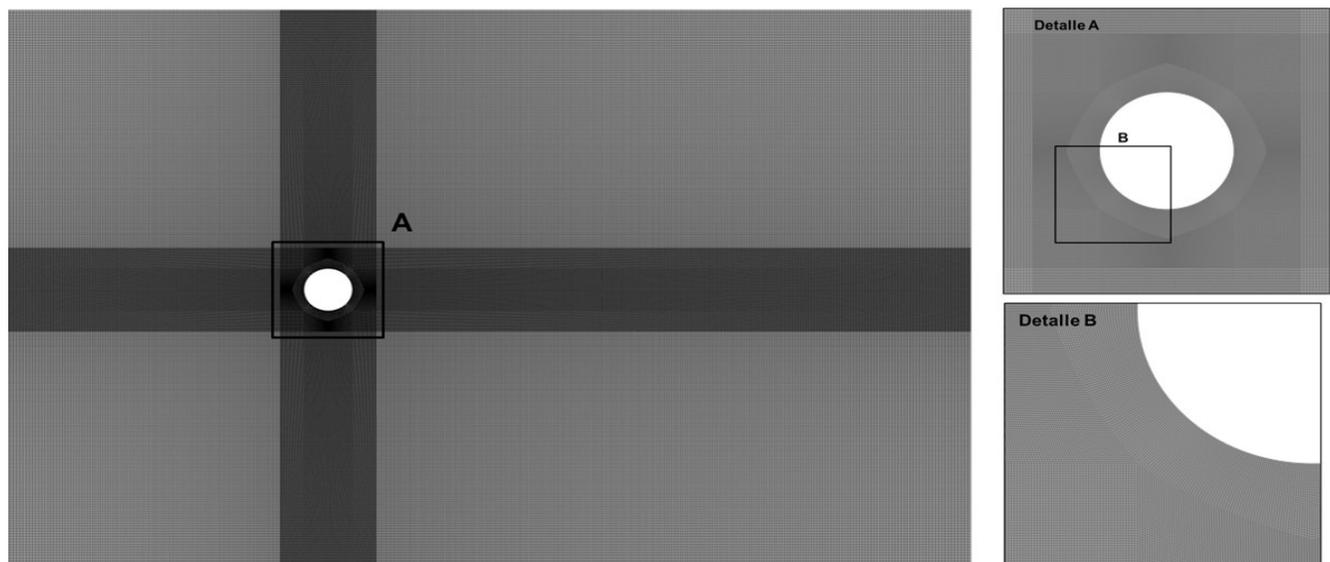


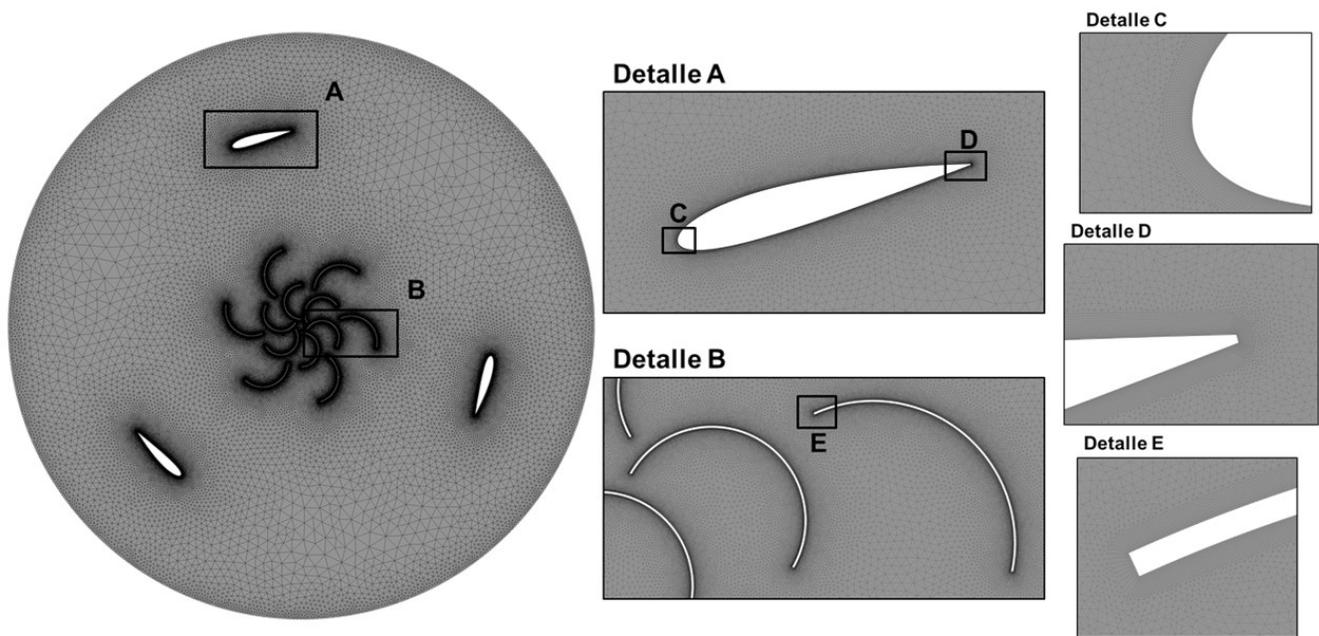
Figura 7. Malla del estator con detalles del refinamiento de malla, malla E1.

Tabla 1. Número de elementos y nodos para cada malla del estator y cada malla del rotor.

Malla	Estator			Rotor		
	E1	E2	E3	R1	R2	R3
Número de elementos	364,068	151,364	62,664	1,051,697	585,542	487,467
Número de nodos	365,560	152,288	63,256	830,219	517,202	428,569

Tabla 2. Combinación de mallas de rotor y estator para la simulación de la turbina híbrida.

Malla	1	2	3	4	5
Malla Rotor	R1	R2	R3	R2	R2
Malla Estator	E1	E1	E1	E2	E3
Núm. de elementos	1,415,765	949,610	851,535	736,906	645,206

**Figura 8.** Malla del rotor con detalles del refinamiento de malla, malla R1.

cuadráticos, refinado en la zona próxima a InterfaceEstator (**Figura 7**).

Para el dominio computacional del rotor, se empleó una malla no estructurada con elementos triangulares y rectangulares. Se refinó la malla cerca de los álabes (RotorH, RotorS_Interior y RotorS_Exterior) y en el límite del dominio (InterfaceRotor) (**Figura 8**). Se utilizó una inflación con los elementos rectangulares en las paredes de los álabes. Para las simulaciones se usó un $y^+ \approx 1$ (Kacprzak y Sobczak, 2014; Ostos *et al.*, 2019b; Rezaeiha *et al.*, 2018b).

Cálculo de las propiedades físicas del fluido

La densidad del aire se calculó siguiendo el procedimiento descrito por Manwell *et al.* (2009), quien indica que el aire se puede considerar como un gas ideal, por lo que su densidad está en función de la temperatura anual promedio y la presión atmosférica, la cual a su vez está en función de la altitud del lugar de instalación de la turbina. Se obtuvo un valor de $\rho_{aire} = 0.99036 \text{ kg/m}^3$. La temperatura anual promedio del sitio de instalación se determinó con los datos de temperatura de los años 2000 al 2014 obtenidos del Sistema CLICOM (CICESE, 2021) de la estación Guadalajara (DGE) con Id:14066. La temperatura anual promedio es

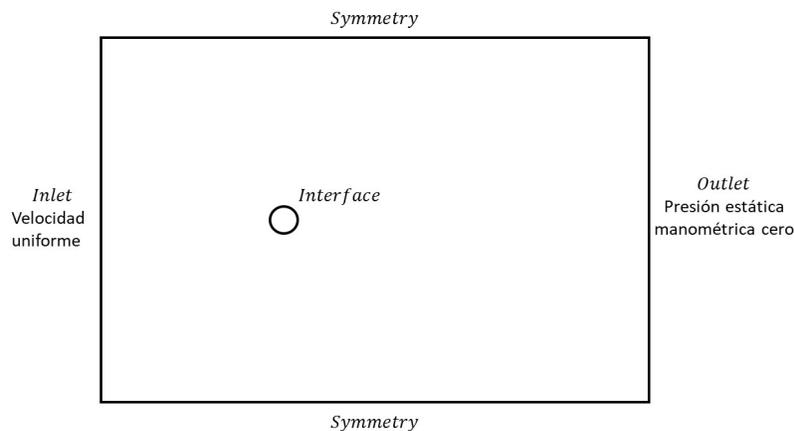


Figura 9. Condiciones de frontera.

de $T_{promedio} = T = 20.99 \text{ }^\circ\text{C} \approx 21 \text{ }^\circ\text{C}$. Además, se empleó la ley de Sutherland (CRANE, s/f) para obtener la viscosidad $\mu = 0.000018188 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$.

Especificación de condiciones de frontera

En las zonas nombradas como RotorH, RotorS_ Interior y RotorS_ Exterior, correspondientes a los álabes de la turbina, se impuso una condición de paredes antideslizantes (no-slip wall condition), se creó una interface en las zonas denominadas InterfaceRotor e InterfaceEstator, y se impusieron las condiciones de frontera ilustradas en la **Figura 9** (Balduzzi *et al.*, 2017; Dobrev y Massouh, 2011; Durrani *et al.*, 2011; ed-Dîn Fertahi *et al.*, 2018; Franchina *et al.*, 2019; Hosseini y Goudarzi, 2019; Kacprzak y Sobczak, 2014; Lam y Peng, 2016; Liang *et al.*, 2017; Lositaño y Danao, 2019; Mauro *et al.*, 2019; Ostos *et al.*, 2019a; Qin *et al.*, 2011; Rezaeiha *et al.*, 2017, 2018b, 2018a; Tirandaz y Rezaeiha, 2021; Zhu *et al.*, 2015).

Inicialización del modelo

Se inició el estudio con una simulación de flujo en estado estacionario con la técnica de Single Reference Frame (Frame Motion). Posteriormente, se hizo la simulación de flujo en estado no estacionario con la técnica de Sliding Mesh. La inicialización de la simulación RANS del rotor con la técnica de Frame Motion se usó con el modelo de turbulencia $k-\omega$ SST de dos ecuaciones (SST). Para la simulación URANS del rotor con la técnica de Sliding Mesh se usó el modelo de turbulencia de 4 ecuaciones SST de transición (TSST). Se emplearon los modelos anteriormente mencionados debido a que son modelos robustos que son ampliamente

utilizados en simulaciones de VAWT y por las recomendaciones de trabajos especializados como el de Rezaeiha *et al.* (2019).

Con los datos proporcionados por CIATEQ para el rotor H ($TSR = 3$ y $r = D/2 = 1.2 \text{ m}$), la velocidad del viento a evaluar (7 m/s) y despejando la velocidad angular de la definición de TSR, ($\omega = [TSR \cdot V_\infty]/r$), se calculó la velocidad angular $\omega = 17.5 \text{ rad/s}$.

El paso de tiempo para el caso de turbinas eólicas con la revolución de la turbina se tiende a correlacionar y expresar como incremento azimutal, $d\theta$. El incremento azimutal se define como el número de grados que gira la turbina por paso de tiempo (Rezaeiha *et al.*, 2018b). Se utiliza un incremento azimutal de 0.5° con base en Rezaeiha *et al.* (2017).

Supervisión de la convergencia

El esquema numérico usado para la técnica Frame Motion es Coupled, y para la de Sliding Mesh, SIMPLE. El solucionador utilizado es *pressure-based* con una discretización de segundo orden tanto para el esquema espacial como para el temporal. En la simulación de flujo en estado estacionario se consideró solamente los residuales para establecer la convergencia, con un criterio mínimo de convergencia de $1 \cdot 10^{-5}$ para todos los residuales (Tu *et al.*, 1995).

En la simulación en estado no estacionario, la convergencia se define con base en el número de revoluciones de la turbina antes de alcanzar una condición estadística de estado estable (Balduzzi *et al.*, 2016). La complejidad del flujo para los VAWT varía en función de las condiciones geométricas y de funcionamiento del rotor para cada turbina (solidez y TSR), por lo que no existe un número de

revoluciones en particular para alcanzar la solución (Balduzzi *et al.*, 2016). El criterio de convergencia más usado en la literatura es comparar el valor promedio del torque de una revolución completa entre dos revoluciones sucesivas. En la mayoría de los trabajos, las simulaciones se detienen cuando esta diferencia es inferior al 1% (Balduzzi *et al.*, 2016). Se usó como criterio de convergencia el valor de 0.5% de diferencia entre el valor promedio del torque de una revolución y sus dos revoluciones sucesivas. El criterio se cumplió entre la décima séptima y decima novena revolución, dependiendo de la simulación. Los valores reportados en el presente trabajo corresponden a la vigésima quinta revolución, atendiendo también a la recomendación de Rezaeiha *et al.* (2018b), que establece un mínimo de 20 revoluciones como requisito de criterio de convergencia.

Análisis de resultados

Durante una revolución de la turbina, el álabe, el ángulo de ataque y la velocidad relativa percibida por el perfil cambian continuamente, dando como resultado una fluctuación instantánea de las fuerzas y el par que actúan sobre la turbina (Franchina *et al.*, 2019). En la **Figura 10** se muestra el torque de la turbina desde el inicio de

la simulación con la técnica de Sliding Mesh hasta finalizar las 25 revoluciones.

Se muestran tres líneas correspondientes al torque generado por el rotor H, el torque del rotor Savonius y el torque del rotor híbrido. El torque del rotor híbrido es la suma del torque del rotor H y el rotor Savonius. Así mismo, se observa un comportamiento sinusoidal repetitivo en el rotor H y el rotor híbrido a partir de la tercera revolución, en cambio en el rotor Savonius se observa que el torque permanece variado en un determinado rango.

La **Figura 11** muestra de forma comparativa los resultados de ambas simulaciones para el rotor H de la turbina híbrida y para la turbina H con un incremento azimutal de 0.5° en sus últimas tres revoluciones.

La diferencia más notoria es en los máximos y mínimos del torque. El torque de la turbina H es 2.09% mayor que el torque del rotor H de la turbina híbrida. Al ser una diferencia porcentual baja y para evitar una sobreestimación del torque de la turbina propia de las simulaciones en 2D se aproximó el torque total de la turbina híbrida completa mediante la suma del torque de la turbina híbrida y el torque del rotor H. La **Figura 12** muestra el torque de la turbina híbrida y sus rotores en las última tres revoluciones.

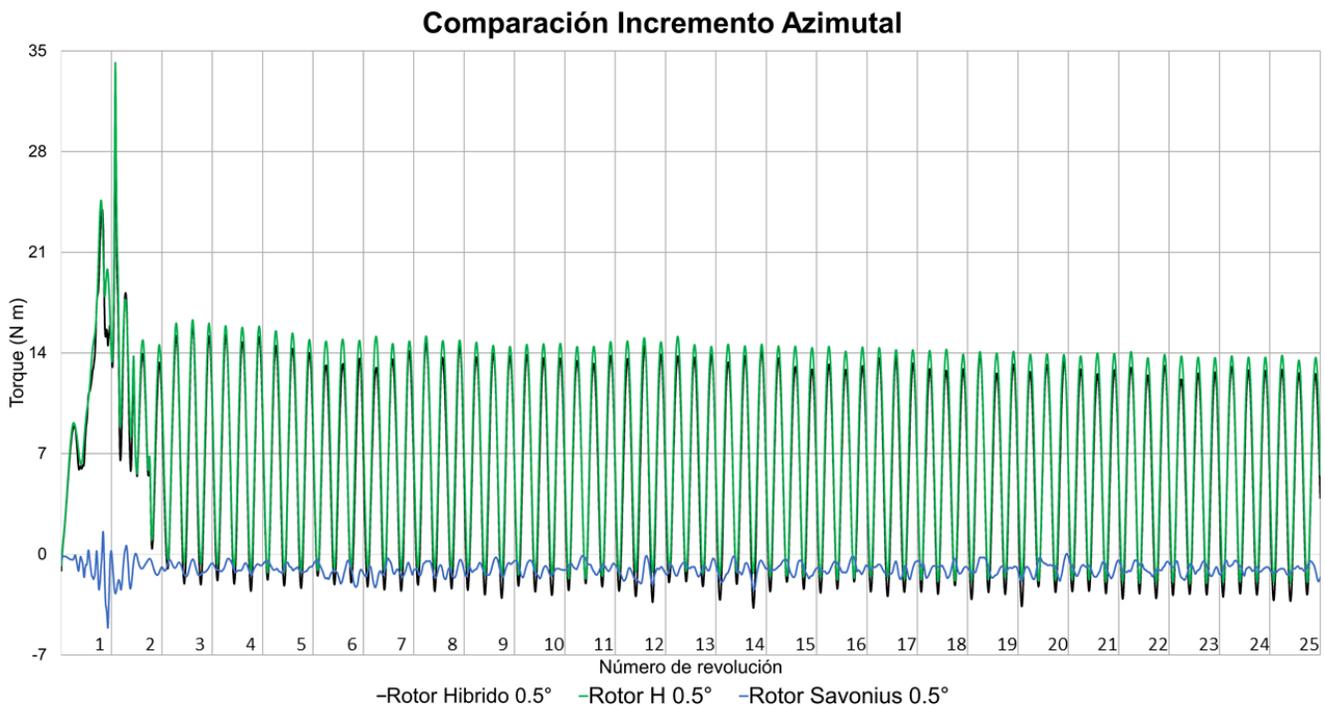


Figura 10. Torque simulado en 25 revoluciones con la malla 1 y con un incremento azimutal de 0.5° .

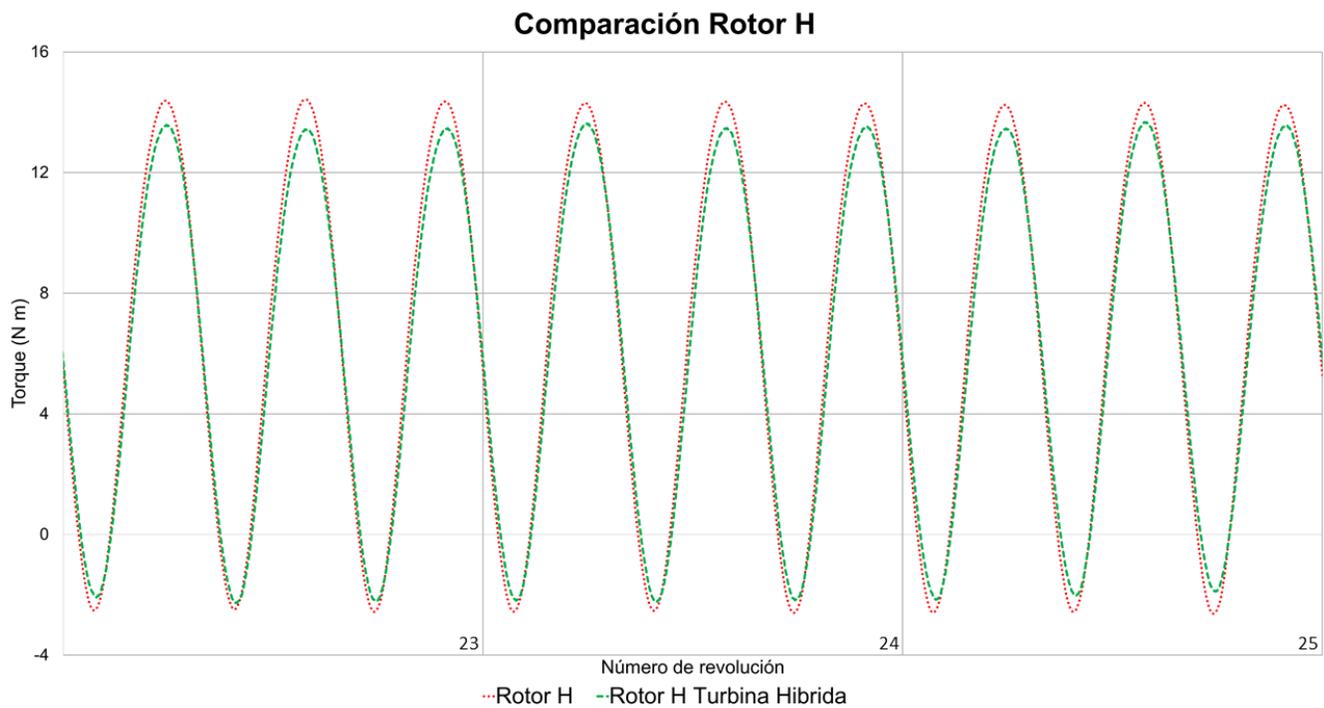


Figura 11. Comparación del torque generado por la turbina H y por el rotor H de la turbina híbrida en la 23.ª, 24.ª y 25.ª revolución con un incremento azimutal de 0.5°.

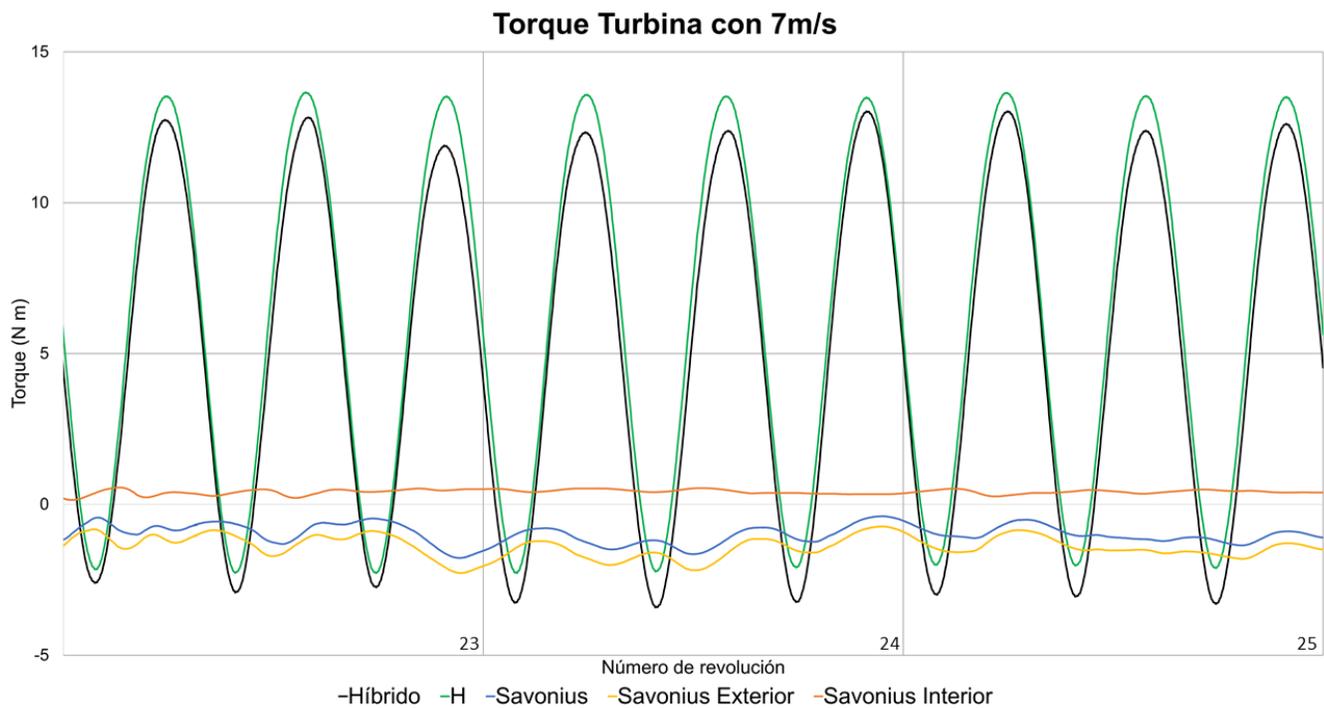


Figura 12. Torque de la turbina híbrida en la 23.ª, 24.ª y 25.ª revolución con un incremento azimutal de 0.5° con una velocidad del viento de 7 m/s, con la malla 4.

Se observa un comportamiento predominante sinusoidal de la turbina híbrida debido a que predomina el comportamiento sinusoidal del rotor H. El torque de la turbina híbrida varía ligeramente

en sus picos máximos y mínimos debido a las fluctuaciones del rotor Savonius. El rotor Savonius proporciona un torque neto negativo; el torque neto se obtuvo con base en la suma del torque del



Savonius Interior y el del Savonius Exterior. El torque del Savonius Interior es positivo y tiende a tener un valor prácticamente constante en cada revolución en comparación con el torque generado por el Savonius Exterior que es negativo y fluctúa en mayor medida.

Para calcular la potencia de la turbina híbrida se obtuvo el torque total, es decir, la suma del torque de la turbina híbrida y del rotor H, y posteriormente se multiplicó por su velocidad angular, obteniendo una potencia de 200.1 W. Se calculó la potencia disponible del viento para una velocidad uniforme de viento de 7 m/s. Además, se determinó el C_p , el cual dio un valor de 0.245.

La simulación de esta turbina en particular se validó con base en los resultados reportados en la literatura, ya que no se contaba con datos experimentales. El rotor H genera el mayor torque y tiene forma de 3 ondas sinusoidales por revolución, lo que concuerda con lo mencionado en otros trabajos (Hau, s/f; Hosseini y Goudarzi, 2019; Lopez Mejia *et al.*, 2021; Lositaño y Danao, 2019; Shahizare *et al.*, 2016). Por otro lado, el torque del rotor Savonius no tiene una forma establecida y oscila en un rango de valor, y no se encontró un rotor similar reportado en la literatura por lo que no se cuenta con una gráfica de torque esperada con la cual comparar. No obstante, el rotor Savonius opera como un freno para la turbina híbrida (Bhuyan y Biswas, 2014), ya que genera un torque negativo bajo las condiciones de velocidad angular y velocidad del viento evaluadas. La potencia generada permanece debajo del límite de Betz (Hau, s/f; Manwell *et al.*, 2009) y el C_p de la turbina (0.245) se encuentra dentro de los rangos para turbinas eólicas de eje vertical (Hau, s/f).

Conclusiones

Se evaluó el rendimiento de la VAWT diseñada por el CIATEQ mediante simulaciones 2D. La metodología propuesta sirvió para solventar la problemática que posaba trabajar con una turbina con cambio de sección transversal. A pesar de la falta de datos experimentales, la simulación del rotor de la turbina se considera confiable, ya que los resultados presentados concuerdan con lo reportado en la literatura. Según lo obtenido en las simulaciones, la turbina eólica de eje vertical tiene una potencia de 200.1 W y un C_p de 0.245; estos

valores se apegan a lo indicado en la literatura. Además, la forma de torque por revolución del rotor H y el comportamiento del rotor Savonius también se respaldan por la literatura.

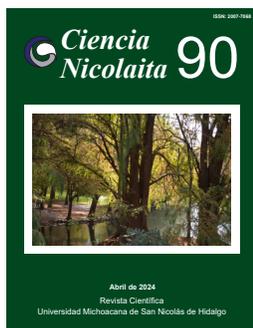
Referencias

- Airfoil Tools (2022). *Airfoil Tools*. <http://airfoiltools.com/index>
- ANSYS Inc. (2021a). *ANSYS FLUENT Theory Guide 2021-R2*. July.
- ANSYS Inc. (2021b). *ANSYS FLUENT Tutorial Guide*.
- Balduzzi F, Bianchini A, Maleci R, Ferrara G, Ferrari L (2016). Critical issues in the CFD simulation of Darrieus wind turbines. *Renewable Energy* 85: 419–435. doi:10.1016/j.renene.2015.06.048
- Balduzzi F, Drofelnik J, Bianchini A, Ferrara G, Ferrari L, Campobasso MS (2017). Darrieus wind turbine blade unsteady aerodynamics: a three-dimensional Navier-Stokes CFD assessment. *Energy* 128: 550–563. doi:10.1016/j.energy.2017.04.017
- Bhuyan S, Biswas, A. (2014). Investigations on self-starting and performance characteristics of simple H and hybrid H-Savonius vertical axis wind rotors. *Energy Conversion and Management* 87: 859–867. doi:10.1016/j.enconman.2014.07.056
- CIATEQ. (2020). *CIATEQ Bienvenidos*. <https://www.ciateq.mx/index.php/conoce-ciateq.html>
- CICESE. (2021). *CLICOM*. <http://clicom-mex.cicese.mx/>
- CRANE. (s/f). *Flujos de Fluidos en Válvulas Accesorios y Tuberías*. McGRAW HILL.
- Dobrev I, Massouh, F. (2011). CFD and PIV investigation of unsteady flow through Savonius wind turbine. *Energy Procedia* 6: 711–720. doi:10.1016/j.egypro.2011.05.081
- Durrani N, Hameed H, Rahman H, Chaudhry S (2011). *A Detailed Aerodynamic Design and Analysis of a 2-D Vertical Axis Wind Turbine Using Sliding Mesh in CFD*. January, 1–16. doi:10.2514/6.2011-541
- ed-Dîn Fertahi S, Bouhal T, Rajad O, Kousksou T, Arid A, El Rhafiki T, Jamil A, Benbassou A (2018). CFD performance enhancement of a low cut-in speed current Vertical Tidal Turbine through the nested hybridization of Savonius and Darrieus. *Energy Conversion and Management* 169: 266–278. doi:10.1016/j.enconman.2018.05.027
- Franchina N, Persico G, Savini M (2019) 2D-3D Computations of a Vertical Axis Wind Turbine Flow Field: Modeling Issues and Physical Interpretations. *Renewable Energy* 136: 1170-

1189. doi:10.1016/j.renene.2018.09.086
- Ghasemian M, Ashrafi ZN, Sedaghat A (2017). A review on computational fluid dynamic simulation techniques for Darrieus vertical axis wind turbines. *Energy Conversion and Management* 149: 87–100. doi:10.1016/j.enconman.2017.07.016
- Hau E (s/f). *Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics* (Second Edi). Springer.
- Hosseini A, Goudarzi N (2019) Design and CFD study of a hybrid vertical-axis wind turbine by employing a combined Bach-type and H-Darrieus rotor systems. *Energy Conversion and Management* 189: 49-59. doi:10.1016/j.enconman.2019.03.068
- Kacprzak K, Sobczak K (2014). Numerical analysis of the flow around the Bach-type Savonius wind turbine. *Journal of Physics: Conference Series* 530(1): 012063. doi:10.1088/1742-6596/530/1/012063
- Lam HF, Peng HY (2016). Study of wake characteristics of a vertical axis wind turbine by two- and three-dimensional computational fluid dynamics simulations. *Renewable Energy* 90: 386–398. doi:10.1016/j.renene.2016.01.011
- Letcher TM (s/f). *Wind Energy Engineering A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*.
- Liang X, Fu S, Ou B, Wu C, Chao CYH, Pi K (2017). A computational study of the effects of the radius ratio and attachment angle on the performance of a Darrieus-Savonius combined wind turbine. *Renewable Energy* 113: 329–334. doi:10.1016/j.renene.2017.04.071
- Lopez Mejia OD, Mejia OE, Escorcía KM, Suarez F, Laín S (2021). Comparison of Sliding and Overset Mesh Techniques in the Simulation of a Vertical Axis Turbine for Hydrokinetic Applications. In *Processes* (Vol. 9, Issue 11). doi:10.3390/pr9111933
- Lositaño ICM, Danao LAM (2019). Steady wind performance of a 5 kW three-bladed H-rotor Darrieus Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) with cambered tubercle leading edge (TLE) blades. *Energy* 175: 278–291. doi:10.1016/j.energy.2019.03.033
- Manwell JF, McGowan JG, Rogers AL (2009). *WIND ENERGY EXPLAINED Theory, Design and Application Second Edition* (Wiley, Ed.; Second Edi).
- Marin Tellez GJ (2022). *Simulación y optimización del rotor de una turbina eólica de eje vertical de baja capacidad*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Mauro S, Brusca S, Lanzafame R, Messina M (2019). CFD modeling of a ducted Savonius wind turbine for the evaluation of the blockage effects on rotor performance. *Renewable Energy* 141: 28–39. doi:10.1016/j.renene.2019.03.125
- Orlandi A, Collu M, Zanforlin S, Shires A (2015). 3D URANS analysis of a vertical axis wind turbine in skewed flows. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 147: 77–84. doi:10.1016/j.jweia.2015.09.010
- Ostos I, Ruiz I, Gajic M, Gómez W, Bonilla A, Collazos C (2019a). A modified novel blade configuration proposal for a more efficient VAWT using CFD tools. *Energy Conversion and Management*, 180(August 2018), 733–746. doi:10.1016/j.enconman.2018.11.025
- Ostos I, Ruiz I, Gajic M, Gómez W, Bonilla A, Collazos C (2019b). A modified novel blade configuration proposal for a more efficient VAWT using CFD tools. *Energy Conversion and Management*, 180(August 2018), 733–746. doi:10.1016/j.enconman.2018.11.025
- Qin N, Howell R, Durrani N, Hamada K, Smith T (2011). Unsteady flow simulation and dynamic stall behaviour of vertical axis wind turbine blades. *Wind Engineering* 35(4): 511–527. doi:10.1260/0309-524X.35.4.511
- Rezaeiha A, Kalkman I, Blocken B (2017). CFD simulation of a vertical axis wind turbine operating at a moderate tip speed ratio: Guidelines for minimum domain size and azimuthal increment. *Renewable Energy* 107: 373–385. doi:10.1016/j.renene.2017.02.006
- Rezaeiha A, Montazeri H, Blocken B (2018a). Characterization of aerodynamic performance of vertical axis wind turbines: Impact of operational parameters. *Energy Conversion and Management* 169: 45–77. doi:10.1016/j.enconman.2018.05.042
- Rezaeiha A, Montazeri H, Blocken B (2018b). Towards accurate CFD simulations of vertical axis wind turbines at different tip speed ratios and solidities: Guidelines for azimuthal increment, domain size and convergence. *Energy Conversion and Management*, 156(September 2017), 301–316. doi:10.1016/j.enconman.2017.11.026
- Rezaeiha A, Montazeri H, Blocken B (2019). On the accuracy of turbulence models for CFD simulations of vertical axis wind turbines. *Energy* 180: 838–857. doi:10.1016/j.energy.2019.05.053
- Shahizare B, Nazri Bin Nik Ghazali N, Chong WT, Tabatabaeikia SS, Izadyar N (2016). Investigation of the Optimal Omni-Direction-Guide-Vane Design for Vertical Axis Wind



- Turbines Based on Unsteady Flow CFD Simulation. In *Energies* (Vol. 9, Issue 3). doi:10.3390/en9030146
- Tescione G, Ragni D, He C, Simão Ferreira CJ, van Bussel GJW (2014). Near wake flow analysis of a vertical axis wind turbine by stereoscopic particle image velocimetry. *Renewable Energy* 70: 47–61. doi:10.1016/j.renene.2014.02.042
- Tirandaz MR, Rezaeiha A (2021). Effect of airfoil shape on power performance of vertical axis wind turbines in dynamic stall: Symmetric Airfoils. *Renewable Energy* 173: 422–441. doi:10.1016/j.renene.2021.03.142
- Tu J, Heng Yeoh G, Liu C (1995). *Computational Fluid Dynamics A Practical Approach*.
- Untaroiu A, Wood HG, Allaire PE, Ribando RJ (2011). Investigation of Self-Starting Capability of Vertical Axis Wind Turbines Using a Computational Fluid Dynamics Approach. *Journal of Solar Energy Engineering* 133(4). doi:10.1115/1.4004705
- Versteeg HK, Malalasekera W (2007). *An introduction to Computational Fluid Dynamics: the finite volume method*. Second edn. Pearson Education, Harlow, England
- Zhu J, Huang H, Shen H (2015). Self-starting aerodynamics analysis of vertical axis wind turbine. *Advances in Mechanical Engineering* 7(12): 1–12. doi:10.1177/1687814015620968



Ciencia Nicolaita 90

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Modelado hidrológico superficial de la cuenca tributaria de la estación hidrométrica 12378 en Aguascalientes, México mediante el modelo de precipitación-escorrimento HBV

Surface hydrological modeling of the tributary basin of hydrometric station 12378 in Aguascalientes, Mexico using the HBV precipitation-runoff model

Roxana Nicté-Há Hughes Lomelín, Sonia Tatiana Sánchez Quispe*, Liliana García Romero

Para citar este artículo: Hughes Lomelín RN, Sánchez Quispe ST*, García Romero L (2024). Modelado hidrológico superficial de la cuenca tributaria de la estación hidrométrica 12378 en Aguascalientes, México mediante el modelo de precipitación-escorrimento HBV. *Ciencia Nicolaita* 90: 86-94.

DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi90.738>

Historial del artículo



Recibido: 16 de agosto de 2023

Aceptado: 31 de enero de 2024

Publicado en línea: abril 2024



Ver material suplementario



*Correspondencia de autor: quispe@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Modelado hidrológico superficial de la cuenca tributaria de la estación hidrométrica 12378 en Aguascalientes, México mediante el modelo de precipitación-escorrimento HBV

Surface hydrological modeling of the tributary basin of hydrometric station 12378 in Aguascalientes, Mexico using the HBV precipitation-runoff model

Roxana Nichte-Há Hughes Lomelín¹, Sonia Tatiana Sánchez Quispe^{2*}, Liliana García Romero²

¹Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Química

²Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil

Resumen

El modelado hidrológico superficial es una herramienta fundamental en el estudio de la hidrología, ya que permite una mejor comprensión del comportamiento, propiedades y características de sistemas hidrológicos; a través de la simulación de estos modelos se puede analizar cómo los cambios en particularidades y parámetros de cada sistema afectan a los fenómenos hidrológicos. En este trabajo se modela la cuenca tributaria de la estación hidrométrica con ID 12378 ubicado por la Presa Plutarco Elías Calles en Aguascalientes, México mediante el modelo de precipitación – escurrimento Hydrologiska Bryans Vattenbalansavdelning (HBV). Se usan las series de precipitación y temperaturas proporcionadas por el Servicio Meteorológico Nacional, y los escurrimentos resultantes del modelo se comparan con las series de caudales medidos en esta estación disponible en el BANDAS del CONAGUA, para poder determinar sus índices de bondad de ajuste con respecto a la literatura y determinar la robustez del modelo, para poder asegurar que simulaciones futuras concuerdan con un elevado grado de confianza con lo que podría pasar en la realidad.

Palabras clave: Modelo hidrológico, modelo HBV, Aguascalientes

Abstract

Superficial hydrological modelling is a fundamental tool in the study of hydrology, allowing a better comprehension of hydrological system behaviours, properties, and characteristics; through the simulation of these models, the analyst can determine how changes to the particularities and parameters of each system affect hydrological phenomena. In this paper, the tributary basin to the hydrometric station with ID 12378, located by the Calles Dam in Aguascalientes, Mexico, is modelled using the HBV model. The precipitation and temperature series are obtained from the National Meteorological Service, and the resulting runoffs are compared to the series of measured runoffs by this station, which is available in the BANDAS by CONAGUA, to determine the model's evaluation statistics according to the existing literature and determine the model's robustness, assuring in this manner that future simulations correspond by a high degree of confidence with what may really happen.

Keywords: Hydrological model, HBV model, Aguascalientes

Introducción

La modelación hidrológica es una herramienta fundamental en el estudio de la hidrología, ya que permite obtener una mejor comprensión del comportamiento, las características y las propiedades de un sistema hidrológico. También, se puede analizar la influencia que ejerce la alteración de las condiciones hidrológicas del sistema en los fenómenos hidrológicos (González-Mendoza, 2016). Mediante la simulación de la representación simplificada del sistema, se puede estimar, predecir y analizar eventos futuros que pudieran ocurrir, de tal forma reduciendo la incertidumbre en la toma de decisiones dentro de la gestión de los recursos hídricos.

El modelo HBV (Hydrologiska Bryans Vattenbalansavdelning) (Bergström, 1976; Lindström *et al.*, 1997) es un modelo conceptual y agregado que ha sido utilizado ampliamente en el estudio del balance hídrico, dado que es un modelo robusto con una estructura simple y pocos parámetros (Paredes *et al.*, 2014). El modelo promedia los diferentes parámetros y valores de entrada para cuencas pequeñas. La **Figura 1** representa esquemáticamente los procesos e interacciones hidrológicas simulados por el modelo HBV.

La versión del modelo utilizado (módulo HBV de la herramienta Evaluación de los Recursos Hídricos EvalHid; (Paredes *et al.*, 2011) requiere como variables de entrada, la precipitación mensual acumulada y evapotranspiración potencial (ETP).

Contempla el ajuste de ocho parámetros que influyen en la transferencia de agua entre las diferentes celdas (superficial, subsuperficial y subterránea) que simula. En la celda superficial, se tiene: β (adim), que controla la cantidad de agua que contribuye al escurrimiento superficial dado

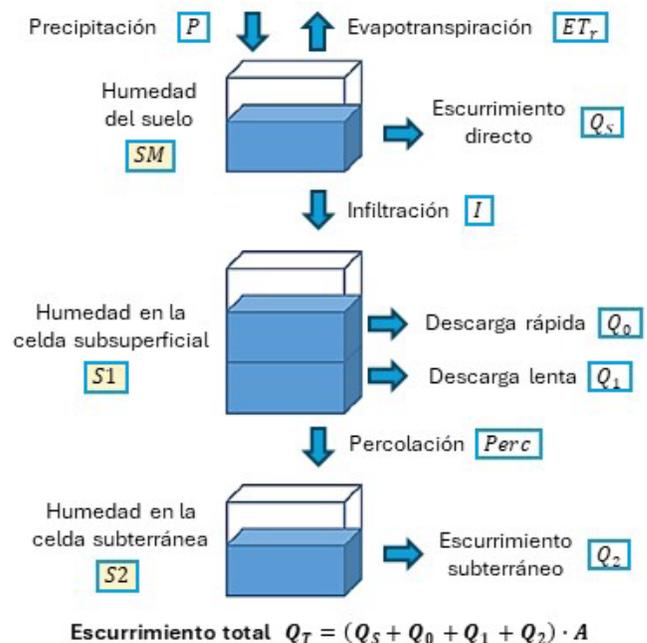


Figura 1. Diagrama que muestra el funcionamiento del modelo HBV y los flujos y almacenamiento del agua entre sus diferentes fases (celdas). Modificado de Paredes *et al.* (2014).

un déficit en la humedad del suelo; FC (mm), el cual define la capacidad de almacenamiento de agua máxima del suelo; y PWP (mm), que proporciona el punto de marchitez del suelo, influyendo en la evapotranspiración del sistema. L_{max} (mm) es la cantidad mínima del agua que puede almacenar el suelo antes de escurrir subsuperficialmente (en la celda subsuperficial); este escurrimiento es regulado por dos coeficientes adimensionales, K_0 y K_1 , dependiendo si la descarga del gasto es rápida o lenta, respectivamente. Esta celda presenta una salida más a través del proceso de percolación del agua, controlado por K_{perc} (adim). Con respecto a la celda subterránea, se tiene el escurrimiento subterráneo, limitado por K_2 (adim). El escurrimiento total del sistema, por tanto, está dado por la suma de los escurrimientos presentes en las tres celdas simuladas.

El modelo debe someterse a un proceso de calibración, a través del cual los parámetros del modelo se ajustan de tal manera que los datos simulados por el modelo se aproximen lo más estadísticamente posible a los datos medidos. Idealmente, también se realiza una validación, que es comparar una serie de datos simulados en otro periodo contra los datos medidos del mismo. Es importante mencionar que la validación no se debe hacer durante el mismo periodo que se usó para la calibración. Los parámetros se manipulan con base en el rendimiento del modelo, descrito por medio de índices de bondad de ajuste. Estos índices son coeficientes estadísticos que representan la similitud estadística de las dos series (observadas vs. simuladas). Los índices de la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y su logaritmo ($\ln N$) determinan la magnitud relativa entre la varianza residual (ruido) comparada con la varianza de los datos medidos, indicando el ajuste que presentan los valores observados graficados con respecto a los datos simulados con respecto a la recta 1:1 (Moriassi *et al.*, 2007). NSE es más sensible a los valores altos mientras que $\ln N$ es más sensible a los valores bajos. El coeficiente de correlación de Pearson (R) describe a su vez el grado de

colinealidad entre las dos series de datos (Moriassi *et al.*, 2007). El coeficiente de simetría indica lo parecido que son las medias de las dos series. La **Tabla 1** resume los índices recomendados por la literatura para modelos hidrológicos (Moriassi *et al.*, 2007; Moriassi *et al.*, 2015) y sus rangos indicativos de calidad, mismos que se implementan en este trabajo.

El acuífero Valle de Aguascalientes se ubica en la parte central del estado de Aguascalientes, México. Tiene una superficie de 3,129 km². El acuífero, definido con la clave 0101 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, pertenece a la Región Hidrológica-Administrativa (RHA) VIII "Lerma-Santiago-Pacífico". El clima prevalente en la zona es semiseco, con temperatura media de 17 °C, una precipitación media anual de 510 mm y evaporación potencial de 2010 mm (CONAGUA, 2020).

Para elegir una estación hidrométrica (EH) del cual obtener datos que servirán como punto de comparación de un modelo hidrológico, se debe verificar que se encuentra a régimen natural (el flujo de agua que circula por los cauces no esté afectado por actividades de origen antrópico), de acuerdo con la metodología propuesta por Sánchez-Quispe *et al.* (2021). Idealmente, si el régimen que presenta una EH es alterado, se debería realizar una restitución a régimen natural; sin embargo, en México no se dispone de la información necesaria para realizar dicha restitución, por lo que, para garantizar hasta cierto punto el estado inalterado del caudal, la estación elegida debe situarse en la cabecera de la cuenca.

Este trabajo aplica el modelo HBV a una cuenca de cabecera tributaria de la EH 12378 (**Figura 2**), localizada por la Presa Calles en Aguascalientes, México. Esta cuenca servirá como base de calibración para un modelado mayor de toda la zona del acuífero.

Tabla 1. Calidad de índices de bondad de ajuste.

Calidad	NSE	$\ln N$	R	Simetría
Muy buena	$0.75 < x \leq 1.00$	$0.75 < x \leq 1.00$	$0.90 < x \leq 1.00$	$0.75 < x \leq 1.00$
Buena	$0.65 < x \leq 0.75$	$0.65 < x \leq 0.75$	$0.75 < x \leq 0.90$	$0.65 < x \leq 0.75$
Satisfactoria	$0.50 < x \leq 0.65$	$0.50 < x \leq 0.65$	$0.50 < x \leq 0.75$	$0.50 < x \leq 0.65$
Insatisfactoria	$x \leq 0.50$	$x \leq 0.50$	$-1.00 < x \leq 0.50$	$x \leq 0.50$

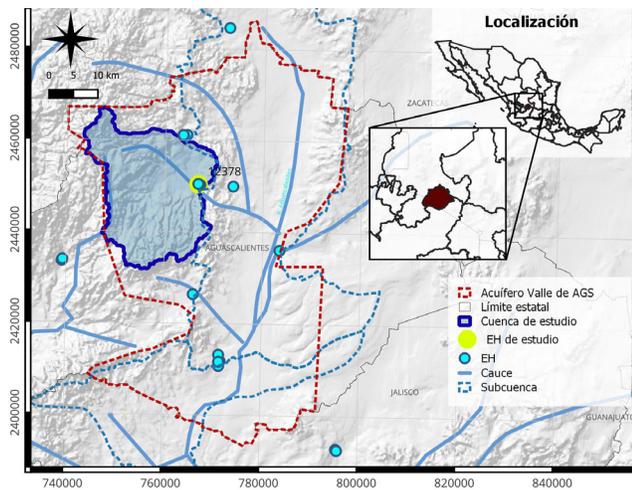


Figura 2. Ubicación de la cuenca de estudio.

Desarrollo

La información hidrométrica y meteorológica se encuentra en las bases de datos de las estaciones ubicadas en o alrededor de la zona de estudio; estas bases de datos son manejadas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2021) y la CONAGUA (2016).

Se realiza una primera selección de EHs con base en su ubicación espacial; se les aplican pruebas estadísticas para determinar el comportamiento de sus datos (pruebas de Secuencias y Helmer para determinar homogeneidad y límites de Anderson al 95% para probar su independencia) y se definen coeficientes específicos que describen el caudal medido, con base en la metodología de Sánchez-Quispe *et al.* (2021). El módulo relativo M_r representa el escurrimiento en litros por segundo (lps) unidad de área de cuenca; por su parte, el coeficiente de escurrimiento C_e es la razón entre el volumen escurrido y el volumen precipitado en la cuenca. Una vez seleccionada la EH adecuada, se genera la cuenca utilizando la herramienta GRASS en el software de QGIS (GRASS Development Team, 2017).

Las series de entrada del modelo de precipitación y evapotranspiración potencial (calculada a partir de las series de temperatura) se encuentran en las estaciones meteorológicas (EM). Al igual que las EH, se requiere realizar un filtrado para determinar cuáles estaciones proveen la información más adecuada para el modelado. Se hace un primer filtrado con base en su distancia geográfica a la zona de estudio, su porcentaje de vacíos, sus años de servicio y el periodo de servicio. Las

series de precipitación y temperatura deben concordar temporalmente con la serie de caudales observados para lograr comparar la serie de escurrimiento resultante del modelo, para después calibrarlo. Las EM también se validan estadísticamente mediante la metodología de Sánchez-Quispe *et al.* (2021) para determinar su homogeneidad e independencia, usando las pruebas de Secuencias y Helmer y la prueba de los límites de Anderson, respectivamente. Si las pruebas para la homogeneidad resultan inconclusas, se aplican pruebas más específicas, como la de T-Student y la de Cramer (Sánchez-Quispe *et al.*, 2021).

A partir de los datos validados se obtiene la serie de precipitación y se calcula la serie de ETP con el método de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948) utilizando las temperaturas medias mensuales obtenidas de la base de datos del SMN (2021).

El modelo HBV se genera en el módulo informático EvalHid. El modelo resultante se calibra con base en los datos hidrométricos de la EH 12378, garantizando la precisión de los datos simulados para que futuras simulaciones representen el sistema real de manera fiable. Idealmente, se realiza también la validación, para aumentar la confianza en los datos simulados. Sin embargo, se deja a criterio del modelador, puesto que, dependiendo del comportamiento o incluso de la cantidad de datos disponibles, puede no ser factible calibrar y validar el modelo (Hughes-Lomelín *et al.*, 2022a). Los parámetros del modelo se ajustan con base en la calidad de los índices de bondad de ajuste (**Tabla 1**).

Resultados

Después de seleccionar espacialmente las EH y aplicarles las pruebas estadísticas, se eligieron las estaciones hidrométricas mostradas en la **Figura 3**. La estación de cabecera, 12378, se propuso como la estación de calibración y se generó la cuenca mostrada en la **Figura 2**. La **Tabla 2** muestra los coeficientes y resultados de las pruebas aplicadas a la EH 12378.

De acuerdo con Sánchez-Quispe *et al.* (2021), los valores de los coeficientes de la **Tabla 2** significan que la serie de caudales observados de la EH 12378 no son fiables para la modelación, puesto que se busca que el M_r se encuentre entre los 3 y los 15 lps/km², aunque C_e cumple al ser menor que

Tabla 2. Resultados de las pruebas estadísticas y coeficientes de comportamiento de la EH 12378. Los datos que resultan menos que adecuados se señalan en cursiva.

Clave	M_r (lps/km ²)	C_e (adim)	Secuencias	Helmert	Persistencia
12378	<i>1.835</i>	0.116	<i>No homogénea</i>	<i>No homogénea</i>	Persistente

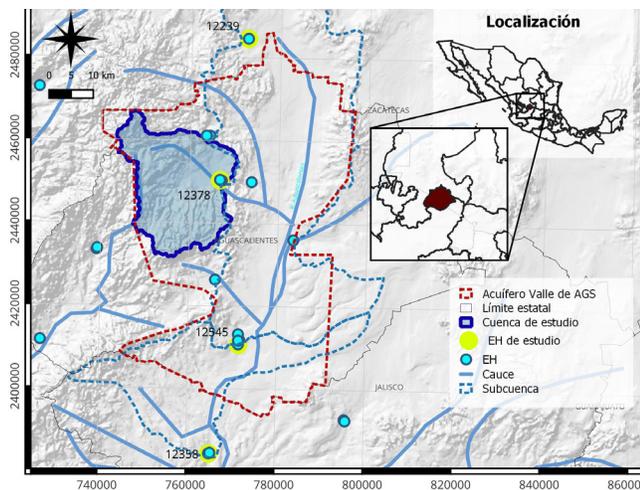


Figura 3. Ubicación de la EH 12378 y las otras EH consideradas para la calibración.

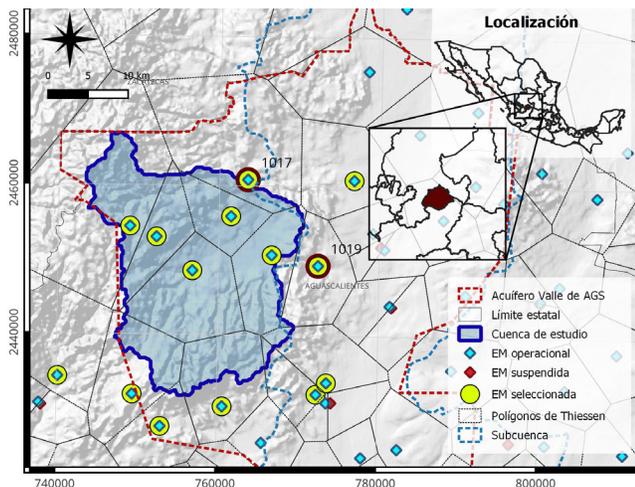


Figura 4. Ubicación de las EMs consideradas, las EMs 1017 y 1019 (encerradas en rojo) y el centro de gravedad de la cuenca.

la unidad. Sin embargo, al ser los únicos datos disponibles para la zona, se asumieron como válidas. Cabe destacar que las pruebas de homogeneidad y de independencia (persistencia) no son limitantes en la selección de la estación, mas son una representación del comportamiento estadístico de la serie.

La **Figura 4** muestra la selección espacial de las EMs, incluyendo las EMs ID de las cuales se ob-

Tabla 3. Las características de las EMs. Las EMs 1017 y 1019 y sus características están señaladas en cursiva.

Clave	Año inicial	Año final	Años de servicio	Distancia al CG* (km)	% Vacíos
1010	1961	2016	55	6.44	1.847
<i>1017</i>	<i>1942</i>	<i>2016</i>	<i>74</i>	<i>13.52</i>	<i>1.918</i>
1018	1933	2016	83	9.64	0.895
<i>1019</i>	<i>1942</i>	<i>2016</i>	<i>74</i>	<i>15.28</i>	<i>0.966</i>
1020	1963	2016	53	22.40	1.792
1021	1959	2016	57	0.53	1.775
1047	1975	2016	41	18.62	6.604
1082	1979	2016	37	22.97	1.865
1089	1980	2016	36	8.27	4.33
1095	1981	2016	35	21.64	3.033
1098	1986	2016	30	22.55	10.139
1103	1998	2016	18	10.00	10.602
1105	2001	2016	15	22.44	15.075
1106	2001	2016	15	18.77	11.073

* Distancia entre la EM y el centro de gravedad de la cuenca.

tuvieron las series de precipitación y temperatura utilizadas. El factor principal en la elección de la EM fue el periodo en el cual había registros de precipitación y que coincidiera con los registros hidrométricos (1942 – 2011).

La **Tabla 3** muestra las estaciones consideradas y sus características. Por su parte, la **Tabla 4** muestra los resultados de las pruebas estadísticas de las EM seleccionadas. En este caso, los resultados de las pruebas generales fueron inconclusas, por lo que se optó por aplicar las pruebas específicas.

Una vez ingresadas las series de precipitación y ETP al modelo, se procedió con la primera simulación utilizando los parámetros predeterminados en la herramienta de EvalHid, y posteriormente se procedió con la etapa de calibración. El modelo se calibró considerando lo siguiente:

- Un periodo de calentamiento (octubre 1943 – septiembre 1945), permitiendo que el comportamiento del modelo se estabilice.

Tabla 4. Resultados de las pruebas estadísticas de las EMs 1017 y 1019. Los datos que resultan menos que adecuados se señalan en cursiva.

Clave	Secuencias	Helmert	Anderson	T-Student	Cramer
1017	Homogénea	<i>No homogénea</i>	Independiente	Homogénea	Homogénea
1019	Homogénea	<i>No homogénea</i>	Independiente	Homogénea	Homogénea

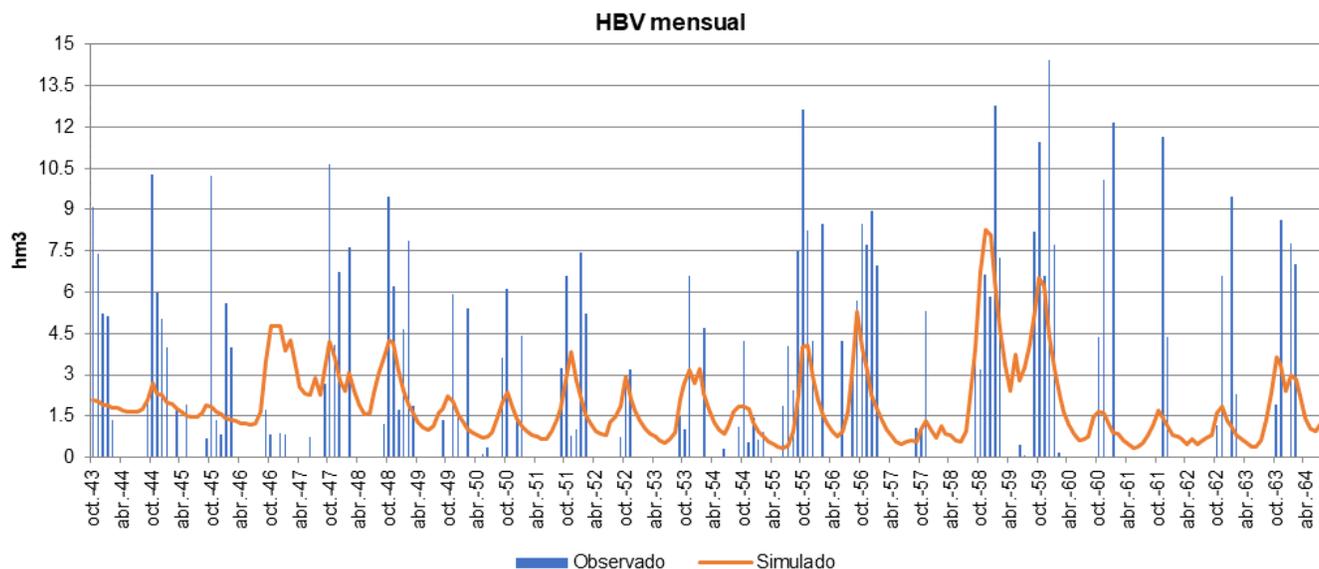


Figura 5. Gráfica de datos simulados vs. datos observados para el modelo HBV calibrado.

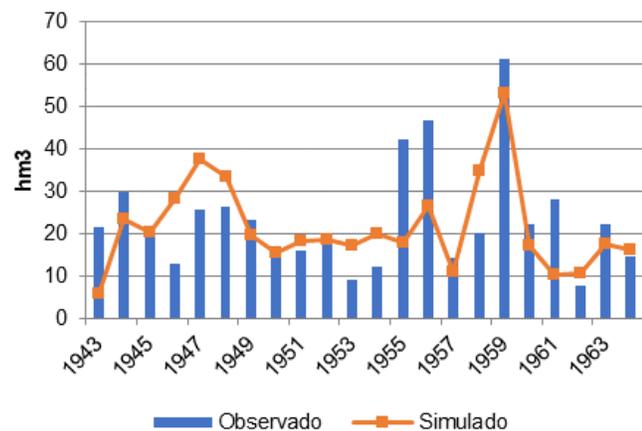


Figura 6. Observados vs. simulados, acumulación anual.

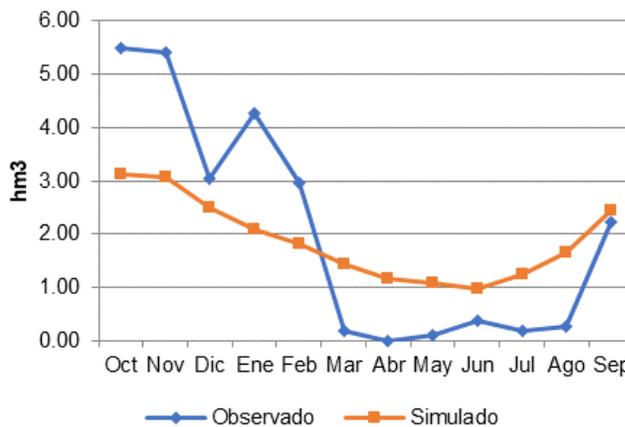


Figura 7. Observados vs. simulados, medias mensuales.

- El periodo de calibración fue de octubre 1945 – septiembre 1960; en esta etapa se observó que los datos medidos eran más homogéneos y tenían un comportamiento más estable.
- Se analizó la serie de datos observados y se determinó que ciertos datos en ceros eran más bien nulos, ya que el comportamiento de estos datos no concordaba con el conocimiento que se tiene del escurrimiento en la zona con respecto

a las temporadas de lluvia. Estos datos no se consideraron al momento de calcular los índices de bondad de ajuste.

- Se decidió no validar el modelo, por el comportamiento de los datos observados.

Las **Figuras 5, 6, y 7** representan gráficamente los valores observados vs. los simulados por el modelo HBV calibrado. Los parámetros calibrados

Tabla 5. Parámetros calibrados del modelo HBV.

Parámetro	Descripción	Unidad	Valor calibrado
β	Coefficiente de forma para la infiltración	Adim	2.2542
FC	Capacidad de campo	<i>mm</i>	1000.0
PWP	Punto de marchitez de la vegetación	<i>mm</i>	549.4
$L_{m\acute{a}x}$	Umbral de descarga rápida	<i>mm</i>	130.6
K_0	Coefficiente de descarga rápida	Adim	0.2980
K_1	Coefficiente de recesión tanque superior	Adim	0.2980
K_2	Coefficiente de recesión tanque inferior	Adim	0.0150
K_{perc}	Coefficiente de percolación	Adim	3.80810^{-5}

Tabla 6. Índices de bondad de ajuste para el modelo HBV calibrado.

Índice	Valor	Calidad
NSE	0.3043	Insatisfactoria
$\ln N$	0.1232	Insatisfactoria
R	0.5618	Satisfactoria
Simetría	0.9938	Muy buena

finales se resumen en la **Tabla 5**. Los índices de bondad de ajuste obtenidos por el modelo calibrado se resumen en la **Tabla 6**.

Conclusiones

El rendimiento general del modelo HBV para esta serie fue deficiente; los índices de bondad de ajuste permanecieron categorizados como insatisfactorios, aún después de la calibración del modelo. Esto se traduce en un modelo hidrológico poco fiable. Sin embargo, se ha demostrado que el modelo HBV es capaz de simular cuencas con datos escasos o con comportamiento errático, específicamente en esta zona de estudio (Hughes-Lomelín *et al.*, 2022b). Se

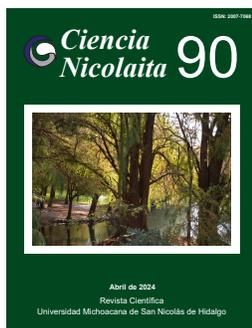
recomienda seguir modelando mediante el HBV, pero modificando los parámetros de modelado, más concretamente, trabajar con datos diarios en vez de datos mensuales, de manera que al contar con mayor número de datos se pueda lograr mejorar el modelo buscado.

La escasez y la calidad de datos es un factor importante a la hora de modelar hidrológicamente, tanto para la elección del modelo como la disponibilidad de datos para calibrar y validar. Es de suma importancia seleccionar los datos que sean los más adecuados para modelar según las metodologías propuestas en la literatura; no obstante, en ocasiones no será posible contar con datos de calidad y se deberá trabajar con los datos disponibles para cada zona a modelar.

Referencias

- Bergström S (1976). Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. Norrköping, Sweden.
- CONAGUA (2020). Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero del Valle de Aguascalientes (0101), Estado de Aguascalientes.
- CONAGUA (2016). Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). <https://app.conagua.gob.mx/bandas/>
- González-Mendoza JL (2016). Obtención de la disponibilidad hídrica media anual en la cuenca del Río Tuxpan, mediante la NOM-011-CONAGUA-2015 y el modelo hidrológico HBV. Tesis, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- GRASS Development Team (2017). Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software.
- Hughes-Lomelín RN-H, Sánchez Quispe ST, Hernández Hernández MA, García-Romero L (2022a). Modelación hidrológica superficial del área de aporte al acuífero Valle de Aguascalientes mediante el uso del modelo de Témez. XXVI Congreso Nacional de Hidráulica.
- Hughes-Lomelín RN-H, Sánchez Quispe ST, Hernández Hernández MA, García-Romero L (2022b). Superficial Hydrological Modelling of the Aguascalientes Valley Aquifer (Mexico) Contribution Area. A Comparison between Témez and HBV Models. XXX Congreso Latinoamericano de Hidráulica.
- Lindström G, Johansson B, Persson M, Gardelin M,

- Bergström S (1997). Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *J Hydrol (Amst)* 201: 272–288
- Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans ASABE* 50: 885–900.
- Moriasi DN, Gitau MW, Pai N, Daggupati P (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Trans ASABE* 58: 1763–1785.
- Paredes J, Solera A, Andreu J, Lerma N (2014). Herramienta EvalHid para la evaluación de recursos hídricos: Manual Técnico v1.1.
- Paredes J, Solera A, Andreu J, Lerma N (2011). EVALHID.
- Sánchez-Quispe ST, Navarro-Farfán M del M, García-Romero L (2021). Methodology for Processing Meteorological and Hydrometric Data at Basin Level. Handbook T-XVI CIERMMI Women in Science Engineering and Technology. ECORFAN, pp 107–145.
- SMN (2021). Base de datos climatológica nacional (Sistema CLICOM). Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE), <http://clicom-mex.cicese.mx/>
- Thorntwaite CW (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geogr Rev* 38: 55–94.



Ciencia Nicolaita 90

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Efecto del IHX sobre el rendimiento energético de un sistema de refrigeración por absorción híbrido

Effect of IHX on the energy performance of a hybrid absorption refrigeration system

Jasson Ortega Rojas, Edgar Amador López, José Luis Rodríguez Muñoz*, José Sergio Pacheco Cedeño, Carlos Ernesto Borja Soto, Jorge Zuno-Silva

Para citar este artículo: Ortega Rojas J, Amador López E, Rodríguez Muñoz JL, Pacheco Cedeño JS, Borja Soto CE, Zuno Silva J (2024). Efecto del IHX sobre el rendimiento energético de un sistema de refrigeración por absorción híbrido. *Ciencia Nicolaita* 90: 95-104.

DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi90.741>



Historial del artículo

Recibido: 16 de agosto de 2023
Aceptado: 6 de diciembre de 2023
Publicado en línea: abril 2024



Ver material suplementario



***Correspondencia de autor:** jose_rodriguez@uaeh.edu.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Efecto del IHX sobre el rendimiento energético de un sistema de refrigeración por absorción híbrido

Effect of IHX on the energy performance of a hybrid absorption refrigeration system

Jasson Ortega Rojas, Edgar Amador López, José Luis Rodríguez Muñoz*, José Sergio Pacheco Cedeño, Carlos Ernesto Borja Soto, Jorge Zuno Silva

Escuela Superior de Ciudad Sahagún, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Cd. Sahagún-Otumba s/n, Zona Industrial, 43990, Hidalgo, México.

Resumen

En el presente trabajo se presenta un estudio termodinámico de un sistema de refrigeración por absorción híbrido (HARC), en el que parte del calor del condensador es recuperado para mejorar el proceso de producción de refrigerante. Para el análisis del sistema, se investigaron los siguientes parámetros de operación: temperatura de activación, coeficiente de desempeño y capacidad de enfriamiento. Además, se establecieron como condiciones de operación que el sistema opera a la misma temperatura en el condensador y absorbedor (35 °C), temperatura en el evaporador de 5 °C, efectividad en el intercambiador de calor de $\eta_{IHX} = 0.5, 0.7$ y 0.9 , y se consideraron 5 variaciones en la presión de operación en el generador ($P_{gen} = 1167, 889, 778, 687$ y 584 kPa).

Los resultados muestran que la temperatura en el generador decrece hasta en 23.8 °C al reducir la presión en el generador de 1167 kPa hasta 584 kPa y el rendimiento energético puede ser incrementado hasta en un 3.30%. El aumento de la temperatura en el generador promueve un incremento en la capacidad de enfriamiento, la cual se mejora entre el 3.6-6.68% al utilizar una efectividad en el intercambiador de calor de 0.9 y al operar el sistema a una temperatura en el generador de 100 °C. Finalmente, este tipo de sistemas puede ser viable para aplicaciones de energía solar (colectores solares), debido a que las temperaturas de activación pueden ser menores a 70 °C.

Palabras clave: IHX, refrigeración, absorción, rendimiento energético, ciclo híbrido.



Abstract

In this work, a hybrid absorption refrigeration system (HARC) is analyzed from the point of view of the first Thermodynamic Law, where part of the condensation heat is recovered and supplied to the generator and then, to improve the refrigerant production process. For the cycle analysis, it has been considered that the condensation and absorber are at the same temperature (35 °C), the evaporation temperature of 5 °C, internal heat exchanger effectiveness $\eta_{IHx}=0.5, 0.7$ and 0.9 , and five different pressures ($P_{gen} = 1167, 889, 778, 687$ y 584 kPa) in the generator were analyzed.

The results show that the temperature in the generator decreases up 23.8 °C when the pressure is reduced from 1167 kPa to 584 kPa and the COP can be increased up in 3.30%. The increasing of the generator temperature increases the cooling capacity between 3.6-6.68% when the system operates at internal heat exchanger of 0.9 and generator temperature of 100 °C. Finally, this kind of system can be a good alternative for solar energy applications (solar collectors), since activation temperatures can be lower than 70 °C.

Keywords: IHX, refrigeration, absorption, energetic efficiency, hybrid cycle.

Introducción

El consumo de electricidad del ser humano para satisfacer las necesidades de confort se ha incrementado considerablemente durante las últimas décadas. Según Ahmad *et al.* (2022), los sistemas de compresión de vapor consumen casi el 17% de la electricidad en el mundo, empleados principalmente para refrigeración doméstica o dentro del sector industrial. Acorde a la Unión Europea, los equipos para calefacción y refrigeración basados en la tecnología de compresión de vapor, consumen 50% de su energía total, de la cual, 45% es usada para el sector residencial, 37% para la industria y 18% para el sector de servicios (EU Comission, 2016). Haciendo referencia a la misma tecnología de compresión de vapor, Wang *et al.* (2017) ha encontrado que del total de energía producida en los Estados Unidos en el 2010, 41% de la energía fue utilizada por esta tecnología dentro del sector residencial, 30% por el industrial y 29% por el sector de transporte, mientras para el caso de China, la energía total consumida en edificios por equipos de aire acondicionado fue de entre el 40-55% (Tsinghua University Building Energy Saving Research Center, 2009).

Meraj *et al.* (2021) indican que los sistemas de refrigeración por absorción se están convirtiendo en una alternativa viable y son capaces de ahorrar

electricidad. Kumar y Rakshit (2021) han establecido que este tipo de tecnología es amigable con el medio ambiente, al usar refrigerantes naturales para su operación, mientras que Yuksel *et al.* (2016), pudieron emplear fuentes alternas de energía para su funcionamiento.

Es así que en la literatura se encuentran diversos estudios para mejorar el rendimiento energético de los sistemas de refrigeración por absorción y estos puedan ser competitivos a los sistemas de refrigeración por compresión de vapor. Es por ello, que nuevas configuraciones de ciclos de refrigeración por absorción han emergido con el objetivo de mejorar sus prestaciones energéticas. Por ejemplo, Asensio-Delgado *et al.* (2022) analizaron un sistema de refrigeración híbrido (HARC), en el que usaron como refrigerante el HFO y como absorbente, varios líquidos iónicos. Sus resultados muestran que el uso de estas nuevas mezclas de trabajo resulta ser adecuadas en los HARC, desde que la temperatura de activación es menor en comparación al ciclo convencional de refrigeración por absorción (ARC). Su y Zhang (2016) realizaron un análisis termodinámico de la combinación de un ciclo híbrido y un dehumificador, concluyendo que, desde el punto de vista energético, esta configuración resulta ser 34.97% superior que el ARC y su temperatura de

activación se reduce de 100 °C a 60 °C, debido a la existencia del compresor. Ventas *et al.* (2010) presentaron un modelo matemático de un ciclo híbrido de refrigeración por absorción, en el que se coloca un compresor entre el evaporador y absorbedor. Sus resultados muestran que con este ciclo se reduce la temperatura de activación hasta 24 °C, en comparación con el ARC.

Por su parte, Wang *et al.* (2016) analizaron termodinámicamente un ciclo de compresión-absorción híbrido, en el que parte del calor del condensador es recuperado e incorporado al generador. Ellos encontraron que el calor requerido en el generador se reduce entre el 70-80% y que el rendimiento energético del ciclo es 97.1% superior al obtenido por el ARC. Por tal motivo, el objetivo de este trabajo, es investigar desde el punto de vista termodinámico, el efecto que presenta la inclusión de un intercambiador de calor en el circuito refrigerante sobre el rendimiento energético del sistema, la capacidad de enfriamiento y en la temperatura de activación de la configuración presentada por Wang *et al.* (2016) en el que se utiliza amoníaco-agua como fluidos de trabajo. Se espera que los resultados obtenidos de esta investigación sean de gran aporte para que los investigadores y desarrolladores de esta tecnología comprendan mejor su funcionamiento y sus áreas de mejora.

Descripción del ciclo

En la **Figura 1** se muestra el diagrama esquemático del ciclo de refrigeración por absorción híbrido (HCRC). El funcionamiento del ciclo HCRC opera de manera similar que el ciclo convencional de refrigeración por absorción (ARS), la diferencia radica en que, el ciclo HARC trabaja bajo tres niveles de presión, presión baja en el absorbedor y evaporador, presión media en el generador y presión alta en el condensador y descarga del segundo compresor, mientras que en el ciclo ARS se opera con dos niveles de presión (presión baja en el evaporador y absorbedor y alta presión en el condensador y generador).

Los fundamentos que describen el modelado de cada uno de los componentes del HARC, se basan en balances de masa, especie y energía, los cuales han sido resueltos por medio del uso del software computacional Engineering Equation Solver (EES), debido a

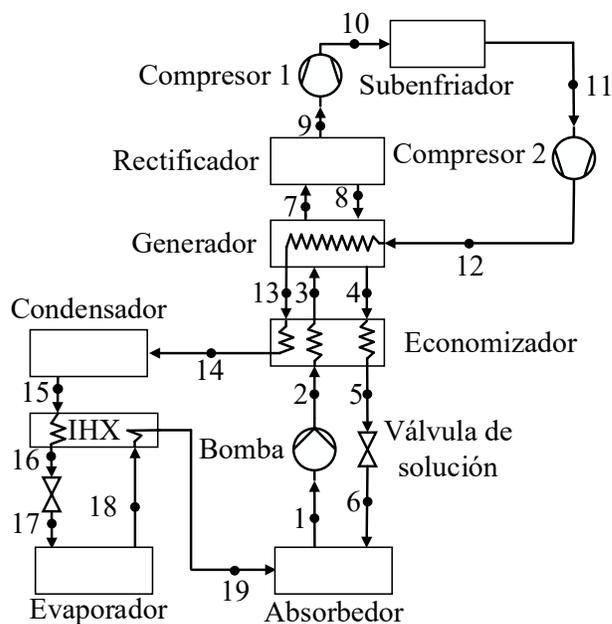


Figura 1. Diagrama del ciclo de refrigeración híbrido.

que este, contiene subrutinas para determinar las propiedades termodinámicas de la mezcla amoníaco-agua y permite resolver sistemas de ecuaciones, tanto lineales como no lineales derivados de los balances de masa, especie y energía en el sistema. Además, para la validación modelo, los resultados obtenidos se compararon con aquellos obtenidos por Wang *et al.* (2016), sin considerar el efecto del IHX.

Lo resultados mostrados en la **Tabla 1** muestran que las mayores desviaciones de 3.55, 2.55 y 1.08%, corresponden para el caso del condensador, compresor 1 y COP, respectivamente. Sin embargo, para los demás componentes, las desviaciones encontradas son inferiores al 0.5%, por lo que se puede establecer que hay una adecuada concordancia entre los resultados presentados por ambos modelos.

Resultados

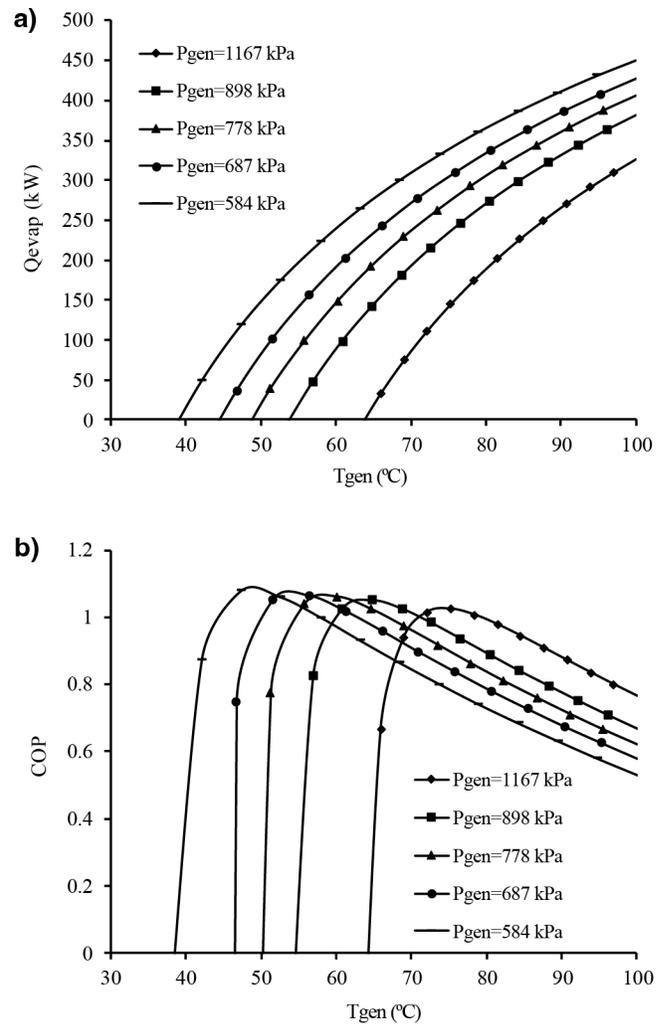
En la **Figura 2a** y **2b** se muestra el efecto de la temperatura y la presión en el generador sobre la capacidad de enfriamiento (\dot{Q}_{evap}), así como el rendimiento energético del HARC (COP). Los resultados muestran un aumento en la capacidad de enfriamiento conforme se incrementa la temperatura y/o se reduce la presión en el generador (**Figura 2a**). La mayor capacidad de enfriamiento de 450 kW se obtiene a la temperatura en el generador de 100 °C y

Tabla 1. Validación del modelado del ciclo HARC

Parámetro	Unidad	Wang <i>et al.</i> 2016	Presente estudio	Desviación %
Presión en el condensador	kPa	4609.00	4609.00	0.00
Presión en el generador	kPa	1351.00	1351.00	0.00
Presión en el evaporador	kPa	516.00	516.00	0.00
Presión en el absorbedor	kPa	516.00	516.00	0.00
Concentración débil	%	47.70	47.70	0.00
Concentración fuerte	%	53.89	53.89	0.00
Energía en el condensador	kW	2.93	3.03	3.55
Energía en el generador	kW	51.89	51.66	0.44
Energía en el evaporador	kW	130.7	130.70	0
Energía del absorbedor	kW	178.7	179.50	0.45
Potencia del compresor 1	kW	18.46	17.99	2.55
Potencia del compresor 2	kW	17.10	17.02	0.47
COP		1.02	1.007	1.27

una presión de 584 kPa. Sin embargo, cuando se compara este resultado con presiones en el generador de 687, 778, 898 y 1167 kPa, la capacidad de enfriamiento se reduce en un 5.52, 10.74, 18.01 y 37.86%, respectivamente. Lo anterior se debe a que, el incremento de T_{gen} provoca un aumento en el flujo másico de refrigerante que circula por el evaporador y con ello, un incremento en la capacidad de enfriamiento en el sistema.

En la **Figura 2b** se ilustra que a medida que se incrementa la temperatura en el generador, el COP del sistema se incrementa hasta alcanzar un valor máximo de entre 1.02 y 1.10 y posteriormente este disminuye a valores de entre 0.53 y 0.78. Sin embargo, al reducir la presión en el generador (P_{gen}) de 1167 kPa a 584 kPa, se puede obtener una reducción en la temperatura de activación en hasta 23.8 °C, lo que indica que este tipo de sistemas pueda ser viable para


Figura 2. Efecto de la T_{gen} a cinco diferentes valores de P_{gen} sobre: a) \dot{Q}_{evap} y b) COP

el uso de colectores solares. Lo anterior se debe al hecho de que el aumento en la T_{gen} ocasiona que la concentración de la solución rica en refrigerante y el flujo másico de refrigerante incrementen, por lo tanto, el consumo eléctrico en los compresores también incrementa, reduciendo el COP del sistema HARC.

La influencia de T_{gen} y P_{gen} sobre el COP del HARC considerando valores en la efectividad del intercambiador de $\eta_{IHx} = 0.5, 0.7$ y 0.9 se muestra en la **Figura 3a-e**. Los resultados ilustran un ligero incremento del COP a medida que se incrementa la efectividad del intercambiador de calor y los mejores resultados se obtienen a una efectividad en el IHX de 0.9. A una $P_{gen} = 1167$ kPa (**Figura 3a**), los incrementos

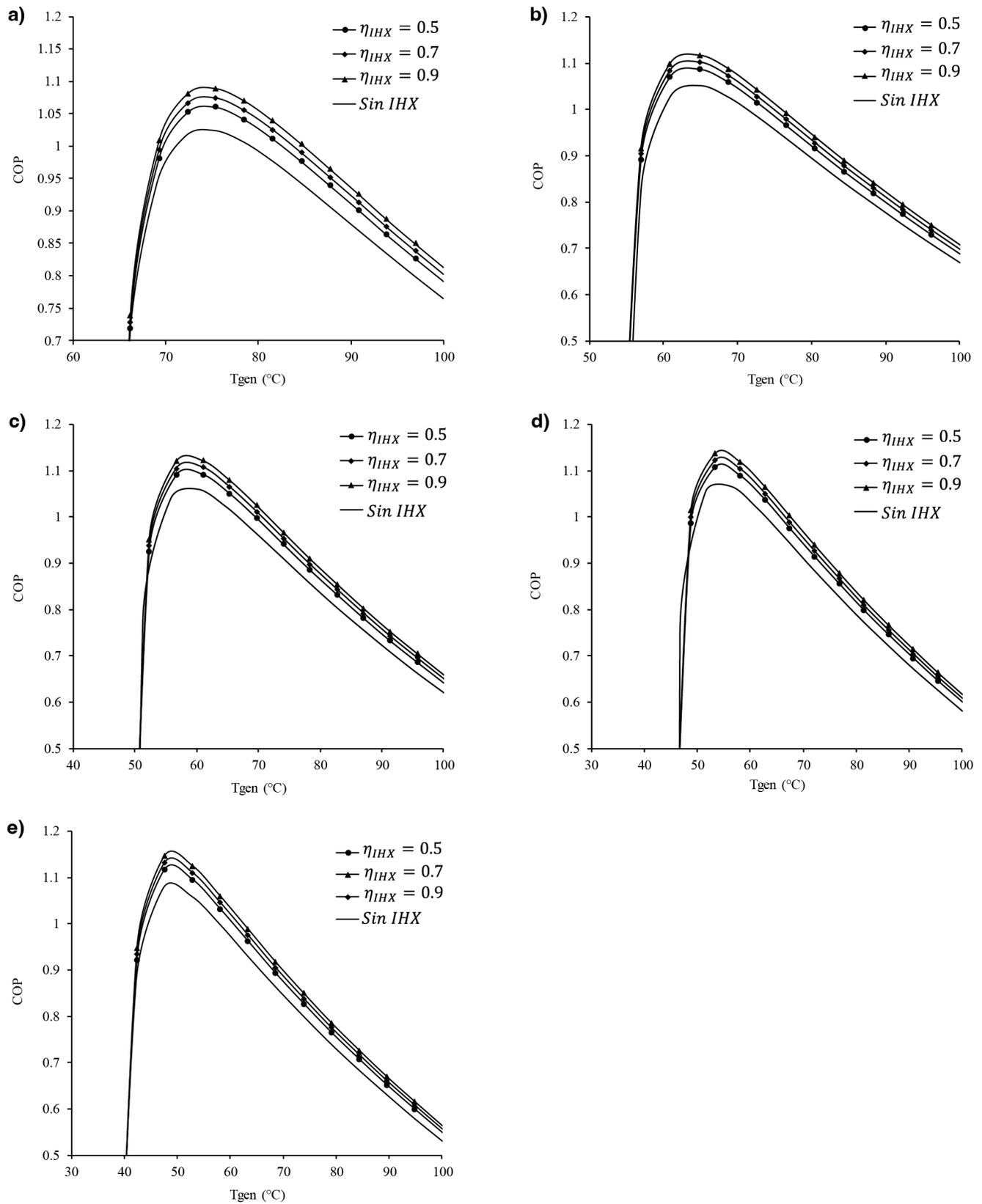


Figura 3. Efecto de la T_{gen} sobre el COP a diferentes η_{IHX} y P_{gen} : a) 1167 kPa, b) 889 kPa, c) 778 kPa, d) 687 kPa y e) 584 kPa.



del COP para los valores de efectividad en el intercambiador de calor de 0.5, 0.7 y 0.9 son de 3.51, 4.48 y 5.95%, respectivamente, todo ello, en comparación con el ciclo sin intercambiador de calor. Para el ciclo operando a una presión de 898 kPa (**Figura 3b**), se pueden lograr incrementos de 3.42, 4.85 y 6.27% para los tres valores de efectividades aquí estudiados. Cuando la presión en el generador se incrementa a $P_{gen}=778$ kPa (**Figura 3c**), el menor COP= 1.06 se obtiene con el ciclo sin intercambiador de calor, mientras que, cuando se utiliza una $\eta_{IHX}=0.5$, se logra un incremento en el COP del 3.01, 4.43 y 5.84% al aumentar la efectividad del intercambiador de calor a $\eta_{IHX}=0.7$ y 0.9, respectivamente. Respecto a la presión de operación de 687 kPa (**Figura 3d**), las mejores prestaciones energéticas se obtienen a una $\eta_{IHX}=0.9$, lo que se traduce en un incremento en el COP del 5.07% en comparación con el ciclo sin intercambiador de calor, del 2.75% a una $\eta_{IHX}=0.5$ y del 1.35% con $\eta_{IHX}=0.7$. Al reducir la presión en el generador a un valor de 584 kPa (**Figura 3e**), los incrementos del COP para el HARC con $\eta_{IHX}=0.5, 0.7$ y 0.9 resultan ser del 3.39, 4.81 y 6.23%, respectivamente, en comparación con los resultados obtenidos con el ciclo sin intercambiador de calor. Comparativamente entre presiones en el generador, el reducir este parámetro provoca un incremento en el COP. Tomando como referencia la presión de 1167 kPa (misma presión de operación que el ciclo ARC) y comparando los resultados con las presiones de 898, 778, 687 y 584 kPa, el COP para dicha presión resulta ser menor entre el 2.47-3.30%.

En la **Figura 4a-e** se describe el comportamiento de la \dot{Q}_{evap} en función de T_{gen} y η_{IHX} . Los resultados muestran un incremento en la capacidad de enfriamiento con el incremento de T_{gen} y los mejores resultados se obtienen a una temperatura de 100 °C. Además, para todas las presiones analizadas, la capacidad de enfriamiento resultó ser menor para el sistema sin intercambiador de calor. Para una $P_{gen}=1167$ kPa y efectividades en el intercambiador de calor de $\eta_{IHX}=0.5, 0.7$ y 0.9, los valores de capacidad de enfriamiento resultaron ser de 338.1, 342.7 y 347.4 kW, respectivamente, lo que se traduce a incrementos en el orden del 3.48-6.33%, en comparación con el sistema sin intercambiador de calor. En la **Figura 4b**, se puede observar que a $P_{gen}=889$ kPa, los valores de la capacidad de enfriamiento para los tres valores de

efectividad ($\eta_{IHX}=0.5, 0.7$ y 0.9) son de 396.9, 402.3 y 407.8 kW, respectivamente, mientras que al operar el ciclo HARC sin intercambiador, la capacidad de enfriamiento es de 356.3 kW. En la **Figura 4c** ($P_{gen}=778$ kPa) se muestra que la capacidad de enfriamiento no presenta cambios significativos con el incremento en la efectividad del intercambiador de calor a temperaturas en el generador inferiores a los 74 °C. Comparando los resultados a la máxima temperatura de operación en el generador (100 °C), la capacidad de enfriamiento obtenida por el ciclo sin intercambiador de calor es de 381.6 kW, mientras para efectividades de 0.5, 0.7 y 0.9, las capacidades de enfriamiento que se obtienen son 396.9, 402.3 y 407.8 kW, respectivamente, lo que representa mejoras en el ciclo de 4.01, 5.42 y 6.86%. En la **Figura 4d**, la cual corresponde al sistema operando a una $P_{gen}=687$ kPa, se observan pequeños incrementos conforme se incrementa la temperatura en el generador hasta los 100 °C. En esta temperatura, la capacidad de enfriamiento obtenida por el ciclo sin IHX es de 406.7 kW, mientras que al emplear en la efectividad del intercambiador de calor de 0.5, 0.7 y 0.9, las capacidades de enfriamiento se incrementan entre 3.56-6.41%. Para la **Figura 4e**, la \dot{Q}_{evap} a una $\eta_{IHX}=0.9$ y $P_{gen}=584$ kPa es de 453.9 kW. Cuando se reducen los valores de efectividad en el intercambiador de calor a 0.7 y 0.5, la capacidad de enfriamiento también se reduce a 447.8 y 441.8 kW, respectivamente. Comparativamente entre resultados, la capacidad de enfriamiento del HARC con intercambiador de calor resulta ser entre el 2.07-4.87% superior en comparación con el HARC sin intercambiador de calor.

En la **Figura 5** se muestra el efecto de la η_{IHX} sobre el COP para la configuración HCRC. Para este análisis, se estableció una temperatura en el generador de 75 °C, temperatura en el condensador y absorbedor de 35 °C, temperatura en el evaporador de 5 °C y consideró todo el rango de valores en la efectividad del intercambiador de calor (0-1). Los resultados indican que el COP del ciclo sin intercambiador de calor es inferior en comparación al ciclo con intercambiador de calor. Las mejores prestaciones energéticas se obtienen al operar el HCRC a una $P_{gen}=1167$ kPa y los menores rendimientos energéticos se consiguen a una $P_{gen}=584$ kPa. Cuando se tienen variaciones en la efectividad de $\eta_{IHX}=0-1$, los incrementos en el COP van de entre los 6.0-7.08%. Finalmente al comparar los

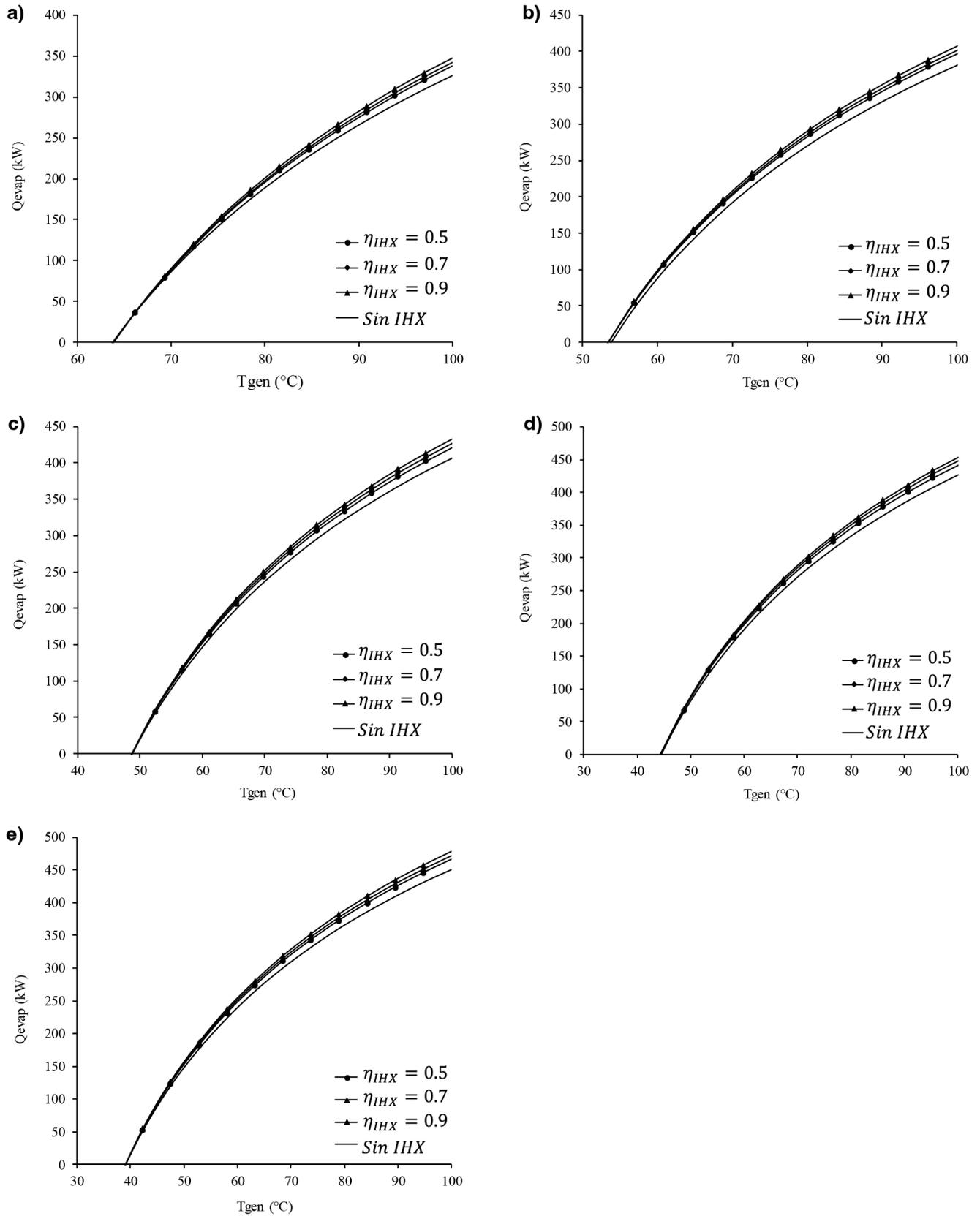


Figura 4. Efecto de la T_{gen} sobre el \dot{Q}_{evap} del ciclo a diferentes η_{IHx} y P_{gen} : a) 1167 kPa, b) 889 kPa, c) 778 kPa, d) 687 kPa y e) 584 kPa.

resultados obtenidos del HCRC a una $P_{gen}= 584$ kPa respecto a las presiones en el generador de 1167, 889, 778 y 687 kPa, así como una $\eta_{IHX}= 1$, se logran incrementos en el COP del orden del 7.23, 14.15, 20.90 y 30.50%, respectivamente.

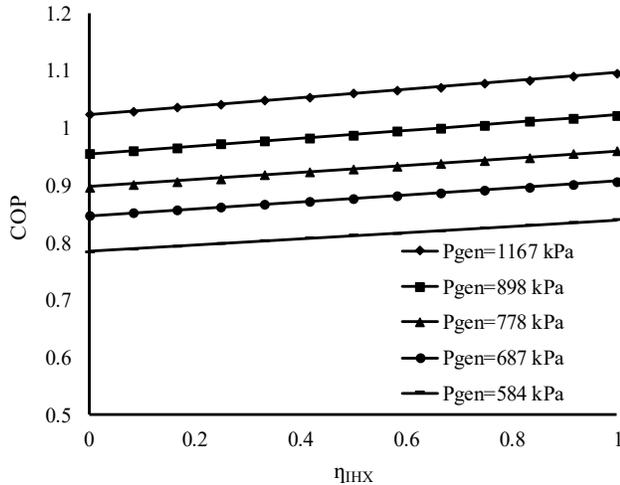


Figura 5. Influencia de η_{IHX} sobre el COP a diferentes valores de P_{gen} .

Conclusiones

Con base en el efecto del IHX sobre la temperatura de activación, rendimiento energético y capacidad de enfriamiento de un sistema de refrigeración híbrido se pueden obtener las siguientes conclusiones:

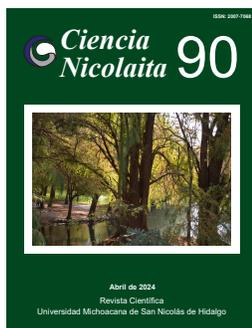
1. Recuperar parte de la energía en el condensador en el sistema propuesto, permite reducir la temperatura en el generador hasta en 23.8 °C. El rendimiento energético se puede incrementar en un 3.30%, mientras la capacidad de enfriamiento entre 3.6-6.68%.
2. El uso del intercambiador de calor contribuye a mejorar el rendimiento energético del sistema. Los mejores resultados se obtienen a una $P_{gen}= 1167$ kPa y una efectividad de 0.9, mientras que los menores rendimientos energéticos se obtienen a una $P_{gen}=584$ kPa. El uso del intercambiador de calor mejora el rendimiento energético entre 3.39-6.27%. Además, el uso del intercambiador promueve también el incremento en la capacidad de enfriamiento entre 3.48-6.41%.

3. Cuando se trabaja en un rango de valores en la efectividad en el intercambiador de calor ($\eta_{IHX}= 0-1$), los incrementos en el COP para el sistema oscilan entre 6.0-7.08%. Sin embargo, al comparar los resultados obtenidos del sistema HARC a una $P_{gen}= 584$ kPa y una $\eta_{IHX}= 1$, respecto a las presiones en el generador de 1167, 889, 778 y 687 kPa, se obtienen incrementos de este parámetro en el orden del 7.23, 14.15, 20.90 y 30.5%, respectivamente.
4. Finalmente, se espera que los resultados obtenidos de esta investigación sean de gran aporte para que los investigadores y desarrolladores de esta tecnología comprendan mejor su funcionamiento y sus áreas de mejora, así como su posible implementación en aplicaciones de energía solar.

Referencias

- Asensio-Delgado JM, Asensio-Delgado S, Zarca G, Urriaga A (2022). Analysis of hybrid compression absorption refrigeration using low-GWP HFC or HFO/ionic liquid working pairs. *International Journal of Refrigeration* 134: 232-241.
- Ahmad T, Azhar M, Sinha MK, Meraj M, Mahbubul IM, Ahmad A (2022). Energy analysis of lithium bromide-water and lithium chloride-water based single effect vapour absorption refrigeration system: A comparison study. *Cleaner Engineering and Technology* 7: 100432.
- EU Commissions (2016). Communication from Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and social Committee and the Committee of the Regions, An EU Strategy on Heating and Cooling. Tech. Rep., Brussels, 2016.
- Kumar A, Rakshit D (2021). A critical review on waste heat recovery utilization with special focus on Organic Rankine Cycle applications. *Cleaner Engineering and Technology* 5: 100292.
- Meraj M, Azhar M, Khan MZ, Anjum MSS, Ahmad MSF, Ab Rasheed MF, ... Alam MNM (2021). Thermal modelling of PVT-CPC integrated vapour absorption refrigeration system. *Materials Today: Proceedings* 38: 391-396.
- Somers C, Mortazavi A, Hwang Y, Radermacher R, Rodgers P, Al-Hashimi S (2011). Modeling water/lithium bromide absorption chillers in ASPEN Plus. *Applied Energy* 88(11): 4197-4205.

- Wu W, Li X, You T, Wang B, Shi W (2015). Combining ground source absorption heat pump with ground source electrical heat pump for thermal balance, higher efficiency and better economy in cold regions. *Renewable energy* 84: 74-88.
- Tsinghua University Building Energy Saving Research Center (2009). Annual Report on China Building Energy Efficiency, China Architecture and Building Press, Beijing.
- Ventas R, Lecuona A, Zacarias A, Venegas M (2010). Ammonia-lithium nitrate absorption chiller with an integrated low-pressure compression booster cycle for low driving temperatures. *Applied Thermal Engineering* 30(11-12): 1351-1359.
- Wang J, Wang B, Wu W, Li X, Shi W (2016). Performance analysis of an absorption-compression hybrid refrigeration system recovering condensation heat for generation. *Applied Thermal Engineering* 108: 54-65.
- Yuksel YE, Ozturk M, Dincer I (2016). Thermodynamic performance assessment of a novel environmentally-benign solar energy based integrated system. *Energy Conversion and Management* 119: 109-120.



Ciencia Nicolaita 90

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Simulación numérica de un álabe de una turbina eólica de 600 W aplicando la norma IEC 61400-2

Numerical simulation of a 600 W wind turbine blade applying the IEC 61400-2 standard

Paulina Marín Téllez*, Víctor López Garza, Juan Felipe Soriano Peña, Gilberto González Avalos, Gerardo Javier Marín Téllez, Adrián Santibáñez Maldonado

Para citar este artículo: Marín Téllez P, López Garza V, Soriano Peña JF, González Avalos G, Marín Téllez GJ, Santibáñez Maldonado A (2024). Simulación numérica de un álabe de una turbina eólica de 600 W aplicando la norma IEC 61400-2. *Ciencia Nicolaita* 90: 105-116.

DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi90.742>

Historial del artículo

Recibido: 17 de agosto de 2023

Aceptado: 17 de noviembre de 2023

Publicado en línea: abril 2024



Ver material suplementario



***Correspondencia de autor:** 1214884f@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Simulación numérica de un álabe de una turbina eólica de 600 W aplicando la norma IEC 61400-2

Numerical simulation of a 600 W wind turbine blade applying the IEC 61400-2 standard

Paulina Marín Téllez*, Víctor López Garza, Juan Felipe Soriano Peña, Gilberto González Avalos, Gerardo Javier Marín Téllez, Adrián Santibáñez Maldonado

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Mecánica

Resumen

En el presente trabajo, se muestra la simulación numérica realizada mediante software de elemento finito (FEA), para un álabe de una turbina eólica de baja potencia de acuerdo con la norma IEC 61400-2. El álabe se diseñó para una turbina de 600 W y se fabricó de un material compuesto de fibra de vidrio con resina epoxi. Las cargas de diseño aplicadas se calcularon de acuerdo con la metodología de cargas simplificadas descritas en la norma. Se desarrolló una metodología para la simulación numérica que consta de las siguientes etapas: modelado del álabe en 3D, definición del material compuesto, definición de la estructura del sándwich, mallado, definición de las condiciones de frontera y carga, análisis de convergencia de malla y análisis de resultados.

La simulación numérica muestra que el álabe es capaz de soportar las cargas estructurales bajo las condiciones de operación, cumpliendo así con la normativa. Los desplazamientos y deformaciones fueron mínimos para la mayoría de las hipótesis de carga; los esfuerzos de Von Mises y el criterio de Tsai-Wu indicaron que la región del soporte presentó los mayores desafíos estructurales.

La simulación numérica es una herramienta muy útil que proporciona una evaluación preliminar del comportamiento del álabe, parámetros necesarios para realizar ajustes previos a la manufactura y para la realización de las pruebas estructurales. Además, permite ahorrar recursos en tiempo y costos.

Palabras clave: simulación, turbina eólica, álabe.

*Autor de correspondencia: 1214884f@umich.mx



Abstract

In the present work, the numerical simulation carried out by means of finite element software (FEA), for a blade of a low power wind turbine in accordance with the IEC 61400-2 standard is shown. The blade was designed for a 600 W turbine and was made of a fiberglass composite material with epoxy resin. The applied design loads were calculated according to the simplified load methodology described in the standard. A methodology was developed for numerical simulation consisting of the following stages: 3D blade modeling, definition of the composite material, definition of the sandwich structure, meshing, definition of boundary and load conditions, analysis of mesh convergence and analysis of results.

The numerical simulation shows that the blade is capable of supporting the structural loads under the operating conditions, thus complying with the regulations. Displacements and deformations were minimal for most loading hypotheses; Von Mises efforts and the Tsai-Wu criterion indicated that the support region presented the greatest structural challenges.

Numerical simulation is a very useful tool that provides a preliminary evaluation of the behavior of the blade, provides necessary parameters to make adjustments prior to manufacturing and to carry out structural tests. In addition, it saves resources in time and costs.

Keywords: simulation, wind turbine, blade.

Introducción

El uso de energías no renovables para la generación de electricidad conlleva graves consecuencias para el medio ambiente, mientras que las fuentes de energías renovables presentan múltiples beneficios, como competitividad en sus costos, mayor confiabilidad, y la creación de empleos, pero sobre todo reduce la contaminación, ayudando así a mejorar la salud pública (Renewable Energy Policy Network, 2019).

En 2021, el 28% de la generación de electricidad a nivel mundial provino de fuentes renovables y por primera vez en la historia el 10% de este porcentaje fue por medio de la energía solar y la energía eólica. Esta última se ha convertido en la segunda fuente de energía renovable durante la última década, lo cual se ha visto reflejado en su rápido crecimiento tanto en la tierra como en el mar (REN21, 2022).

Los álabes son un componente fundamental en una turbina eólica; la fatiga en estos puede generar problemas que disminuyen el rendimiento del aerogenerador, acelerando su proceso de degradación y disminuyendo su eficiencia, lo anterior puede provocar graves accidentes (GWEC, 2019; REN21, 2022). Para prevenir que los álabes de un aerogenerador fallen

dentro de su vida útil (entre 20 y 25 años), es necesario realizar pruebas estáticas y de fatiga, con la finalidad de verificar su utilidad (AWEA, n.d.).

Aunque existen diversos estándares a nivel internacional para la evaluación y certificación de las turbinas de viento de baja potencia y todos sus componentes, estos se encuentran basados en la Norma IEC 61400-2 que es la más aceptada y empleada. Dicha norma trata de la seguridad, del aseguramiento de la calidad y la integridad de la ingeniería; especifica los requisitos para la seguridad de los aerogeneradores pequeños (AP), incluyendo el diseño, la instalación y el mantenimiento, así como la explotación en condiciones externas específicas. Su propósito es fijar un nivel apropiado de protección contra daños por riesgos causados en estos sistemas durante su vida útil (IEC 61400-2 “Wind Turbines - Part2: Design Requirements of Small Wind Turbines”, 2015).

El poder realizar una simulación numérica del álabe bajo las cargas estructurales marcadas por la normativa internacional, previo a su manufactura, permite una evaluación preliminar del álabe, además de reducir costos y tiempo, asimismo, brinda criterios necesarios para la manufactura. En este trabajo, se realizó la simulación de un álabe empleando la Teoría

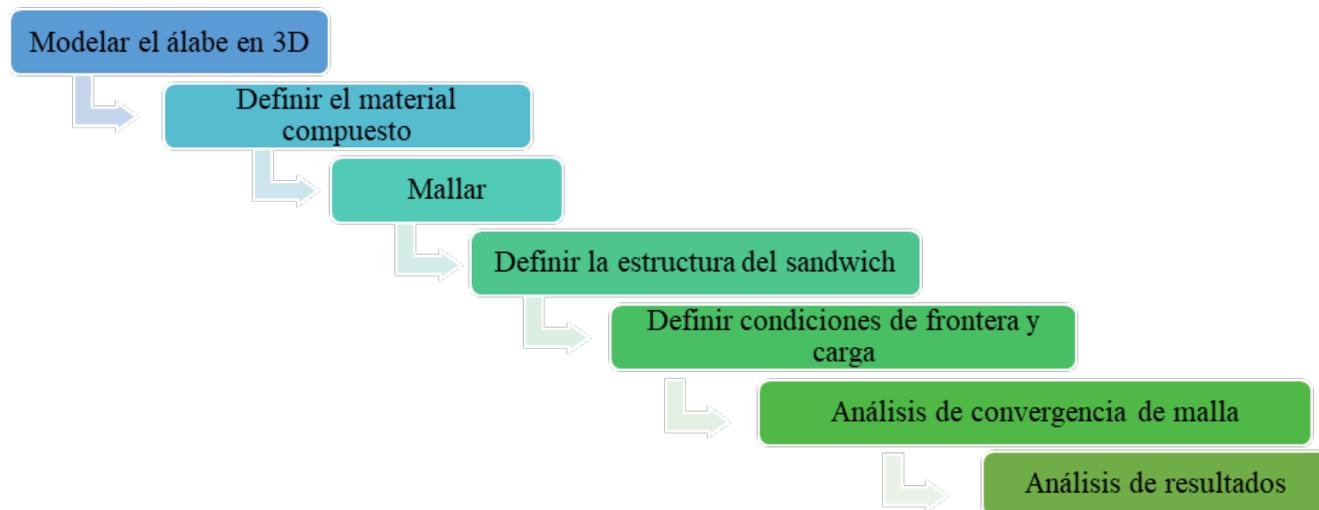


Figura 1. Metodología de simulación numérica.

del Elemento Pala, que integra las fuerzas dadas por la interacción de álabe con el fluido para cada sección radial, obteniendo una fuerza total resultante. El diseño del perfil aerodinámico se obtuvo del software TIMEO, para una turbina de 600 W con una velocidad específica de 6 m/s, una velocidad en la punta de la pala de 12.5 m/s^2 y se seleccionó perfil NACA 4412, obteniéndose un radio de 0.95m y una cuerda máxima de 0.215 m.

Metodología

Este trabajo parte de la hipótesis que es posible realizar una simulación numérica estructural de un álabe de una turbina eólica de acuerdo con la norma IEC 61400-2 para evaluar la capacidad del álabe de soportar las cargas estructurales de diseño previo a la manufactura. La metodología utilizada para la simulación numérica consta de 7 pasos (Figura 1), iniciando con el modelo 3D del álabe con base en los parámetros geométricos obtenidos del diseño mediante programas de elemento finito. El segundo paso es asignar el material al modelo, definiendo correctamente las propiedades para lograr un comportamiento realista. En el tercer paso se selecciona el tipo de malla, el tipo y número de celdas, así como el grado de refinamiento.

Posteriormente, se define la estructura del sándwich, seleccionado la orientación de cada capa de material, para continuar con la selección correcta de las condiciones de frontera para aplicar las cargas calculadas de acuerdo con la norma IEC 61400-2. En el análisis de convergencia de malla los principales factores a verificar son: el esquinamiento y la relación de aspecto y este es un indicador de la estabilidad y exactitud de los cálculos numéricos. Finalmente se analizan los resultados para verificar la congruencia con el comportamiento esperado.

Modelado

Utilizando el software SolidWorks se modeló el aspa como una superficie hueca dividida en 10 secciones, la zona de unión raíz-soporte y el soporte como se muestra en la Figura 2.

Material

Se utilizó fibra de vidrio con resina epoxi y los valores de las propiedades fueron tomados de la literatura (Brondsted *et al.*, 2005; Tabla 1).

Malla

El mallado del álabe se realizó en un software de simulación por elemento finito (ANSYS), usando el método de triángulos debido a que el aspa es hueca y

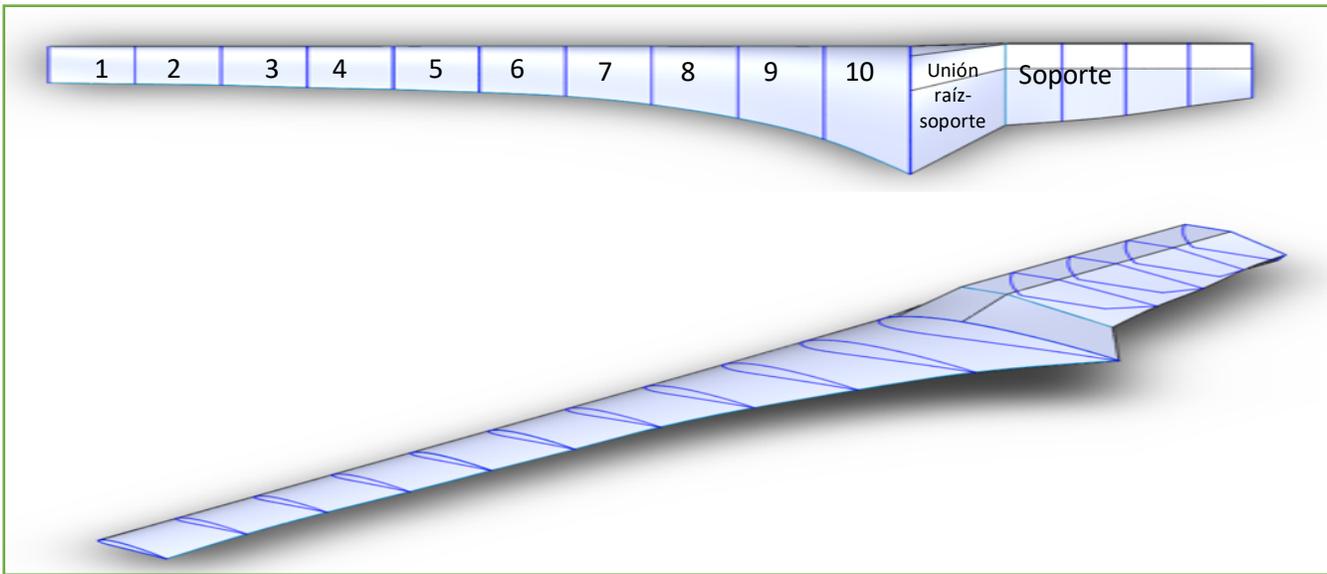


Figura 2. Modelado 3D del álabe como superficie hueca.

fue modelada como una superficie. Se empleó el mapeo de malla en todas las caras, con un tamaño promedio de elemento de 6 mm y aplicando un refinamiento en las secciones mostradas en la **Figura 3**, y la malla se muestra en detalle en la **Figura 4**.

Para la malla del álabe, se generó un solo tipo de elemento, triángulos con 3 nodos, respecto a la cali-

dad de la malla cumple con los requerimientos mínimos de calidad, tal como se muestra en la **Tabla 2**. Parámetros como la relación jacobiana, la desviación paralela, el factor de deformación y la longitud característica no se aplican para el tipo de elemento presente.

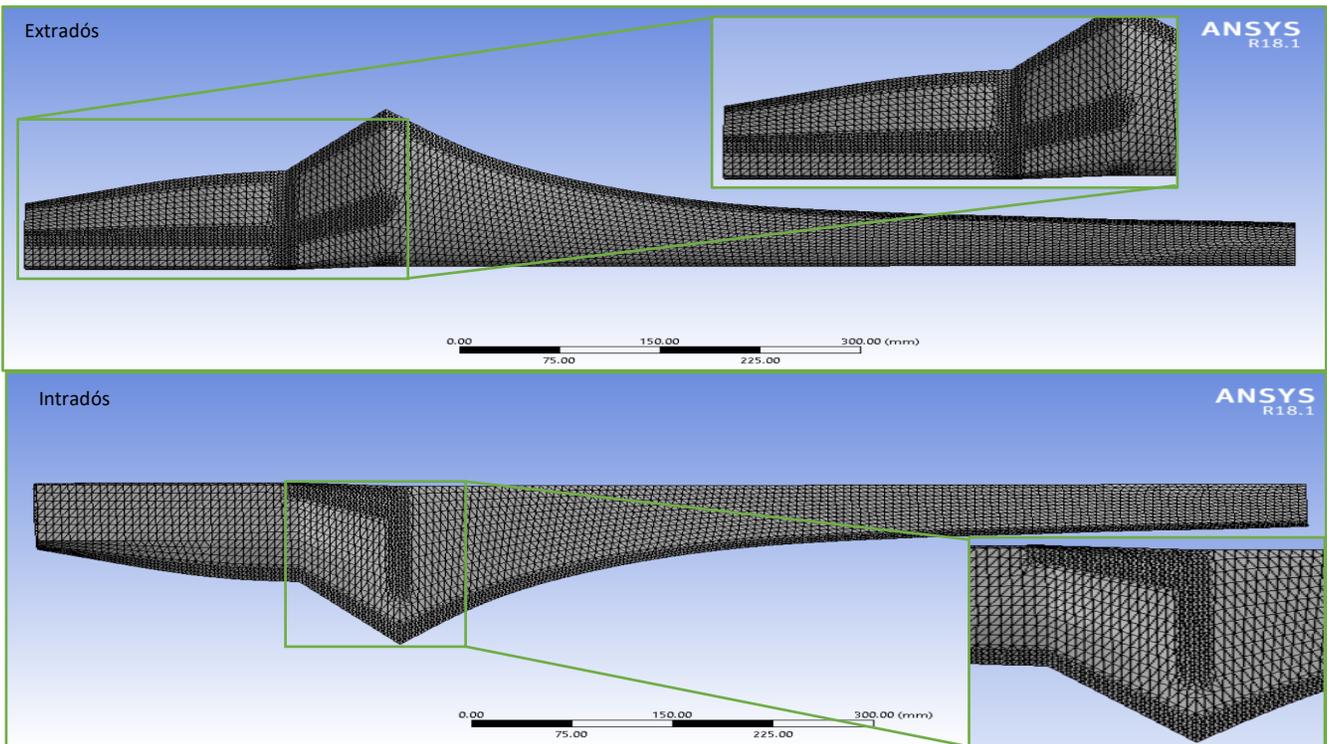


Figura 3. Mallada del extradós y del intradós del álabe.

Tabla 1. Propiedades de la fibra de vidrio con resina epoxi.

Propiedad	Unidireccional	
Densidad (kg/m ³)	1900	
Coefficiente de Poisson	0.26	
Módulo de Young (GPa)	Dirección X	8.3
	Dirección Y	8.3
	Dirección Z	39
Módulo cortante (GPa)	4.1	
Resistencia a la tensión (MPa)	Dirección X	1062
	Dirección Y	31
	Dirección Z	31
Resistencia a la compresión (MPa)	Dirección X	610
	Dirección Y	118
	Dirección Z	118

Estructura compuesta

Se realizó la simulación en el módulo para materiales compuestos ANSYS Composite PrePost (ACP), ya que proporciona las herramientas necesarias para el análisis de estructuras compuestas en capas. El álabe ya se había manufacturado previamente por lo que se tomaron esos mismos parámetros para simular la estructura del sándwich (Gómez, 2012). Se tomó un espesor de 1 mm por capa y se orientaron todas las capas en la dirección de la envergadura, definiendo 3 capas para la región roja y 2 capas para la región azul, tal como se muestra en la **Figura 5**. En la **Figura 6** se

Tabla 2. Parámetros de la calidad de malla.

Parámetro	Promedio	Calidad
Tamaño de malla (mm)	6	-
Tipo de elemento	Tri3	-
Número de nodos	7955	-
Número de elementos	15836	-
Relación de aspecto	1.6735	Muy bien
Calidad ortogonal	0.83342	Muy bien
Esquinamiento	0.24549	Muy bien
Calidad de elemento	0.83398	Muy bien
Ángulo de esquinamiento máximo	85.009°	Muy bien

ilustra la configuración de las capas del álabe, siendo 3 capas para el extradós y 3 capas para el intradós.

Cargas y condiciones de frontera

La norma IEC 61400-2 indica 3 formas para determinar las cargas de diseño en un aerogenerador: metodología de cargas simplificadas, modelo de simulación y modelo de carga a escala real. En este trabajo se empleó la metodología de cargas simplificadas, la cual indica un conjunto limitado de hipótesis de carga y de configuraciones con fórmulas sencillas y condiciones externas simplificadas. Las hipótesis de carga que se evaluaron fueron: A) operación normal, B) orientación, C) Error de

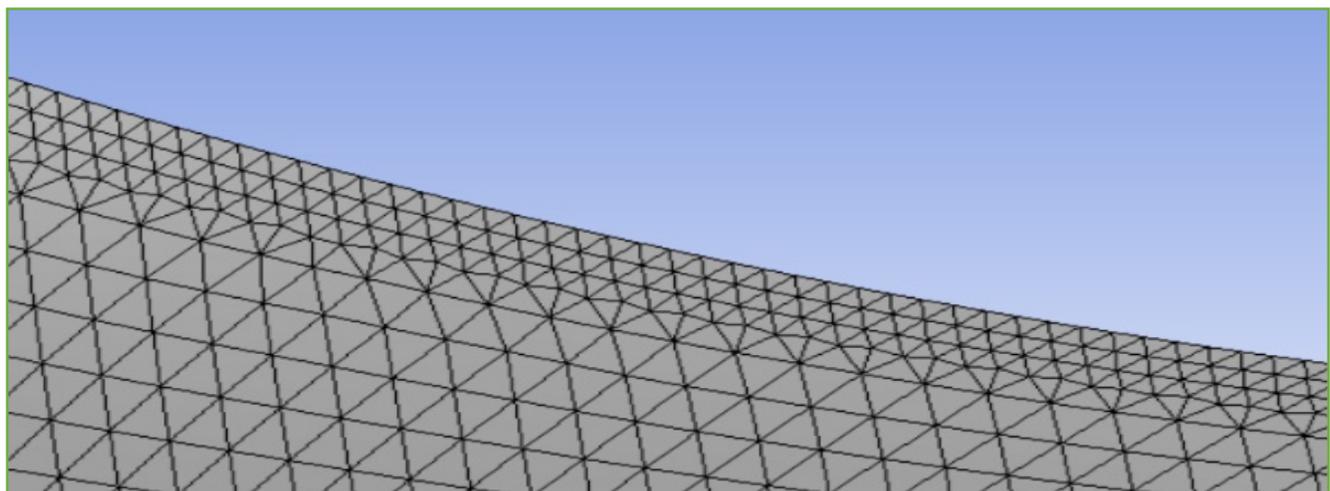


Figura 4. Detalle de la malla del álabe.

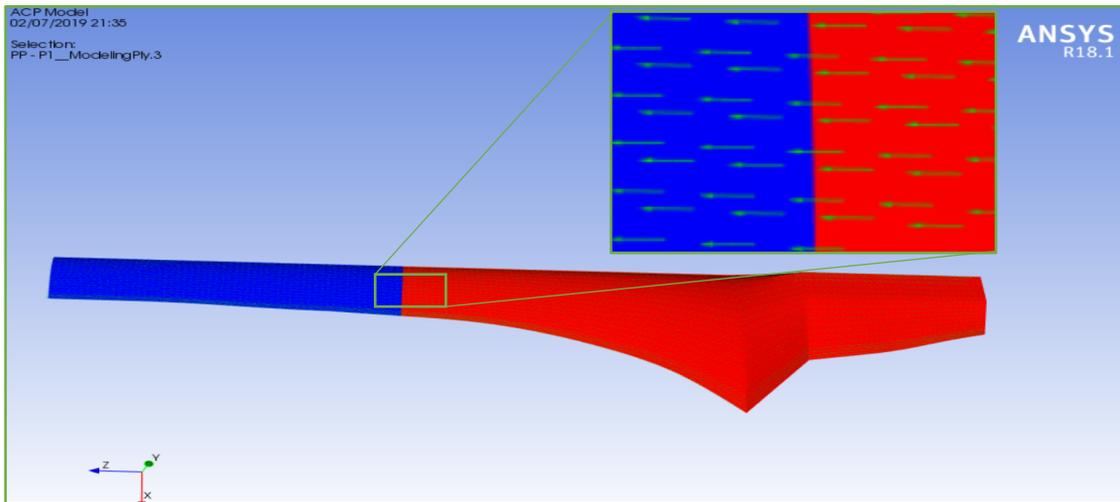


Figura 5. Orientación de las capas del álabe.

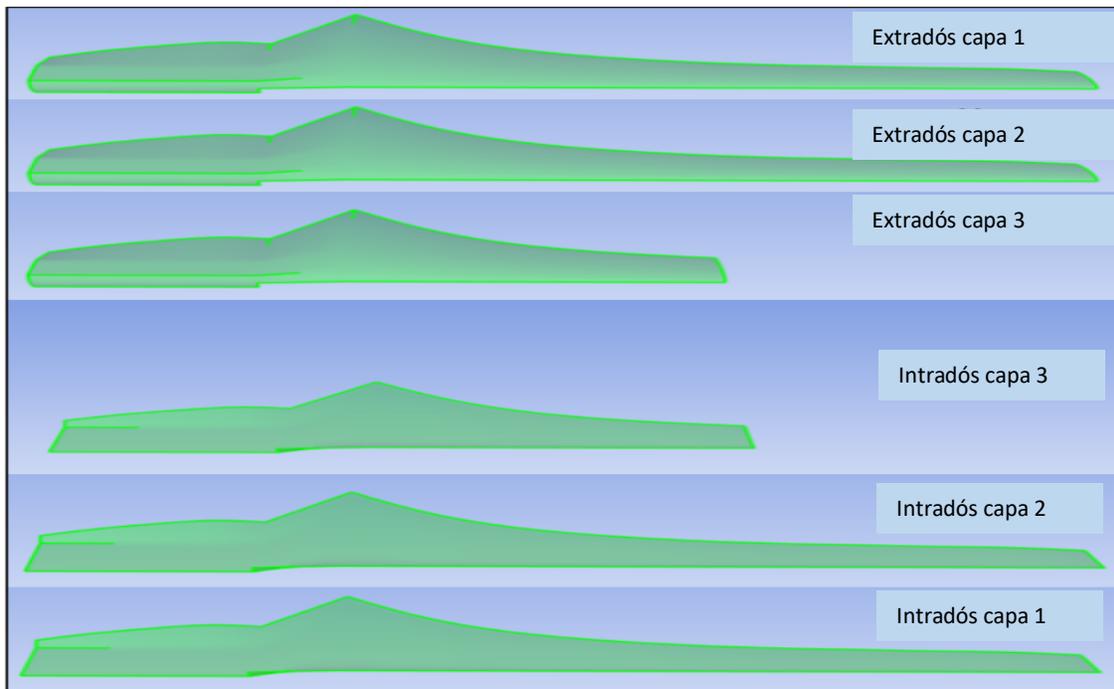


Figura 6. Esquema de las capas del álabe.

orientación, D) Empuje máximo, E) Velocidad de rotación máxima, F) Cortocircuito en la conexión a la carga, G) Carga extrema del viento, H) Inmovilización con carga del viento y exposición máxima.

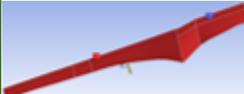
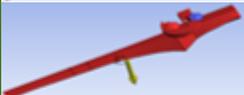
Las condiciones de frontera incluyendo los valores de fuerzas y momentos para cada hipótesis de carga se muestran en la **Tabla 3**. Para las condiciones de frontera se tomaron en cuenta: la fuerza ejercida por la gravedad que se muestra en amarillo, los soportes

fijos son las áreas marcadas en azul y en rojo se muestran las fuerzas y momentos para cada hipótesis de carga.

Análisis de convergencia de malla

Es necesario realizar un análisis de convergencia de malla para obtener resultados precisos con el menor costo computacional. En la **Figura 7**, se muestra el análisis de convergencia de malla donde para el

Tabla 3. Valores calculados para cada hipótesis de carga.

Hipótesis de operación		Valor calculado	Condiciones de frontera
A	Operación normal	$\Delta F_{zB}=35.743 \text{ N}$	
		$\Delta M_{xB}=18.416 \text{ Nm}$	
		$\Delta M_{yB}=76.349 \text{ Nm}$	
B	Orientación	$M_{yB}=38.986 \text{ Nm}$	
C	Error de orientación	$M_{yB}=0.018 \text{ Nm}$	
D	Empuje máximo	$F=41.157 \text{ N}$ $M_{yB}=0.018 \text{ Nm}$	
E	Velocidad de rotación máxima	$F_{zB}=17.871 \text{ N}$	
F	Cortocircuito en la conexión a la carga	$M_{xB}=28.307 \text{ Nm}$	
G	Carga extrema del viento	$M_{yB}=8.415 \text{ Nm}$	
		$F=258.9533 \text{ N}$ $M_{yB}=16.7 \text{ Nm}$	
H	Inmovilización con carga del viento y exposición máxima	$F=86.317 \text{ N}$	

tamaño de malla de 0.9 mm, 0.8 mm y 0.7 mm el porcentaje de variación del esfuerzo está por debajo del 5% para las últimas 3 mallas. La malla convergió con 399, 588 nodos y 798,624 elementos.

Resultados

Desplazamiento total

Como es de esperar, para todas las hipótesis de carga es en la punta donde se tiene el mayor valor para el desplazamiento y aproximadamente en la mitad del álabo correspondiente a la unión del soporte y la raíz

los desplazamientos tienden a cero. La **Figura 8** muestra los valores obtenidos del desplazamiento total por hipótesis de carga. La hipótesis G con carga F_{x-eje} presenta el mayor desplazamiento, seguida de la hipótesis de carga A con carga M_y y por la hipótesis de carga B con carga M_y . El menor desplazamiento se presentó en la hipótesis de carga A con carga F_{zB} , seguida por la hipótesis de carga E con carga F_{zB} y por la hipótesis de carga C con carga M_y . En general los desplazamientos son muy pequeños para la mayoría de las hipótesis de carga, exceptuando la hipótesis de carga G con carga F_{x-eje} y la hipótesis de carga A con carga M_y .

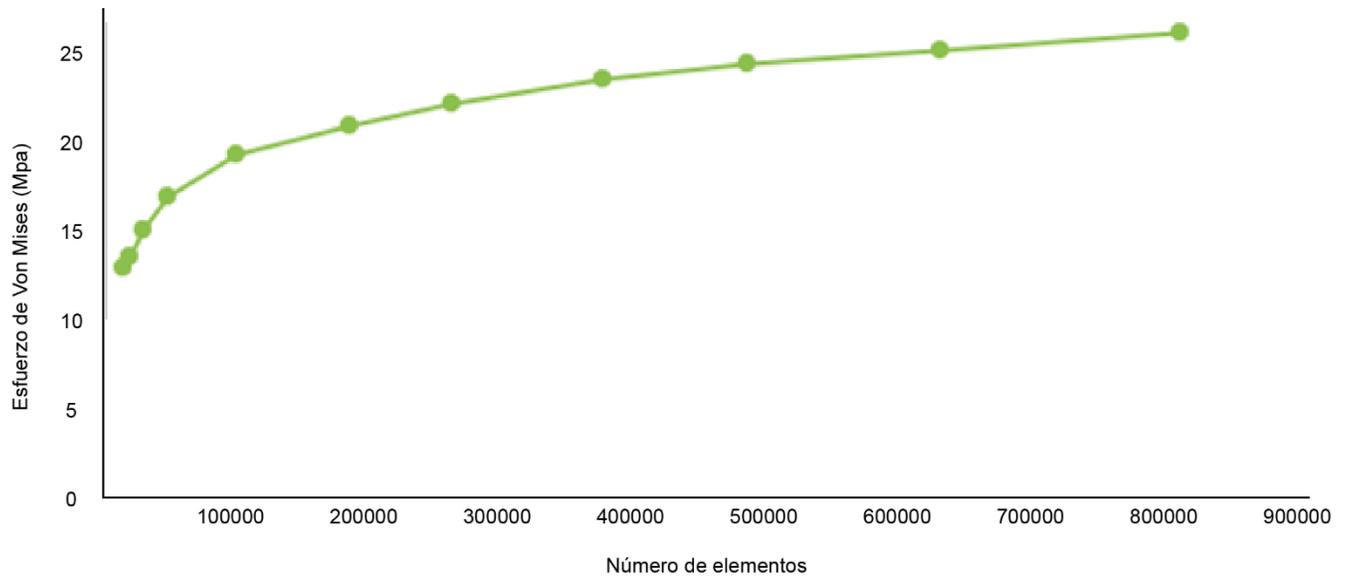


Figura 7. Convergencia de malla.

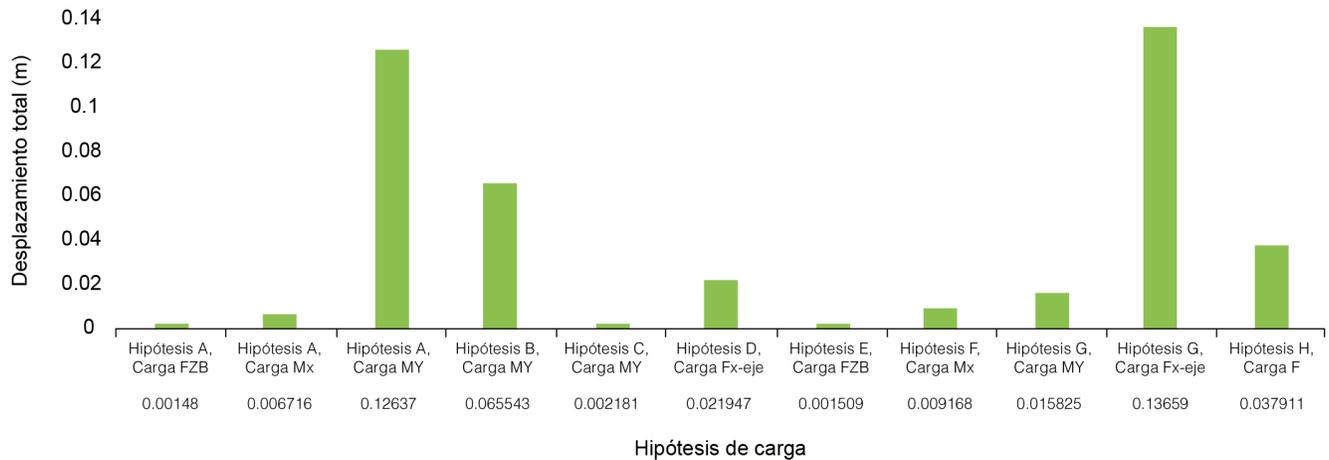


Figura 8. Desplazamiento total por hipótesis de carga.

Desplazamiento direccional

En todas las hipótesis de carga los valores más altos de desplazamiento direccional se dan en la zona de la punta tanto para el extradós como para el intradós. La **Figura 9** muestra los valores obtenidos del desplazamiento direccional por hipótesis de carga.

La hipótesis de carga A con carga M_y presenta el mayor desplazamiento direccional, seguida de la hipótesis de carga G con carga F_{x-eje} y por la hipótesis de carga B con carga M_y . El menor desplazamiento se presentó en la hipótesis de carga E con carga F_{ZB} , seguida por la hipótesis de carga A con carga F_{ZB} y por la hipótesis de carga C con carga M_y . En general los desplazamientos direccionales son muy pequeños para todas las hipótesis de carga.

Esfuerzo de Von Mises

Las **Figuras 10** y **11**, muestran los valores para el esfuerzo de Von Mises por capa del álabe para el extradós y el intradós, respectivamente, para cada hipótesis de carga. Los esfuerzos en el extradós son mucho mayores en comparación con los del intradós. La primera capa del extradós en la zona de la raíz es la que presenta los mayores esfuerzos de todo el álabe, mientras que los menores se presentan en el intradós en la primera capa en la zona de la punta. También podemos observar que los esfuerzos en la zona de la raíz son mucho mayores que en la zona de la punta para el extradós y el intradós.

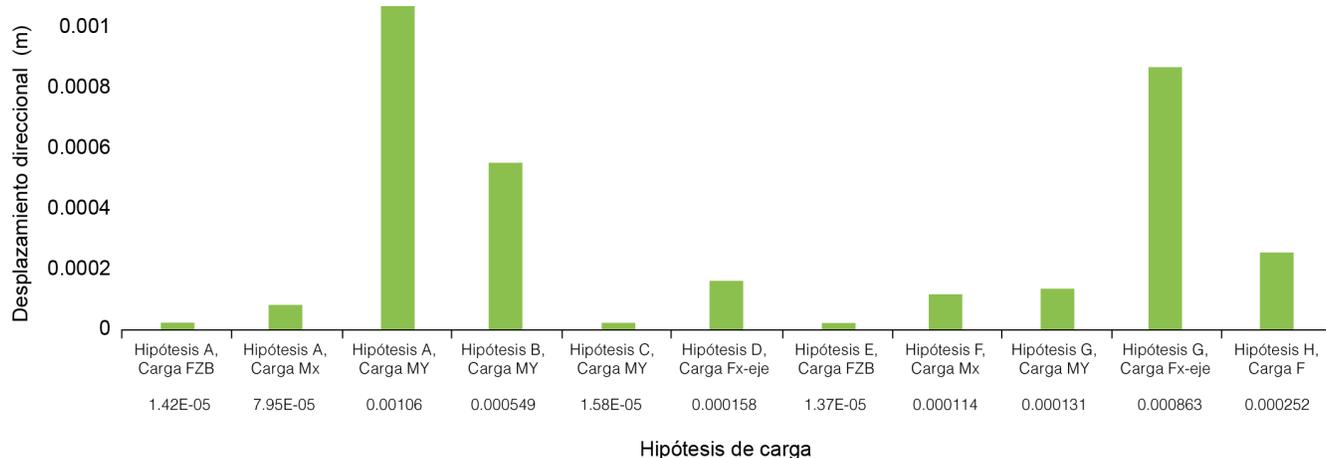


Figura 9. Desplazamiento direccional por hipótesis de carga.

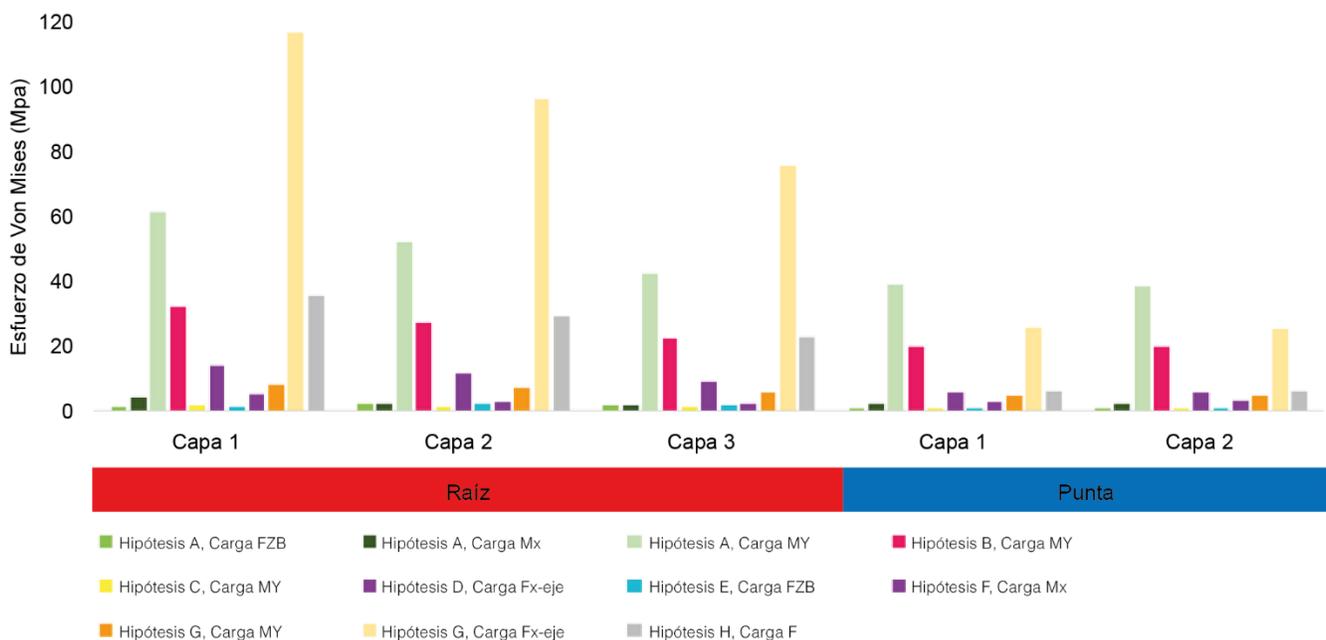


Figura 10. Esfuerzos de Von Mises por capa en el extradós para cada hipótesis de carga.

Tanto en el extradós como en el intradós, la hipótesis con los valores de esfuerzo más altos es la hipótesis de carga G con carga F_{x-eje} , seguida de la hipótesis de carga A con carga M_y . Ambas hipótesis se encuentran en la zona de la raíz.

Criterio de Tsai-Wu

El criterio de Tsai-Wu es uno de los más utilizados en códigos de elementos finitos comerciales, ANSYS lo implementa debido a su simplicidad y a que predice satisfactoriamente el fallo de los materiales compuestos en múltiples casos (Sebastián, 2016). La

Figura 12, muestra los valores para el criterio de Tsai-Wu del álabe para cada hipótesis de carga, encontrando que para todas ellas el valor mayor se da en la zona del soporte del álabe, donde se une con la raíz.

La hipótesis de carga G con carga F_{x-eje} presenta el mayor desplazamiento direccional, seguida de la hipótesis de carga A con carga M_y y por la hipótesis de carga B con carga M_y . El menor desplazamiento se presentó en la hipótesis de carga F con carga F_{ZB} , seguida por la hipótesis de carga A con carga F_{ZB} y por

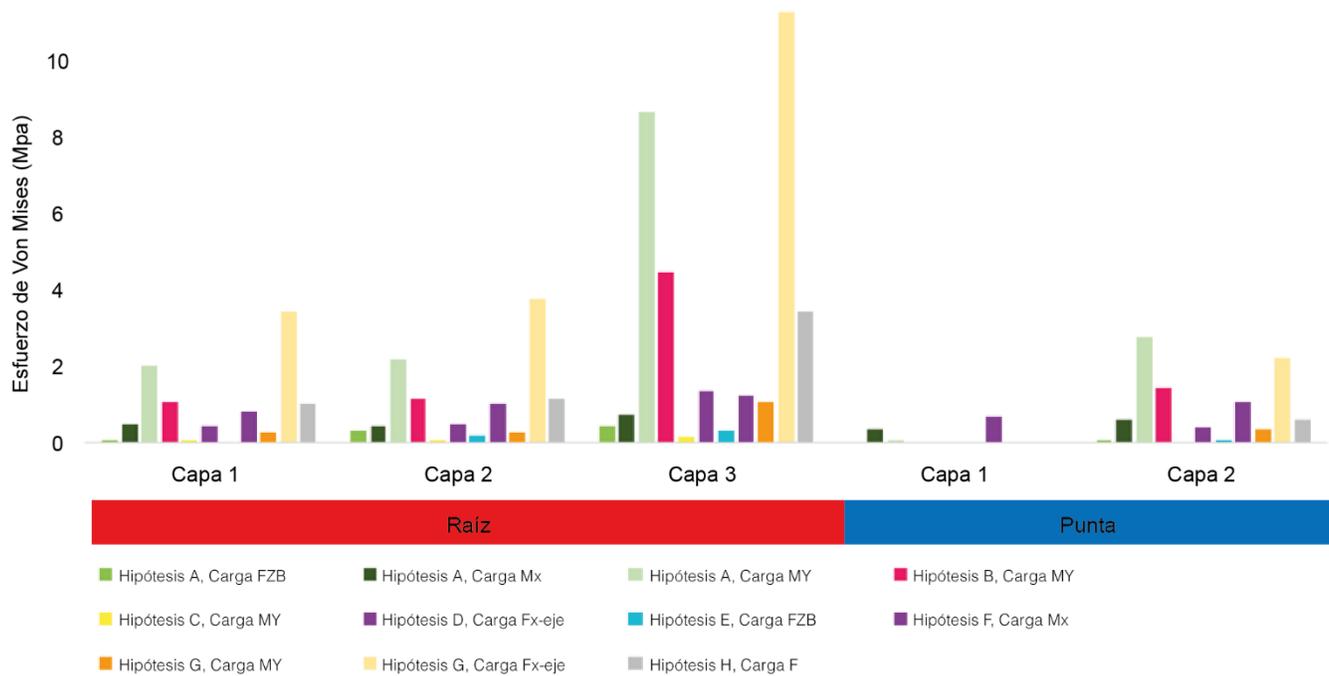


Figura 11. Esfuerzos de Von Mises por capa en el intradós para cada hipótesis de carga.

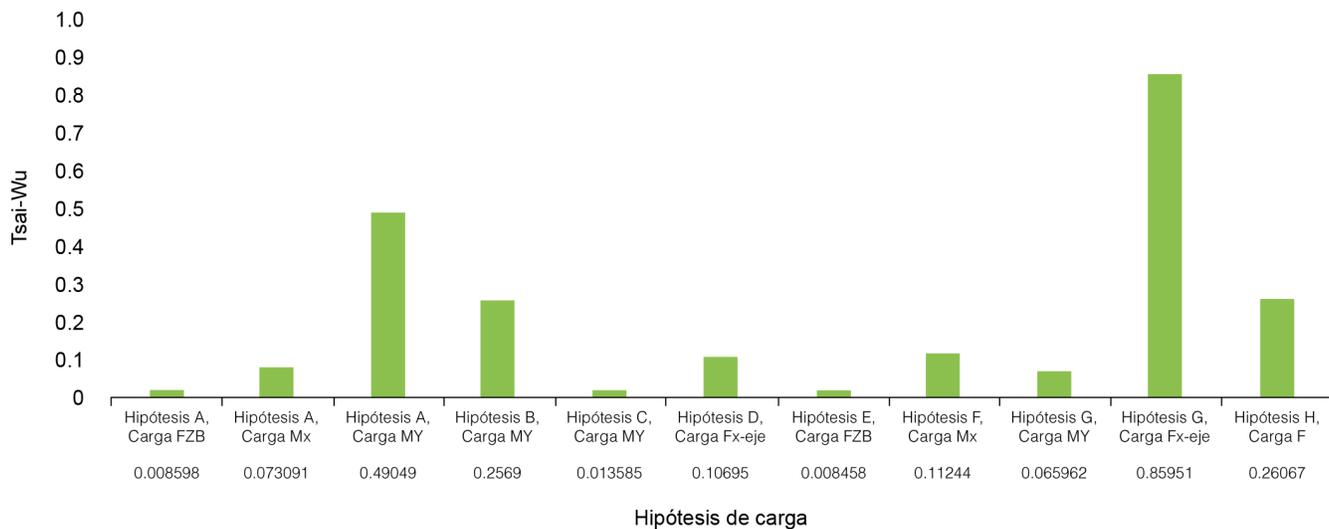


Figura 12. Criterio de Tsai-Wu para cada hipótesis de carga.

la hipótesis de carga C con carga MY. En todas las hipótesis de carga, el valor de Tsai-Wu es menor que 1, por lo que el álabe no presentará fallos estructurales.

Conclusiones

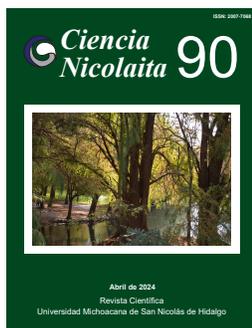
De acuerdo con los valores de esfuerzos y microdeformaciones obtenidos mediante la

simulación de elemento finito, el álabe es capaz de soportar las cargas estructurales a las que será sometido en funcionamiento. Realizar una simulación numérica bajo las cargas estructurales marcadas por la normativa internacional previo a su manufactura, posibilita una evaluación preliminar de su comportamiento, indicándonos si se necesitan modificaciones previo a la manufactura, reduciendo así recursos en costos y tiempo. Además, nos presenta

parámetros necesarios tanto para la manufactura como para las pruebas estructurales necesarias para garantizar un funcionamiento seguro durante su vida útil.

Referencias

- AWEA (n.d.) (2020). AWEA | American Wind Energy Association. The Voice of Wind Energy. Retrieved August 23, 2020, from <https://www.awea.org/>
- Brøndsted P, Lilholt H, Lystrup A (2005). Composite Materials for wind power turbine blades. Annual Review of Materials Research 35(1): 505-538. doi:10.1146/annurev.matsci.35.100303.110641
- Gómez EY (2012). Diseño y manufactura del hub y álabes de una turbina de viento. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- GWEC (2019). GWEC Global Wind Report 2019. <https://gwec.net/wp-content/uploads/2020/08/Annual-Wind-Report-2019-digital-final-2r.pdf>
- IEC 61400-2 (2015). "Wind Turbines - Part2: Design requirements of small wind turbines".
- REN21. (2022). Renewables 2022.
- Renewable Energy Policy Network. (2019). *Renewables 2019 Global Status Report*. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/28496/REN2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y%0Ahttp://www.ren21.net/cities/wp-content/uploads/2019/05/REC-GSR-Low-Res.pdf>
- Sebastián EC (2016). Análisis de criterios de fallo para materiales compuestos. 118. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/72577/CASTILLO> - Análisis de criterios de fallo para materiales compuestos.



Ciencia Nicolaita 90

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Simulación numérica y propuesta de ensayos estructurales de aspas de turbinas de viento de baja capacidad de doble raíz con base en la norma IEC 61400-2

Numerical simulation and proposal for structural tests of low-capacity double-root wind turbine blades based on the IEC 61400-2 standard

Adrián Santibáñez Maldonado*, Víctor López Garza, Juan Felipe Soriano Peña, Paulina Marín Téllez, Gerardo Javier Marín Téllez

Para citar este artículo: Santibáñez Maldonado A, López Garza V, Soriano Peña JF, Marín Téllez P, Marín Téllez GJ (2024). Simulación numérica y propuesta de ensayos estructurales de aspas de turbinas de viento de baja capacidad de doble raíz con base en la norma IEC 61400-2. *Ciencia Nicolaita* 90: 117-126.

DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi90.743>

Historial del artículo



Recibido: 17 de agosto de 2023

Aceptado: 10 de noviembre de 2023

Publicado en línea: abril 2024



Ver material suplementario



***Correspondencia de autor:** 1214743e@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Simulación numérica y propuesta de ensayos estructurales de aspas de turbinas de viento de baja capacidad de doble raíz con base en la norma IEC 61400-2

Numerical simulation and proposal for structural tests of low-capacity double-root wind turbine blades based on the IEC 61400-2 standard

Adrián Santibáñez Maldonado*, Víctor López Garza, Juan Felipe Soriano Peña, Paulina Marín Téllez, Gerardo Javier Marín Téllez

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Mecánica.

Resumen

En el presente trabajo, se muestran los resultados obtenidos mediante simulación numérica, así como los resultados de los ensayos estructurales mediante extensometría, para un aspa de turbina de viento de doble raíz de 2400 W en base a la norma IEC 61400-2, bajo las cargas de operación normal. Se desarrolló una metodología para llevar a cabo la experimentación y se muestra la importancia de la simulación numérica como herramienta vital previa a llevar a cabo el plan experimental.

Palabras clave: Simulación numérica, álabe de doble raíz, ensayos estructurales, extensometría

Abstract

In this work, we present the results obtained through numerical simulation as well as structural tests through extensometry for a 2400 W double root wind turbine blade based on the IEC 61400-2 standard, under normal operating loads. A methodology was developed to carry out the experimentation and the importance of numerical simulation as a vital tool prior to carrying out the experimental plan is shown.

Keywords: Numerical simulation, double root blade, structural tests, extensometry

*Autor de correspondencia: 1214743e@umich.mx
Copyright © Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Introducción

Una turbina eólica es accionada por la energía cinética del viento. Se trata de una turbomáquina motora que intercambia cantidad de movimiento con el viento, haciendo girar un rotor. Las turbinas eólicas se clasifican, según la orientación del eje del rotor, en verticales y horizontales. Las turbinas eólicas también se pueden clasificar por la potencia que generan: alta, media y baja potencia. La norma IEC 61400-2, clasifica a las turbinas de baja potencia como aquellas que generan hasta 50KW.

Los componentes más importantes de una turbina eólica son los álabes. Si uno solo se daña de manera estructural puede comprometer el rendimiento del aerogenerador o incluso puede provocar fallas catastróficas. Por este mismo motivo, cada álabe antes de ser puesto en funcionamiento debe ser sometido a rigurosas pruebas mecánicas con el fin de garantizar su seguridad estructural durante su vida útil. Aquí entra la Norma IEC 61400-2, la cual es un estándar internacional para la certificación de turbinas de baja potencia y todos los componentes de éstas.

El presente trabajo de investigación muestra la evaluación de un álabe de doble raíz (MX/a/2017/015904) para una turbina de baja potencia de 2400W en base a la norma IEC 61400-2 utilizando las siguientes hipótesis de carga: operación normal, velocidad máxima de rotación y carga extrema de viento. Se muestran los resultados obtenidos mediante simulación por elemento finito y aplicando técnicas de extensometría.

Metodología

Hipótesis de carga aplicadas con base en la norma IEC 61400-2

Las hipótesis de carga que se evaluaron son: operación normal, velocidad máxima del rotor y carga extrema del viento, las cuales se muestran en la **Tabla 1**. Para cada estado de diseño, se expone el tipo apropiado de análisis por “F” y por “U”. F se refiere al análisis de las cargas por fatiga, a emplear en la valoración del esfuerzo por fatiga. U se refiere al análisis de las cargas críticas tales como exceso de

resistencia máxima del material, de la deformación extrema y de la estabilidad.

Tabla 1. Hipótesis de carga de diseño para el método de cálculo de cargas simplificadas.

Situación de diseño	Hipótesis de carga		Tipo de análisis
Producción de energía	A	Operación normal	F
	B	Orientación	U
	C	Error de orientación	U
	D	Empuje máximo	U
Producción de energía de más ocurrencia de fallo	E	Velocidad de rotación máxima	U
	F	Cortocircuito en la conexión de carga	U
Parada	G	Desconexión (frenado)	U
Carga extrema de viento	H	Carga extrema del viento	U
Condiciones de inmovilización y de falta	I	Inmovilización con carga del viento y exposición máxima	U
Transporte, montaje, mantenimiento y reparación	J	Deberá estar indicado por el fabricante	U

Hipótesis A: operación normal

La carga de diseño para “operación normal” es una carga de fatiga. La hipótesis de carga asume una carga de fatiga de rango constante para la pala.

$$\Delta F_{zB} = 2m_B R_{cog} \Omega_{n,design}^2 \quad (1)$$

$$\Delta M_{xB} = \frac{Q_{design}}{B} + 2m_B g R_{cog} \quad (2)$$

$$\Delta M_{yB} = \frac{\lambda_{design} Q_{design}}{B} \quad (3)$$

Hipótesis E: velocidad máxima del rotor

La carga debida a la fuerza centrífuga en la raíz de la pala F_{zB} se calcula como sigue:

$$F_{zB} = m_B R_{cog} \Omega_{n,máx}^2 \quad (4)$$

Hipótesis H: carga extrema del viento

En esta hipótesis de carga, el aerogenerador funciona de la manera prevista en el diseño para velocidades de viento extremas. Las cargas deben calcularse tomando la velocidad máxima registrada en los últimos 50 años, V_{e50} :

$$M_{yB} = \frac{C_D}{4} \rho V_{e50}^2 A_{projB} R \tag{5}$$

Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores obtenidos para cada hipótesis de carga.

Hipótesis de carga		Valor
A	Operación normal	$\Delta F_{zB}=12151.12 \text{ N}$
		$\Delta M_{xB}=1666.57 \text{ Nm}$
		$\Delta M_{yB}=378.67 \text{ Nm}$
E	Velocidad de rotación máxima	$F_{zB}=62125 \text{ N}$
H	Carga extrema del viento	$M_{yB}=2970.34 \text{ Nm}$

Simulación del álabe

La **Figura 1** muestra la metodología a seguir para llevar a cabo la simulación del álabe en software de elemento finito.

El álabe se modeló empleando software CAD utilizando un perfil NACA 4412 para la raíz principal y para la doble raíz, dividiéndose en 25 secciones. Véase **Figura 2**.

El álabe está fabricado con varias capas de material compuesto, fibra de vidrio/Epoxi, dispuestas a $\pm 45^\circ$ y 90° como se muestra en la **Figura 3**. Los laminados se modelaron empleando el modulo ACP-Pre de ANSYS, el cual permite hacer laminados o sandwich de materiales compuestos de matriz polimérica y fibras en diferentes orientaciones.

El mallado se hizo con la ayuda de un software de elemento finito mediante elementos triangulares (**Figura 4**). En la **Tabla 3** se muestra la calidad del mallado. En la **Figura 5** se muestra el estudio de convergencia de malla.

Las condiciones de frontera consistirán en aplicar las hipótesis de carga agregando una condición de

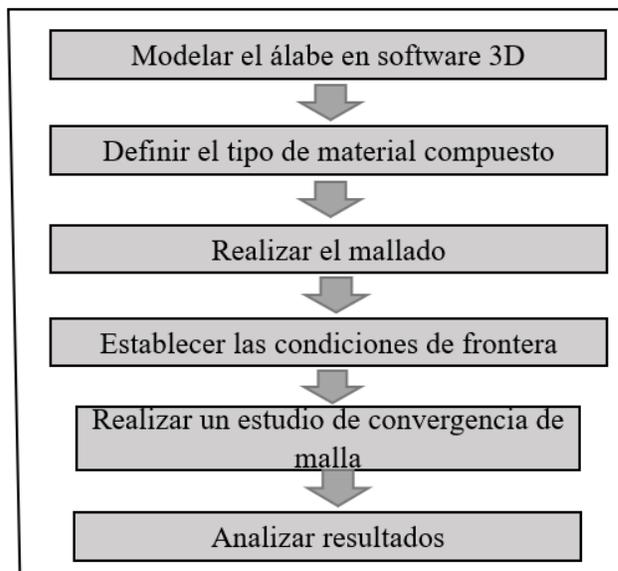


Figura 1. Metodología para la simulación numérica.

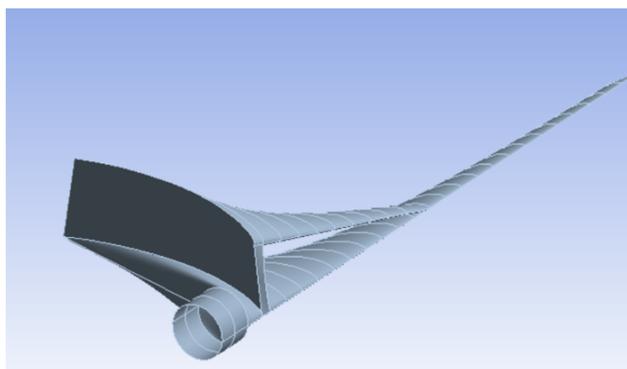


Figura 2. Modelo CAD 3D del álabe de doble raíz.

empotramiento en la raíz del aspa (**Figura 6**). Para fines prácticos, las hipótesis de carga que impliquen momentos en el aspa, serán transformadas a fuerzas en el mismo eje, utilizando la distancia a la raíz que en este caso es de 3.25 metros. En la **Tabla 4** se presenta

Tabla 3. Métricas de calidad de malla.

Parámetro	Promedio	Calidad
Tamaño de elemento	2.6 mm	-
Nodos	1338349	-
Elementos	2676144	-
Tipo de elemento	Tri3	-
Calidad del elemento	0.96721	Excelente
Relación de aspecto	1.184	Excelente
Esquinamiento	0.04936	Excelente
Calidad ortogonal	0.96966	Excelente

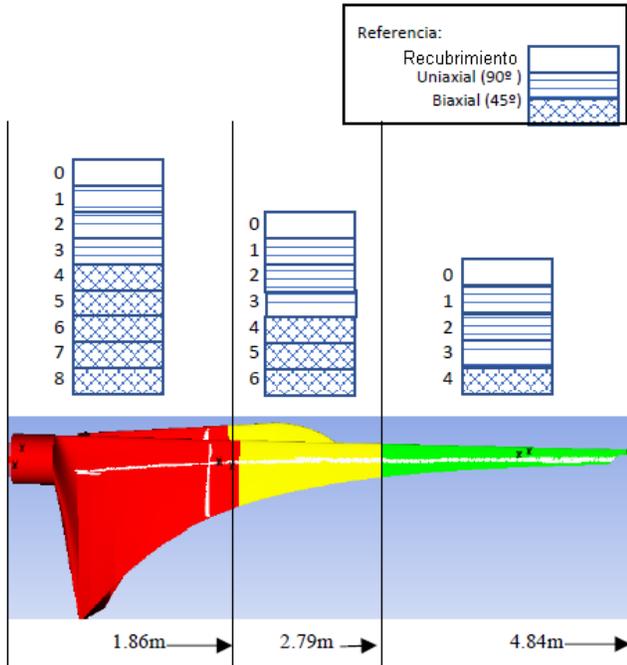


Figura 3. Distribución de las láminas de fibra de vidrio/epoxi en ábale de doble raíz.

un resumen de las condiciones de frontera de las 3 hipótesis de carga.

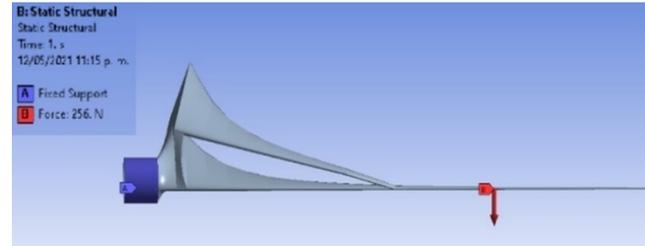


Figura 6. Condiciones de frontera.

Tabla 4. Resumen de las cargas a aplicar.

Hipótesis de carga	Momento en x (momento flapwise) N	Momento en y (momento edgewise) N	Fuerza en z (centrífuga) N
A	256	115	12151.12
E	No aplica	No aplica	62125
H	No aplica	459.1	No aplica

Resultados

A continuación, se muestran los resultados en esfuerzo máximo de Von Mises (Figura 7) y desplazamiento total (Figura 8) y el desplazamiento direccional en el eje Z (Figura 9) para la hipótesis de carga A: Flapwise. Según Castillo (2016), es aceptable aplicar la teoría de falla de Von Mises en materiales compuestos siempre y cuando el material se comporte más o menos lineal en la zona elástica en el diagrama esfuerzo-deformación, el material compuesto de fibra de vidrio/Epoxi tiene este tipo de comportamiento lineal.

A continuación, la Tabla 5 resume los resultados obtenidos de desplazamiento total, esfuerzo máximo de Von Mises y desplazamiento direccional.

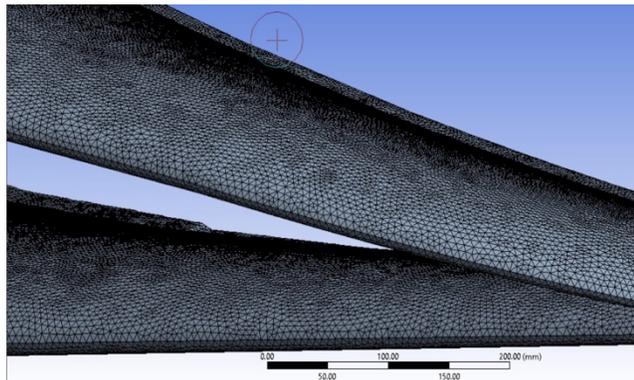


Figura 4. Mallado del ábale de doble raíz.

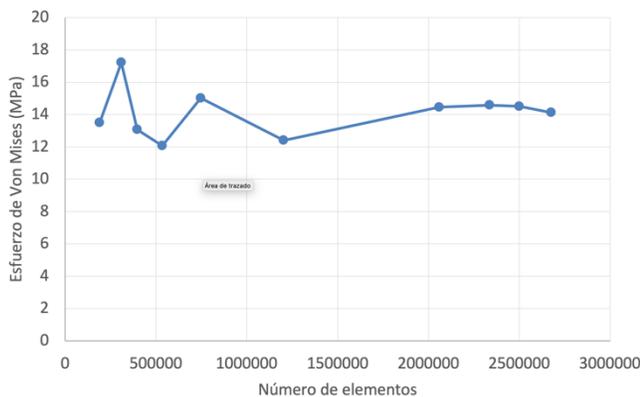


Figura 5. Gráfica de convergencia de malla.

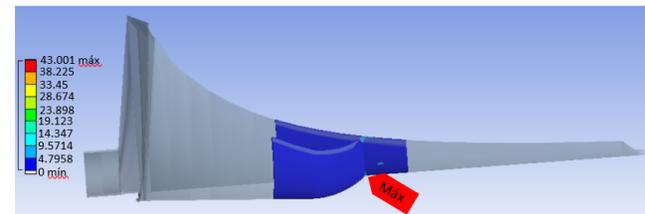


Figura 7. Esfuerzo maximo de Von Mises, ubicado en la zona media del extradós [MPa].

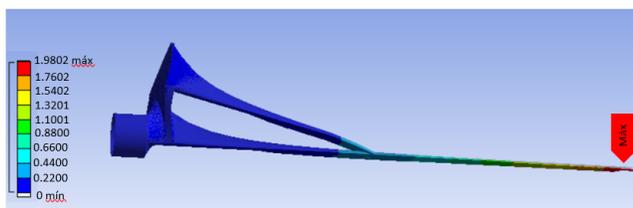


Figura 8. Deformación total del álabe [cm].

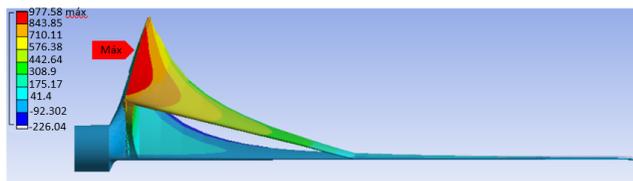


Figura 9. Deformación direccional del álabe en el eje Z [µε].

Tabla 5. Resumen de los resultados obtenidos para los modos de carga simulados.

Hipótesis de carga	Desplazamiento total (mm)	Esfuerzo máximo de Von Mises (Mpa)	Desplazamiento direccional máximo (µε)
A Operación normal	F_{zB} : 24.93	35.27	424.52 (eje z)
	M_{xB} : 43.00	86.13	977.58 (eje z)
	M_{yB} : 2.59	12.07	4.7282 (eje x)
E Velocidad de rotación máxima	F_{zB} : 127.48	180.35	2170.5 (eje z)
H Carga extrema del viento	M_{yB} : 20.35	94.69	18.876 (eje x)

Pruebas de laboratorio

En la **Figura 10**, se muestra a detalle las etapas del plan experimental. La primera es identificar todos los factores o variables no experimentales que puedan afectar el experimento y determinar cómo controlarlas; tales como los factores ambientales, temperatura, ruido, etc.

La **Figura 11** muestra la metodología a seguir para realizar las pruebas de laboratorio.

Para realizar los ensayos estructurales a los álabes se utilizará el banco de pruebas de cargas estáticas y de fatiga (**Figura 12**) diseñado por el Ing. Erick Pérez

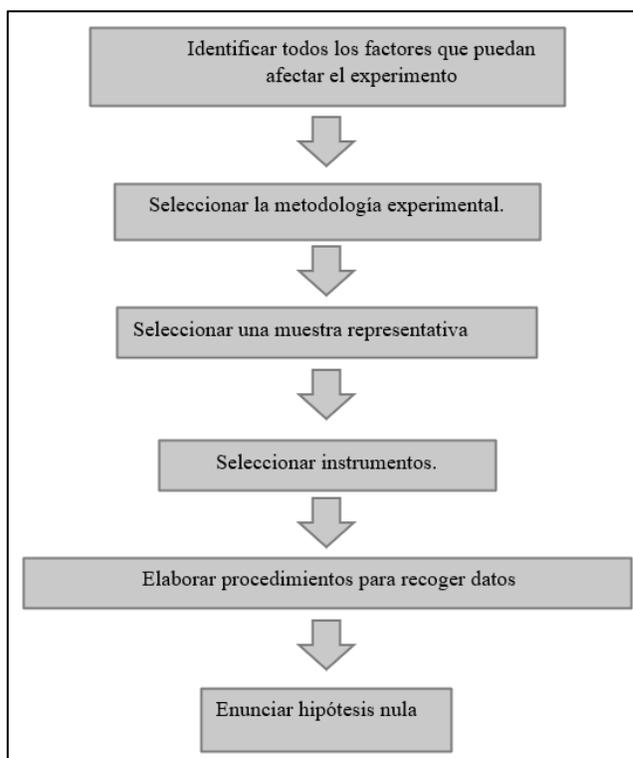


Figura 10. Metodología del plan experimental.

Juárez, el cual está conformado por las siguientes partes:

1. Base
2. Cabezal-soporte
3. Cabezal-sujetador
4. Álabe
5. Sistema de fuerza

Para la realización de las mediciones de deformación, se utilizó la técnica de extensometría, la cual, consiste en adherir galgas extensométricas a la superficie del aspa, que son básicamente una resistencia variable (**Figura 13**). Se utilizaron galgas modelo CEA-06-240UZ-120 y un indicador de tensión y registrador modelo P3 para recabar los datos (**Figura 14**).

El lugar donde se colocaron las galgas se eligió en base a los resultados obtenidos en la simulación numérica. Cabe destacar que 2 de los 5 modos de carga no se pueden reproducir en laboratorio debido a la complejidad de las mismas, por lo tanto, se limita a 3 modos de carga, la **Tabla 6** resume los modos de carga y sus magnitudes, tanto en Newtons como en kilogramos.

Tabla 6. Resumen de las cargas a aplicar en laboratorio.

Hipótesis	Carga (N)	Carga a aplicar (kg)
A: Flapwise	256	26.1
A:Edgewise	115	11.8
H: Edgewise	459.1	46.8

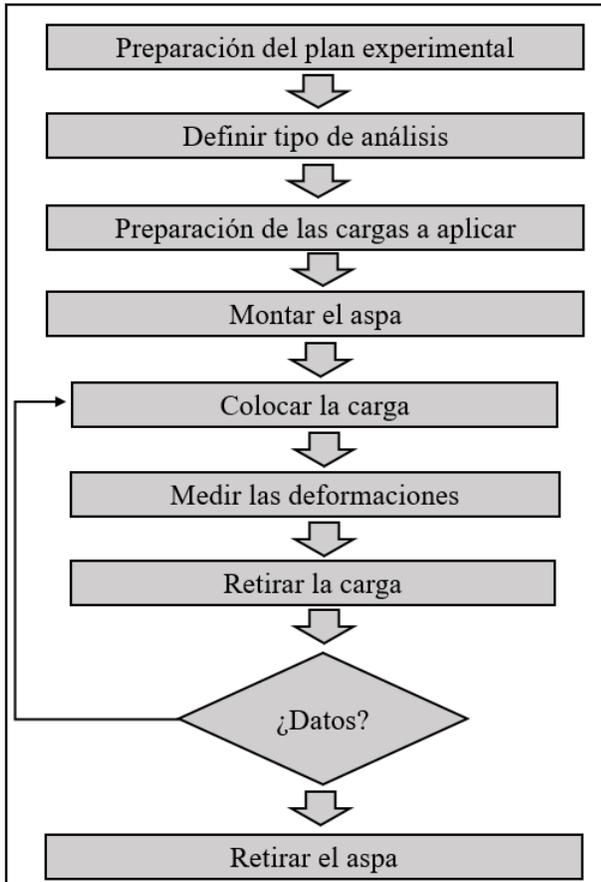


Figura 11. Metodología para las pruebas de laboratorio.

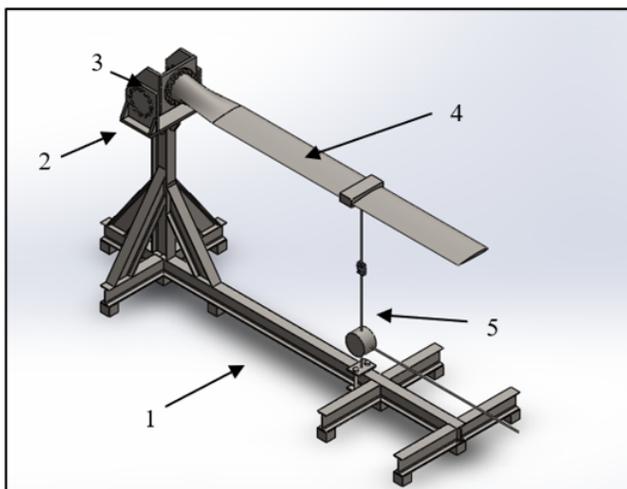


Figura 12. Banco de pruebas estáticas y de fatiga.

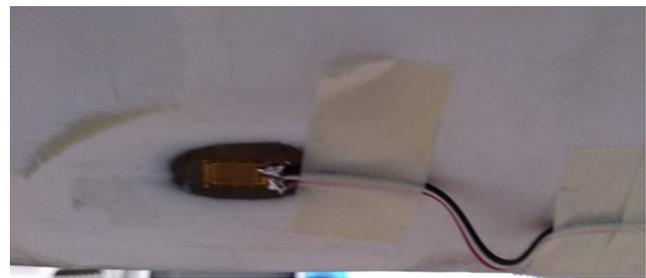


Figura 13. Galga instalada en el álabe.



Figura 14. Indicador de tensión y registrador modelo P3.

Resultados

Se llevaron a cabo 30 mediciones para cada modo de carga, sensando de cada galga, su temperatura, humedad y temperatura ambiente. Para evitar la fatiga en el álabe, se decidió realizar las mediciones en dos días.



Figura 15. Galgas instaladas en el álabe para las pruebas a Flapwise.

Las Tablas 7 y 8 muestran las medidas de dispersión y de tendencia central de los resultados obtenidos para las mediciones a Flapwise (**Figura 15**).

Tabla 7. Resultados para el día 1, se realizaron 17 mediciones.

Hipótesis de carga A: Flapwise				
Medidas de tendencia central y dispersión	Galga			
	A	B	C	D
Media ($\mu\epsilon$)	54.76	20.76	-177.47	-191.11
Moda ($\mu\epsilon$)	54	20	-183	-194
Desviación estándar ($\mu\epsilon$)	2.75	2.04	5.14	4.44
Coefficiente de variación	5.02	9.85	2.90	2.32

Tabla 8. Resultados para el día 2, se realizaron 13 mediciones.

Hipótesis de carga A: Flapwise				
Medidas de tendencia central y dispersión	Galga			
	A	B	C	D
Media ($\mu\epsilon$)	57.07	22.38	-185.46	-197.15
Moda ($\mu\epsilon$)	57	24	-186	-198
Desviación estándar ($\mu\epsilon$)	0.64	1.15	1.45	2.93
Coefficiente de variación	1.12	6.71	0.78	1.49



Figura 16. Galgas instaladas en álabe para pruebas a Edgewise.

Tabla 9. Resultados para el día 1, se realizaron 15 mediciones.

Hipótesis de carga A: Edgewise				
Medidas de tendencia central y dispersión	Galga			
	A	B	C	D
Media ($\mu\epsilon$)	-2.73	20.93	12.13	2.86
Moda ($\mu\epsilon$)	-3	21	12	3
Desviación estándar ($\mu\epsilon$)	0.59	0.45	0.51	0.74
Coefficiente de variación	21.71	2.18	4.25	25.92

Las galgas para los modos Edgewise se muestran en la **Figura 16**. Los resultados obtenidos para el modo Edgewise de la hipótesis A se muestran a continuación en las **Tablas 9 y 10**.

Tabla 10. Resultados para el día 2, se realizaron 15 mediciones.

Hipótesis de carga A: Edgewise				
Medidas de tendencia central y dispersión	Galga			
	A	B	C	D
Media ($\mu\epsilon$)	-2.93	21.06	12.13	2.8
Moda ($\mu\epsilon$)	-3	21	12	3
Desviación estándar ($\mu\epsilon$)	0.59	0.45	0.35	0.67
Coefficiente de variación	20.23	2.17	2.89	24.14

Por último, se muestran los resultados para la hipótesis H, también a Edgewise en las **Tablas 11 y 12**:

Para el modo de carga de Hipótesis A: Flapwise, las galgas A y B, registraron mediciones de tensión, como era de esperarse de acuerdo a la simulación numérica, las galgas C y D registraron mediciones de compresión, de acuerdo a la simulación numérica, la galga C debería registrar mediciones de tensión, cosa que no sucedió, la galga D si se está comportando de acuerdo a lo esperado (a compresión), ambas galgas mostraron los valores más altos debido a la cercanía al punto de aplicación de la carga.

Tabla 11. Resultados para el día 1, se realizaron 15 mediciones.

Hipótesis de carga H				
Medidas de tendencia central y dispersión	Galga			
	A	B	C	D
Media ($\mu\epsilon$)	-20.06	76.66	38.93	-2.8
Moda ($\mu\epsilon$)	-20	74	39	-2
Desviación estándar ($\mu\epsilon$)	0.79	1.17	0.88	0.77
Coefficiente de variación	3.98	1.59	2.26	27.66

Para los modos de análisis Edgewise, las galgas A, B y C tuvieron el mismo comportamiento, tanto para la hipótesis A como la H, la galga D fue la única que se comportó de manera distinta, a tensión en la hipótesis A y a compresión en la H.



Tabla 12. Resultados para el día 2, se realizaron 15 mediciones.

Hipótesis de carga H				
Medidas de tendencia central y dispersión	Galga			
	A	B	C	D
Media ($\mu\epsilon$)	-19.33	72.73	38.86	-2.53
Moda ($\mu\epsilon$)	-19	74	39	-2
Desviación estándar ($\mu\epsilon$)	1.34	1.53	0.74	1.18
Coefficiente de variación	6.95	2.10	1.91	46.86

El coeficiente de variación es bajo en general (salvo en un par de ocasiones) lo que nos indica que las pruebas se llevaron a cabo de manera homogénea y que hay reproducibilidad en el experimento. Los valores de desviación estándar más altos se dieron para la Hipótesis A: Flapwise, donde se dieron los valores de deformación más altos, esto nos indica que, a mayores valores de deformación, mayor será la dispersión de los datos y viceversa.

Conclusiones

Fue posible realizar la simulación numérica y ensayos estructurales a un álabe de doble raíz para una turbina de baja potencia empleando las hipótesis de carga que describe la norma IEC 61400-2. De acuerdo a los valores obtenidos tanto de esfuerzo mediante la simulación como de microdeformaciones obtenidas mediante extensometría, se puede concluir que el álabe es apto para trabajar en condiciones sin que se vea comprometida su integridad estructural.

Como se pudo observar en el presente trabajo, la simulación numérica es un paso fundamental previo a la hora de diseñar álabes de turbinas, ya que los resultados que nos arroja son claves para poder realizar los ensayos estructurales en laboratorio.

Cabe destacar que, para este tipo de álabes de doble raíz a la hora de hacer los ensayos en modo Flapwise, hay que tener mucha precaución en la zona de unión de la doble raíz, ya que es la que presentó los mayores valores de microdeformaciones ($-407.92 \mu\epsilon$), además, presentó el esfuerzo máximo de Von Mises (86.135 MPa). Caso contrario en las hipótesis a Edgewise, donde prácticamente todo el esfuerzo lo presentó la raíz principal y los valores de

microdeformaciones fueron de casi cero en la doble raíz tanto para la hipótesis A como la H.

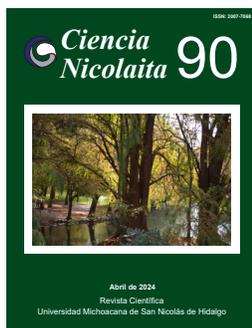
Los resultados mayores de deformación medidos en laboratorio mediante extensometría, se dieron en la Hipótesis A: Flapwise como era de esperarse. Una consideración de suma importancia es que el módulo de Young empleado en la simulación para la fibra de vidrio/epoxi difiere del módulo de Young real del aspa analizada, esto causa discrepancia entre los valores obtenidos con los distintos métodos. Habría que hacer una caracterización de la resina empleada para la fabricación del álabe, pero por cuestiones de tiempo no fue posible.

Los valores obtenidos en el laboratorio nos indican que el álabe trabajará de forma segura en funcionamiento, ya que los valores obtenidos están lejos de los valores de fallo. Por lo tanto, podemos concluir que la norma IEC 61400-2 se puede aplicar perfectamente a este tipo de álabes de doble raíz siguiendo la metodología planteada para su análisis estructural.

Referencias

- Barnes RH, Morozov EV, Shankar K (2015). Improved Methodology for design of low wind speed specific wind turbine blades. *Composite Structures* 119: 677-684.
- Burton T, Sharpe D, Jenkins N, Bossanyi E (2001). WIND ENERGY HANDBOOK, by John Wiley & Sons, Ltd.
- Castillo Sebastián E (2016). Análisis de criterios de fallo para materiales compuestos, tesis, Universidad Politécnica de Valencia.
- Manwell JF, McGowan JG, Rogers AL (2009). Wind Energy Explained Theory, Design and Application, Second Edition. John Wiley & Sons Ltd.
- Marin Tellez P (2020). Simulación y pruebas de laboratorio de un aspa de turbina de viento de 600 W de acuerdo a la Norma IEC-61400-2, UMSNH.
- Monje C (2011). Metodología de la investigación cuantitativa y cualitativa guía didáctica, Neiva, Colombia: Universidad Surcolombiana.
- Norma Europea EN 61400-2:2015 (2015). que a su vez adopta la Norma Internacional IEC 61400-2.
- López Garza V *et al.* (2018). Análisis preliminar estructural de un álabe de doble raíz de materiales compuestos para una turbina eólica de 3Kw. *Revista de Aplicaciones de la Ingeniería* 5-17: 22-30.

- López Garza V (2020). Diseño y manufactura de álabes de turbinas de viento de eje horizontal de baja capacidad para bajas velocidades de viento, CIATEQ.
- Pérez Juárez E (2019). Construcción de una máquina de ensayo a fatiga para álabes de aerogeneradores de baja capacidad. UMSNH.
- Pitteloud Jean-Daniel, Gsänger S (2017). World Wind Energy Association. Small Wind World Report small wind report. WWEA, Bonn, Germany.
- SENSITEC S.A. de C.V. (2016). Extensometría Eléctrica.
- Wood D (2011). Small Wind turbines, Analysis, Design, and Application. SpringerVerlag London Limited.



Ciencia Nicolaita 90

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Revisión hidráulica e hidrológica de la lluvia del 22 de octubre de 2018 en Morelia empleando análisis forense

Hydraulic and hydrological review of the rain of October 22, 2018 in Morelia using forensic analysis

Jorge E. Ochoa García y Juan Pablo Molina Aguilar*

Para citar este artículo: Ochoa García JE, Molina Aguilar JP (2024). Revisión hidráulica e hidrológica de la lluvia del 22 de octubre de 2018 en Morelia empleando análisis forense. *Ciencia Nicolaita* 90: 127-142.
DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi90.744>

Historial del artículo



Recibido: 17 de agosto de 2023
Aceptado: 7 de diciembre de 2023
Publicado en línea: abril 2024



Ver material suplementario



*Correspondencia de autor: juan.molina@umich.mx, ORCID 0000-0002-9607-6274



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Revisión hidráulica e hidrológica de la lluvia del 22 de octubre de 2018 en Morelia empleando análisis forense

Hydraulic and hydrological review of the rain of october 22, 2018 in Morelia using forensic analysis

Jorge E. Ochoa García y Juan Pablo Molina Aguilar*

Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Avenida Francisco J. Múgica S/N, Edificio "C", Ciudad Universitaria. Morelia, Michoacán.

Resumen

En el año 2018, el paso del Huracán Willa por territorio nacional ocasionó una tormenta que afectó Morelia, dejando inundaciones y encharcamientos en calles y avenidas principales de la ciudad, particularmente en colonias de la zona sur - oriente. El presente trabajo tuvo por objeto realizar la modelación hidrológica de la zona afectada, identificando y representando el comportamiento del flujo durante y después de la tormenta, complementándose con el estudio del contexto socioeconómico mediante un análisis forense, definiéndose las afectaciones demográficas y poblacionales. El análisis simultáneo de ambos enfoques mostró el periodo de retorno de la tormenta, acorde con el régimen pluviométrico de la zona de estudio, permitiendo establecer recomendaciones para mejorar la resiliencia en la capital michoacana.

Palabras clave: Análisis forense, modelación hidrológica, IBER 5, tormenta, inundación.

Abstract

In 2018, the path of Hurricane Willa through the national territory caused a storm that affected Morelia, leaving flooding and waterlogging in main streets and avenues of the city, mainly in colonies of the south-east zone. The present work had the objective of performing the hydrological modeling of the affected area, identifying and mapping the flow pattern during and after the storm, complemented with the study of the socioeconomic context by performing a forensic analysis and defining demographic and population effects. The simultaneous analysis of both perspectives showed the return period of the storm, according to the rainfall regime of the study area, allowing the establishment of recommendations to improve resilience in the capital city of Michoacán.

Keywords: Forensic analysis, hydrologic modeling, IBER 5, storm, flood.



Introducción

Las inundaciones son la respuesta de un espacio físico ante un fenómeno hidrometeorológico que, a nivel internacional cobra cada vez más importancia e impacto. Se estima que las mismas son posiblemente la causa más importante en pérdidas económicas en lo referente a fenómenos naturales, siendo además la más común mundialmente (Wang *et al.*, 2011).

De acuerdo con la OECD (2016), las inundaciones a nivel mundial superan pérdidas de 40,000 millones de dólares anualmente. Bajo ese panorama, se presupone un incremento en el número de personas vulnerables a los desastres relacionados con las inundaciones para el año 2050 (UNESCO World Water Assessment Programme, 2012), esto en conjunto con el incremento de la población en zonas propensas a inundaciones, por el cambio climático y por el incremento en el nivel de los océanos y mares.

En México, las inundaciones provocan daños temporales y permanentes en los sectores agrícola, comercial, industrial, educativo y habitacional. El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) identificó en el año 2016 que, de todas las pérdidas provocadas por eventos naturales, el 86% fue debido a fenómenos hidrometeorológicos. De esa cantidad, más del 70% se debió a la manifestación de intensas lluvias que provocaron a su vez inundaciones en el país. En este sentido actualmente se registran más de 120 defunciones relacionadas con esta problemática, misma que también provoca más de 5,000,000 de personas afectadas, 111,000 damnificados, 23,155 viviendas dañadas, 108 escuelas afectadas y 586 unidades económicas dañadas (CENAPRED, 2016; Vázquez y Palazuelos, 2017). Al respecto, Pablo (2012) señala que las inundaciones pueden clasificarse de acuerdo a diversos parámetros, tales como su tiempo de duración y el mecanismo que las generan.

La ciudad de Morelia no es ajena a la problemática, ya que históricamente ha manifestado inconvenientes referentes a las inundaciones en algunas zonas identificadas, a pesar de que no es nueva la aparición de esta complicación, sí se ha venido intensificando con los años. Las inundaciones en Morelia han sido estudiadas en diversos campos de aplicación, no necesariamente en lo referente al entorno ingenieril.

En el mismo sentido, Arreygue *et al.* (2005), Arreygue (2008) y Arreygue-Rocha *et al.* (2012)

realizaron estudios hidrológicos y geomorfológicos que se presentan en las partes más susceptibles de la zona de estudio, ultimando que la morfología del río ha sido modificada en el pasado, trayendo como consecuencia que se presenten desbordamientos e inundaciones en lo que antes eran sus antiguos cauces, mismos que actualmente se encuentran compuestos por la presencia de infraestructura como calles, viviendas, fábricas y comercios, siendo las precipitaciones extremas los factores más importantes para los desbordamientos.

Los desbordes de los ríos Grande y Chiquito en Morelia son factores fundamentales para el anegamiento eventual en calles y avenidas importantes de la ciudad. Aunado a lo anterior, la conformación topográfica ha permitido que en los puntos más bajos se puedan presentar problemas de inundaciones, pero también, de manera notoria, la rápida conformación de asentamientos humanos sobre terrenos irregulares.

El crecimiento de la población ha provocado que se ocupen zonas que anteriormente habían sido de cultivo, ciénegas y depresiones naturales donde se captaba agua o bien se infiltraba a los mantos acuíferos, incluyendo las márgenes de ambos ríos (Hernández y Vieyra, 2014). La falta de una planeación urbana, la cual respeta las estipulaciones establecidas por el ordenamiento territorial para conocer cuáles son las restricciones territoriales, la segregación socio-espacial y socio-ambiental de los habitantes, la escasa responsabilidad de las autoridades y de sus instituciones de control y de la falta de conocimiento que se tuvo para el desarrollo de las áreas urbanas (Bernal, 2013), contribuyó en gran medida a que las circunstancialidades generadas por las inundaciones empeoraran.

Con base a lo antes señalado, el objetivo de este trabajo fue la comprensión de la inundación provocada por la tormenta ocurrida en la madrugada del 22 de octubre del año 2018 en las colonias ubicadas en la zona sur - oriente de la ciudad de Morelia. Considerando como herramientas el análisis forense, entendida como la reconstrucción de los eventos extremos a fin de definir las causas de su ocurrencia, después de estudiar los procesos hidrológicos involucrados y aplicar técnicas de investigación que muestren relaciones causa-efecto a partir de la evidencia recabada sobre los hechos en el sitio de estudio (Gutiérrez-López, 2022; Lischeid *et al.*, 2017; Ramírez Orozco, 2015) y la modelación hidrológica, teniendo en cuenta la precipitación to-

tal diaria y asignando distintos periodos de retorno para diferentes duraciones de tormenta, la cual fue provocada por la precipitación ininterrumpida generada por el huracán Willa de categoría 5 según la escala Saffir-Simpson.

Materiales y métodos

La zona de estudio, establecida como la delimitación geográfica del espacio, donde se lleva a cabo la modelación hidrológica y su correspondiente análisis forense, es aquel en el cual se consideran diferentes parámetros (capas de información), de tal forma que permitan conocer los aspectos físicos, geográficos, ambientales, climatológicos e hidrológicos del territorio analizado y que sea fundamental para discurrir en su vinculación con los materiales empleados y el resultado al que se espera llegar.

La zona de estudio, localizada en el municipio de Morelia, en el interior del estado de Michoacán, el cual forma parte de la región occidente de la República Mexicana, está delimitada por los paralelos 19°27'06" y 19°50'12" y meridianos 101°01'43" y 101°30'32", contando con un área de 146 km² que representan el 2% de la superficie del estado. Se demarcó de tal forma que se consideraron las colonias que se vieron afectadas por la tormenta

ocurrida el día 22 de octubre del año 2018 en la zona sur-oriente de la ciudad (**Figura 1**), siendo estas las siguientes: Nueva Jacarandas, Ventura Puente, Félix Ireta, La Loma, Electricistas, Bosque Camelinas, Camelinas, Chapultepec Sur, Oriente y Nueva Chapultepec.

La zona de estudio delimitada, respecto de los aspectos hidrológicos, se encuentra en la cuenca del Río Chiquito, perteneciente al sistema de cuencas de la región Lerma-Santiago. La cuenca abarca una superficie de casi 90 km² y se localiza en la zona suroriente de la ciudad de Morelia. En su interior se localiza el Río Chiquito, homónimo a la cuenca dentro de la cual se localiza la zona de estudio, que recorre de oriente a poniente la ciudad a partir de Cañadas del Rincón hasta unir sus aguas con las del Río Grande. El Río Chiquito rara vez se desborda dentro de la zona de estudio y dependiendo del lugar en su interior donde se hagan lecturas, el tirante del mismo no llega a sobrepasar los 40 cm durante los meses secos.

Su representación topográfica está caracterizada por la Loma de Santa María que se sitúa a más de 2,100 msnm, así como el cerro perteneciente a la localidad de Jesús del Monte que son las partes más altas, mientras que las partes más bajas son las correspondientes a las zonas cercanas al cauce del Río Chiquito, correspondiente a la urbanización en la ciudad en la cual se sitúan las colonias enlista-



Figura 1. Imagen satelital de la zona de estudio.



das previamente.

Para las colonias afectadas, el uso de suelo predominante es el de tipo complementario (suelo no natural o desprovisto de vegetación); por otro lado, en menor medida en la zona sur la Loma de Santa María concentra un uso de suelo forestal.

En Morelia, la vegetación más característica es el bosque de pino-encino, la cual representa poco más del 30% de su extensión. El pastizal inducido se encuentra ubicado en regiones presentes en el noroeste de la ciudad, aunque también en menor medida en las comunidades Loma de Santa María y El Durazno del sur de la ciudad, principalmente en pequeñas regiones donde no se encuentran asentamientos urbanos.

Como características meteorológicas o variables del estado atmosférico, consideradas en la zona de estudio, para esta investigación fueron la precipitación, la temperatura, la zona de heladas y la zona de granizadas.

La topografía de la región, fue considerada con base al Modelo de Elevación Digital (MED) del municipio de Morelia, que fue obtenido del Instituto Municipal de Planeación de Morelia (IMPLAN) con el cual fueron realizadas las curvas de nivel, haciendo énfasis en las colonias afectadas (**Figura 2a**). Por otra parte, la delimitación de la cuenca hidrológica que aporta escurrimiento superficial a la zona de estudio (**Figura 2b**) se realizó con base a información de la Biblioteca Digital de Mapas del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

Dentro del territorio municipal de Morelia se localizan 9 estaciones climatológicas, también conocidas como estaciones meteorológicas convencionales por sus siglas EMC (**Figura 3**) gestionadas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Cada una de ellas recibe el nombre de la comunidad o pueblo en el que se encuentran ubicadas, estando situadas dos dentro de la ciudad de Morelia y el resto en Jesús del Monte, San Miguel del Monte, Teremendo, Cointzio, Cuitzillo Grande, Santiago Undameo y Capula respectivamente, que son comunidades y tenencias del municipio.

Como se observa en la **Figura 3** y el estatus consignado en la **Tabla 1**, la estación 16081 Morelia, se sitúa en la zona de estudio y se encuentra operando, razón por la cual se consultó la información registrada en la fecha del evento pluviométrico a causa del Huracán Willa (**Tabla 2**).

Para conjuntar la modelación hidrológica con el análisis forense, se requirió información desde el ámbito socioeconómico de la zona que presentó daños por la inundación, obtenida de las bases de datos de INEGI. Se hizo énfasis en identificar los elementos dentro de este apartado al interior de la zona de estudio, identificando su ubicación por medio de mapas, mismos que se enfatizan en las colonias de la zona sur de la ciudad afectadas. En esta información, se incluyen los semblantes educativos, comerciales, de infraestructura, de salud, y de los programas de desarrollo que tienen influencia en la región (**Figura 4**).

Tabla 1. Ubicación y estatus de las EMC en el municipio de Morelia.

Código	Nombre	Situación	Coordenadas		Elevación (m)
			Longitud	Latitud	
16055	Jesús del Monte	Operativa	-101.1514	19.6517	2180
16080	Morelia (OBS)	Operativa	-101.1833	19.7	1912.7
16081	Morelia	Operativa	-101.1761	19.6886	1908
16114	San Miguel del Monte	Operativa	-101.1342	19.6203	1965
16254	Teremendo	Operativa	-101.4778	19.7833	2188
16022	Cointzio	Suspendida	-101.2811	19.625	2096
16028	Cuitzillo Grande	Suspendida	-101.1194	19.7667	1987
16120	Santiago Undameo	Suspendida	-101.32	19.6028	2130
16247	Capula	Suspendida	-101.3917	19.675	2097

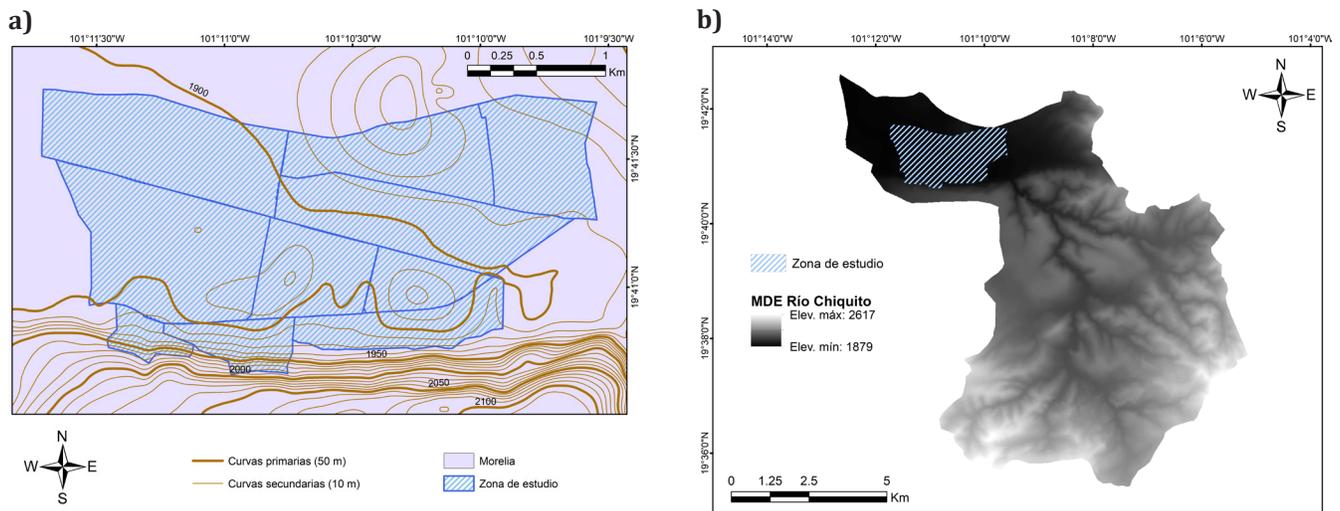


Figura 2. Zona de estudio a) curvas de nivel y b) cuenca hidrológica.

Tabla 2. Información climatológica registrada en la estación 16081 Morelia, antes, durante y después de la tormenta provocada por el huracán Willa.

Clave	Variable climatológica	Unidad	Valor registrado		
			Día 21	Día 22	Día 23
1	Temperatura ambiente 8 horas	°C	16	15	15.5
2	Temperatura mínima	°C	25	23	27
3	Temperatura máxima	°C	15	13	14.5
5	Precipitación 24 horas	mm	6.7	43.5	2.3
18	Evaporación 24 horas	mm	1.2	0.68	4.26
30	Días con tormenta	-	0	1	0

Estimación de tormenta de diseño

El método de estimación de la tormenta de diseño fue el desarrollado por Dick-Peschke (Gamarra, 2021) el cual cuenta con aceptación internacional. Es útil cuando se dispone únicamente de registro la precipitación máxima en 24 horas (P_{24}) registrada en mm y la relaciona con la duración de la tormenta (d) en minutos, es decir, permite la resolución de precipitaciones en periodos cortos de duración (P_d) en mm, con apenas dos variables.

$$P_d = P_{24} \left[\frac{d}{1440} \right]^{0.25}$$

Curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF)

Las curvas intensidad - duración - frecuencia (IDF) son el elemento de diseño que relacionan la intensidad de la lluvia (I), la duración de la misma (D) y la frecuencia (F) con la que se puede presentar en un lugar determinado, es decir, su probabilidad de ocurrencia o el periodo de retorno (Tr). Para su determinación se necesita contar con registros pluviográficos en el lugar de interés y seleccionar la lluvia más intensa de diferentes duraciones en cada año. Con la finalidad de realizar un estudio de frecuencia con cada una de las series así formadas, mediante la definición de los parámetros k , m y n se relacionan con el régimen pluviométrico y las características geográficas, así como climatológicas de la zona de estudio.

Estas series anuales se forman eligiendo, en cada año del registro, el mayor valor observado correspondiente a cada duración, obteniéndose con ello un valor para cada año y cada duración (MTC, 2008) y posteriormente se utilizan para construir hietogramas sintéticos que representen los picos más altos de la intensidad y el momento en el que se manifestaron.

$$i = \frac{k Tr^m}{d^n}$$

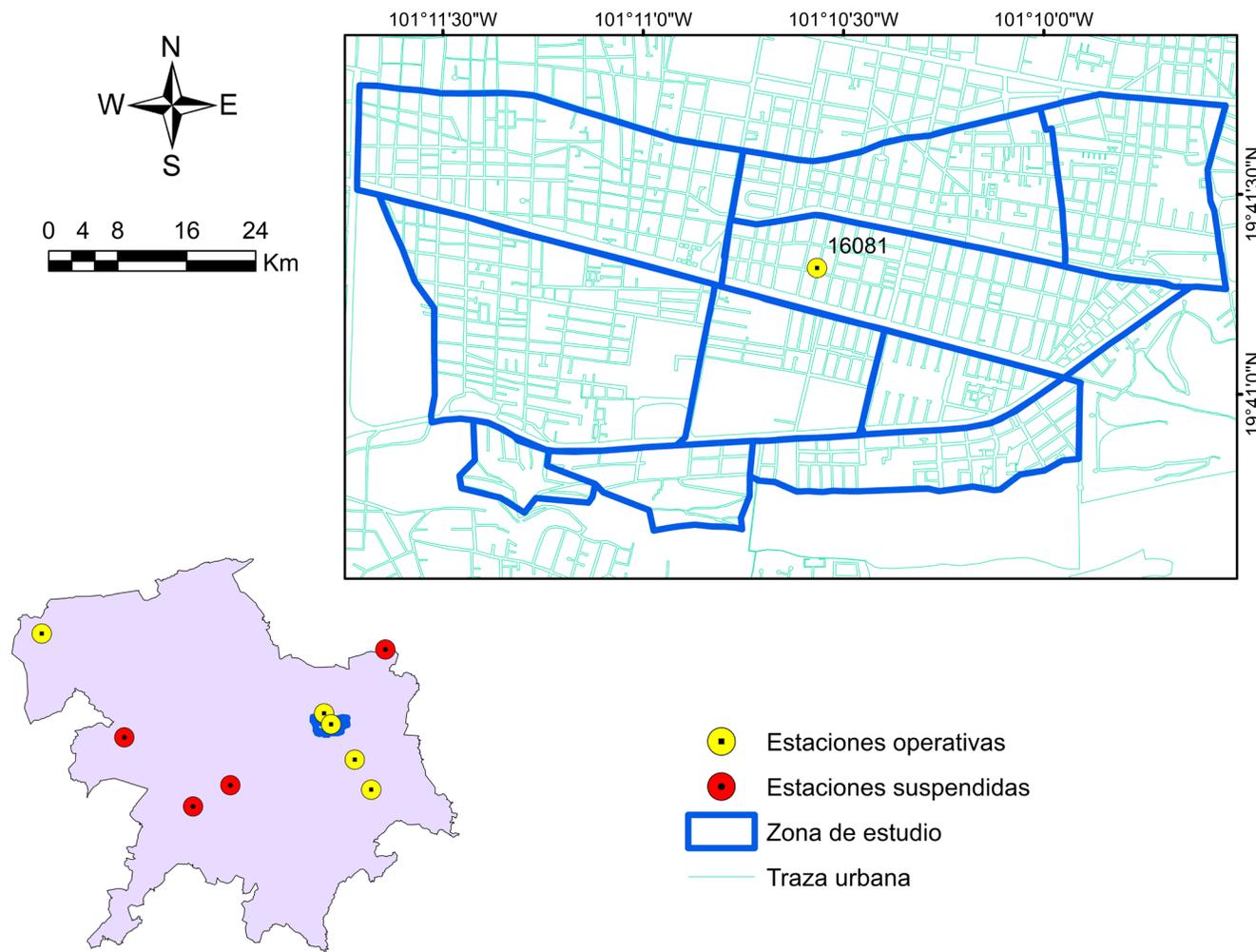


Figura 3. Ubicación de las EMC en el municipio de Morelia.

Hietograma de diseño por el método del bloque alterno

El hietograma de diseño, en términos de un T_r , es requerido en el programa IBER para el funcionamiento del comportamiento del flujo. Siendo IBER capaz de leer la información de la precipitación y la hora a la que se presentó, de modo que, respecto al intervalo de tiempo seleccionado y a las variables del coeficiente de rugosidad de Manning (n) y de escurrimiento (c), se pueda modelar el flujo superficial del agua sobre el enmallado.

El método de bloque alterno es una forma simple para su obtención empleando una curva IDF. El hietograma de diseño producido por este método, especifica la altura de precipitación que ocurre en n intervalos de tiempo sucesivos de duración Δt sobre una duración total de tormenta. Después de seleccionar el periodo de retorno de diseño, la intensidad es leída en una curva IDF

para cada una de las duraciones Δt , $2\Delta t$, $3\Delta t$, ..., y la altura de precipitación correspondiente se encuentra al multiplicar la intensidad y la duración (Chow *et al.*, 1988).

Tomando diferencias entre valores sucesivos de la altura de precipitación, se encuentra la cantidad de precipitación que debe añadirse por cada unidad adicional de tiempo Δt . Estos incrementos o bloques se reordenan en una secuencia temporal de modo que la intensidad máxima ocurra en el centro de la duración requerida y que los demás bloques queden en orden descendente alternativamente hacia la derecha y hacia la izquierda del bloque central para formar el hietograma de diseño (MTC, 2008; Paredes, 2015).

Funcionamiento del programa IBER

El software IBER tiene la capacidad de calcular el comportamiento del flujo a superficie libre

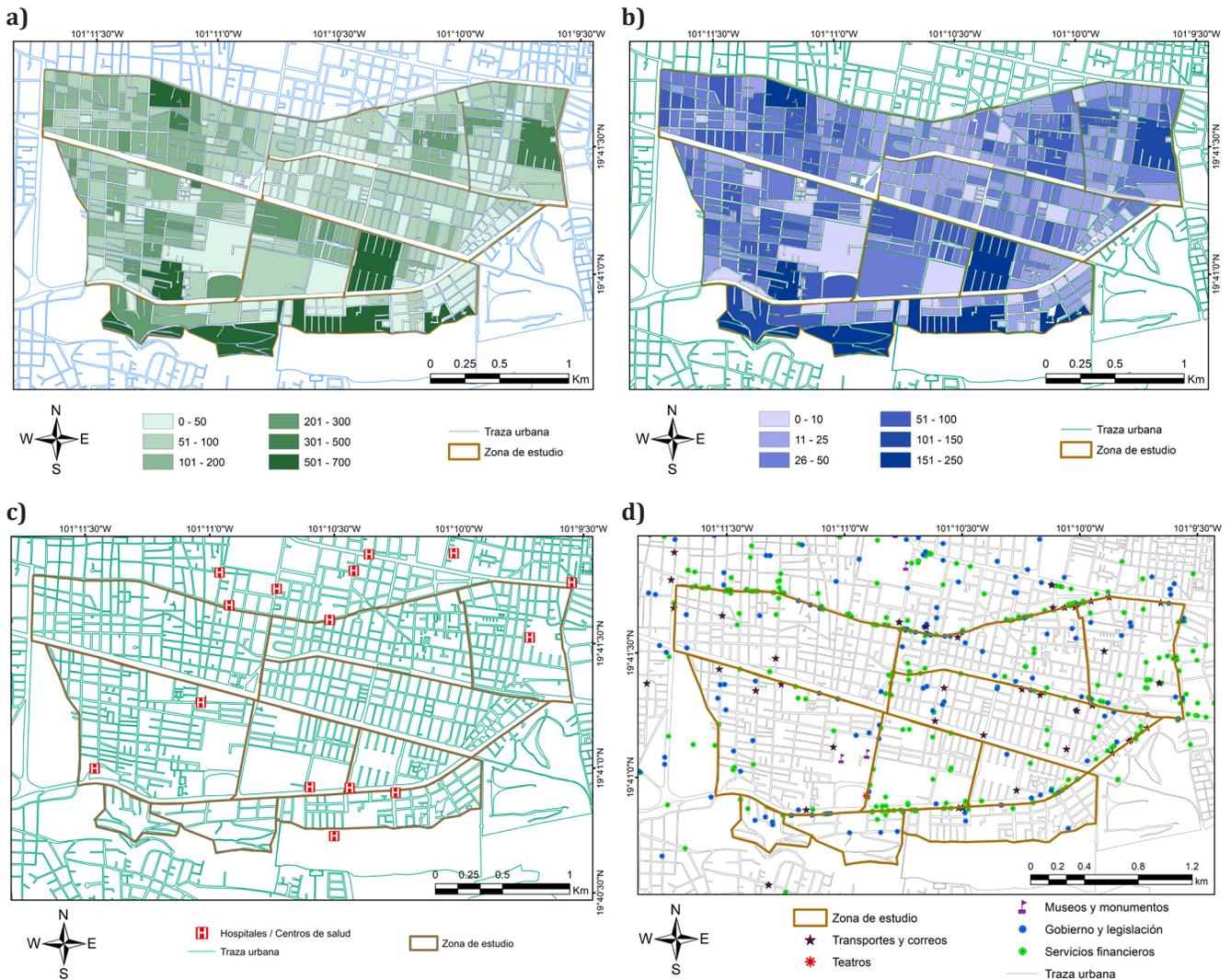


Figura 4. Información socioeconómica de la zona de estudio. a) Número de habitantes por manzana. b) Número de viviendas por manzana. c) Centros de salud, consultorios y hospitales. d) Ubicación de financieras y empresas de transporte.

mediante el sistema de ecuaciones diferenciales de Saint-Venant en dos dimensiones, contemplando los efectos de turbulencia, y rozamiento superficial por viento; las cuales dependiendo de si se cuentan con las condiciones suficientes, se pueden calcular bajo dichas condiciones u omitir. Bladé *et al.* (2014), simplifican la representación de las ecuaciones de Saint-Venant, considerando todas las variables representadas y expresándolas de la forma:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU_x}{\partial x} + \frac{\partial hU_y}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hU_y) + \frac{\partial}{\partial x}(hU_xU_y) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hU_y^2 + g\frac{h^2}{2}\right) =$$

$$= -gh\frac{\partial hZ_b}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}\left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial y}\right)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hU_x) + \frac{\partial}{\partial x}\left(hU_x^2 + g\frac{h^2}{2}\right) + \frac{\partial}{\partial y}(hU_xU_y) = gh$$

$$= -gh\frac{\partial hZ_b}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}\left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial y}\right)$$

En las ecuaciones anteriores h representa el tirante (m), por su parte U_x , U_y son las velocidades horizontales promediadas en profundidad (m/s), mientras que g considera la acción de la aceleración de la gravedad (m/s²), en el caso de Z_b se representa la cota del fondo (m), con τ_s se muestra la fricción en la superficie libre debida el rozamiento producido por el viento, de forma análoga τ_b muestra la fricción debida al rozamiento del fondo, en lo que concierne al flujo v_t considera la viscosidad turbulenta (m²/s) y ρ es la densidad (kg/m³).



La modelación del escurrimiento superficial producto del régimen pluviométrico empleando IBER, requiere la conformación de Redes Irregulares de Triángulos Rectángulos (Right-Triangulated Irregular Networks, RTIN por sus siglas en inglés) es un enmallado propuesto por Evans *et al.* (2001), el cual consiste en una representación de la superficie de la zona de estudio basado en un MDE. Es decir, IBER cuenta con la capacidad de crear una malla mediante la técnica RTIN a partir de un MDE convencional, a pesar de no contar con la capacidad de leer un formato MDE extraído directamente de la base de datos del INEGI.

Para que el programa pueda hacer efectiva la lectura de los datos ya existentes de un MDE, es preciso que el formato a ingresar con la información del terreno sea de tipo ASCII por sus siglas en inglés (American Standard Code for Information Interchange), mismo que se puede obtener a partir de un SIG como ArcGIS o mediante la descarga de los metadatos desde la biblioteca digital de mapas del INEGI, si es que no se requiere realizar un tratamiento previo a la información del terreno.

Parámetros temporales

Por parámetros de tiempo, se refiere a los elementos temporales que se involucran para la modelación de flujo IBER (Tabla 3). Para poder establecer el tiempo de análisis se tienen cuatro días desde el momento en el que se inició el registro de la lluvia en la zona de estudio hasta que el huracán Willa llegó a Sinaloa y se convirtió en depresión tropical (DT).

Tabla 3. Parámetros temporales asignados al programa IBER.

Fecha/hora	Parámetro temporal	Tiempo (s)	Observación
21/10/2018 22:00 p.m.	Instante inicial	0	
22/10/2018 05:00 a.m.	Tiempo máximo de simulación	25,200	Equivalentes a las siete horas de simulación de flujo
	Intervalo de resultados	900	Equivalentes a 15 minutos del intervalo de simulación

Condiciones hidrodinámicas iniciales

Para que no se presenten anomalías en la modelación del flujo, una vez ejecutado el programa con las variables establecidas, es imperioso ingresar los elementos hidrodinámicos ya presentes en la microcuenca y, en particular, en la zona de estudio, para que su presencia no pueda afectar el resultado obtenido.

Por lo anterior, las condiciones hidrodinámicas iniciales consisten en la determinación de la ubicación en la malla correspondiente a la zona de estudio de ríos, lagos, lagunas, estuarios, drenes, entre otros. Torres y Lucas (2014), indican que la sección transversal del Río Chiquito es de forma trapezoidal irregular, tiene una profundidad de aproximadamente 4 m hasta el fondo del cauce, un ancho de 3 m con un tirante de 15 cm en temporada de estiaje el cual incrementa hasta 40 cm en temporada de lluvias, los autores no establecieron la influencia de los fenómenos extraordinarios que afectan la ciudad. Por practicidad, el valor considerado para el enmallado RTIN fue de 40 cm en toda la extensión del río dentro de la zona de estudio, es decir, se consideró su comportamiento uniforme previo a la recepción de los escurrimientos superficiales asociados con la lluvia aportada por el huracán Willa.

Escurrecimiento superficial

El escurrimiento superficial es definido como el agua proveniente de la precipitación que se mueve sobre la superficie del suelo hasta llegar a los cauces de ríos dentro de la región, normalmente definidos por la letra S.

El modelo que fue definido por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (SCS por sus siglas en inglés), únicamente requiere conocer una variable previa para poder ser empleado, siendo así que su utilización resulta sencilla, definido con la ecuación:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

En donde CN es el número de curva de escurrimiento, cuyo valor resulta empírico, ya que se encuentra en función del uso de suelo y cualquier otro factor que pueda afectar al escurrimiento y a la retención del agua precipitada. El número de curva es un parámetro hidrológico que permite caracterizar el potencial de escorrentía en una cuenca hidrográfica y se determina a partir de

algunas características físicas del territorio como el tipo, la densidad y el tratamiento de las coberturas (NRCS, 2004; Díaz y Mercado, 2017), así como por el grupo hidrológico de suelo (GHS).

Incorporar tanto el GHS como el CN a subáreas pertenecientes a la microcuenca del Río Chiquito es complicado, pues se requiere conocer de información del suelo que permita entonces identificar los grupos de suelo y posteriormente a los mismos aplicar el número de curvatura. Para este trabajo de investigación, se decidió considerar la capa del uso de suelo y una imagen satelital georreferenciada de la zona de estudio para poder ubicar con mayor exactitud las áreas pertenecientes a los usos agrícola, urbano y suburbano, que no son aplicables por considerarse zona urbana sin espacios para uso exclusivo de vegetación.

Resultados

Como parte del análisis del régimen pluviométrico de la ciudad de Morelia, la estación 16081 permite obtener información suficiente, que en el proceso de la selección de función de distribución de probabilidad (*f_{dp}*). En la **Tabla 4**, se encuentran resumidos los resultados del valor de la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov, donde se destaca la distribución con el menor delta teórico, que representa la diferencia entre las probabilidades observada y estimada. Dicha prueba sirve para determinar cuál de las *f_{dp}* utilizadas se adapta más al comportamiento histórico de los datos, de modo que la escogida sirva para proyectar

Tabla 4. Delta teórico para cada una de las *f_{dp}* ajustadas.

FDP	$ F_0(x_m) - F(x_m) $
Normal	0.1207
Log-Normal 2 parámetros	0.0669
Log-Normal 3 parámetros	0.0684
Gamma 2 parámetros	0.0850
Gamma 3 parámetros	0.06813
Pearson Tipo III	Sin resultado. No se ajusta a las condiciones
Gumbel	0.0565
Log-Gumbel	0.0888

la información para diferentes *Tr* y con ayuda de la información de lluvia del día 22 de octubre, se pueda determinar su *Tr* específico.

Como la *f_{dp}* Gumbel es en la que menor delta teórico se presentó, es con ella con la cual se obtienen las precipitaciones probables para diferentes periodos de retorno (**Tabla 5**).

Con los resultados obtenidos y aplicando el método de Dick-Peschke, una vez asignado el periodo de retorno, la precipitación máxima de 24 horas y la duración de la tormenta, se pudo estimar la precipitación acontecida por el huracán Willa (**Figura 5**).

A fin de establecer el hietograma de precipitación, realizado el ajuste de la IDF, mediante el procedimiento sugerido por Aparicio Mijares (1992), se obtuvieron las constantes $k=384.1482$, $m=0.1705$, $n=0.7500$ que definen la ecuación de la intensidad:

$$I = \frac{384.1482Tr^{0.1705}}{d^{0.7500}}$$

La cual, al ser evaluada para un periodo de retorno equivalente a la precipitación registrada el día 22 de octubre, resulta en el siguiente hietograma de diseño (**Figura 6**).

Modelación hidrológica

Los resultados presentados corresponden al *Tr* estimado de 17.72 años equivalente a la precipitación acaecida el día 22 de octubre, que fue de 43.5 mm. Por otra parte, las imágenes presentadas de la modelación extraídas del programa IBER corresponden a ocho tiempos de

Tabla 5. Precipitaciones asignadas a diferentes periodos de retorno.

Tr (años)	hp (mm)
2	29.988
5	35.059
10	39.457
17.72	43.500
25	46.129
50	51.916
100	58.429

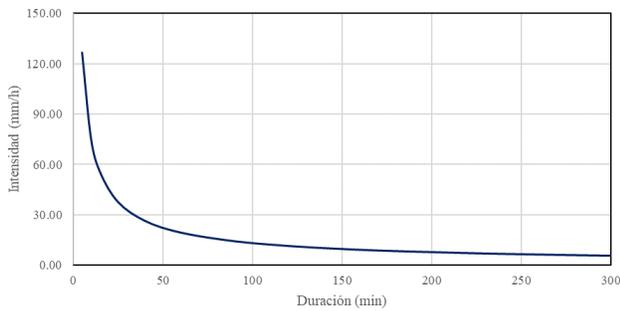


Figura 5. Curva IDF con una duración de 5 horas para un $Tr = 17.72$ años.

modelación; partiendo del hecho que se modelaron siete horas donde cinco de ellas forman parte de la duración de la tormenta, mientras que las otras dos complementarias se tomaron para observar más detalladamente el comportamiento del flujo en la cuenca después del fenómeno climatológico (**Figura 7**).

A partir de los resultados continuos obtenidos en el programa IBER, fue posible identificar la evolución de los encharcamientos en las principales avenidas de la zona de estudio (**Figura 8**). En el caso la avenida Ventura Puente, la cual tiene una ubicación norte a sur en la ciudad, se aprecia el incremento gradual a partir de los 43 minutos una vez que se inicia la acumulación del escurrimiento superficial. Respecto a la Av. Solidaridad, Boulevard García de León y Av. Camelinas, que cuenta con orientación oriente – poniente, los resultados sugieren un comportamiento análogo, en el cual el escurrimiento superficial sobre el Río Chiquito de Morelia rige el movimiento de los escurrimientos en exceso a partir de la Av. Solidaridad y hacía las dos avenidas restantes, lo que implica un movimiento simultaneo de los encharcamientos en dirección norte y sur.

Análisis forense del sitio

Una vez realizada la modelación hidrológica, se procedió a identificar información socio-económica relacionada al periodo temporal y espacial, a fin de conformar el análisis forense, mismo que se muestra en las **Figuras 9 - 12**.

Discusión

El análisis forense realizado en sus etapas de recopilación de eventos históricos y en la revisión de los programas de desarrollo, muestran que, en efecto,

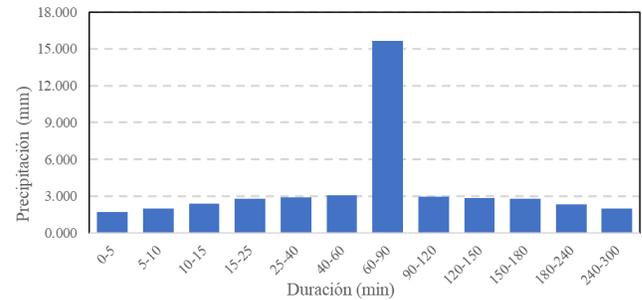


Figura 6. Hietograma de diseño para el $Tr = 17.72$ años.

el crecimiento de la población en zonas propensas a inundarse ha provocado que la problemática al día de hoy se siga conservando y, con el crecimiento de la ciudad en regiones igualmente vulnerables puede verse un empeoramiento de la situación.

En la modelación hidrológica se distingue un comportamiento en el flujo que tiende a descender a la zona baja de la microcuenca del Río Chiquito, justamente hacia la zona de estudio establecida en este trabajo, lo cual confirma que las condiciones topográficas de la ciudad también han incentivado en que se presenten inundaciones en avenidas importantes de la ciudad que corresponden a un alto índice participativo en lo competente al comercio y a zonas donde se concentra una alta cantidad de personas con dificultades de movimiento y, a su vez, presencia de hospitales, clínicas y centros médicos en general. Aunque en lo establecido en el análisis forense y en función de lo reportado por las autoridades, el Río Chiquito no se desbordó durante el paso del huracán Willa, lo cual no impidió que las calles aledañas al mismo resultaran damnificadas por la misma topografía de la región. Esta problemática registró sus principales afectaciones en las colonias aledañas a Lomas de Santa María.

En cuando a la modelación hidrológica, la misma mostró que para una intensidad equivalente a la precipitación acaecida en este estudio, las avenidas más importantes de la zona y, a su vez, de la misma ciudad en algunos puntos conflictivos se presentaron tirantes que oscilaron desde los 10 hasta los 40 cm, pudiendo variar el resultado con el comportamiento real dados los coeficientes de uso de suelo y la situación de la red de drenaje, ya que no es posible conocer su estado real durante la tormenta, por lo que el tirante registrado en la modelación es posible que sea mayor al que se obtuvo realmente. Por otra parte, y dadas las limitaciones del enmallado utilizado, no se contó con una capa de RTIN que fuera capaz de contar

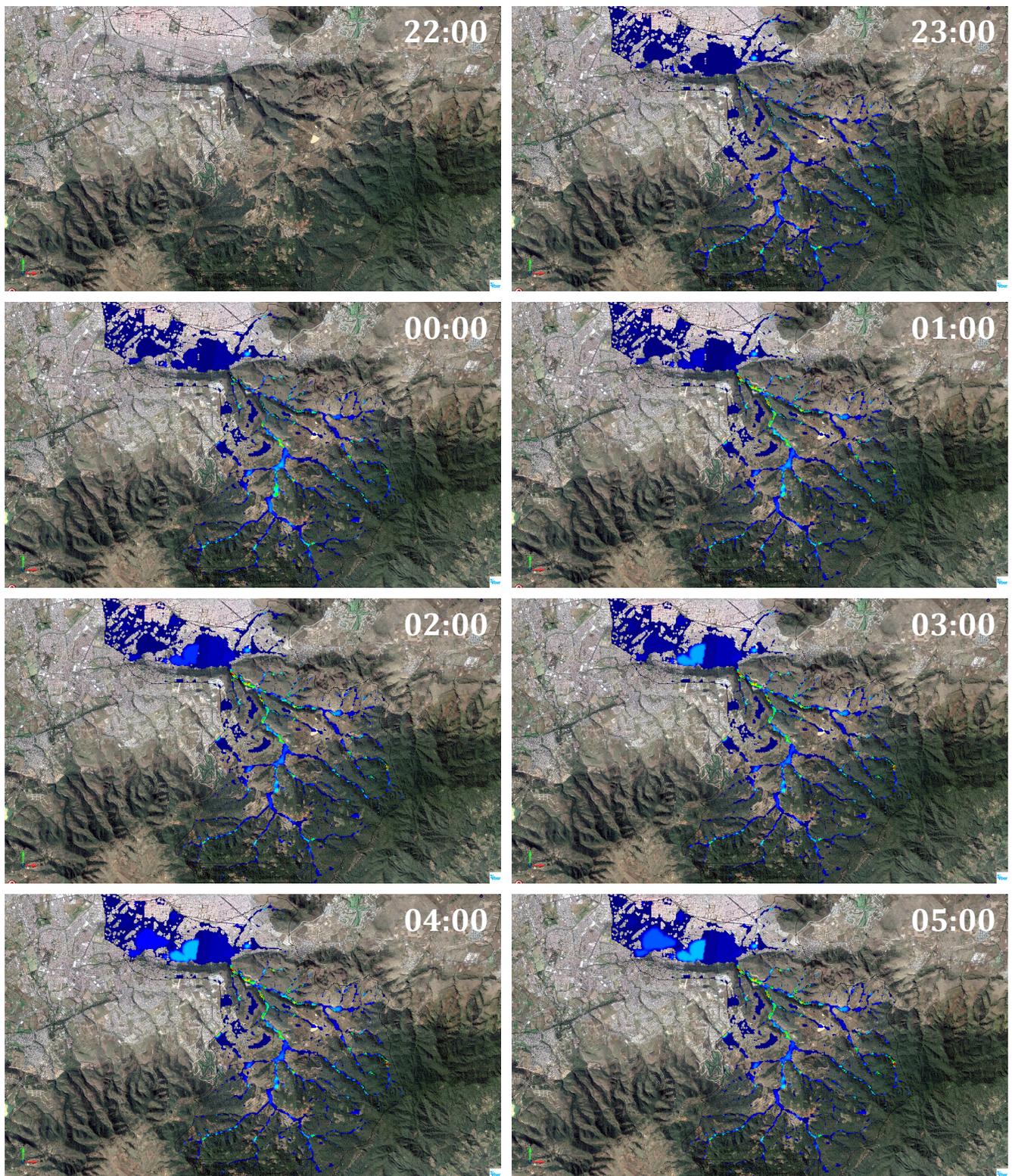


Figura 7. Resultado de la modelación hidrológica en la cuenca de aportación a la zona de estudio considerando la precipitación registrada a causa del huracán Willa a partir de las 22:00 pm del día 21 en intervalo horario hasta las 05:00 a.m. del día 22.

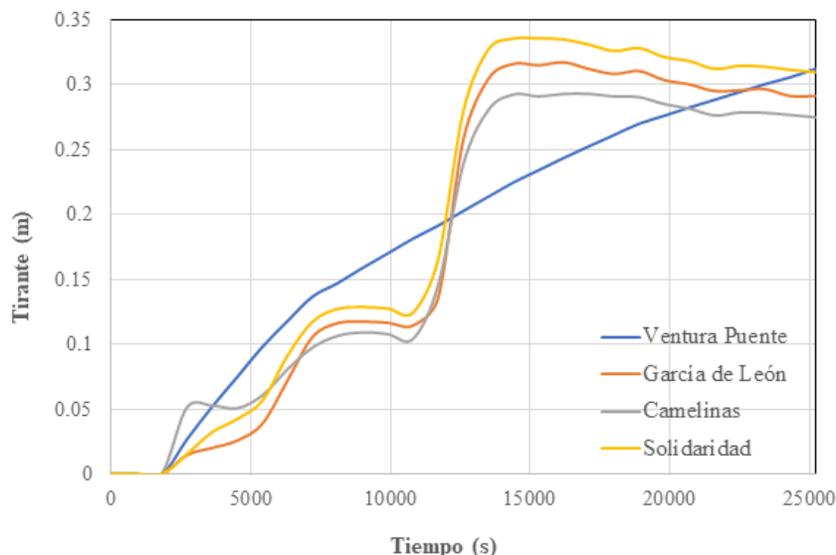


Figura 8. Evolución temporal de los encharcamientos en la zona de estudio.

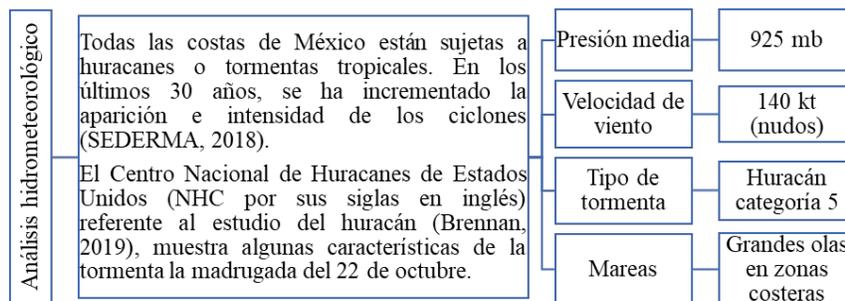


Figura 9. Análisis hidrometeorológico del huracán Willa.

con información perteneciente a la infraestructura a nivel de banqueta, ni mucho menos el detallado de las calles por lo que se muestran regiones inundadas pertenecientes a comercios, viviendas, centros de envíos, oficinas gubernamentales y demás.

Se sabe que la zona protegida de la Loma de Santa María estuvo en su momento resguardada bajo los estatutos de ANP hasta que el mismo fue revocado y se cambió a simplemente una zona protegida, la cual, a diferencia de la anterior, sí permite limitadamente la construcción de nuevos edificios con fines departamentales, lo que ha provocado que el cambio de uso de suelo de la región intensifique las inundaciones al verse diezmada la posibilidad de que el agua precipitada en la loma se infiltre y, en consecuencia, se estanque en la zona baja.

Con base a los resultados del análisis hidráulico e hidrológico, señalado en los párrafos anteriores, se logró establecer que la infraestructura civil de la zona afectada, carece de capacidad ante eventos

climatológicos cuyo periodo de retorno sea mayor a 17.72 años, el cual es un estándar muy bajo para las condiciones en las que se deben de realizar obras civiles. Esto quiere decir que, la falta de mantenimiento, así como de la modernización de los servicios públicos en función del periodo de vida útil ocasiona un decremento en las condiciones de diseño adoptadas, esto implica que se debe hacer una revisión periódica del funcionamiento en concordancia con el régimen pluviométrico actual, mismo que presenta rasgos tangibles del cambio climático y las alteraciones antropogénicas de la ciudad.

Lo anterior debe ser una acción paralela a las políticas públicas y la observancia de los instrumentos jurídicos que regula el comportamiento de la sociedad en cuestiones del manejo de los residuos sólidos y su disposición en sitios establecidos por las autoridades competentes que contribuyan a mantener en lo posibles las condiciones de la red de drenaje en la ciudad.

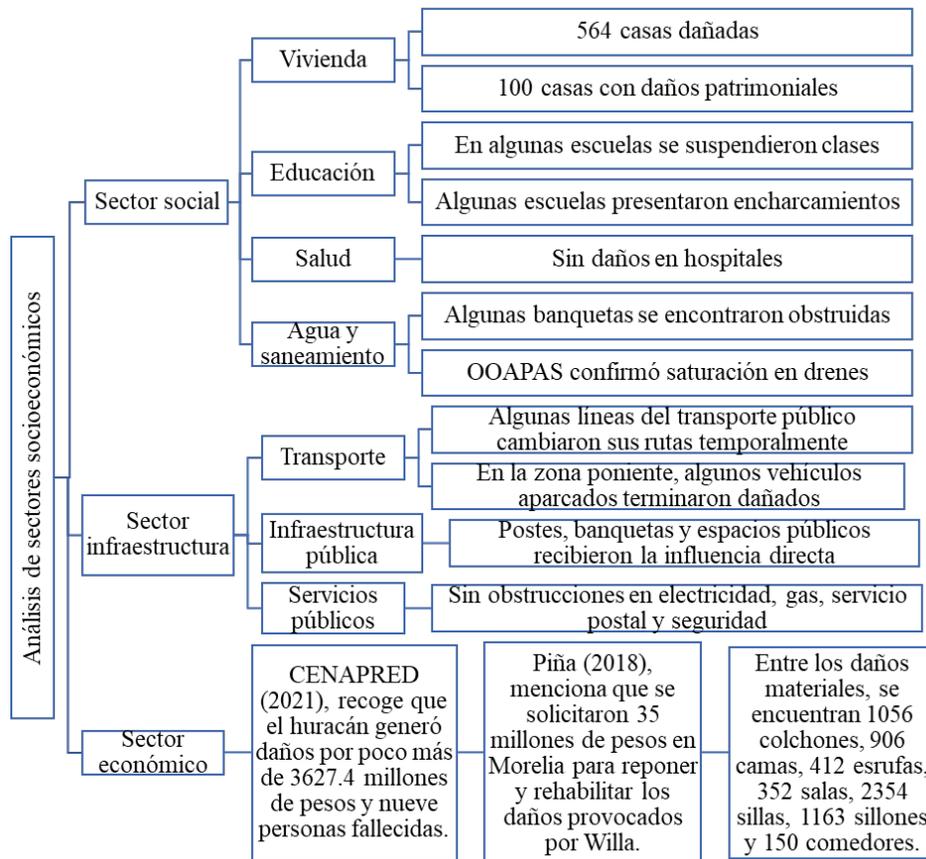


Figura 10. Análisis de los sectores socioeconómicos en la ciudad de Morelia.

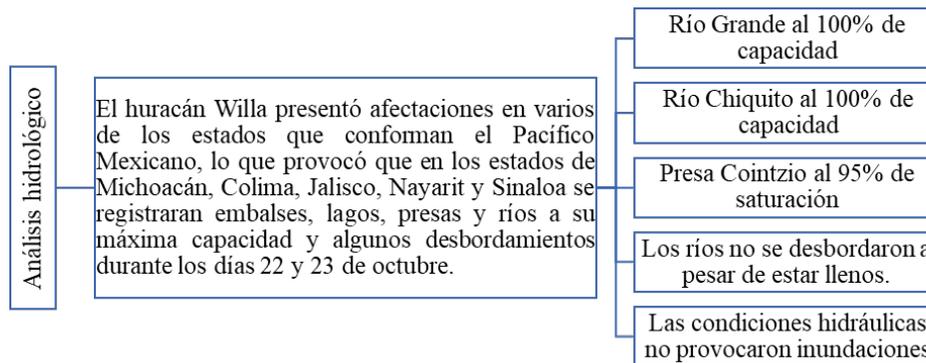


Figura 11. Análisis hidrológico en la ciudad de Morelia.

Conclusiones

Los planes y programas de acción, así como los atlas de riesgo vigentes consultados tanto del ámbito estatal como del municipal hacen mención de un sistema de alcantarillado deficiente, lo cual provoca que el funcionamiento del mismo no resulte completamente óptimo y, por lo tanto, ya no se pueda permitir el paso del agua hacia el mismo.

La red de drenaje, a diferencia de la presencia del Río Chiquito, sí resultó ser un problema durante el paso del huracán Willa puesto que en el análisis forense se recoge que, efectivamente, el mismo se mostró en su máxima capacidad y permitió que el agua precipitada y proveniente de las zonas altas de la microcuenca quedara estancada en algunas partes de la zona de estudio, en particular en las correspondientes a una topografía uniforme. El

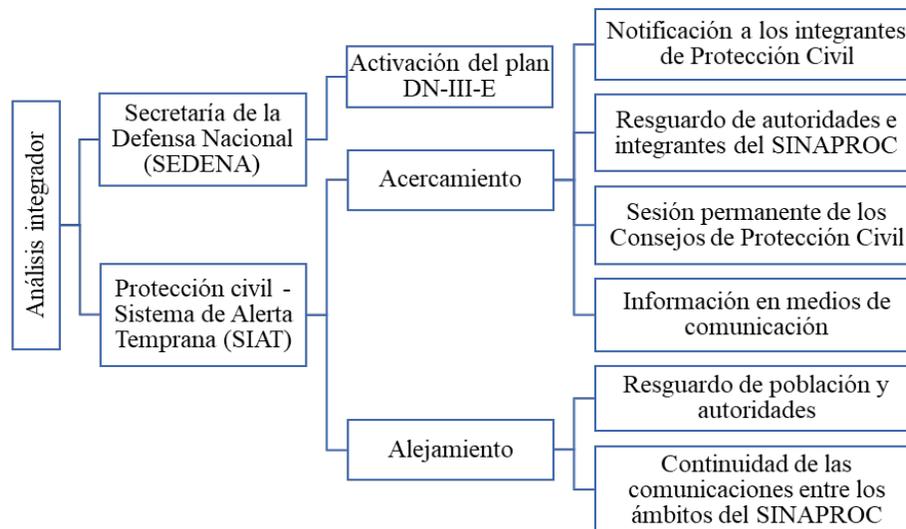


Figura 12. Resumen de causas y consecuencias de la tormenta en la zona de estudio.

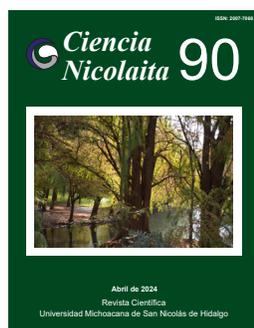
problema, aparte de la deficiente infraestructura con la que se cuenta al respecto al verse rebasados los Tr de diseño utilizados en su momento, se debe también a la cultura que se cuenta con la gestión de los residuos sólidos.

Se sugiere una actualización normativa de los periodos de retorno en términos de las nuevas condiciones climatológicas con que cuenta el país, en base a los enfoques de cambio climático, dado que mucha infraestructura hidráulica e hidrológica se encuentra rebasada por las lluvias actuales no obstante a tener estas un Tr menor que el especificado en el diseño.

Referencias

- Arreygue E, Garduño V, Canuti P, Casagli N, Iotti A (2005). Riesgos Geomorfológicos e hidrológicos en la ciudad de Morelia, Michoacán, México. Depto. de Geología y Mineralogía IMM, UMSNH, Morelia. México.
- Arreygue-Rocha E (2008). Evaluación de las constantes inundaciones en la ciudad de Morelia, Michoacán, México. Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, UMSNH, Morelia. México.
- Arreygue-Rocha *et al.* (2012). Estudio de las inundaciones en la Ciudad de Morelia, Michoacán, México. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*. 103 - -110.
- Bernal Trejo EG (2013). La gestión urbano resiliente en la ciudad de Morelia, Michoacán. División de Estudios de Posgrado, Facultad de Derecho y Ciencias Administrativas, UMSNH. Morelia, México.
- Bladé E, Cea L, Corestein G, Escolano E, Puertas J, Vázquez-Cendón E, Dolz J, Coll A (2014). Iber: Herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería* 30(1): 1-10. doi:[10.1016/j.rimni.2012.07.004](https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004)
- Brennan, Michael J (2019) Hurricane Willa (EP242018). National Hurricane Center, Tropical Cyclone Report. National Oceanic and Atmospheric Administration.
- CENAPRED, Centro Nacional de Prevención de Desastres (2016). Atlas Nacional de Riesgos, Cobertura de atlas municipales. Disponible en <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/cob-atlas-municipales.html>.
- CENAPRED (2021). Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres. Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana. Centro Nacional de Desastres, México.
- Gutierrez-Lopez A (2022). Methodological Guide to Forensic Hydrology. *Water* 14(23). doi:[10.3390/w14233863](https://doi.org/10.3390/w14233863)
- Hernández J, Vieyra A (2014). Precariedad habitacional en el peri-urbano de la ciudad de morelia, una ciudad media mexicana: ¿El desastre nace o se hace? *Revista de Geografía Norte Grande* (47): 45-60. Disponible en https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S071834022010000300003&s-cript=sci_arttext

- Lischeid G, Balla D, Dannowski R, Dietrich O, Kalettka T, Merz C, Schindler U, Steidl J (2017). Forensic hydrology: what function tells about structure in complex settings. *Environmental Earth Sciences* 76(1). doi:[10.1007/s12665-016-6351-5](https://doi.org/10.1007/s12665-016-6351-5)
- OECD (2016). Financial management of food risk. Disponible en <https://www.oecd.org/finance/financial-management-of-flood-risk.htm>.
- Pablo Feliciano G (2012). Inundaciones en Zonas Urbanas. Facultad de Estudios Aragón. Superiores, Universidad Nacional Autónoma de México. San Juan de Aragón, México.
- Piña I (2018). Necesarios 35 mdp para solventar daños por "Willa". Recuperado el 13 de abril de 2022, de <https://www.contramuro.com/necesarios-35-mdp-para-solventar-danos-por-willa/>.
- Ramírez Orozco AI, Herrera Lozano A (2016). Forensic hydrology. En *Forensic Analysis-From Death to Justice*. IntechOpen. doi:<http://dx.doi.org/10.5772/64616>
- SEDERMA (2018). Gaceta Ambiental, Revista publicación trimestral Año: 13 Número: 01/ enero-marzo 2019. Secretaría de Desarrollo Rural y Medio Ambiente. Subsecretaría de Medio Ambiente.
- UNESCO World Water Assessment Programme (2012). *United Nations world water development report 4: Managing water under uncertainty and risk*. Disponible en <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000215644>.
- Vázquez Correa Lorena; Palazuelos Covarrubias Israel, "Principales retos y pendientes ante las inundaciones en México", Mirada Legislativa, No. 138, Ciudad de México, Instituto Belisario Domínguez, Senado de la República, 21p. Disponible en <http://bibliodigitalibd.senado.gob.mx/handle/123456789/3791>.
- Wang Y, Li Z, Tang Z, Zeng G (2011). A GIS-Based Spatial Multi-Criteria Approach for Flood Risk Assessment in the Dongting Lake Region, Hunan, Central China. *Water Resources Management* 25(13): 3465-3484. doi:[10.1007/s11269-011-9866-2](https://doi.org/10.1007/s11269-011-9866-2)



Ciencia Nicolaita 90

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Indicadores de flexibilidad de madera laminada, densificada y reforzada con fibra de carbono

Flexibility indicators of laminated, densified and carbon fiber reinforced wood

Javier Ramón Sotomayor Castellanos*, Koji Adachi, Kayo Kudo

Para citar este artículo: Sotomayor Castellanos JR, Adachi K, Kudo K (2024). Indicadores de flexibilidad de madera laminada, densificada y reforzada con fibra de carbono. *Ciencia Nicolaita* 90: 143-156.

DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi90.782>

Historial del artículo



Recibido: 11 de diciembre de 2023

Aceptado: 26 de febrero de 2024

Publicado en línea: abril 2024



Ver material suplementario



***Correspondencia de autor:** javier.sotomayor@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Indicadores de flexibilidad de madera laminada, densificada y reforzada con fibra de carbono

Flexibility indicators of laminated, densified and carbon fiber reinforced wood

Javier Ramón Sotomayor Castellanos^{1*}, Koji Adachi², Kayo Kudo³

¹ Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. ORCID: 0000-0002-1527-8801. E-mail: javier.sotomayor@umich.mx

² Instituto de Tecnología de la Madera, Universidad Prefectoral de Akita, Japón. ORCID: 0000-0002-9962-5750

³ Instituto de Tecnología de la Madera, Universidad Prefectoral de Akita, Japón.

Resumen

En este trabajo se determinaron los módulos de elasticidad y de ruptura, así como los índices de ductilidad y de flexibilidad de la madera de *Cryptomeria japonica*. Se prepararon probetas de madera sólida y densificada, se laminaron con resina epoxi y se reforzaron con fibra de carbono. Se realizaron pruebas de flexión estática en las direcciones radial y tangencial respecto a la dirección transversal de la carga. El densificado, laminado y reforzado de la madera de *C. japonica* incrementa su módulo de elasticidad y de ruptura. En contraste, estas modificaciones disminuyen sus índices de ductilidad y de flexibilidad. En el mismo sentido, los parámetros determinados en la dirección tangencial son mayores que los determinados en la dirección radial.

Palabras clave: módulo de elasticidad, módulo de ruptura, índice de ductilidad, índice de flexibilidad, madera de *Cryptomeria japonica*.

Abstract

In this report it was determined the modulus of elasticity, rupture, ductility and flexibility indices of *Cryptomeria japonica* wood. Solid and densified wood specimens were prepared, laminated with epoxy resin, and reinforced with carbon fiber. Static bending tests were performed in the radial and tangential directions with respect to the transverse direction of loading. The densification, laminating and reinforcement of *C. japonica* wood increases its modulus of elasticity and modulus of rupture. In contrast, these modifications decrease its ductility and flexibility indices. In addition, the parameters determined in the tangential direction are higher than those determined in the radial direction.

Keywords: modulus of elasticity, modulus of rupture, ductility index, flexibility index, *Cryptomeria japonica* wood.

*Autor de correspondencia: javier.sotomayor@umich.mx
Copyright © Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Introducción

Los módulos de elasticidad y de ruptura, así como los índices de ductilidad y de flexibilidad en la madera laminada, densificada y/o reforzada dependen de varios factores, incluyendo la especie, la composición laminar, la intensidad del densificado, las características del adhesivo y las propiedades del material agregado para convertirla en madera de ingeniería (Frihart, 2009; Kliger *et al.*, 2016; Kandler *et al.*, 2018; Śliwa-Wieczorek *et al.*, 2021). De igual modo, las condiciones del procesamiento influyen en el comportamiento mecánico del material resultante y los usos que se le puedan dar en la elaboración de muebles y en la industria de la construcción (Irlle, 2019; Svoboda *et al.*, 2019).

Existen trabajos en los que se comparan las propiedades de la madera aserrada y la madera con algún tipo de modificación. Los hallazgos de estas investigaciones muestran qué respecto a la madera aserrada, la madera laminada reduce su heterogeneidad estructural (Kandler *et al.*, 2018); la madera densificada incrementa su resistencia mecánica (Gaff *et al.*, 2016); el empleo de resina epoxi consolida las conexiones de la madera laminada (Karaman *et al.*, 2021); y la incorporación de tejido de fibra de carbono mejora sus propiedades mecánicas (Wang *et al.*, 2019). La combinación de estas cuatro modificaciones resulta en un material compuesto de madera densificada-laminada (Sikora *et al.*, 2017) y/o reforzada (Schober *et al.*, 2015). Estas mejoras tecnológicas son evaluadas con sus indicadores de flexibilidad, por ejemplo, los módulos de elasticidad y de ruptura (Kretschmann y Hernández, 2006), el índice de ductilidad (Novosel *et al.*, 2021) y el de flexibilidad (Gaff *et al.*, 2016).

Las propiedades de flexibilidad de la madera de ingeniería están reportadas para vigas laminadas con dimensiones de empleo (Foraboschi, 2009; Manalo *et al.*, 2010; Gaff *et al.*, 2015) y vigas laminadas-reforzadas (Kliger *et al.*, 2016; Yusof y Rahman, 2017; Wang *et al.*, 2019; Wdowiak-Postulak y Brol, 2020; Saad y Lengyel, 2022). Entre otras técnicas de refuerzo, el uso de tejido de fibra de carbono para incrementar los módulos de elasticidad y de ruptura está reportado tanto para madera sólida (Yusof y Rahman, 2017), como para madera laminada (Śliwa-Wieczorek *et al.*, 2021) y para vigas laminadas de grandes dimensiones (Wdowiak-Postulak y Brol, 2020).

Otro tipo de investigaciones emplean probetas de pequeñas dimensiones y se enfocan en sus pro-

piedades físico-mecánicas y/o con configuraciones experimentales específicas para madera laminada (Bal, 2016; Sikora *et al.*, 2017; Sikora *et al.*, 2019), para madera densificada (Svoboda *et al.*, 2015; Bao *et al.*, 2017) y para madera reforzada (Svoboda *et al.*, 2019; Rescalvo *et al.*, 2020; Novosel *et al.*, 2021; Śliwa-Wieczorek *et al.*, 2021). En este contexto, es notoria la ausencia de estudios integrales sobre la flexibilidad de madera laminada, densificada y/o reforzada.

El objetivo de esta investigación fue determinar en probetas de madera sólida, laminada, densificada y/o reforzada, los siguientes parámetros: densidad, módulo de elasticidad, módulo de ruptura, índice de ductilidad e índice de flexibilidad. Para tal fin, se diseñó un experimento completamente al azar, homogéneo y balanceado, con datos derivados de pruebas de flexión estática de probetas de pequeñas dimensiones de la madera de *Cryptomeria japonica* (Thunb. ex L. f.) D. Don.

Materiales y métodos

Se adquirieron secciones de troncos de *C. japonica* en la Prefectura de Akita, Japón, con dimensiones de 200 mm de grueso, 300 mm de ancho y 1200 mm de longitud. El taxon botánico de la especie fue determinado en el Instituto de Tecnología de la Madera, de la Universidad Prefectoral de Akita, en Japón. Las secciones se recortaron en láminas de 10 mm, 20 mm y 40 mm de grosor por 150 mm de ancho y 410 mm de largo. Se prepararon seis tipos de placas de donde se recortaron las probetas, cabe mencionar que la madera estaba libre de defectos de crecimiento.

Para densificar la madera, las láminas se colocaron en una prensa Tensilon modelo TS-100 (Shon ai-Tekko, Japón), con capacidad de 100 toneladas. Las láminas se comprimieron en la dirección radial con una velocidad de prensado de 0,001 m min⁻¹ hasta alcanzar un espesor de 50% de su dimensión original (Coeficiente de densificado de 50%, Sotomayor, 2017). La presión aplicada osciló entre 30 y 50 MN m⁻². Una vez alcanzado el objetivo de densificado, las placas se mantuvieron en la prensa con temperatura de 120 °C durante 6 horas. Después de haber fabricado las placas, estas se enfriaron a temperatura de 20 °C por 12 horas.

Después de la fabricación de las placas, se recortaron probetas de 20 mm de ancho (base) por

20 mm de espesor (altura) y 320 mm de longitud (ISO 3129:2012, 2012) y se acondicionaron a temperatura de 20 °C y una humedad relativa del aire de 65% hasta que alcanzaron un peso constante. Las probetas se elaboraron solamente con madera de albura y se revisó que estuviesen libres de anomalías de crecimiento y de madera de duramen. Para cada configuración se prepararon tres probetas. La dirección radial y tangencial se definen respecto a los anillos de crecimiento en el plano radial-tangencial del plano leñoso (**Figura 1**).

Para fabricar las probetas laminadas, se unieron dos láminas de madera con dos capas de 22 g (200 g m⁻²) de resina epoxi E200 (Konishi, Japón; Guo *et al.*, 2022). La presión de compresión fue de 10 kg cm⁻², a una temperatura de prensado de 20 °C y con un tiempo de curado de 12 horas. Para reforzar las

probetas laminadas, se colocó en el plano radial-tangencial una capa de tejido de fibra de carbono (15 g; Nipon Oil Corporation, Japón).

De los extremos de las probetas, se recortaron segmentos de 60 mm de largo para determinar el contenido de humedad (ISO 13061-1, 2014) y la densidad aparente (ISO 13061-2, 2017). Se recortaron segmentos con dimensiones de 20 mm × 20 mm × 20 mm y las micrografías de sus secciones transversales fueron examinadas con un microscopio electrónico MiniscopeTM3030Plus (Hitachi, Japón). Sus fotografías macroscópicas fueron tomadas con un microscopio digital VHX-1000 (Keyence, USA).

Las pruebas de flexión estática consistieron en aplicar una fuerza a la probeta en medio de su portada de flexión hasta alcanzar su ruptura. Para tal fin, se empleó una máquina de ensayos universal

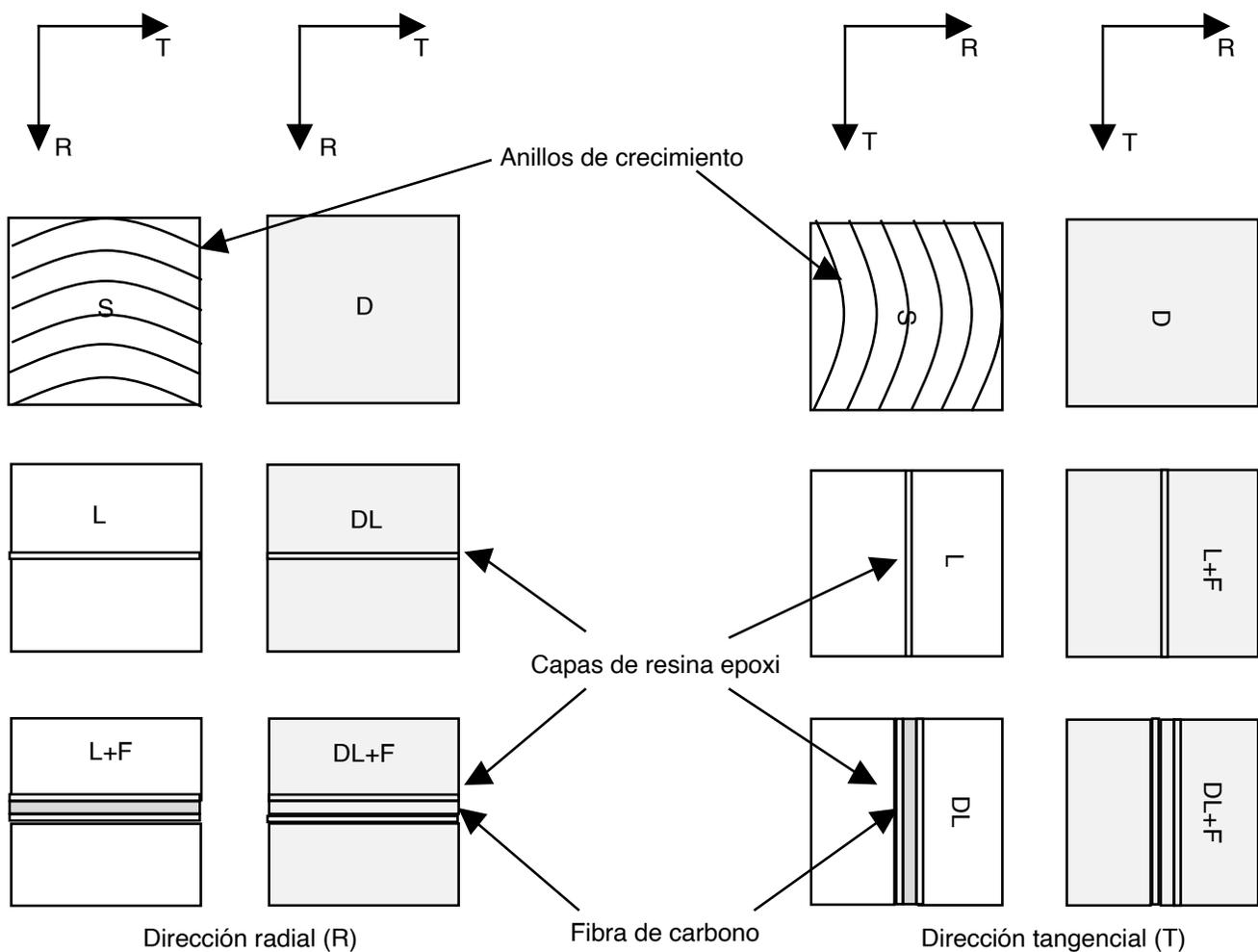


Figura 1. Configuraciones de las probetas. S = Madera sólida; L = Madera laminada; L+F = Madera laminada y reforzada; D = Madera densificada; DL = Madera densificada y laminada; DL+F = Madera densificada laminada y reforzada.

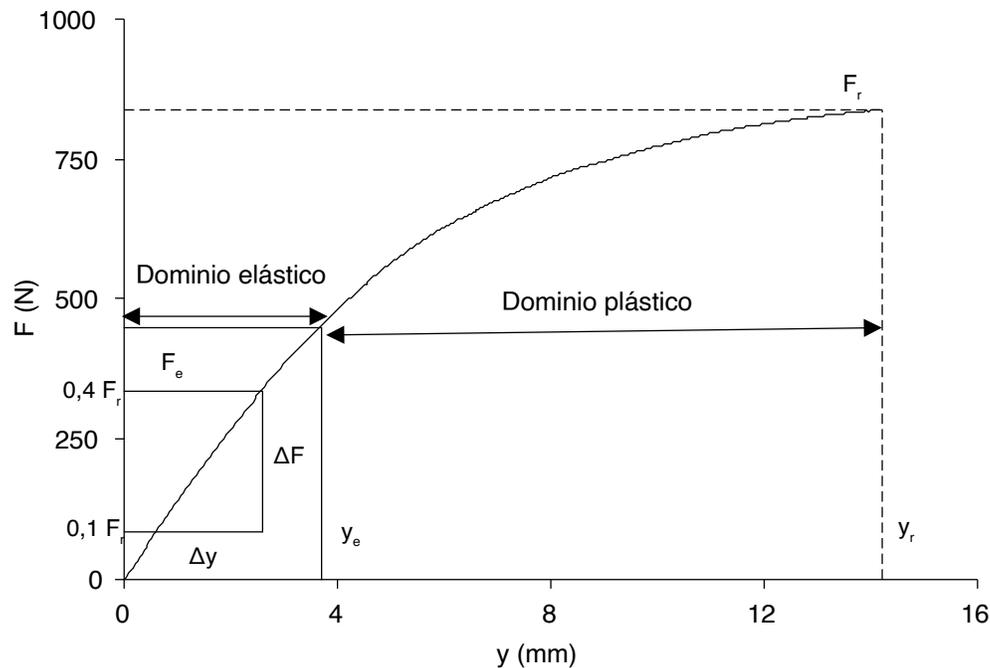


Figura 2. Diagrama fuerza (F) - deformación (y). La explicación de fórmulas y símbolos utilizados se presenta en la **Tabla 1**.

Tensilon Orientec RTC-125 (A & D Company Limited, Japón), con capacidad de carga de 25 kN. La velocidad de aplicación de la herramienta de carga fue de 5 mm s^{-1} . La frecuencia de captura de datos fue de 3 Hz. La relación de la distancia entre apoyos y el espesor de la probeta (L/y) fue de 15. Los datos del diagrama esfuerzo-deformación (**Figura 2**, **Tabla 1**) fueron capturados y tratados con el programa Tensilon Advanced Controller for Testing (A & D Company Limited, Japón).

Resultados y discusión

A nivel macroscópico, las capas de crecimiento de las probetas de madera sólida se observan heterogéneas, regulares y sin fisuras (**Figura 3a**). En la madera densificada, esta estructura se percibe reacomodada y con diferentes capas formadas por células comprimidas de manera irregular (**Figura 3b**), principalmente la madera temprana. Por su parte, las probetas laminadas y/o densificada-laminada muestran las capas de resina epoxi adheridas de manera uniforme (**Figuras 3c** y **3d**). Igualmente, las probetas laminadas y/o reforzadas muestran uniones uniformes maderado-adhesivo-fibra de carbono (**Figuras 3e** y **3f**).

A nivel microscópico, en las capas de creci-

Tabla 1. Fórmulas y símbolos utilizados.

Fórmula	No.	Referencia
$MOE = \left(\frac{0,4 F_r - 0,1 F_e}{0,4 y_r - 0,1 y_e} \right) \times \left(\frac{L^3}{4 \times b \times h^3} \right)$	(1)	Babiak <i>et al.</i> , (2018)
$MOR = 1,5 \times \left(\frac{F_r \times L}{b \times h^2} \right)$	(2)	Sikora <i>et al.</i> , (2019)
$K_{ductilidad} = \frac{y_r}{y_e}$	(3)	Ottenhaus <i>et al.</i> , (2021)
$K_{flexibilidad} = h \div \left(\frac{L^2}{12 + y_r} \right)$	(4)	Gaff <i>et al.</i> , (2016)

Símbolo	Definición	Unidades
MOE	= Módulo de elasticidad	N m^{-2}
MOR	= Módulo de ruptura	N m^{-2}
$K_{ductilidad}$	= Índice de ductilidad	m m^{-1}
$K_{flexibilidad}$	= Índice de flexibilidad	m m^{-1}
F	= Fuerza	N
F_r	= Fuerza a la ruptura	N
F_e	= Fuerza en el límite elástico	N
y	= Deformación	m
y_r	= Deformación a la ruptura	m
y_e	= Deformación en el límite elástico	m
L	= Distancia entre apoyos	m
b	= Base de la probeta (ancho)	m
h	= Altura de la probeta (espesor)	m

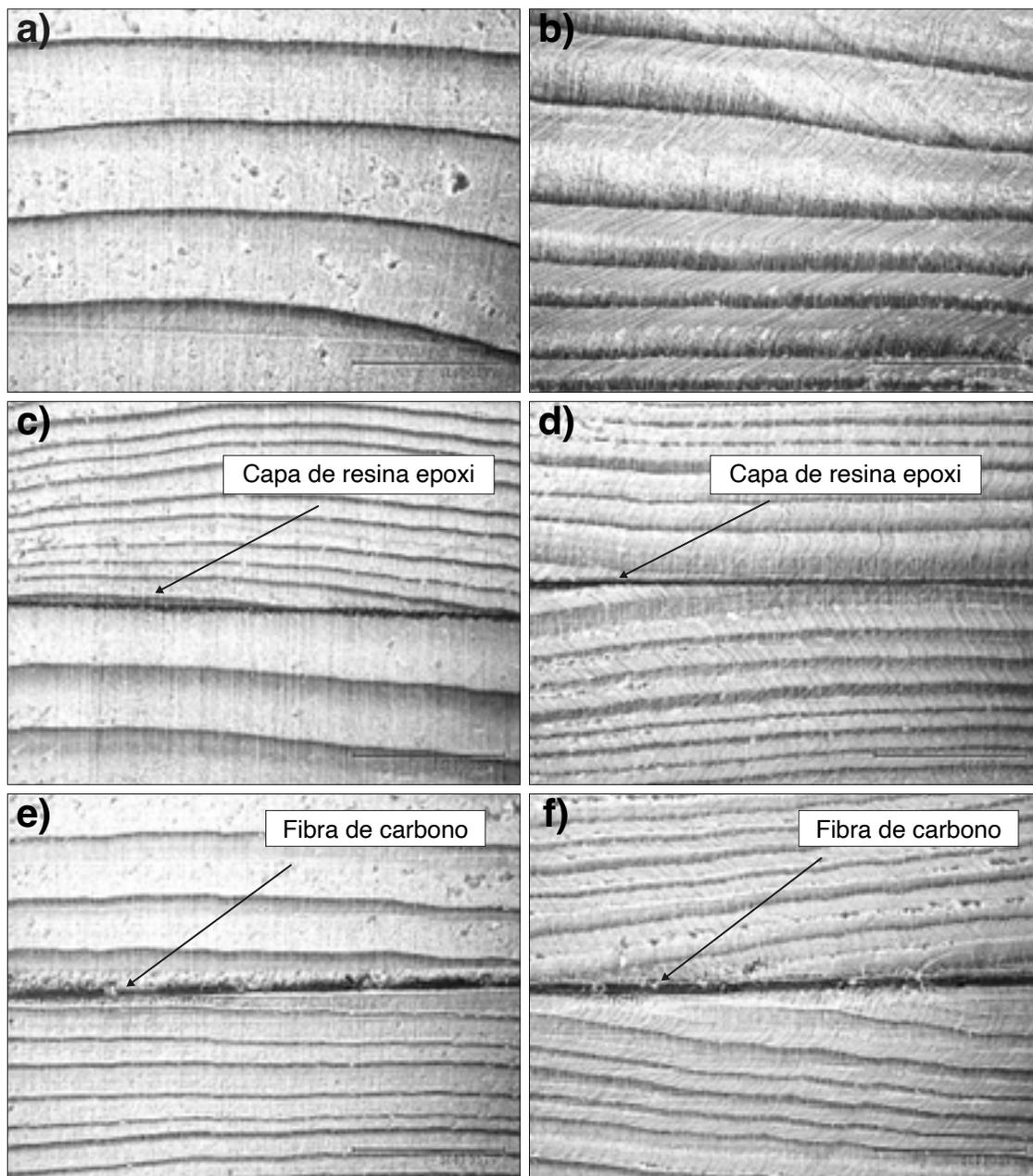


Figura 3. Fotografías macroscópicas de secciones transversales de las probetas. a) Madera sólida; b) Madera densificada; c) Madera laminada; d) Madera densificada y laminada; e) Madera laminada y reforzada; f) Madera densificada laminada y reforzada.

miento de la madera de *C. japonica* se observa una estructura heterogénea con diferentes diámetros, espesores, formas y acomodo de las células (**Figura 4a**). Una vez que la madera es densificada, su aspecto es más homogéneo (**Figura 4b**). Sin embargo, se observan irregularidades en la estructura celular y una penetración discontinua de la resina epoxi en el plano radial-tangencial (**Figura 4c**). En el mismo sentido, se distinguen alteraciones y fisuras en el entorno de las capas madera-adhesivo-fibra de carbono (**Figura 4d**).

Densidad

La densidad de la madera de *C. japonica* fue de 341 kg m^{-3} para la madera sólida y 485 kg m^{-3} para la madera densificada y laminada (**Tabla 2**). La densidad de la madera sólida, laminada y/o reforzada no varía de manera significativa entre las direcciones radial y tangencial ($-3\% < \rho_{\text{CH}} < +2\%$); con excepción de la madera laminada y reforzada en la cual se observa un incremento de $+6\%$ (**Tabla 3**). Cuando se densifica la madera y se incorpora en madera laminada y/o reforzada, la densidad

aumenta ($+32\% < \rho_{CH} < +46$) si se compara con la de la madera sólida no densificada.

Estos resultados se interpretan con los siguientes argumentos: las proporciones de tejido de madera temprana y tardía que conforman una capa de crecimiento de la madera de *C. japonica* se distinguen por las diferentes formas y espesores de las paredes y lúmenes celulares (**Figura 4a**). En la madera densificada, las cavidades celulares se reducen de tal forma que la masa de la pared celular aumenta en relación con el volumen, dando como resultado un material con una estructura más compacta y homogénea, pero ocasionando que la organización original de las células se distorsione (**Figura 4b**). La incorporación de la masa de la resina epoxi aumenta la masa por unidad de volumen, pero en una proporción menor a la del efecto del densificado de la madera sólida (**Figura 4c**). El tejido de fibra de carbono (**Figura 4d**) incrementa poco la proporción de la masa, por lo que no se distingue un aumento significativo de la densidad entre la madera laminada con resina y con fibra de carbono.

Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad de la madera de *C. japonica* varía entre 5501 MN m^{-2} para la madera sólida y 13564 MN m^{-2} para la madera densificada laminada y reforzada (**Tabla 2**). Comparativamente con la madera sólida, la madera laminada, densificada y/o reforzada, incrementan su módulo de elasticidad.

El módulo de elasticidad tangencial es 3% mayor que el módulo radial (**Tabla 3**). En la madera densificada, ya sea laminada densificada y/o reforzada, el incremento del módulo tangencial va desde +27% en la madera laminada, hasta +61% en la madera densificada y laminada (**Tabla 3**). Estos resultados son similares a los reportados por Kubojima *et al.* (2004) para madera de *C. japonica*, quienes utilizaron tasas de densificación de 33% y 67%. En el mismo contexto, los resultados reportados por Laskowska *et al.* (2021) confirman esta tendencia, pero estos autores confunden la cara radial, es decir, el plano R-L, con la dirección (tangencial) en la que la fuerza de flexión se aplica respecto a los anillos de crecimiento.

El módulo de elasticidad de las probetas ela-

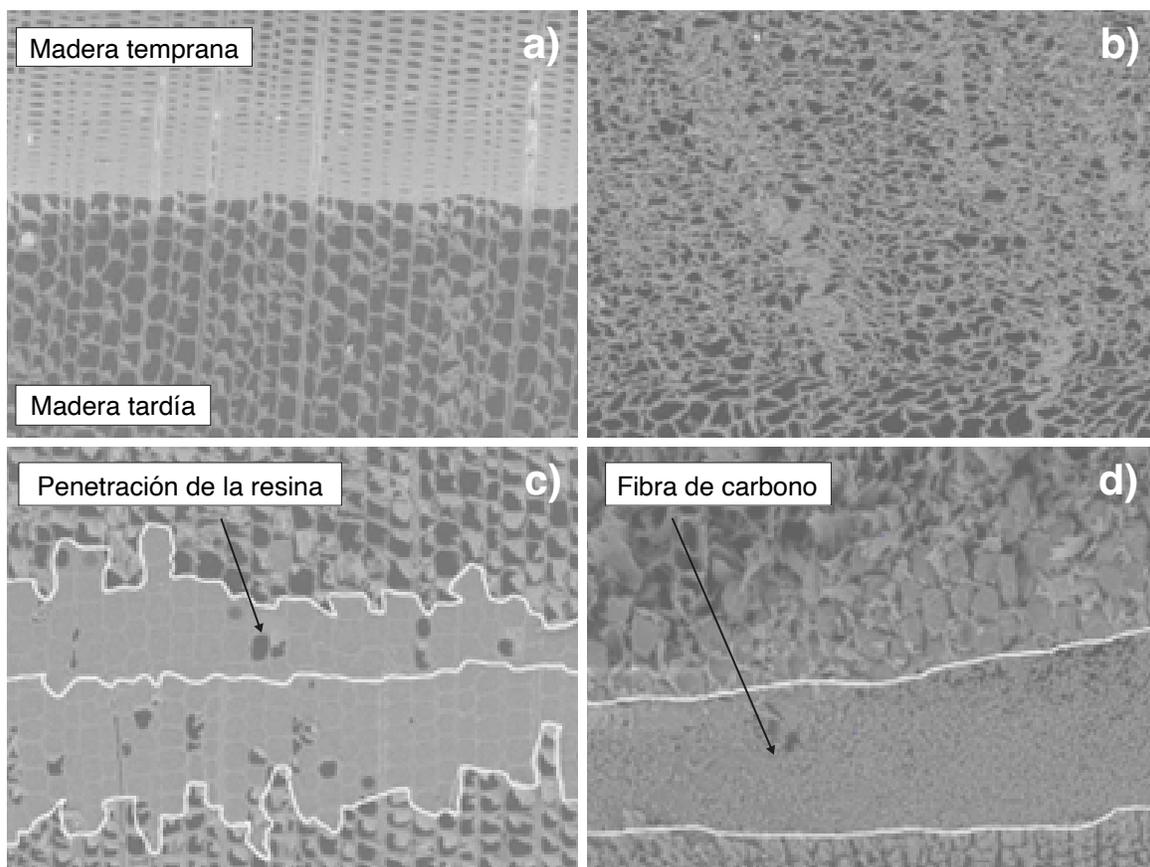


Figura 4. Micrografías de la sección transversal (plano radial-tangencial) de la madera de *Cryptomeria japonica* (Amplificación $\times 200$). a) Capa de crecimiento, b) Madera densificada, c) Resina epoxy, d) Fibra de carbono.

Tabla 2. Contenido de humedad, densidad e indicadores de flexibilidad.

	CH	ρ_{CH}	MOE	MOR	$K_{ductilidad}$	$K_{flexibilidad}$
	(%)	($kg\ m^{-3}$)	($MN\ m^{-2}$)	($MN\ m^{-2}$)	($m\ m^{-1}$)	($m\ m^{-1}$)
Madera sólida (S)						
R	12	341	5501	49,08	4,88	0,040
T	12	347	5658	47,26	4,59	0,033
Madera laminada (L)						
R	11	346	9028	66,77	5,63	0,034
T	11	343	11444	83,62	4,38	0,027
Madera laminada y reforzada(L+F)						
R	11	337	8233	66,76	7,02	0,034
T	11	356	11429	78,96	5,39	0,031
Madera densificada (D)						
R	13	497	7219	59,89	4,41	0,032
T	13	481	9719	89,38	3,72	0,030
Madera densificada y laminada (DL)						
R	9	479	8357	84,18	3,65	0,032
T	9	485	13426	101,82	3,33	0,021
Madera densificada laminada y reforzada (DL+F)						
R	10	466	9295	97,01	4,46	0,040
T	10	471	13564	101,99	3,47	0,022

CH = Contenido de humedad; ρ_{CH} = Densidad; MOE = Módulo de elasticidad; MOR = Módulo de ruptura; $K_{ductilidad}$ = Índice de ductilidad; $K_{flexibilidad}$ = Índice de flexibilidad; R = Dirección radial; T = Dirección tangencial.

boradas con madera densificada se incrementa con respecto a las probetas de madera no densificada. Este resultado se observa igualmente para probetas de madera laminada y/o reforzada (**Tabla 3**). Caso excepcional es la madera densificada laminada donde se observa una disminución del módulo de elasticidad en la dirección tangencial con respecto a la dirección radial. Este incremento en el módulo de elasticidad de la madera se puede explicar admitiendo dos paradigmas vigentes en ciencias de la madera: por una parte, que su resistencia mecánica aumenta a medida que la densidad se incrementa (Prihatmaji *et al.*, 2012; Almeida *et al.*, 2022) y, por otra parte, que el módulo de elasticidad en flexión tangencial es mayor que el radial (Kim *et al.*, 2022; Mascia *et al.*, 2022).

En el caso de la madera sólida, las diferentes capas de crecimiento se alinean paralelamente, lo que permite modelar la madera como un material multicapas a la escala anatómica de los tejidos de crecimiento anuales de un árbol. Cuando la fuerza

Tabla 3. Diferencias en por ciento de los indicadores de flexibilidad entre direcciones y configuraciones.

Diferencias entre las direcciones tangencial y radial (T/R)						
	ρ_{CH}	MOE	MOR	$K_{ductilidad}$	$K_{flexibilidad}$	
	(kg/m^3)	(MN/m^2)	(MN/m^2)	(m/m^{-1})	(m/m^{-1})	
S	+2	+3	-4	-6	-17	
L	-1	+27	+25	-22	-21	
L+F	+6	+39	+18	-23	-11	
D	-3	+35	+49	-16	-8	
DL	+1	+61	+21	-9	-34	
DL+F	+1	+46	+5	-22	-44	
Diferencias entre la madera densificada y no densificada						
	D/S		DL/L		DL+F/L+F	
	R	T	R	+T	R	T
ρ_{CH}	+46	+39	+38	+41	+38	+32
MOE	+31	+72	-7	+17	+13	+19
MOR	+22	+89	+26	+22	+45	+29
$K_{ductilidad}$	-10	-19	-35	-24	-37	-36
$K_{flexibilidad}$	-18	-9	-5	-21	+17	-27

ρ_{CH} = Densidad; MOE = Módulo de elasticidad; MOR = Módulo de ruptura; $K_{ductilidad}$ = Índice de ductilidad; $K_{flexibilidad}$ = Índice de flexibilidad; R = Dirección radial; T = Dirección tangencial; S = Madera sólida; L = Madera laminada; L+F = Madera laminada y reforzada; D = Madera densificada; DL = Madera densificada y laminada; DL+F = Madera densificada laminada y reforzada.

es aplicada en la dirección radial de la probeta, esta reacciona como una placa conformada por dos componentes de madera. El efecto de este acomodo relativo de las capas de crecimiento de la madera, respecto a la dirección de la carga resulta en una diferencia de módulos de elasticidad y/o de ruptura. En cambio, el efecto de la presencia de la placa rígida de resina epoxi y/o de fibra de carbono puede explicar que los módulos de elasticidad y de ruptura de la madera laminada, densificada y/o reforzada, correspondientes a la dirección tangencial sean mayores en comparación con los de la dirección radial.

En el caso de la madera laminada, tanto sólida como densificada, esta configuración natural de multicapas se interrumpe y se reconstruye con la ayuda de una capa de resina epoxi, la cual funciona como adherente y endurecedor, situado en entorno del eje neutro de la probeta. A su vez, el tejido de fibra de carbono, en la capa intermedia actúa como refuerzo y/o componente estabilizador entre las superficies de la madera adheridas con resina epoxi.

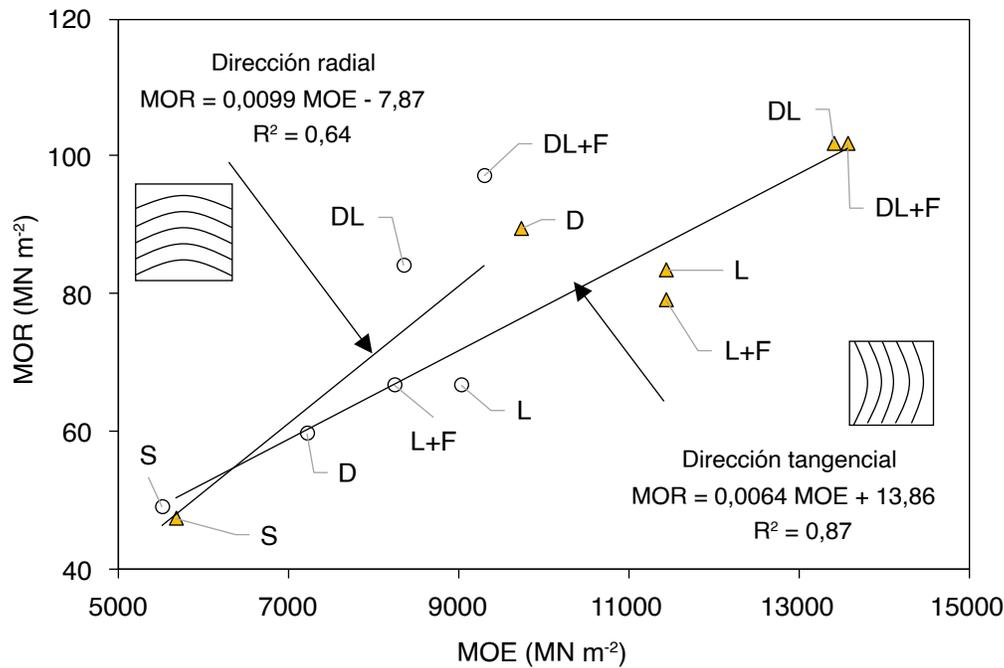


Figura 5. Correlación de los módulos de ruptura (MOR) en función de los módulos de elasticidad (MOE). S = Madera sólida; L = Madera laminada; L+F = Madera laminada y reforzada; D = Madera densificada; DL = Madera densificada y laminada; DL+F = Madera densificada laminada y reforzada; R = Dirección radial; T = Dirección tangencial.

Módulo de ruptura

El módulo de ruptura de la madera de *C. japonica* varía entre $47,26 \text{ MN/m}^2$ para la madera sólida y $101,99 \text{ MN/m}^2$ para la madera densificada laminada y reforzada (**Tabla 2**). De manera análoga al módulo de elasticidad, la madera laminada, así como la densificada y/o reforzada incrementan su módulo de ruptura comparativamente con la madera sólida. Para todas las configuraciones, el módulo de elasticidad tangencial es en promedio 24% mayor que el módulo radial, sin considerar un decremento de -4% que se observa para la madera sólida (**Tabla 3**). Para la dirección radial se observa una correlación media entre el módulo de ruptura y el de elasticidad, y una correlación fuerte para la dirección tangencial (**Figura 5**).

Índice de ductilidad

El índice de ductilidad tangencial es menor respecto al radial. Las disminuciones van desde -6% para la madera sólida sin densificar, hasta -23% para la madera laminada y reforzada (**Tabla 3**). Este resultado está relacionado con el acomodo relativo de las capas de crecimiento de la madera, respecto a la dirección de la carga, observado en los resultados del módulo de elasticidad (**Tabla 3**) y reportados por Karaman *et al.* (2021) en la

caracterización de madera laminada de *Pinus nigra* adherida con resina epoxi y reforzada con tejido de fibra de aramida. En el mismo tenor, el índice de ductilidad de la madera densificada es menor que el de la madera sin densificar y el índice de ductilidad en flexión disminuye con el densificado (**Tabla 3**).

El índice de ductilidad en flexión ($K_{\text{ductilidad}}$, Fórmula 3) depende de la deformación a la ruptura y la deformación en el límite elástico. La deformación en el límite elástico es medida bajo el supuesto de la no existencia de deformaciones locales en las superficies de la probeta en las zonas de contacto de los apoyos y la herramienta con que se aplica la fuerza. Este supuesto no es necesariamente cierto, particularmente en el dominio plástico, y se intensifica en el momento crítico cuando es máxima la fuerza aplicada, es decir, la fuerza a la ruptura (F_r). En consecuencia, el indicador $D_{\text{FLEXIÓN}}$ está subestimado, particularmente para la madera sólida en sus dos orientaciones. Una vez que la madera fue laminada, densificada y/o reforzada este fenómeno es diferente.

Si se toma como referencia la madera sólida, la madera laminada disminuye su $K_{\text{ductilidad}}$, en cambio, la ductilidad radial de la madera laminada y reforzada en ambas direcciones aumenta. Este resultado coincide con los de Novosel *et al.* (2021) quienes reportan la

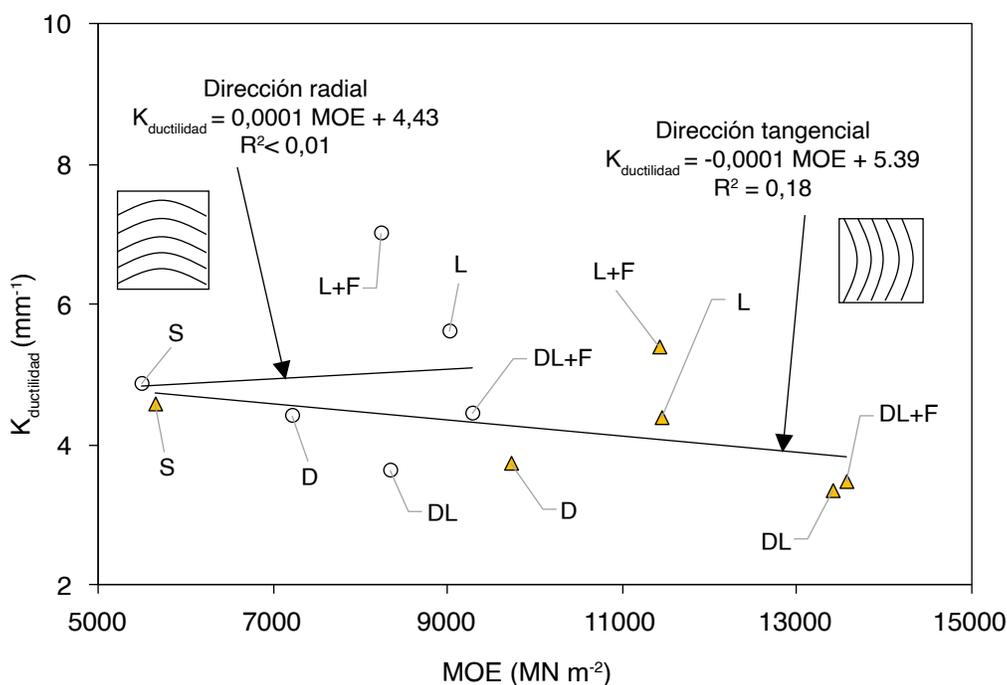


Figura 6. Correlación de los índices de ductilidad ($K_{ductilidad}$) en función de los módulos de elasticidad (MOE). S = Madera sólida; L = Madera laminada; L+F = Madera laminada y reforzada; D = Madera densificada; DL = Madera densificada y laminada; DL+F = Madera densificada laminada y reforzada; R = Dirección radial; T = Dirección tangencial.

misma tendencia para vigas laminadas de *Quercus Robur*, adheridas con resina epoxi y reforzadas con tejido de fibra de carbono.

El índice de ductilidad no depende del módulo de elasticidad (Figura 6). En la dirección radial, se advierte una dispersión entre resultados para las seis configuraciones a medida que el módulo de elasticidad aumenta. Así mismo, para la dirección tangencial se observa una importante dispersión entre la madera sólida y densificada, pero una proximidad entre los resultados de la madera laminada y reforzada.

Índice de flexibilidad

Los índices de flexibilidad ($K_{flexibilidad}$) se calculan en relación con la base (espesor) de la probeta, la distancia entre apoyos (L) y la deformación a la ruptura (y_r en Fórmula 4). Este indicador depende de la deflexión elástica y es susceptible al método y al contenido de humedad (Babiak *et al.*, 2018). En el caso de la madera sólida, las capas de las probetas solicitadas en dirección radial trabajan en conjunto como un material multi-placas, unidas naturalmente y como un material continuo (a la escala de observación de la presente investigación). Una vez laminada la madera, el sistema es formado

por dos componentes adheridos por una capa de resina epoxi y/o reforzada con tejido de fibra de carbono (Figura 1). Este estado une de manera artificial el sistema viga-probeta y se crea una discontinuidad en el tejido leñoso. No obstante, la resina epoxi y la fibra de carbono incrementan la magnitud de sus parámetros de elasticidad (MOE, Tabla 2) y de ruptura (MOR, Tabla 2) respecto a los correspondientes a la madera sólida, pero no necesariamente las de sus indicadores de flexibilidad ($K_{ductilidad}$, Figura 6 y $K_{flexibilidad}$, Figura 7). Para el caso de la madera densificada, no solo su relación masa volumen aumenta, sino su estructura celular es más compacta y, para un coeficiente de densificado del 50%, el deterioro físico de la estructura celular es mínimo (Figura 4).

Para la madera laminada en la dirección radial, la capa de adhesivo, una vez endurecida, actúa como una lámina con propiedades de rigidez propias, pero combinada con el conjunto madera-capa de resina epoxi da como resultado una estructura artificial con una resistencia mecánica mayor a la de la madera de *C. japonica*. En cambio, las probetas tangenciales trabajan como placas acomodadas horizontalmente, lo cual permite que la madera se flexione con más facilidad y en mayor proporción.

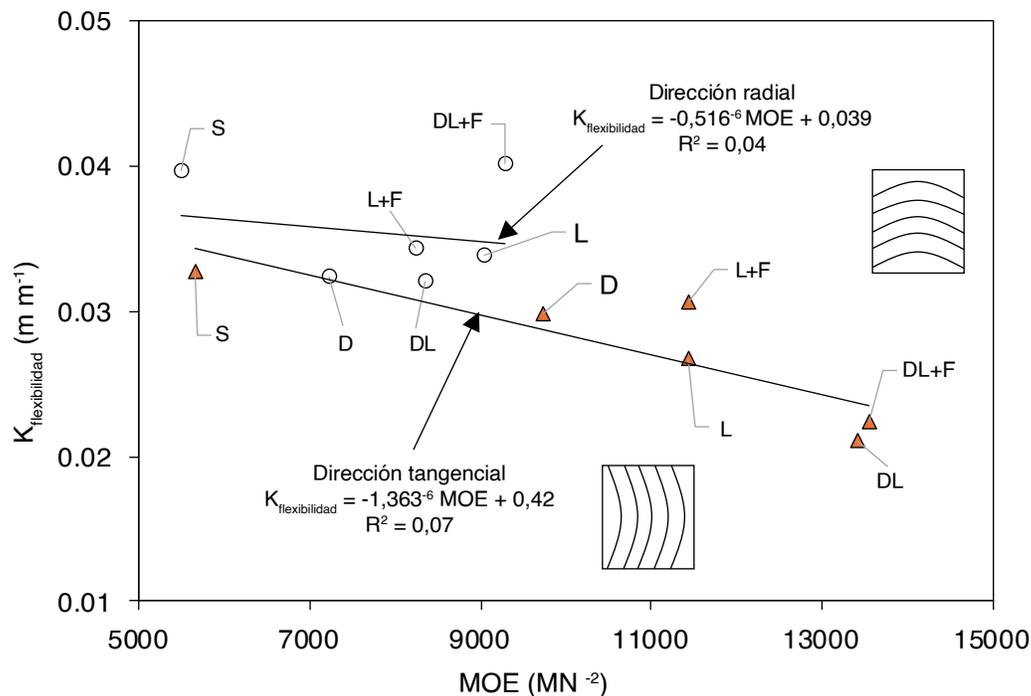


Figura 7. Correlación de los índices de flexibilidad ($K_{\text{flexibilidad}}$) en función de los módulos de elasticidad (MOE). S = Madera sólida; L = Madera laminada; L+F = Madera laminada y reforzada; D = Madera densificada; DL = Madera densificada y laminada; DL+F = Madera densificada laminada y reforzada; R = Dirección radial; T = Dirección tangencial.

La configuración y/o acomodo del plano de la capa adhesiva, ya sea solo de resina epoxi y/o tejido de fibra de carbono, es más flexible en la dirección radial, es decir, perpendicular a la dirección de la fuerza, comparativamente al acomodo del mismo plano, pero en la dirección tangencial, es decir, cuando el plano de la capa adhesiva es paralelo a la dirección de la fuerza.

Comparativamente con la madera sólida, la madera laminada disminuye su índice de flexibilidad ($K_{\text{flexibilidad}}$, Fórmula 4). Este indicador representa la relación del espesor (h) de la probeta dividido por el radio mínimo de flexión (Gaff *et al.*, 2016). Este concepto es derivado de las relaciones geométricas de la flexión y se calcula con la deformación a la ruptura (y_r) medida en medio de la portada ($L/2$) de la catenaria (Cao *et al.*, 2023). La deformación a la ruptura (F_r) incluye el desplazamiento ocasionado por el esfuerzo cortante y en condiciones reales de las pruebas de flexión, contiene también el desplazamiento de la probeta ocasionado por las deformaciones locales en los apoyos y/o en la herramienta de aplicación de la fuerza, de tal forma que la deformación a la ruptura es mayor a la deformación teórica en condiciones ideales de las

pruebas de flexión. En consecuencia, el índice de flexibilidad es subestimado.

El índice de flexibilidad no depende del módulo de elasticidad (Figura 7). Sin embargo, se observa una ligera tendencia en su disminución a medida que el módulo de elasticidad aumenta. En el mismo contexto, y derivado del análisis de los resultados de todas las probetas, no se observó una correlación importante entre los índices de ductilidad y de flexibilidad ($K_{\text{ductilidad}} = 0,0028 K_{\text{flexibilidad}} + 0,018$, $R^2 = 0,27$). Este resultado sugiere que estos dos indicadores de flexibilidad son independientes del tipo de configuración de las probetas.

Conclusiones

Se determinó la densidad, los módulos de elasticidad y de ruptura, así como los índices de ductilidad y de flexibilidad en probetas de madera de *C. japonica*. Estos parámetros se estudiaron en seis configuraciones: madera sólida, madera densificada, madera laminada, madera densificada y laminada, madera laminada y reforzada, así como madera densificada laminada y reforzada.

El densificado laminado y reforzado de la made-

ra de *C. japonica* incrementa sus módulos de elasticidad y de ruptura. En contraste, estas modificaciones disminuyen sus índices de ductilidad y de flexibilidad. En el mismo sentido, los parámetros determinados en la dirección tangencial son mayores que los determinados en la dirección radial.

Agradecimientos

Esta investigación fue patrocinada por el Instituto de Tecnología de la Madera de la Universidad Prefectoral de Akita, en Japón, y por la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en México. Se agradece a Ryuto Kumamoto, alumno de la Escuela de Graduados en Ciencias de Biorecursos, de la Universidad Prefectoral de Akita, en Japón, por su participación en los trabajos de microscopía.

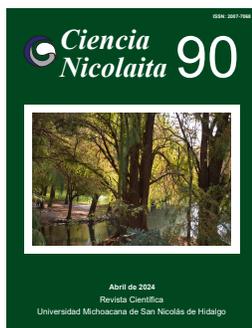
Referencias

- Almeida ADS, Criscuolo G, Arroyo FN, Aquino VBM, Silva DAL, Molina JC, Chahud E, Branco LAMN, Christoforo AL, Lahr FAR (2022). Estimation of compression and shrinkage properties of Brazilian tropical timber through porosimetry analysis by mercury intrusion. *BioResources* 17(1): 519-526. doi: <https://doi.org/10.15376/biores.17.1.519-526>
- Babiak M, Gaff M, Sikora A, Hysek Š (2018). Modulus of elasticity in three- and four-point bending of wood. *Composite Structures* 204: 454-465. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.113>
- Bal BC (2016). Some technological properties of laminated veneer lumber produced with fast-growing poplar and eucalyptus. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 18(3): 413-424. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2016005000037>
- Bao M, Huang X, Jiang M, Yu W, Yu Y (2017). Effect of thermo-hydro-mechanical densification on microstructure and properties of poplar wood (*Populus tomentosa*). *Journal of Wood Science* 63: 591-605. <https://doi.org/10.1007/s10086-017-1661-0>
- Cao AS, Grönquist P, Frangi A (2023). Catenary action in strip-reinforced wood and timber beams. *Construction and Building Materials* 385: 131422. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131422>
- Foraboschi P (2009). Analytical solution of two-layer beam taking into account nonlinear interlayer slip. *ASCE Journal of Engineering Mechanics* 135(10): 1129-1146. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000043](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000043)
- Frihart CR (2009). Adhesive groups and how they relate to the durability of bonded wood. *Journal of Adhesion Science and Technology* 23(4): 601-617. <https://doi.org/10.1163/156856108X379137>
- Gaff M, Gašparik M, Borůvka V, Haviarová E (2015). Stress simulation in layered wood-based materials under mechanical loading. *Materials and Design* 87: 1065-1071. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.128>
- Gaff M, Vokatý V, Babiak M, Bal BC (2016). Coefficient of wood bendability as a function of selected factors. *Construction and Building Materials* 126: 632-640. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.085>
- Guo D, Guo N, Fu F, Yang S, Li G, Chu, F (2022). Preparation and mechanical failure analysis of wood-epoxy polymer composites with excellent mechanical performances. *Composites Part B: Engineering* 235: 109748. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109748>
- International Organization for Standardization (2012). ISO 3129:2012: Wood - Sampling methods and general requirements for physical and mechanical testing of small clear wood specimens. Geneva: International Organization for Standardization. 9 p. <https://www.iso.org/standard/52489.html>
- International Organization for Standardization (2014). ISO 13061-1:2014: Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests. Geneva: International Organization for Standardization. 4 p. http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=60063
- International Organization for Standardization (2017). ISO 13061-2:2014/Amd 1:2017. Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests - Amendment 1. Geneva: International Organization for Standardization. 5 p. http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=60064
- Irlle M (2019). A review of methods to increase the flexibility of wood. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov, Series II: Forestry, Wood*



- Industry, Agricultural Food Engineering* 12(61): 53-62. <https://doi.org/10.31926/but.fwjafe.2019.12.61.2.4>
- Kandler G, Lukacevic M, Zechmeister C, Wolff S, Füssl J (2018). Stochastic engineering framework for timber structural elements and its application to glued laminated timber beams. *Construction and Building Materials* 190: 573-592. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.129>
- Karaman A, Yildirim MN, Tor O (2021). Bending characteristics of laminated wood composites constructed with black pine wood and aramid fiber reinforced fabric. *Wood Research* 66(2): 309-320. <https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/66.2.309320>
- Kim SH, Purusatama BD, Kim JH, Lee SH, Kim NHA (2022). Comparative study of the bending properties of Dahurian larch and Japanese larch grown in Korea. *Forests* 13: 1074. <https://doi.org/10.3390/f13071074>
- Kliger IR, Haghani R, Brunner M, Harte AM, Schober K (2016). Wood-based beams strengthened with FRP laminates: improved performance with pre-stressed systems. *European Journal of Wood and Wood Products* 74: 319-330. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0970-5>
- Kretschmann D, Hernandez R (2006). "Grading timber and glued structural members", Walker JCF, *Primary Wood Processing. Principles and Practice*: Springer Dordrecht, pp. 339-390. eBook ISBN: 978-1-4020-4393-2. <https://doi.org/10.1007/1-4020-4393-7>
- Kubojima Y, Ohtani T, Yoshihara H (2004). Effect of shear deflections on bending properties compressed wood. *Wood and Fiber Science* 36(2): 201-215. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1316/1316>
- Laskowska A, Majewska K, Kozakiewicz P, Mamiński M, Bryk G (2021). Case study of anatomy, physical and mechanical properties of the sapwood and heartwood of random tree *Platyclusus orientalis* (L.) franco from South-Eastern Poland. *Forests* 12: 925. <https://doi.org/10.3390/f12070925>
- Manalo AC, Aravinthan T, Karunasena W (2010). Flexural behaviour of glue-laminated fibre composite sandwich beams. *Composite Structures* 92(11): 2703-2711. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2010.03.006>
- Mascia NT, Kretschmann DE, Vilela R (2022). Evaluation of wood modulus of rupture and modulus of elasticity in the radial and tangential directions in bending and reliability analysis. *European Journal of Wood and Wood Products* 80: 597-610. <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01788-5>
- Namari S, Drosky L, Pudlitz B, Haller P, Sotayo A, Bradley D, Mehra S, O'Ceallaigh C, Harte AM, El-Houjeiry I, Oudjene M, Guan Z (2021). Mechanical properties of compressed wood. *Construction and Building Materials* 301: 124269. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124269>
- Novosel A, Sedlar T, Čizmar D, Turkulin H, Živković V (2021). Structural reinforcement of bi-directional oak-wood lamination by carbon fibre implants. *Construction and Building Materials* 287: 123073. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123073>
- Ottenhaus, L-M., Jockwer R, van Drimmelen D, Crews K (2021). Designing timber connections for ductility - A review and discussion. *Construction and Building Materials* 304: 124621. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124621>
- Prihatmaji YP, Kitamori A, Murakami S, Komatsu K (2012). Study on mechanical properties of tropical timber hardwood species: promoting javanese inferior timbers for traditional wooden houses. *Wood Research Journal* 3(1): 44-54. <https://doi.org/10.1234/wrj.v3i1.52>
- Rescalvo FJ, Duriot R, Pot G, Gallego A, Denaud L (2020). Enhancement of bending properties of Douglas-fir and poplar laminate veneer lumber (LVL) beams with carbon and basalt fibers reinforcement. *Construction and Building Materials* 263: 120185. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120185>
- Saad K, Lengyel A (2022). Strengthening timber structural members with CFRP and GFRP: A state-of-the-art review. *Polymers* 14: 2381. <https://doi.org/10.3390/polym14122381>
- Schober KU, Harte AM, Kliger R, Jockwer R, Xu Q, Chen, J-F (2015). FRP reinforcement of timber structures. *Construction and Building Materials* 97: 106-118. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.020>
- Shi J, Peng J, Huang Q, Cai L, Shi Q (2020). Fabrication of densified wood via synergy of chemical pretreatment, hot-pressing and post mechanical fixation. *Journal of Wood Science* 66: 5. <https://doi.org/10.1186/s10086-020-1853-x>
- Sikora A, Gaffová Z, Rajnoha R, Šatanová A, Kminiak R (2017). Deflection of densified beech and aspen woods as a function of selected factors. *BioResources* 12(2): 3192-3210. <https://doi.org/10.15376/biores.12.2.3192-3210>
- Sikora A, Svoboda T, Záborský V, Gaffová Z (2019). Effect of selected factors on the bending deflection at the limit of proportionality and at the modulus of rupture in laminated veneer lumber. *Forest* 10(5): 401. <https://doi.org/10.3390/f10050401>
- Śliwa-Wieczorek K, Ostrowski KA, Jaskowska-Lemańska

- J, Karolak A (2021). The influence of CFRP sheets on the load-bearing capacity of the glued laminated timber beams under bending test. *Materials* 14(14): 4019. <https://doi.org/10.3390/ma14144019>
- Sotomayor Castellanos JR (2017). Densificado higro-termo-mecánico de madera de *Gyrocarpus americanus*. Evaluación por ultrasonido. *Revista de Investigaciones Agropecuarias* 43(2): 156-164. https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/bitstream/handle/20.500.12123/15004/RIA_2017_VOLUMEN43_N%c2%ba2_p.156-164.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Svoboda T, Ruman D, Gaff M, Gasparik M, Miftieva E, Dundek L (2015). Bending characteristics of multilayered soft and hardwood materials. *BioResources* 10(4): 8461-8473. <https://doi.org/10.15376/biores.10.4.8461-8473>
- Svoboda T, Sikora A, Záborský V, Gaffová Z (2019). Laminated veneer lumber with non-wood components and the effects of selected factors on its bendability. *Forests* 10: 470. <https://doi.org/10.3390/f10060470>
- Wang B, Bachtiar EV, Yan L, Kasal B, Fiore V (2019). Flax, basalt, e-glass frp and their hybrid frp strengthened wood beams: An experimental study. *Polymers* 11: 1255. <https://doi.org/10.3390/polym11081255>
- Wdowiak-Postulak A, Brol J (2020). Ductility of the tensile zone in bent wooden beams strengthened with CFRP materials. *Materials* 13: 5451. <https://doi.org/10.3390/ma13235451>
- Yusof A, Rahman AB (2017). Flexural strengthening of timber beams using carbon fibre reinforced polymer. *International Journal of Applied Engineering Research* 12(3): 348-358. https://www.ripublication.com/ijaer17/ijaerv12v3_12.pdf



Ciencia Nicolaita 90

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Gestión de residuos sólidos y la inteligencia artificial en el contexto mexicano

Solid waste management and artificial intelligence in the mexican context

Juan Manuel Sánchez Yáñez y Liliana Márquez Benavides*

Para citar este artículo: Sánchez Yáñez JM, Márquez Benavides L (2024). Gestión de residuos sólidos y la inteligencia artificial en el contexto mexicano. *Ciencia Nicolaita* 90: 157-168.

DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi90.722>



Historial del artículo

Recibido: 25 de mayo de 2023
Aceptado: 10 de noviembre de 2023
Publicado en línea: abril 2024



Ver material suplementario



***Correspondencia de autor:** liliana.marquez@umich.mx, ORCID: 0000-0003-3738-6608.



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Gestión de residuos sólidos y la inteligencia artificial en el contexto mexicano

Solid waste management and artificial intelligence in the mexican context

Juan Manuel Sánchez Yáñez¹ y Liliana Márquez Benavides^{2*}

¹ Laboratorio de Microbiología Ambiental. Edif-B1, CU. Instituto de Investigaciones Químico Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Fco. J. Mujica s/n, Col. Felicitas del Río, Morelia, Mich, México.

² Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Carretera Morelia-Zinapécuaro km 9.5, Tarímbaro, Mich. México.

Resumen

En México, la gestión de residuos sólidos varía de acuerdo con cada municipio. Las prácticas inadecuadas y tasas limitadas de reciclaje generan graves consecuencias ambientales. La inteligencia artificial (IA) tiene el potencial de aumentar la eficiencia en la gestión de residuos, por ejemplo, al utilizar sistemas de clasificación para agilizar el proceso de reciclaje. Además, los dispositivos inteligentes pueden desempeñar un papel crucial al separar diferentes materiales de manera precisa durante este proceso. Sensores basados en Internet de las cosas (IoT o *Internet of things*) permiten el monitoreo en tiempo real de los contenedores, optimizando la gestión de residuos. La implementación de la IA reduce costos y asigna mejor los recursos, generando ventajas económicas. Sin embargo, se enfrentan desafíos como la disponibilidad de datos y limitaciones en infraestructura y financiamiento. La integración exitosa de la IA en la gestión de residuos en México requiere abordar estos desafíos específicos.

Palabras clave: residuos sólidos; smart waste; inteligencia artificial; gestión de residuos.

*Autor de correspondencia: liliana.marquez@umich.mx, ORCID: 0000-0003-3738-6608.
Copyright © Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Abstract

In México, solid waste management varies according to each municipality. Inadequate practices and limited recycling rates generate serious environmental consequences. Artificial intelligence (AI) has the potential to increase efficiency in waste management, for example, by using AI-based sorting systems to streamline the recycling process. In addition, smart devices can play a crucial role in accurately separating different materials during the recycling process. Internet of things (IoT)-based sensors enable real-time monitoring of containers, optimizing waste management. The implementation of AI would reduce costs and better allocate resources, generating economic advantages. However, challenges such as data availability and limitations in infrastructure and financing are faced. Successful integration of AI into waste management in México requires addressing these specific challenges.

Keywords: solid waste; smart waste; artificial intelligence; waste management.

Introducción

Los residuos sólidos se pueden definir como el material o producto que se desecha una vez que es consumido o utilizado por el usuario y que pueden provenir de distintas fuentes como domicilios, oficinas, centros comerciales, centros de producción, entre otros (Ceballos Pérez *et al.*, 2022). Los residuos pueden clasificarse en:

- 1) Residuos sólidos urbanos (RSU), que son los generados en las actividades domésticas.
- 2) Residuos de manejo especial (RME), que son generados en procesos productivos o por grandes generadores de residuos.
- 3) Residuos peligrosos (RP), los cuales pueden presentar al menos una de las siguientes características: corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad o contener agentes infecciosos.

En México, la infraestructura y los sistemas de gestión de residuos sólidos varían según las regiones y municipios. De acuerdo con la SEMARNAT (2020), se estima que a nivel nacional se generan diariamente 120,128 toneladas de RSU, de los cuales en promedio se recolecta el 84%, lo que significa una cobertura a nivel nacional de 100,751 toneladas de residuos al día. El nivel de recolección más bajo se registra en la zona sur del país donde sólo alcanza el 69%. Mientras que

algunas áreas cuentan con prácticas bien establecidas de gestión de residuos, otras enfrentan desafíos significativos. La infraestructura para la gestión de residuos debiera incluir la recolección, el transporte, el tratamiento y la disposición final de los residuos. Las brechas en la cobertura y eficiencia, especialmente se dan en las áreas rurales y de bajos ingresos. Los sistemas de gestión de residuos sólidos a menudo involucran una combinación de servicios municipales, recolectores informales de residuos y participación del sector privado.

En México, como en el caso de muchos otros países, el aumento en la generación de residuos sólidos está ligado al gasto del consumo final privado y el producto interno bruto (PIB) nacional (SEMARNAT, 2018). Es decir, a mayores niveles de consumo se produce un mayor volumen de residuos. En el caso mexicano, entre 2003 y 2012, el PIB y la generación de residuos tuvieron un incremento similar en cuanto a la tasa anual, cerca del 2.77%. Información oficial mexicana publicada en el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos (DBGIR), reporta una generación per cápita de 0.944 kg/hab/día (SEMARNAT, 2020). En los últimos años, a la par del crecimiento poblacional, se ha incrementado la oferta y consumo de productos y servicios, dando como resultado la generación de RSU en mayores cantidades. A su vez, los núcleos poblacionales, cada vez más grandes, dificultan la recolección de los RSU y la implementación de áreas o

terrenos para la disposición final y tratamiento de estos (Kaza *et al.*, 2018). Por lo tanto, las prácticas inadecuadas en la gestión de residuos en México tienen implicaciones económicas.

La disposición inadecuada de residuos conduce a un aumento en los costos asociados con la gestión integral de residuos, la remediación ambiental y los gastos relacionados con la salud. El artículo 10 de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (Cámara de Diputados del Honorable Congreso de la Unión, 2023), indica que los municipios, como gobiernos locales, tienen a su cargo el servicio público del manejo de RSU y el cobro por el mismo, que debería ser destinado a la operación, sin embargo, para la mayoría de los municipios estos recursos suelen ser limitados. Además, los métodos ineficientes de recolección y disposición de residuos resultan en la pérdida de recursos, disminución de oportunidades para el reciclaje y compostaje, y mayores costos en general.

Las prácticas inadecuadas de disposición de residuos y las tasas limitadas de reciclaje en México contribuyen a consecuencias ambientales evidentes: por ejemplo, los vertederos sin prácticas adecuadas de ingeniería ni gestión representan riesgos de contaminación del suelo y agua, contaminación del aire y emisiones de gases de efecto invernadero. En México se cuenta con 2,203 sitios de disposición final, que se encuentran ubicados en 1,722 municipios, de estos, al menos 883 no realizan alguna acción o proceso para el tratamiento de los RSU (SEMARNAT, 2020). Las tasas insuficientes de reciclaje llevan al agotamiento de recursos naturales y un aumento en la demanda de materias primas. Aun así, según ECOCE (2021), México es líder en reciclaje de PET en América Latina, con un 60%, respectivamente.

El impacto ambiental de las prácticas de gestión de residuos en México se extiende más allá de los vertederos. El país enfrenta desafíos relacionados con la disposición de RP, como los residuos electrónicos, que contienen metales pesados que pueden filtrarse en el medio ambiente si no se manejan adecuadamente (Muñoz Cruz y Morales Calderón, 2023).

Fomentar el reciclaje, promover prácticas sostenibles de gestión de residuos y mejorar la infraestructura de residuos son pasos cruciales para reducir la huella ambiental de la gestión de residuos sólidos en

México, a su vez, estas prácticas requieren de una estrategia o políticas encaminadas a la gobernanza ambiental de los RSU (Juárez de la Rosa *et al.*, 2023), sin embargo, los diferentes contextos políticos y el cambio de gobiernos en México dificulta su implementación y continuidad, para que las políticas públicas tengan éxito.

Abordar estos desafíos requiere enfoques innovadores, como la integración de la inteligencia artificial (IA) en las prácticas de gestión de residuos. La inteligencia artificial se centra en la creación de máquinas inteligentes capaces de simular la inteligencia y el comportamiento humanos (Moreno, 2019). Las siguientes secciones explorarán las posibles aplicaciones de la IA para abordar estos problemas y discutir los beneficios, desafíos e implicaciones asociadas en el contexto mexicano.

El sistema de gestión de residuos sólidos y las aplicaciones potenciales de *smart-waste* (residuos inteligentes)

El enfoque de la *gestión de residuos inteligente* (*smart waste*) consiste en asociar los residuos físicos con la información digital (Figura 1).

En el contexto de la gestión de residuos sólidos, la integración de la IA en los sistemas de clasificación de residuos tiene un potencial significativo para mejorar la eficiencia y las tasas de reciclaje. Las tecnologías de robótica impulsada por IA y visión por computadora pueden revolucionar el proceso de clasificación de residuos sólidos en México. Los usuarios suelen ser reacios a separar sus residuos. Sin embargo, mediante el uso de algoritmos de aprendizaje automático, se pueden desarrollar sistemas inteligentes capaces de identificar y clasificar automáticamente diferentes tipos de residuos.

Al automatizar el proceso de clasificación, se mejora significativamente la velocidad y precisión de la segregación de residuos. Las prácticas tradicionales de clasificación de residuos en México, y el mundo, a menudo dependen del trabajo manual, lo que puede llevar tiempo y propiciar errores (Fang *et al.*, 2023). Los algoritmos de IA pueden analizar datos visuales capturados por sensores o cámaras, identificar y categorizar rápidamente diferentes tipos de materiales, y clasificarlos en contenedores o corrientes apropiadas.

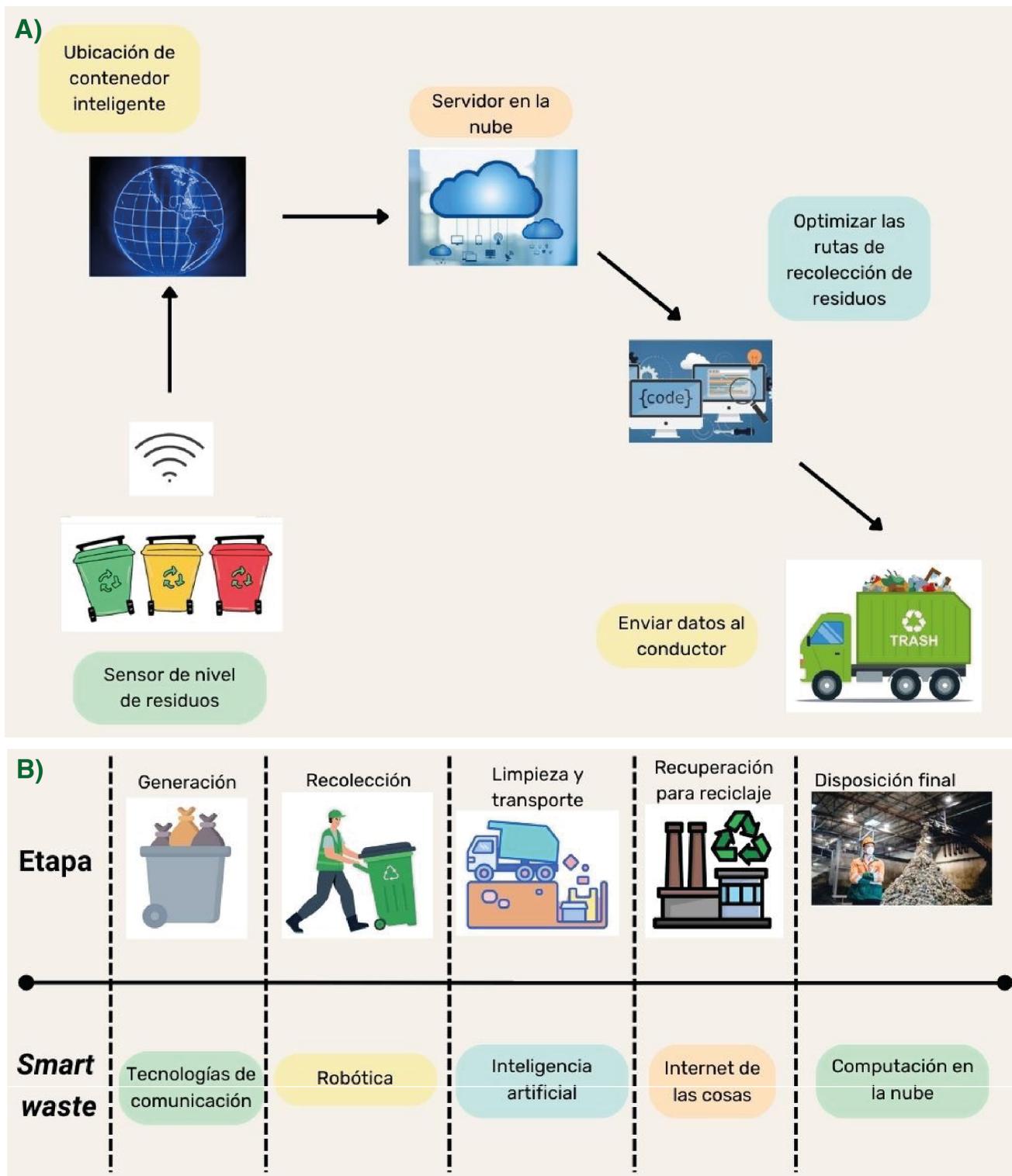


Figura 1. Diagrama del uso de *smart waste* que abarca la generación hasta la recolección de residuos sólidos. **A)** La gestión integral de los residuos sólidos urbanos incluye varias etapas, desde la generación, la recolección, el proceso de limpia, la recuperación para reciclaje y/o pretratamiento y la disposición final en un relleno sanitario o vertedero. **B)** Etapas de la gestión de los residuos sólidos urbanos y su relación con el *smart waste*. Se muestra cada etapa y la relación que comúnmente se asocia con algunas opciones.

Esto agilizaría el proceso de separación de residuos en plantas de reciclaje, reduciendo los tiempos y los costos asociados (Ihsanullah *et al.*, 2022).

Por otra parte, México enfrenta desafíos relacionados con las tasas desiguales de reciclaje y la contaminación de materiales reciclables. Los sistemas de clasificación de residuos integrados con IA pueden desempeñar un papel crucial en la solución de estos problemas. Al identificar y clasificar con precisión los

materiales reciclables, estos sistemas permiten procesos de reciclaje más eficientes, al tener una mayor recuperación de recursos valiosos y reducir la cantidad de materiales reciclables que terminan en vertederos. En la Tabla 1 se muestran ejemplos de literatura sobre el desarrollo y aplicación de sistemas de clasificación de residuos impulsados por IA, que abarcan lo recién mencionado.

Tabla 1. Ejemplos de literatura sobre el desarrollo y aplicación de sistemas de clasificación impulsados por IA.

Autor	Tipo de IA empleada	Sistema de clasificación
Li y Chen (2023)	Técnicas de aprendizaje profundo (<i>deep learning</i>) para redes neuronales convolucionales (CNN).	Reconocimiento de residuos en una cinta transportadora, clasificándolos en 6 clases: cartón, metal, vidrio, plástico, papel y desechos orgánicos.
Zhang <i>et al.</i> , (2021)		Algoritmo de reconocimiento-recuperación de dos etapas para la clasificación de residuos. La primera etapa involucra un modelo de reconocimiento para clasificar los residuos en trece categorías. La segunda etapa entrena al modelo de reconocimiento-recuperación para clasificar los desechos en cuatro categorías.
Seredkin <i>et al.</i> , (2019)	Técnicas de aprendizaje profundo (<i>deep learning</i>) para redes neuronales convolucionales (CNN).	Detección y clasificación de residuos en una línea transportadora mediante el procesamiento de imágenes a través de redes neuronales detectando 4 clases de residuos: HDPE, aluminio, PET (sin distinción de color) y otros
Sousa <i>et al.</i> , (2019)	Técnicas de aprendizaje profundo (<i>deep learning</i>) para redes neuronales convolucionales (CNN).	Clasificación e identificación de residuos en bandejas de alimentos, se clasifican en cuatro categorías según el material o diez categorías según la forma.
Du <i>et al.</i> , (2022)	Modelo de aprendizaje profundo basado en una red neuronal convolucional (CNN)	Modelo de clasificación de residuos textiles, se puede clasificar en 13 categorías según el material, con un tiempo de reconocimiento de menos de dos segundos y una tasa de precisión del 95.4 %.
Thumiki y Khandelwal (2022)	Aplicación móvil en tiempo real y uso de red neuronal convolucional (CNN)	Utiliza el reconocimiento de imágenes y una red neuronal convolucional para clasificar los residuos en seis categorías según el material y determinar si son reciclables o no reciclables.

Análisis predictivo y optimización

El análisis predictivo y las técnicas de optimización impulsadas por IA pueden proporcionar conocimientos valiosos para mejorar los procesos de toma de decisiones en la gestión de residuos sólidos en México.

Los algoritmos de IA pueden analizar datos históricos sobre la generación de residuos, la demografía de la población y otros factores relevantes para predecir sus patrones de generación en las ciudades. Al aprovechar los algoritmos de aprendizaje automático, las



autoridades pueden predecir el volumen y la composición de los residuos generados en diferentes áreas y planificar sus recursos. Esto permite una mejor programación de la recolección, asignación de personal y equipos, y una gestión más eficiente de los recursos, ya que, aproximadamente 70-80% del presupuesto destinado se ocupa en el proceso de recolección y transporte en las diferentes rutas (Sulemana *et al.*, 2018), lo cual involucra los combustibles, mantenimiento de parque vehicular y pago de sueldos al personal operador.

Los algoritmos de IA pueden optimizar las rutas de recolección de residuos en función de factores como la densidad de generación de residuos, los patrones de tráfico y los datos en tiempo real sobre los niveles de llenado de los contenedores. Al analizar estas variables, la IA puede ayudar a identificar las rutas más eficientes, minimizando las distancias de viaje, el consumo de combustible y los costos asociados. Además, las rutas de recolección de residuos optimizadas pueden reducir las emisiones de los vehículos, lo que tiene un impacto ambiental positivo al reducir la huella de carbono de las operaciones de gestión de residuos. El trabajo que desarrollaron Akdas *et al.*, (2021), es un método para el enrutamiento de vehículos, en el que se emplea un algoritmo de optimización de colonias de hormigas, los autores recopilaban información de 110 puntos de un municipio de Estambul, Turquía, posteriormente los convirtieron en coordenadas para usar en una base de datos, visualizaron los datos en un mapa y se creó una matriz de distancias, que el algoritmo de optimización de colonias de hormigas analizó para determinar la ruta más corta, con ello se redujo la distancia de transporte en un 13% (Fang *et al.*, 2023). Otro ejemplo es el trabajo de Akhtar *et al.*, (2017), que, mediante el desarrollo de un algoritmo de búsqueda de retroceso para optimizar las rutas de recolección de residuos, reportaron un aumento de eficacia del 36.7% en la recolección. Este algoritmo se alimentó de los datos que proporcionaron los contenedores inteligentes y que sirvieron para encontrar un rango óptimo para reducir la cantidad y distancia de los contenedores instalados.

Monitoreo y gestión inteligente de residuos

Los sistemas de monitoreo y gestión inteligente de residuos, al emplear el aprovechamiento de sensores basados en IoT y análisis de datos, ofrecen soluciones innovadoras para mejorar las prácticas de gestión de residuos, al implementar sensores basados en IoT en contenedores, se pueden monitorear y recopilar datos en tiempo real sobre los niveles de llenado. Los contenedores inteligentes son herramientas que clasifican rápidamente los residuos al utilizar algoritmos de aprendizaje automático (Fang *et al.*, 2023; Yigitcankar y Cugurullo, 2020). Los sensores IoT utilizan tecnologías como sensores ultrasónicos o infrarrojos para medir los niveles de residuos dentro de los contenedores. Los datos recopilados se pueden transmitir de forma inalámbrica a un sistema centralizado. Los análisis de datos impulsados por IA pueden procesar esta información sobre patrones de generación de residuos, optimizar los horarios de recolección y mejorar la eficiencia general del proceso. Chaudhari *et al.*, (2019), desarrollaron un contenedor inteligente construido sobre una plataforma basada en un microcontrolador Raspberry pi Uno, el cuál interconectaron a un módem GSM, a un sensor ultrasónico y a un sensor de peso para calcular el peso de los contenedores de basura. El microcontrolador Raspberry se programó para que, una vez llenado el cubo de basura, el sensor ultrasónico active el módem GSM que advierte de manera persistente al personal requerido hasta que se recolecte la basura por el camión. El monitoreo en tiempo real permite a los municipios estar informados sobre las capacidades de los contenedores. Otro ejemplo de aplicación de gestión efectiva sería la de los RP y los residuos infecciosos en hospitales, crucial para mantener un entorno seguro e higiénico. Se puede aprovechar la IA para predecir los niveles de llenado de los contenedores de residuos peligrosos y optimizar los horarios de recolección de residuos dentro de las instalaciones hospitalarias. Este enfoque proactivo permitiría a los hospitales garantizar una disposición oportuna y minimizar el riesgo de contenedores desbordados (Kumar *et al.*, 2021; Fang *et al.*, 2023).

A través de la implementación de sistemas de monitoreo de residuos impulsados por IA, los hospitales pueden monitorear continuamente áreas de almace-

namiento de residuos peligrosos, unidades de eliminación y procesos de transporte. El monitoreo en tiempo real proporciona información sobre los niveles de residuos, lo que permite tomar medidas rápidas para prevenir derrames, fugas u otros incidentes que podrían comprometer la seguridad de los pacientes, el personal sanitario y el medio ambiente (Hosseini *et al.*, 2022). Al analizar datos sobre patrones de generación de residuos, flujo de pacientes y actividades operativas, los algoritmos de IA pueden ofrecer recomendaciones para optimizar la ubicación de los contenedores de residuos, mejorar las prácticas de segregación de residuos y optimizar los flujos de trabajo.

La integración de IA en la gestión de residuos sólidos en México

Con base en los ejemplos mencionados con anterioridad, podemos decir que la integración de IA en la gestión de residuos sólidos en México conlleva una serie de beneficios que abarcan aspectos económicos, ambientales y sociales. Dentro de las ventajas económicas, se puede mencionar la reducción del consumo de combustible y los costos operativos asociados al transporte. Al aprovechar la IA, los municipios pueden tomar decisiones informadas sobre inversiones en infraestructura, asegurando la utilización óptima de los recursos y maximizando el retorno de la inversión.

En cuanto a los beneficios ambientales, con los sistemas de clasificación de residuos impulsados por IA, se mejora la precisión y eficiencia de los procesos de reciclaje, garantizando la categorización y separación adecuadas, reduciendo la contaminación y mejorando la calidad de los materiales reciclables, contribuyendo así a conservar los recursos naturales y disminuir el impacto ambiental de la eliminación de residuos, también minimizaría las emisiones de los vehículos recolectores.

Los impactos sociales positivos por las prácticas eficientes de gestión de residuos, impulsadas por tecnologías de IA incluyen mejoras a la salud pública al reducir el riesgo de transmisión de enfermedades y la contaminación ambiental, ya que se puede minimizar el desbordamiento de los contenedores y la basura en las calles, mejorando la limpieza y estética de los espacios públicos. Además, la integración de la IA puede empoderar a los pepenadores al proporcionarles con-

diciones de trabajo más seguras y organizadas. Los sistemas de clasificación impulsados por IA facilitan la separación de materiales reciclables, lo que hace que el proceso de recolección de residuos sea más eficiente y menos peligroso. Este empoderamiento no solo mejoraría la calidad de vida de los pepenadores, sino que también reconocería su valiosa contribución a la cadena de valor del reciclaje.

Implicaciones éticas y sociales en el contexto mexicano

La integración de la IA en la gestión de residuos sólidos en México plantea importantes consideraciones éticas y sociales que deben abordarse cuidadosamente para garantizar la equidad, privacidad e inclusión.

En las preocupaciones de privacidad es crucial establecer medidas sólidas de protección de datos para salvaguardar la privacidad de las personas y las comunidades. La transparencia en las prácticas de recopilación de datos, el consentimiento informado y el almacenamiento seguro de datos son esenciales para generar confianza entre la población usuaria. Es importante asegurar que los datos recopilados se utilicen únicamente con fines de gestión de residuos y que la información personal o sensible se maneje con el mayor cuidado y cumplimiento de las regulaciones de privacidad correspondientes.

En la adopción de tecnologías de IA en la gestión de residuos, es fundamental garantizar un acceso equitativo y una distribución de beneficios justa entre los diferentes grupos socioeconómicos en México. Esto incluye abordar la brecha digital para garantizar que las comunidades marginadas y las áreas desatendidas tengan acceso a soluciones de gestión de residuos impulsadas por IA. Se deben realizar esfuerzos para cerrar la brecha tecnológica y proporcionar capacitación y apoyo a las comunidades para utilizar de manera efectiva las herramientas de IA. Además, se deben desarrollar estrategias para garantizar que los beneficios de la integración de la IA, como ahorros económicos y servicios mejorados, lleguen a todos los segmentos de la sociedad, minimizando las disparidades y promoviendo la inclusión social.

La integración de la IA en la gestión de residuos puede implicar cambios en los roles laborales y potencialmente resultar en la pérdida de empleo para los



trabajadores del sector. Es crucial abordar este problema de manera proactiva mediante la implementación de políticas y programas que brinden oportunidades de capacitación y mejora de habilidades. Al invertir en programas de capacitación vocacional y educación, los trabajadores pueden adquirir las habilidades necesarias para adaptarse al cambiante panorama de la gestión de residuos. La colaboración entre el gobierno, la industria y las instituciones educativas puede desempeñar un papel vital en el desarrollo de iniciativas que aseguren una transición fluida para los trabajadores, permitiéndoles participar y beneficiarse de la transformación impulsada por la IA en el sector.

Las consideraciones éticas y las implicaciones sociales deben estar en primer plano en la integración de la IA en la gestión de residuos sólidos en México. Respetar la privacidad, garantizar el acceso equitativo y abordar las preocupaciones sobre la pérdida de empleo son clave para construir un sistema de gestión de residuos sostenible e inclusivo impulsado por la IA que beneficie tanto al medio ambiente como a la sociedad mexicana en su conjunto.

Desafíos tecnológicos y limitaciones en el contexto mexicano

Disponibilidad y calidad de los datos para los algoritmos de IA en los sistemas de gestión de residuos en México

Uno de los principales desafíos en la integración de la IA en las prácticas de gestión de residuos en México es la disponibilidad y calidad de los datos. Datos precisos y completos son esenciales para entrenar los algoritmos de IA y generar ideas significativas. Sin embargo, en el contexto mexicano existen fuertes limitaciones en cuanto a la recopilación, organización y accesibilidad, por lo cual se debe tener en cuenta las necesidades y la infraestructura únicas de los municipios mexicanos. México se caracteriza por ser un país con una gran diversidad cultural, por lo que cada municipio presenta diferencias uno del otro y se pueden reflejar en los sistemas de gestión de residuos, recursos y capacidades. Adaptar los modelos de IA a estos contextos específicos es esencial para garantizar su efectividad y practicidad. Esta adaptación implica personalizar los algoritmos y tecnologías de IA para abordar

los desafíos específicos de gestión de residuos que enfrentan los municipios mexicanos, se requiere comprender la composición local de los residuos, los métodos de recolección, las redes de transporte y las instalaciones de disposición final.

Otro desafío en el contexto mexicano es la necesidad de construir experiencia técnica y capacidad local para la implementación de IA en las prácticas de gestión de residuos, ya que desarrollar y mantener soluciones de IA requiere profesionales capacitados que comprendan tanto los principios de gestión de residuos como las tecnologías de IA.

Para abordar este desafío, se deben emprender iniciativas para proporcionar programas de capacitación y desarrollo de capacidad en IA para profesionales de la gestión de residuos en México. La colaboración entre instituciones académicas, agencias gubernamentales y socios de la industria puede facilitar la transferencia de conocimientos y el desarrollo de habilidades. Mediante la inversión en programas de educación y capacitación, México puede fomentar una fuerza laboral talentosa equipada con las habilidades técnicas necesarias para implementar y mantener tecnologías de IA en las prácticas de gestión de residuos.

Aplicación de la inteligencia artificial en México y América Latina

En la literatura mexicana y latinoamericana se ha encontrado ejemplos de la aplicación de la IA en la gestión de residuos sólidos urbanos, si bien la literatura no es extensa, los aportes que se ejemplifican a continuación son una base de la aplicación de la IA en distintas ramas de la gestión de residuos sólidos urbanos. Un ejemplo de ello es el trabajo de Calderón-Casanova *et al.*, (2018), donde desarrollaron un modelo de inteligencia artificial para la predicción de la generación de residuos sólidos urbanos en la Ciudad de México, para ello crearon una base de datos con información pública de instituciones gubernamentales, representadas en 39 variables, con ello se alimentó el algoritmo de aprendizaje para generar el valor de predicción. Como parte de los resultados, se identificaron 10 variables generales, con las cuales se puede realizar la predicción de la generación de residuos sólidos, y que, además, se pueden emplear en los demás municipios de México, siempre y cuando se cuente con información para dichas variables.

Montalvo Hernández (2021) desarrolló una aplicación para la optimización y medición de la eficiencia de las rutas de recolección de residuos sólidos urbanos en el estado de Tamaulipas, para ello el modelo de aplicación albergó una base de datos de mapas de la zona de recolección, personal operativo, camiones o unidades de recolección, y días de recolección. Se compararon datos de la recolección de residuos en la misma zona en fechas diferentes y con métodos diferentes: recolección sin la aplicación y recolección con la aplicación, fue evidente que con la aplicación se cubre el 100% de la zona en un menor tiempo y con una menor cantidad de residuos.

Por otra parte, el trabajo desarrollado por Gómez y Tamayo (2022), en una escuela en Colombia, en donde mediante el uso de *Auto Teachable Machine de Google* crearon un modelo de red neuronal para la clasificación de residuos sólidos urbanos mediante imágenes, contaron con tres clasificaciones y cada una fue alimentada con una base de datos de más de 500 imágenes. Este modelo permitía a los estudiantes situar el residuo a desechar frente a una cámara para la captura de imagen y su posterior análisis en la red neuronal, y con ello indicar al usuario en que contenedor desechar el residuo.

Por último, Chávez Salinas (2022), llevó a cabo el diseño y desarrollo de un robot móvil utilizando visión artificial para la identificación y recolección de botellas de plástico en las playas de Perú, mediante el uso de Machine Learning y red neuronal convolucional, que fueron entrenadas durante simulaciones en el reconocimiento de imágenes y agrupación de estas en grupos, como resultado el modelo de robot reconoce las botellas y se acerca a ellas evadiendo obstáculos durante su trayectoria hasta recolectar la botella.

Limitaciones del uso de la inteligencia artificial

La implementación de sistemas basados en IA requiere una inversión económica significativa en tecnología y capacitación. Esto puede ser un obstáculo para muchas regiones y municipios con recursos limitados, especialmente aquellos en áreas rurales y de bajos ingresos. La falta de financiamiento y acceso a tecnología avanzada puede dificultar la adopción generalizada de estas soluciones. Además, la integración de la

IA en la gestión de residuos requiere una infraestructura sólida y una conectividad confiable. En áreas donde la infraestructura de comunicaciones y la cobertura de Internet son deficientes, la implementación de sistemas basados en IA puede ser difícil. Esto puede limitar la aplicabilidad de estas soluciones en todo el país y dificultar la estandarización de las prácticas de gestión de residuos.

Otro desafío es la necesidad de adaptar las soluciones basadas en IA a las características específicas de cada región y municipio. México es un país diverso con flujos de residuos variables, condiciones geográficas diferentes y aspectos socioeconómicos distintos. Por lo tanto, se requiere un enfoque personalizado y una comprensión profunda de las necesidades y desafíos locales para implementar soluciones efectivas.

Conclusiones

La integración de la inteligencia artificial (IA) en la gestión de residuos sólidos en México ofrece numerosas oportunidades para mejorar la eficiencia, aumentar las tasas de reciclaje, reducir el impacto ambiental y el aprovechamiento de recursos económicos y humanos.

La implementación de la IA en la gestión de residuos tiene beneficios que no solo estandarizarían las prácticas de gestión, sino que las mejorarían, sin embargo, las diferentes condiciones económicas y geográficas de cada región y municipios dificultan su implementación. Es de destacarse que, si bien la IA puede llegar a ser una herramienta en la gestión de residuos, su éxito debe involucrar la educación y conciencia ambiental para la población.

Referencias

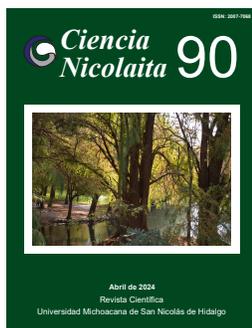
- Akdaş HŞ, Doğan B, Bas A, Uslu BÇ. (2021). Vehicle route optimization for solid waste management: a case study of maltepe, Istanbul. In: 2021 13th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI): 1-6. DOI: 10.1109/ECAI52376.2021.9515129.
- Calderón-Casanova E, López-Ortíz M, Galán P, Villatoro-Tello E, García-Aguilar R, García-Parra B. (2018). Predicción de la generación de residuos sólidos urbanos en la Ciudad de México. *Research in Computing Science* 147(5): 65-77.



- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2023, 08 de mayo). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Diario Oficial de la Federación. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGPGIR.pdf>
- Ceballos Pérez S, Brambila Paz JJ, Pérez Cerecedo V. (2022). Residuos sólidos urbanos y economía circular en Pachuca, Hidalgo, México. *Acta Universitaria* 32: e3437. DOI: 10.15174/au.2022.3437.
- Chávez Salinas MA. (2022). Desarrollo de un robot móvil con inteligencia artificial para recolectar botellas de plástico. Pontificia Universidad Católica del Perú, MSI tesis, p. 135.
- Chaudhari MS, Patil B, Raut V. (2019). "IoT based Waste Collection Management System for Smart Cities: An Overview," 2019 3rd International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC), Erode, India, pp. 802-805. DOI: 10.1109/ICCMC.2019.8819776.
- Du W, Zheng J, Li W, Liu Z, Wang H, Han X. (2022). Efficient recognition and automatic sorting technology of waste textiles based on online near infrared spectroscopy and convolutional neural network. *Resour Conserv Recycl* 180: 106157. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106157.
- ECOCE. "Cifras y Estadísticas". (2020). <https://www.ecoce.mx/cifras-y-estadisticas>.
- Fang B, Yu J, Chen Z *et al.* (2023). Artificial intelligence for waste management in Smart cities: a review. *Environ. Chem. Lett* 21: 1959-1989. DOI: 10.1007/s10311-023-01604-3.
- Gómez Vargas DL, Tamayo Saavedra AK. (2022). Clasificador de residuos sólidos para la i.e. Juan XXIII del municipio de Algeciras con aplicación de Machine Learning. *Revista Sennova: Revista del Sistema De Ciencia, Tecnología E Innovación* 6(1): 11-24. DOI: 10.23850/23899573.5409.
- Hosseini Bamakan SM, Malekinejad P, Ziaei M. (2022). Towards blockchain-based hospital waste management systems; applications and future trends. *Journal of Cleaner Production* 349: 131440. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131440.
- Hua Yu K, Zhang Y, Li D, Montenegro-Marin CE, Malarvizhi Kumar P. (2021). Environmental planning based on reduce, reuse, recycle and recover using artificial intelligence. *Environmental Impact Assessment Review* 86: 106492. DOI: 10.1016/j.eiar.2020.106492.
- Ihsanullah I, Alam G, Jamal A, Shaik F. (2022). Recent advances in applications of artificial intelligence in solid waste management: A review. *Chemosphere* 309(1): 136631. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.136631.
- Juárez de la Rosa JA, Medina Martínez H, Taboada González P, Aguilar Virgen Q, Márquez Benavides L. (2023). Gobernanza ambiental en la gestión de residuos sólidos de los municipios en Oaxaca, México. *Acta Universitaria* 33: e3704. DOI: 10.15174.au.2023.3704
- Kaza S, Yao LC, Bhada-Tata P, Van Woerden F. (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Urban Development; Washington, DC: World Bank. <http://hdl.handle.net/10986/30317>
- Kumar NM, Mohammed MA, Abdulkareem KH, Damasevicius R, Mostafa SA, Maashi M S, Chopra SS. (2021). Artificial intelligence-based solution for sorting COVID related medical waste streams and supporting data-driven decisions for smart circular economy practice. *Process Safety and Environmental Protection* 152: 482-494. DOI: 10.1016/j.psep.2021.06.026.
- Montalvo Hernández MA. (2021). Aplicación automatizada para la optimización y medición del Sistema Integral de recolección de residuos sólidos urbanos en la ciudad de Reynosa, Tamaulipas, México. Universidad Autónoma de Tamaulipas. MS. pp. 72.
- Moreno Padilla R. (2019). La llegada de la inteligencia artificial a la educación. *Revista de Investigación en Tecnologías de la Información* 7: 260-270. DOI: 10.36825/RITI.07.14.022.
- Muñoz Cruz RC, Morales Calderón JR. (2023). El impacto ambiental de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos y la economía circular en México. *Denarius* 1(44): 205-233.
- Li N, Chen Y. (2023). Municipal solid waste classification and real-time detection using deep learning methods. *Urban Climate* 49: 101462. DOI: 10.1016/j.uclim.2023.101462.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; 2018) "Informe de la situación de medio ambiente en México, Capítulo 7, Residuos", <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/cap7.html>.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; 2020). "Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos 2020", URI:

<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf>

- Seredkin AV, Tokarev MP, Plohih IA, Gobyzov OA, Markovich DM. (2019). Development of a method of detection and classification of waste objects on a conveyor for a robotic sorting system. *Journal of Physics: Conference Series* 1359 012127. DOI: 10.1088/1742-6596/1359/1/012127.
- Sousa J, Rebelo A, Cardoso JS. (2019). Automation of waste sorting with deep learning. In: 2019 XV Workshop de Visão Computacional (WVC): 43-48. DOI: 10.1109/WVC.2019.8876924.
- Sulemana A, Donkor EA, Forkuo EK, Oduro-Kwarteng S. (2018). Optimal routing of solid waste collection trucks: a review of methods. *J Eng* 2018: 4586376. DOI: 10.1155/2018/4586376.
- Thumiki M, Khandelwal A. (2022). Real-time mobile application for classifying solid waste material into recyclable and non-recyclable using Image recognition and convolutional neural network. IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS). 1-6. DOI: 10.1109/SCEECS54111.2022.9740863.
- Yigitcanlar T, Cugurullo F. (2020). The sustainability of artificial intelligence: an urbanistic viewpoint from the lens of smart and sustainable cities. *Sustainability* 12: 8548. DOI: 10.3390/su12208548.
- Zhang S, Chen Y, Yang Z, Gong H. (2021). Computer vision based two-stage waste recognition-retrieval algorithm for waste classification. *Resour Conserv Recycl* 169: 105543. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105543.



Ciencia Nicolaita 90

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Modelo de liderazgo e implementación del cambio para equipos de trabajo profesionales en México

Leadership and change implementation model for professional work teams in Mexico

Andrés Guerra Alvarez* y Felipe Ángeles Puc Hernández

Para citar este artículo: Guerra Alvarez A, Puc Hernández FA (2024). Modelo de liderazgo e implementación del cambio para equipos de trabajo profesionales en México. *Ciencia Nicolaita* 90: 169-189.

DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi90.726>



Historial del artículo

Recibido: 9 de julio de 2023
Aceptado: 29 de agosto de 2023
Publicado en línea: abril 2024



Ver material suplementario



***Correspondencia de autor:** andres.guerra.30@hotmail.com



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Modelo de liderazgo e implementación del cambio para equipos de trabajo profesionales en México

Leadership and change implementation model for professional work teams in Mexico

Andrés Guerra Álvarez^{1*}, Felipe Ángeles Puc Hernández²

¹ Programa de doctorado en psicología empresarial. Universidad Americana de Europa. Querétaro, Querétaro de Arteaga, México.

² Universidad Americana de Europa. Querétaro, Querétaro de Arteaga, México.

Resumen

El propósito de este artículo es presentar un modelo de liderazgo y administración del cambio con elementos basados en modelos extranjeros, y complementado con virtudes y hábitos característicos de la cultura e identidad del líder mexicano. Se busca impulsar elementos de “cultura ganadora” y de cambio positivo; robusteciendo “fórmulas” de éxito y desactivando vicios de comportamientos detractores típicos de la cultura mexicana. Este modelo es producto de una investigación correlacional con enfoque mixto y cuasi experimental, que se aplica en un problema específico donde la implementación de cambios en el comportamiento de los empleados es crítica. La aplicación y validación práctica se realiza en un centro de ingeniería en México en el tema de “Inclusión y Diversidad”, donde se requiere la adopción de comportamientos y hábitos que permitan un ambiente sano y psicológicamente seguro para colaborar y compartir ideas novedosas; y dónde todos tengan las mismas oportunidades de reconocimiento y crecimiento en su carrera profesional. Se observa la efectividad del modelo con mediciones antes y después de la intervención, y se identifica un cambio significativo en los comportamientos, así como en los indicadores de éxito para comprobar la eficacia del modelo en el caso específico.

Palabras clave: cambio, liderazgo, cultura, hábitos, comportamientos.



Abstract

The purpose of this article is to present a leadership and change management model with elements based on foreign schemes and complemented with habits and values found in the Mexican culture and the leadership identity in México. It seeks to drive elements of a “winner culture” and with a positive change attitude; strengthening “success formulas” and de-activating detractive behaviors typical of the Mexican culture. This model is a result of a correlational research with a mixed and quasi-experimental approach. It is applied to a specific problem where the implementation of changes in behavior is of the essence. The practical application and validation are on an engineering center in México to improve on the theme of “Inclusion & diversity”, where we need the adoption of behaviors and habits to create a healthy and psychological safe working environment to collaborate, share novel ideas, and where everyone has the same recognition and growth opportunities in their professional career. The effectiveness of the model is observed with measurements before and after the intervention, and significative behavioral changes are identified, with visible impact on success indicators that validate the model on this application.

Keywords: change, leadership, culture, habits, behaviors.

Introducción

¿Cuántas veces hemos escuchado o vivido lo difícil que es implementar cambios de comportamiento en los equipos de trabajo en compañías en México? ¿Cuántas veces, cuando se logra, sólo permanece mientras el jefe actual está en su posición? ¿Cuántas veces nos hemos quejado de que la cultura en México no nos permite avanzar hacia la mejora? Estas preguntas y la problemática que traen embebida son la motivación de la presente investigación.

En esta introducción se busca dar un contexto de la importancia del tema, la justificación para su investigación, y se describen tanto las hipótesis como el objetivo general y particulares que dirigen el trabajo de investigación. Este artículo describe y condensa el trabajo de tesis doctoral con el mismo nombre, y busca la difusión de los resultados en las distintas comunidades educativas, empresariales y de investigación.

Líderes y consultores en varios sectores buscan utilizar modelos y metodologías de implementación de cambio desarrollados genéricamente en otros países, sin tomar en cuenta la idiosincrasia actual y local. Esto trae como consecuencia adopciones muy lentas, resistencia al cambio, y cambios no duraderos o de corto plazo que dan como resultado mejoras no sostenibles (Hanif *et al.*, 2019).

Vivimos en una realidad siempre cambiante, no es algo nuevo. Hay quienes argumentan que el tipo y velocidad del cambio en los últimos años es exponencialmente mayor. El acrónimo VUCA (siglas en inglés: volátil, incierto, complejo y ambiguo) es utilizado para describir los tiempos altamente cambiantes en que vivimos, y con lo que todos tenemos que lidiar, enfrentar o aprovechar (Harrison, 2020).

Como en cualquier momento de la historia, las entidades, o compañías que se adapten o adopten mejor el cambio, tendrán oportunidad de competir o sobrevivir. El tema de la administración del cambio tampoco es nuevo, existen muchos modelos e investigaciones; sin embargo, la necesidad de evolucionar más rápido para sobrevivir a avances tecnológicos, competencia global, conflictos bélicos, pandemias, y otros disruptores, está más presente que nunca.

Por otro lado, si exploramos un poco la historia social y laboral de México, nos daremos cuenta de que la flexibilidad, agilidad y efectividad en la adopción de hábitos no son distintivo de las organizaciones mexicanas (Díaz-Guerrero, 1994). La presente investigación busca adaptar y complementar un modelo operativo que ayude a organizaciones mexicanas a lograr ejecutar la adopción de cambios de una manera más efectiva, y con mejores probabilidades de permanencia. Se busca que el resultado de la investigación sea

un modelo que reúna las mejores prácticas para la efectividad en implementación de cambios, y establezca una forma estándar para minimizar variación. Actualmente existen modelos y normas que incluso se requieren en las empresas de hoy, tales como: APQP (*Advanced Product Quality Planning*), Six Sigma, Lean, PMP (*Project Management Professional*), ISO (*International Organization for Standardization*), normas gubernamentales de salud (e.g. NORM 35), o normas de seguridad EHS (*Environmental Health & Safety*).

Las anteriores son ejemplos de esquemas que no sólo dependen de su contenido técnico para ser efectivos en un mundo VUCA; sino que, dependen de una administración seria para hacerlos realidad, porque finalmente se deben reflejar en comportamientos personales y organizacionales. El personal debe aceptar e integrar los comportamientos a su portafolios de herramientas, y hacerlo porque entienden que es una mejor forma de hacer su trabajo.

Prosci (2020), señala que aún cuando los modelos sean bien seleccionados y planteados, su implementación ha sido históricamente pobre, y los resultados por ende no exitosos. De acuerdo con la revista *Fortune*, menos del 10% de las estrategias se ejecutaron con efectividad al no contar con una administración de cambio; y de acuerdo con la revista Times (estudio en 200 empresas) sólo el 14% contaban con modelos de ejecución de cambio, con lo que menos del 30% de los proyectos fueron exitosos (Harrison, 2020).

Comencemos con entender que un cambio involucra una transición desde un estado generalmente estable. Esta estabilidad es resultado de una serie de elementos que la determinan, y si queremos lograr un cambio en esa situación, es necesario modificar varios o la mayoría de estos elementos que están arraigados en la gente y muchas veces representan habilidades que se tienen y que han costado mucho trabajo desarrollar; otras representan control sobre un proceso, algunas otras son un requerimiento por un procedimiento escrito, o una expectativa del equipo.

Las anteriores son algunas de las muchas razones por las cuales los cambios son difíciles de producir, y la famosa “resistencia al cambio” es un resultado no de un problema, sino de una situación problemática; es decir múltiples razones o causas para múltiples elementos de un resultado o situación.

Y ¿por qué no se sostienen los cambios? Sostener un hábito es uno de los retos más grandes. Son múltiples las razones por las cuales la gente falla en mantener los propósitos de año nuevo: cansancio, desánimo, desilusión, pérdida de ritmo, falta de apoyo, falta de resultados, etc. Por lo tanto, es muy importante contar con mecanismos para que una vez que el cambio se define, se implemente y se comiencen a lograr resultados, y este se consolide como “nueva realidad”.

Las estadísticas señalan que sólo el 30% de los cambios permanecen después de un ciclo anual, y sólo el 10% de los cambios permanecen más de tres años, aún a pesar de que durante la implementación los cambios fueron exitosos (Patterson *et al.*, 2002). Pero, además de la “fuerza de voluntad” ¿Qué se necesita para mantener la mejora? Hablemos un poco de México, su cultura y su perfil del liderazgo. Tanto en la bibliografía como en la práctica laboral, los conceptos de liderazgo, administración, y jefatura están muy confundidos. Se dice incluso que no se tiene que ser buen jefe, o buen administrador, sino un buen líder; pero en realidad son funciones muy importantes, diferentes y necesarias.

En forma general y de acuerdo con múltiples fuentes, el líder toma funciones de definición, de inspiración, dirección y visión, y estrategias para lograrla (Sinek, 2011); el administrador se enfoca en la utilización efectiva (eficaz y eficiente) de los recursos (Bossidy y Charan, 2002; Walker, 2018); y el jefe es responsable de los procesos operacionales de la compañía además del crecimiento profesional del personal (Scott, 2019).

¿Cómo se da esto en una empresa en México? ¿Cómo interviene en el proceso de adopción de hábitos o cambios? ¿Cómo tomar ventaja de las fortalezas del perfil del mexicano? Son preguntas que inspiran esta investigación. Pero ¿cuáles son esas desventajas, fortalezas, valores, antivalores o detractores de nuestro perfil y cultura? El sentido de responsabilidad, la creatividad y el respeto a jerarquías (Zunzunegui, 2014); el apego a la familia (Ramos, 1934); la tenacidad y trabajo duro (Paz, 1950), y la comunicación y la forma de evitar el conflicto Scott (2019); son características que se estudian como elementos característicos de nuestra cultura.

Así, el ambiente y cultura laboral están impactados fuertemente por cada miembro del equipo de trabajo



y su líder; y esto se sustenta en sus valores característicos; que en este caso están ligados a la familia, respeto por las jerarquías, creatividad, tenacidad y el estilo de comunicación. Esto significa que visión, estrategias, y prioridades son muy diferentes para los mexicanos, y de ahí la importancia de no esperar la efectividad prometida por métodos extranjeros.

Por todo lo anterior, definitivamente es claro que la cultura del mexicano en el trabajo, y su perfil de liderazgo tienen un conjunto muy interesante de valores y características propias que pueden ser complementadas para un perfil más ganador en un ambiente que hoy es mucho más global y plagado de retos de ambientes VUCA.

Los beneficios de lograr avance en este campo son muy amplios y variados. Sin embargo, este estudio en particular está limitado al campo laboral profesional en México, y la aplicación práctica tendrá un enfoque en una compañía específica del giro de “ingeniería”, el cual es un sector que aún se encuentra en crecimiento en el país. El aprendizaje que se logre en este campo, a la larga puede ser de beneficio para compañías del giro y similares, y puede ser una referencia para quien busca impacto positivo en el país, creciendo en actividades de creación de valor, y no sólo de explotación de recursos naturales o de manufactura basada en diseños extranjeros.

Esta investigación contiene rasgos y datos de un enfoque mixto correlacional y secuencial. Esto con la investigación analítica, y contextualizaciones subjetivas (en la fase de exploración y generación de modelos) del enfoque cualitativo; y un enfoque cuantitativo con experimentación por medio de intervenciones, encuestas y observaciones que nos permiten hacer correlaciones, validar tendencias, y confirmar la permanencia de nuevos comportamientos.

Esta investigación tiene por audiencia a estudiantes e investigadores de psicología, comportamiento organizacional y humanidades; líderes, empresarios, recursos humanos y gerentes; se limita al sector industrial de ingeniería, dejando fuera sectores educativos, de construcción, y salud. Deja fuera además elementos característicos de la cultura mexicana como: abnegación, religión, pasatiempos, grado académico, sexualidad, política, y características biométricas.

Así, esta investigación se centra en la hipótesis de que es posible acelerar la implementación de cambios conductuales, y adaptación de hábitos en grupos de

trabajo por medio de un modelo de adopción del cambio que incluyan una combinación complementaria de perfiles característicos en México. En consecuencia, se puede comprobar el resultado y la validez de la hipótesis mediante indicadores NPS (Net Promoter Score) que describan la percepción de los clientes.

El objetivo general de la investigación es diseñar un modelo conceptual y metodológico de administración del cambio efectivo que ayude a mitigar la problemática presentada, donde la aplicación directa de métodos extranjeros produce un cambio limitado, lento y no duradero.

Los objetivos específicos buscan identificar el perfil de liderazgo mexicano con sus valores y antivalores; ajustar este perfil con fórmulas ganadoras; identificar los elementos principales de modelos de administración del cambio exitosos en el extranjero; producir un modelo combinado; y comprobar su efectividad en una aplicación práctica particular.

Materiales y métodos

Diseño y tipo de investigación

Los métodos mixtos de investigación son un conjunto de procesos sistemáticos, empíricos y críticos e implican la recolección y el análisis de datos cuantitativos y cualitativos, así como su integración y discusión, para realizar inferencias en la información recabada y lograr un mayor entendimiento del fenómeno (Hernández *et al.*, 2014).

El enfoque de este trabajo de investigación es mixto y secuencial; en la primera etapa cualitativa se describe el perfil de liderazgo mexicano a través de una exploración de las etapas críticas de la historia de este país. Enseguida, se complementa este perfil con elementos “ganadores” de otros países; posteriormente, se adapta este perfil a un modelo inductivo de aceleración de cambio, y finalmente se llevan a cabo talleres y entrevistas para culminar con la creación de un modelo conceptual complementado.

Los resultados de esta etapa sirven para desarrollar una segunda fase cuantitativa que busca demostrar las hipótesis que relacionan las variables y elementos de los modelos, con la capacidad de implementar comportamientos en forma rápida y sostenible; esto con la aplicación práctica en un centro de in-

geniería donde se intenta mejorar los niveles de inclusión mediante la adopción de comportamientos específicos.

El diagrama conceptual mostrado en la **Figura 1** presentan las preguntas que se hacen en los enfoques cualitativos y cuantitativos; y además cómo el enfoque mixto nos da un elemento complementario de los anteriores.

Por otra parte, se construye el mapa conceptual mostrado a continuación en la **Figura 2** donde se describe la ruta que se toma en las dos partes principales de identificación y definición de elementos y modelos (enfoque cualitativo), y validación de estos en un caso específico (enfoque cuantitativo).

Población y muestra

La aplicación práctica del modelo para el cambio de comportamientos en el tema de “Inclusión” se lleva a cabo en un Centro de Ingeniería, basado en el centro de México. Este centro de trabajo es parte de la iniciativa privada y emplea a más de mil ingenieros mexicanos. Se busca hacer dos procesos de medición de parámetros de éxito, uno en diagnóstico base y uno después de la intervención para comprobar la eficacia del modelo.

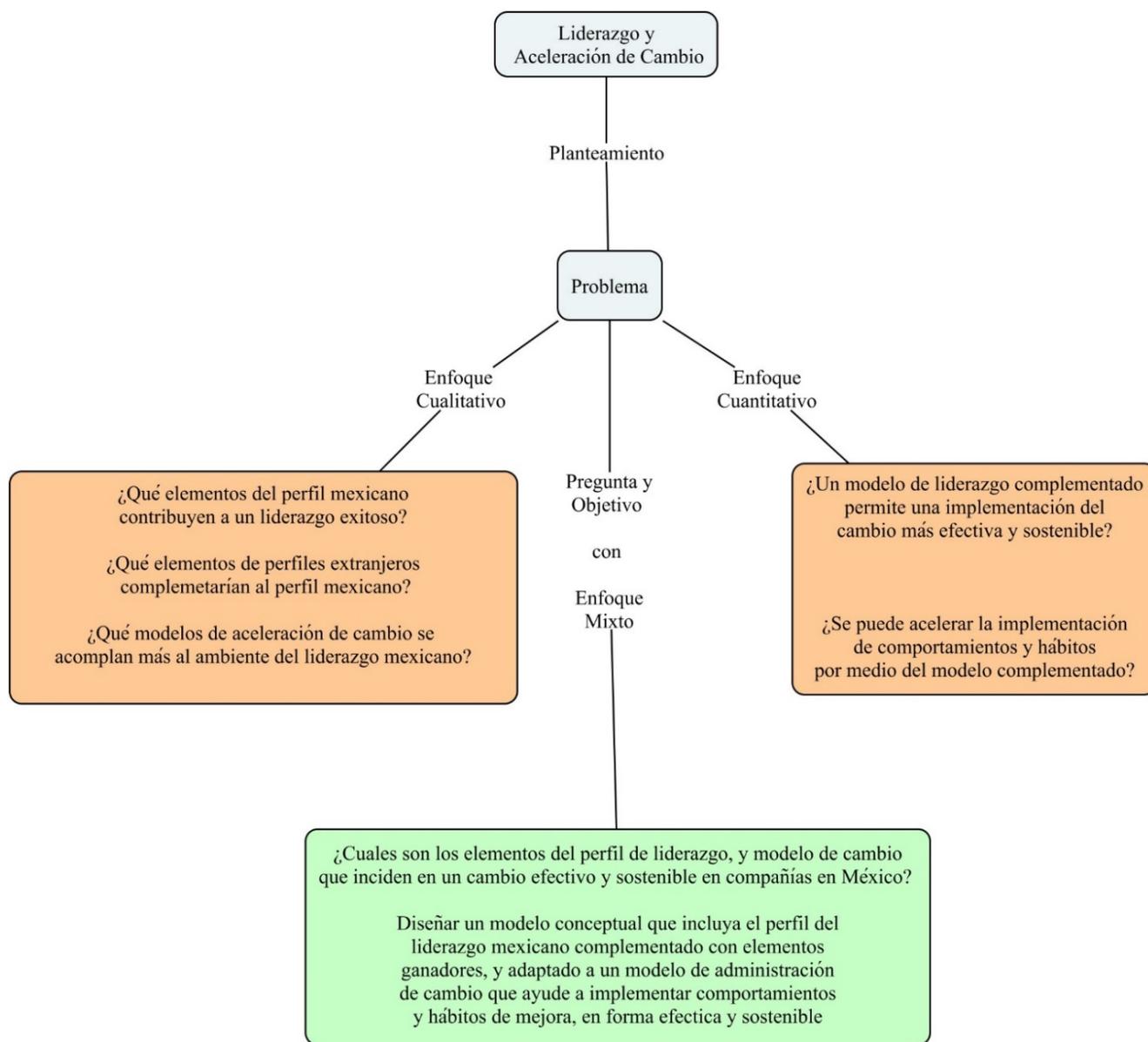


Figura 1. Proceso de planteamiento de investigación mixta.



La población es de aproximadamente 1300 empleados; sobre los cuales se estarán haciendo inferencias correspondientes para la comprobación de hipótesis de investigación. Es preciso indicar que las conclusiones referentes a la evaluación de las

hipótesis serán válidas directamente a esta población, y en un cierto grado a las poblaciones similares.

Las características principales de la población en el centro de ingeniería son:

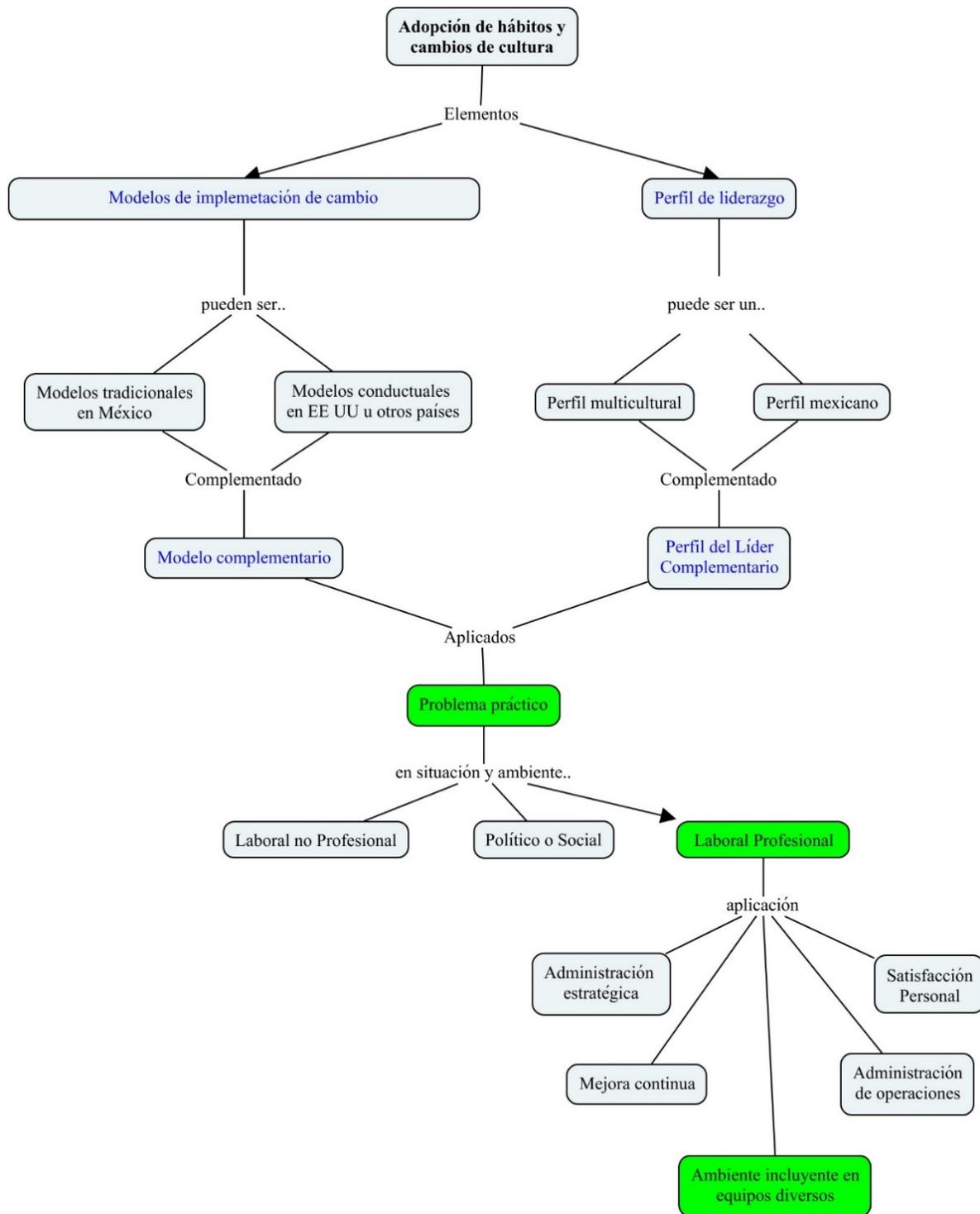


Figura 2. Mapa conceptual de la investigación.

- Edad: De 19-60 años. Media 35.8 años (2022) y una dispersión 1Q:31, 2Q:36, 3Q:40, 4Q:53.
- Especialidades: 80% disciplinas: Mecánica, Programación, y Dibujo y Modelado.
- Nivel de Posiciones: Practicante, 1ro, 2do, 3ro, y 4to nivel. Por experiencia, habilidades y comportamientos definidos por el centro de ingeniería. 1ro, menor nivel. 4to, mayor nivel.
- Nacionalidad. 99% de los empleados mexicanos. Dispersión norte, centro y sur de país.
- Negocio: Se identifica por número I, II, III y IV. Sanitizados así el resto del documento.
- Género: 24% Femenino, 76% Masculino.
- Influencia: Principalmente de los EUA, influencia limitada de siete países más.

La comprobación del impacto en los comportamientos, las tendencias y correlaciones se realiza mediante la aplicación de encuestas de opinión en muestras homogéneas y estadísticamente representativas de la población. Se busca tener muestras homogéneas que estén distribuidas en los cuatro negocios, incluir información que permita hacer correlaciones con datos demográficos; todo esto respetando las leyes y políticas del país, y de la compañía.

La unidad muestral es cada empleado del centro de ingeniería. Los empleados son invitados a responder las encuestas (por la ley de protección a la información personal, la participación es voluntaria y anónima), y estas sirven como instrumentos de medición para proceder al análisis de datos y a la comprobación de las hipótesis planteadas.

Por las características de la investigación, la muestra es de clase “dirigida” o “no probabilística” ya que las encuestas son dirigidas al total de la población. De esta manera, se encuestará a toda la población en las mediciones base y de intervención; sin embargo, realizará una prueba piloto del instrumento de medición donde se tomará una sección de esta población por conveniencia.

Variables. Tanto el perfil exitoso para el líder mexicano, como el modelo de administración o aceleración del cambio deben promover cambios claros y permanentes en comportamientos y hábitos del personal. Estos comportamientos y hábitos deben ser observables para el equipo mismo de trabajo, al igual que para el instrumento de medición.

Dado que hablamos del tema “inclusión”, las variables de cambio a medir estarán relacionadas con temas de: ambiente de trabajo libre de agresiones (físicas/psicológicas), capacidad de líderes para manejar conflictos, voluntad del equipo para expresarse en momentos de discriminación, y ambiente de igualdad de oportunidades. Estos temas y las variables asociadas reflejan el cambio que se pretende introducir a la organización, y por tanto el éxito del modelo que lo provocan.

Diseño de instrumento de medición. Se utilizan escalas tipo *Likert*, Padua (2004), que midan un comportamiento que se categorice o mida en escala de opciones del tipo: “absolutamente no observado”, “no observado”, “neutral”, “observado” y “absolutamente observado”. Esta escala no sólo nos permitirá obtener mediciones directas a comportamientos observados específicos, sino que nos permitirá hacer cálculos de marcador tipo NPS.

Los criterios para garantizar el buen diseño de nuestro instrumento de medición se describen a continuación:

Confiabilidad. Se utiliza el método *Test-retest* con la aplicación a una misma población buscando resultados correlacionados similares. Este método consiste en una medición piloto inicial para probar el instrumento y se comparará contra los resultados de una segunda medición meses después, sin haber tenido intervención. Se revisará la estabilidad de los resultados, el cálculo NPS por sección o negocio y se determinará el coeficiente de confiabilidad de 0 a 1.

Validez. Dado que buscamos el grado en que el instrumento en verdad mide las variables que se buscan medir (Hernández Sanpieri *et al.*, 2014), nos referimos a la validez basados en:

- Validez por contenido. Aplicación del instrumento en otros centros globales.
- Validez por criterio. Elementos de encuesta estándar en medición de cultura.
- Validez por constructo. Teoría del modelo de la compañía *CATALYST* (Catalyst, 2020).
- Validez de expertos. Revisión de los elementos por parte del “Consejo de Inclusión y Diversidad (I & D)” del Centro de Ingeniería, que cuenta con representatividad de todos los negocios y está integrado por directores de negocio, líderes de



sección, psicólogo, director de recursos humanos, líder de comunicación, y representante legal.

Objetividad. Para evitar sesgo, se evita la entrevista y se maneja la encuesta de manera virtual, voluntaria y anónima. La compañía cuenta con los medios electrónicos para ejecutar el tipo de encuestas que garantizan estas tres condiciones.

- Virtual: No existen encuestas en papel o verbales. Medio electrónico, una sólo ocasión.
- Anónima: Garantiza protección de información personal.
- Voluntaria: No existe presión o condicionamiento a responder encuesta, y el hecho de que sea anónima permite evitar cualquier tipo de acercamiento con empleados.

Construcción de instrumento de medición. Para la construcción de la encuesta se realizó el procedimiento de 11 fases indicado en Hernández (2014). Los elementos abordados por la encuesta son validados por el Consejo I & D, los cuales a su vez son validados por la sede matriz en EU y en centros globales como Turquía, Italia y Polonia.

No es objetivo de este trabajo la demostración de la validez de los elementos con respecto al tema de I & D; como si lo es que el modelo funciona para la implementación de comportamientos que los impacten.

Los elementos de la encuesta se mantienen restringidos por políticas de protección a la información propiedad de la compañía, pero se utilizan líneas enumeradas con sus resultados para las mediciones y validaciones de los impactos del modelo.

Cada uno de los 13 elementos abordados con preguntas en la encuesta son evaluados con una escala de 5 niveles de la siguiente manera: 1. Fuertemente en desacuerdo, 2. Moderadamente en desacuerdo, 3. Sin opinión, 4. Moderadamente de acuerdo y 5. Fuertemente de acuerdo

Medición piloto

La prueba piloto se realizó por conveniencia con una población de 421 empleados, de los cuales **Tabla 1.** Resultados de encuesta piloto.

respondieron 229 (54%). Los resultados adicionalmente se correlacionan con la encuesta de cultura y compromiso estándar que la compañía realiza periódicamente para incrementar la validez de los comportamientos y observaciones de ellos por parte de los empleados.

Los resultados de la medición en prueba piloto se muestran en la **Tabla 1**, en donde se pueden ver tanto los resultados de cada uno de los rubros en términos de la escala, como su interpretación con el método de NPS.

Los resultados están ordenados de manera descendente conforme al resultado NPS. Existen múltiples referencias de cómo interpretar los resultados de NPS, pero adicionalmente se tomará un enfoque relativo y no sólo un enfoque absoluto. Es decir, se comparan resultados con un estándar delimitado por un adjetivo de categorización, y se utilizan referencias entre departamentos y referencias entre los resultados antes y después de la intervención.

Como referencia a la interpretación de resultados NPS en la **Tabla 2** se muestran dos estándares públicos y resultados de sectores industriales y compañías diversas (RETENTLY, 2022).

Medición base. Una vez habiendo hecho una medición piloto, se procede a realizar una repetición sin cambio en el sistema de medición, ni en los operadores, esperando una correlación para validar la repetibilidad y reproducibilidad.

Se presentan los resultados de la medición del estado inicial en la **Tabla 3**. Se pueden ver los resultados de cada uno de los rubros en términos de la escala y su interpretación con el método de NPS al igual que en la medición piloto; y los resultados están igualmente de mayor a menor conforme al resultado NPS.

Entre las primeras conclusiones, podemos observar que el NPS total es 68%, con lo cual y de acuerdo con la escala mostrada, tenemos una etiqueta o marcador “Muy bueno” o “Muy bien”. Individualmente, la mayor oportunidad se encuentra en tres preguntas por debajo de 50: “P6”, “P11”, y “P12”. Por otro lado, las preguntas que mostraron el mejor nivel de resultado NPS y que están en un nivel de excelencia arriba de 80 son: “P1”, “P2”, “P7” y “P3”.

Preguntas	Fuertemente en desacuerdo	Moderadamente en desacuerdo	Sin opinión	Moderadamente de acuerdo	Fuertemente de acuerdo	Pro	Neu	Det	Tot	NPS
-----------	---------------------------	-----------------------------	-------------	--------------------------	------------------------	-----	-----	-----	-----	-----

P2	0	10	6	52	160	212	6	10	228	89%
P3	1	6	13	69	137	206	13	7	226	88%
P1	1	10	6	52	160	212	6	11	229	88%
P7	3	11	12	52	150	202	12	14	228	82%
P4	3	12	16	88	108	196	16	15	227	80%
P5	4	12	15	93	104	197	15	16	228	79%
P9	5	7	24	63	127	190	24	12	226	79%
P13	8	12	23	51	134	185	23	20	228	72%
P8	3	8	47	54	114	168	47	11	226	69%
P10	2	5	57	50	114	164	57	7	228	69%
P11	8	37	30	91	62	153	30	45	228	47%
P12	7	29	57	83	52	135	57	36	228	43%
P6	8	33	50	75	63	138	50	41	229	42%
TOTAL	53	184	369	865	1488	2353	369	237	2959	72%

Tabla 2. Referencia para interpretación de resultados NPS

-100	-50	-25	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Requiere mejora			Bueno						Muy bueno						Excelente								
Abismal	Terrible	Pobre	Pobre	Mediocre	Promedio	Bien	Muy bien	Excelente	Espectacular	Perfecto													

Tabla 3. Resultados de estado inicial con cantidad de respuestas y resultados NPS

Preguntas	Fuertemente en desacuerdo	Moderadamente en desacuerdo	Sin opinión	Moderadamente de acuerdo	Fuertemente de acuerdo	Pro	Neu	Det	Tot	NPS
P1	9	17	27	227	500	727	27	26	780	90%
P2	8	16	63	210	483	693	63	24	780	86%
P7	13	31	63	197	476	673	63	44	780	81%
P3	10	39	58	253	420	673	58	49	780	80%
P9	11	31	99	229	410	639	99	42	780	77%
P5	15	50	70	307	338	645	70	65	780	74%
P8	17	32	148	227	356	583	148	49	780	68%
P4	20	65	81	303	311	614	81	85	780	68%
P13	21	64	82	236	377	613	82	85	780	68%
P10	12	33	177	223	335	558	177	45	780	66%
P6	30	97	153	296	204	500	153	127	780	48%
P11	36	107	157	294	186	480	157	143	780	43%
P12	26	112	211	249	182	431	211	138	780	38%
TOTAL	228	694	1389	3251	4578	7829	1389	922	10140	68%

**Tabla 4.** Resultados por negocio. Estado inicial con total de respuestas y resultados NPS

Equipo	Fuertemente en desacuerdo	Moderadamente en desacuerdo	Sin opinión	Moderadamente de acuerdo	Fuertemente de acuerdo	Pro	Neu	Det	Tot	NPS
I	3	18	24	60	207	267	24	21	312	79%
II	151	498	986	2359	3208	5567	986	649	7202	68%
III	12	57	133	239	391	630	133	69	832	67%
IV	62	121	246	593	772	1365	246	183	1794	66%
TOTAL	228	694	1389	3251	4578	7829	1389	922	10140	68%

En la **Tabla 4** se muestran los resultados divididos por negocio, y podemos ver diferencias en esta primera capa organizacional de equipo o negocio I, II, III y IV. El I, se encuentra en nivel 79 de excelencia, y los negocios II, III, y IV en un rango muy cerrado de 66-68, calificado como “Muy bien”; el equipo con mayor cantidad de personal está dentro de este rango y se espera revisar si la aplicación del modelo puede representar diferencia en el resultado.

Finalmente, se presentan frente a frente los resultados de ambas encuestas en la **Tabla 5**. La encuesta piloto presentada para probar los mecanismos y revisar repetibilidad (294 respuestas) y la encuesta de estado actual o base (780 respuestas). Ambas mediciones se realizaron con el mismo instrumento de medición y el mismo estándar de aplicación.

Tabla 5. Comparación por pregunta medición piloto y estado inicial.

Preguntas	Estado Piloto	Muestra Inicial	Variación
P1	88%	90%	-2%
P2	89%	86%	3%
P3	88%	80%	8%
P4	80%	68%	12%
P5	79%	74%	5%
P6	42%	48%	-5%
P7	82%	81%	2%
P8	69%	68%	1%
P9	79%	77%	2%
P10	69%	66%	3%
P11	47%	43%	4%
P12	43%	38%	6%
P13	72%	68%	5%
TOTAL	71.5%	68.1%	3%

Como se puede observar existen diferencias en cada una de las preguntas, especialmente en las preguntas 3 y 4, las cuales varían de 8%-12%. Se calcula un promedio de variación del instrumento completo de 3%. Esta variación puede considerarse grande, dependiendo del tamaño de la mejora que buscamos identificar.

Sin embargo, si hacemos pruebas de hipótesis para observar si el cambio por medición es estadísticamente significativo, generamos tablas de contingencias Chi cuadrada para verificar las diferencias en cada pregunta, y calculamos valores p para confirmar la significancia estadística; tenemos los resultados en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Valores p de diferencia entre encuestas: Piloto y Base

Preguntas	Piloto vs Base	Interpretación
P1	0.3094	Dependientes. No diferencia
P2	0.4199	Dependientes. No diferencia
P3	0.0585	Cercano a distinta población
P4	0.0397	Distinta población
P5	0.4573	Dependientes. No diferencia
P6	0.4414	Dependientes. No diferencia
P7	0.8540	Dependientes. No diferencia
P8	0.4681	Dependientes. No diferencia
P9	0.9060	Dependientes. No diferencia
P10	0.1203	Dependientes. No diferencia
P11	0.9474	Dependientes. No diferencia
P12	0.3868	Dependientes. No diferencia
P13	0.3416	Dependientes. No diferencia
TOTAL	0.0974	Dependientes. No diferencia

Podemos confirmar que los únicos casos donde aparece una diferencia significativa son en las preguntas 3 y 4, lo cual se tomará en cuenta al medir a la población intervenida. En el resto de las preguntas el método de medición luce confiable con diferencias pequeñas en los valores NPS, y baja significancia estadística.

De esta manera partimos con una evaluación base, en donde las principales oportunidades se encuentran en las preguntas: 6, 11 y 12.

Modelos de administración de cambio

No es objetivo de este trabajo el recapitular una colección de modelos; sin embargo, durante la investigación bibliográfica se identificaron cuatro modelos que introducen elementos interesantes que se apoyan de una estructura holística, y que de acuerdo con las referencias directas e indirectas (compañías que ofrecen servicios usando estos modelos) han mostrado un alto grado de efectividad en implementación de cambios en organizaciones a nivel mundial.

Estos modelos son: “**Las seis fuentes de influencia**”, “**El modelo ADKAR**” (por sus siglas en inglés de *Awareness, Desire, Knowledge, Ability y Reinforcement*), “**El modelo CAP**” (por sus siglas en inglés de *Change Acceleration Process*), y “**El modelo ágil de administración del cambio**”. A continuación, una breve descripción.

1. Las seis fuentes de influencia. En Patterson *et al.* (2012) se describe un modelo que parte del aprendizaje logrado al resolver múltiples problemas de gran complejidad en el mundo con un modelo inductivo que es ofrecido actualmente por la compañía *Crucial Learning* a muchas empresas de renombre en sus servicios de desarrollo de habilidades en el personal y organizaciones (*Crucial Learning*, 2022).

Este modelo parte de la idea de no confiar solamente en el *willpower* o fuerza de voluntad de los individuos para lograr establecer y sostener nuevos hábitos, sino que establece una estructura en forma holística para generar y sostener comportamientos, y de esa manera crear hábitos que después formen parte de la cultura.

El modelo refleja una estructura matricial de tres renglones y dos columnas; donde las dos columnas abordan **la motivación**, las ganas de hacerlo, el deseo de iniciarlo, el por qué buscarlo, o la visión que se tiene del futuro haciéndolo; y por otro lado el cómo hacerlo, **la habilidad** para ejecutarlo, el desarrollo de la técnica para lograrlo.

En los tres renglones se abordan los niveles de impacto: **individual, social y estructural**. El individual cubre esa fuerza de voluntad personal y capacitación para ejecutar. El social capitaliza la posibilidad de motivarse y apoyarse en compañeros, líderes, mentores, amigos, y familia, y el estructural, consta del acondicionamiento físico del lugar, así como los sistemas, y procesos que refuercen los comportamientos deseados con recompensas o penalizaciones.

De acuerdo con Patterson *et al.* (2012), si somos capaces de diseñar un plan con acciones o actividades que aborden las seis casillas de la estructura, y no sólo una o dos; estaremos teniendo diez veces más posibilidades de que el comportamiento buscado se establezca y sea parte de nuestra operación diaria y después de nuestra cultura de trabajo.

2. Modelo ADKAR. Prosci (2020) informa que fue desarrollado por Jeff Hiatt en 2003, y fue nutrido estudiando los patrones de cambio de 700 empresas alrededor del mundo; y actualmente se utiliza ampliamente en los servicios de consultoría *Prosci*® donde se ofrece como parte del catálogo de herramientas de implementación de cambios para organizaciones y compañías de todo giro.

El acrónimo refiere a conceptos de “darse cuenta de la necesidad” (*Awareness*), “tener la voluntad” de adoptarlo (*Desire*), “buscar el conocimiento” de la técnica de ejecución (*Knowledge*), “adquirir la capacidad” para llevarlo a cabo de manera exitosa (*Ability*), y “buscar sostener” el nuevo comportamiento mediante el reforzamiento de este (*Reinforcement*).

Se basa en que el cambio únicamente se llevará a cabo a nivel organizacional si se logra que los individuos implementen un cambio personal primero; y el modelo guía a individuos a remover barreras durante la transición. El modelo hace énfasis en trabajar con motivación y habilidad; así como en la necesidad de reforzar el comportamiento deseado.



Para lograr recorrer cada una de las etapas del modelo, Hiatt (2006) recomienda que los líderes sigan la secuencia:

1. Identificación de necesidad: Comunicación intencional; compartir propósito/visión a todos.
2. Crear deseo: Demostrar compromiso y promover el cambio; participación de la comunidad.
3. Desarrollo del conocimiento: Entrenamiento para, durante, y después del cambio útil.
4. Construcción de habilidad: Asesorar, proveer tiempo de práctica. Identifica/elimina barreras.
5. Reforzamiento del cambio: Celebrar éxitos individuales y de equipo; dar retroalimentación.

Para Tang (2019) el modelo está orientado al logro de objetivos y metas, y permite a los equipos enfocarse en obtener los resultados buscados por el negocio. Se describe la limitación que tiene en los temas de liderazgo y administración del programa; por lo tanto, debe utilizarse en comunión con otras técnicas que lo complementen.

3. Modelo CAP. El Proceso de aceleración de cambio surge a petición del CEO de *General Electric*, Jack Welch en 1992, cuando contrató a expertos en la industria y academia para desarrollar un método que permitiera efectividad, rapidez y sustentabilidad de cambios; hasta la fecha es el método utilizado en esta organización.

La metodología radica en que una sólida solución técnica no es suficiente para lograr la implementación de cambios, ni garantiza el éxito de los proyectos; y muchas veces el fracaso de la implementación se debe a cuestiones culturales y situaciones personales, y no debidas a la fortaleza de la solución técnica.

Como resultado de esta conclusión se obtiene la "ecuación de efectividad del cambio": $20\%(Q) \times 80\%(A) = 100\%(E)$, donde E es Efectividad de implementación, que es igual a la calidad de la solución técnica (Q, de *Quality*) por la aceptación de la solución por parte de la gente involucrada en el proceso.

De acuerdo con Der Linn (2011), el modelo facilita el inicio y finalización rápida de los proyectos de implementación, busca asegurar la aceptación del cambio en el personal, impulsa a que los clientes y proveedores estén involucrados en el proceso, refuerza un

cambio visible y tangible, y busca asegurar que el cambio sea profundo y no superficial.

Los siete pasos principales del modelo que se describen a continuación.

1. *Liderazgo del cambio.* Si el equipo no percibe liderazgo, el apoyo es superficial y temporal.
2. *Creación de una necesidad compartida.* Debe resonar en los miembros de la comunidad.
3. *Diseñar una visión.* El cambio descrito en comportamientos, observables y medibles.
4. *Activación del compromiso.* Crear momento. Aprovechar "adoptantes tempranos".
5. *Hacer el cambio permanente.* Evaluar qué está ayudando y qué está limitando la iniciativa.
6. *Monitoreo del proceso.* Medir el progreso del proceso de cambio. ¿Es real? ¿Cómo se sabrá?
7. *Sistemas y estructuras de apoyo al cambio.* Modificarse para apoyar nuevo comportamiento.

4. Modelo ágil de administración del cambio. De acuerdo con Franklin (2021), este modelo busca obtener beneficios del cambio lo más pronto posible, y lo hace dando prioridad a los cambios de acuerdo con el valor que traen al negocio. Los cambios no son sólo implementados desde el liderazgo, sino mediante involucramiento y responsabilidad de todos.

Los cinco conceptos del modelo sirven como técnicas psicológicas para la creación de nuevos comportamientos. Según Franklin (2021) se describen de la siguiente manera:

1. *Colaboración.* Participación conjunta en la creación e implementación de nuevas formas de trabajo; reduce el ambiente de "ellos y ustedes". Evitar crear soluciones sólo entre líderes, con la esperanza de implementación.
2. *Entrega a tiempo.* El calendario de implementación debe ser acordado por las personas que necesitan el cambio y por quien llevará a cabo el cambio. Fallar la entrega a tiempo puede limitar los beneficios de hacer el cambio.
3. *Evolucionar la solución.* Las soluciones son adoptadas paso a paso, obteniendo nuevos logros y avances conforme se agregan estos elementos y se convierten en estándares. Si no, se tendría que esperar una solución completa que se entregaría

en más tiempo, cuando incluso esa solución podría ya no ser válida.

4. **Necesidad del negocio.** Los cambios son costosos y debe haber un valor claro y razones financieras sólidas para cambiar el estado actual. La priorización asegura que el cambio no sea sólo un deseo de algunos líderes.
5. **Enfoque iterativo.** Se desarrollan algunos elementos, se aplican a condiciones reales y se aprende de la experiencia para mejorar en la siguiente etapa. Se tienen diálogos continuamente y se libera al equipo de presión de predecir y producir planes detallados, que de cualquier manera terminan cambiando.

Claramente todos estos modelos aportan elementos de éxito en implementación para diversos ambientes y culturas de trabajo. Algunos de estos elementos son más o menos críticos para el perfil de la cultura mexicana.

Elementos críticos del perfil de la cultura mexicana

Se pretende que el modelo de implementación de cambio propuesto contenga elementos que ayuden a potencializar su efectividad al aprovechar fortalezas de la cultura mexicana, a mitigar las desventajas, y a complementar agregando características de culturas extranjeras en varios elementos del modelo.

Pero ¿cuáles son esas desventajas, fortalezas, excusas o valores? A continuación, menciono algunas de ellas basadas en las referencias citadas. Es interesante ver como estas características pueden jugar en ambos sentidos, limitando o exponenciando la eficacia del líder mexicano o el proceso de adopción del cambio.

Responsabilidad. El mexicano tiende a quejarse y a buscar culpables de lo que le pasa. “Mis compañeros no trabajan igual que yo”, “mi jefe no me valora”, “no recibo el reconocimiento que merezco”, “el gobierno tiene la culpa”, “mi esposa/o no me entiende”, “mis hijos/as son ingratos” (Zunzunegui, 2014).

Amistad y relaciones. Aparentemente debido a que, desde la colonia, los españoles no introdujeron ninguna ley de protección para los mexicanos, ellos tendrían que recurrir exclusivamente a la familia y amigos para buscar apoyo, y desde entonces parece

que esta condición se perpetuó. La efectividad en el trabajo y en trámites burocráticos son casi únicamente posibles cuando se tiene un lazo de amistad o relación entre las personas (GLOBESMART®, 2022).

Familia. El mexicano se caracteriza por levantarse cada mañana, y dar siempre el extra por el bien y abnegación a su familia. El padre por llevar el pan de cada día a casa, la madre se sacrifica por alimentar y educar a sus hijos. Los hijos querrán comprar la casa que nunca tuvo su madre, e idolatrarán el modelo a seguir que fue su padre (Ramos, 1934).

La familia es la mayor motivación para todo el equipo, por encima del dinero, o del éxito profesional. Es lo que motiva al equipo para dar lo mejor en cada día y comprometerse con los objetivos de la compañía (Mi Propio Jefe, 2017).

La membresía familiar parece en México algo acompañado de derechos, expectativas y obligaciones. Se espera que los miembros de la familia hagan y regresen favores, y desplieguen afecto abiertamente; al igual que presentar ayuda, y privilegios exclusivos, que eventualmente se confunde con nepotismo (GLOBESMART®, 2022).

Creatividad. El mexicano es reconocido mundialmente en muchos aspectos artísticos y por una creatividad que se refleja en la pintura, la composición, la música, la comida, la poesía, los “memes”. Además, el mexicano es reconocido también por su buen humor y su capacidad de reírse de su “mala suerte”, o hasta de la muerte.

El mexicano puede improvisar, y salirse de lo convencional para encontrar soluciones rápidas, pero no estables ni duraderas. No somos reconocidos por diseñar grandes soluciones a los problemas de la sociedad. No emprendemos grandes empresas para proveer productos o servicios que utilicen la gran creatividad que tenemos (Zunzunegui, 2014).

Tenacidad y trabajo duro. Cuando el mexicano es galardonado en un rol muestra una tenacidad admirable. Puede pasar largas horas de trabajo, aceptar condiciones complicadas que personas de otras nacionalidades podrían no tomar.



Hay una cantidad de “paisanos” que ahorrarán para progresar, para ayudar a su familia o para independizarse y emprender algún negocio a manera personal y generalmente individual. Pero muchos otros vivirán por siempre al día, gastando cada vez más dinero mientras más ganan, para así mantener una prisión financiera permanente (Paz, 1950).

Respeto a jerarquías y en general a todos. Existe un nivel de sumisión ante el jefe que permite alineación de esfuerzos. Esta sumisión suele ser limitativa; la gente no habla cuando ve algo mal o cuando tiene una diferencia de opiniones, ya que respeta el nivel jerárquico, y el conocimiento de los líderes técnicos, a nivel de incluso dejar pasar problemas evidentes, sólo por no contradecir al superior (Zunzunegui, 2014).

El líder tiene la última palabra, y no puede ser desafiado. Esto detiene el desarrollo y genera un ambiente tóxico (Mi Propio Jefe, 2017). Los mexicanos generalmente son elitistas, dan y esperan respeto a jerarquías, y al estatus social. Se presta atención a títulos, saludos, formas de vestir y formas de expresión verbal. Las clases sociales altas y jefes se resisten a ejecutar tareas de bajo nivel, lo cual hace que los empleados les tengan poco respecto (GLOBESMART®, 2022).

De la misma forma en GLOBESMART® (2022), se indica que el poder y la decisión descansan frecuentemente en los altos mandos, jefes de línea directa y los empleados tienen poco poder y responsabilidad; esto hace que las personas tengan poca iniciativa de mejoras y dejen la responsabilidad de los resultados y del ambiente laboral a sus jefes.

Comunicación y retroalimentación. El mexicano tiende a hablar y platicar mucho en el trabajo. Antes de comenzar cualquier tema, saludará y preguntará por salud, familia, etc. Después de esto entonces entrará en materia. Esto permite hacer fuertes relaciones con compañeros de trabajo.

Por otro lado, de acuerdo con la clasificación de Scott (2019) en el tema de retroalimentación, el mexicano puede caer en el cuadrante pasivo-agresivo, “no te digo lo que en verdad pienso, por que puedo perder nuestra relación”; pero en muchos casos hablará de la situación con otras personas, en lugar de hablarlo directamente con la persona en conflicto.

Los mexicanos valoran altamente la armonía social, son extremadamente respetuosos, amables y

amistosos. Esto sucede muchas veces a expensas de no dar respuestas francas y honestas con tal de mantener una relación placentera y amigable; “quedar bien” en lugar de dar respuestas correctas, aunque incómodas (GLOBESMART®, 2022).

La flexibilidad con el tiempo. El tiempo dicen es flexible en México. La puntualidad desgraciadamente no es prioritaria como en otras culturas; las relaciones son mucho más valoradas que la puntualidad. Por ejemplo, se considera descortés cortar una conversación sólo por llegar a tiempo a la siguiente reunión.

Dos razones más que se atribuyen a esto es que los mexicanos tienden a manejar varias cosas al mismo tiempo y a no enfocarse sólo en alguna cosa a la vez; y a esto se puede añadir que el mexicano tiende a hacer cambios de último momento, estas dos cosas impactan definitivamente la agenda y como resultado a la puntualidad.

Individualidad. Múltiples fuentes destacan que el mexicano no sobresale en el trabajo en equipo; se tienen pocos ejemplos donde los mexicanos sobresalgan en deportes en grupo o en proyectos con alto nivel de colaboración.

En resumen, de acuerdo con las referencias citadas, el ambiente y cultura laboral en México es impactado fuertemente por cada miembro del equipo y su líder; y esto está sustentado en valores característicos ligados a las **relaciones, familia, el respeto por jerarquías, la creatividad, la tenacidad, la individualidad y el estilo de comunicación.**

Eso significa, que la visión, las estrategias, las prioridades, las necesidades, entre otros son muy diferentes para los mexicanos. De ahí la importancia de no esperar la efectividad prometida por modelos o métodos extranjeros al aplicarlos con el liderazgo y equipos mexicanos.

Desarrollo del modelo

Uno de los objetivos del presente estudio es entonces buscar integrar estos criterios de la cultura y estilo mexicano dentro del modelo de cambio organizacional, de tal manera que no sólo se pueda adaptar, sino que además capitalice los valores y la

identidad mexicana durante el proceso de adopción de hábitos o cambios en comportamientos.

Completar ecuaciones, las fórmulas ganadoras. Cuando se habla de la cultura mexicana en el mundo laboral, la tendencia en muchas fuentes es hablar de rasgos y conductas características de un estereotipo que las personas de otras nacionalidades han recibido y percibido de las fuentes de información y de las conductas que observan y que confirman las generalidades (Ramos, 1934).

Como resultado de la exploración e investigación hecha, se estudiaron elementos encontrados en referencias indicadas, que van desde elementos de cultura e identidad del mexicano, tanto antes de la invasión española, pasando por el proceso de independencia, formación de la república, guerra de reforma y revolución, e intervenciones extranjeras.

Durante este proceso de recopilación, se reunió un conjunto de los elementos característicos, y se confirmó la importancia de estos con una encuesta cualitativa realizada a un grupo de 56 líderes externos con experiencia probada en liderazgo. La encuesta cualitativa (Guerra, 2022) realizada utilizó la plataforma de formularios de Google.

Las cinco características del perfil del mexicano que para los encuestados tienen mayor impacto positivo en sus resultados son: 1. Compromiso y Tenacidad, 2. Honestidad, 3. Visionario, 4. Creatividad, y 5.

Relaciones de trabajo. Con esta referencia se proponen “fórmulas ganadoras” que complementan rasgos de la conducta mexicana.

En negritas se considera las que existen y en cursivas las que se tienen que agregar a las fórmulas:

Ejecución = **Compromiso + Diversión + Pasión + Responsabilidad + Reconocimiento + Riesgo**

Asertividad = **Me importas (Respecto, Amistad y Familia) + Hablamos de tus fallas**

Colaboración = **Respeto + Visión compartida + Seguridad Psicológica + Reconocimiento**

Comunicación efectiva = **Oportunidad + Formalidad + Seguridad Psicológica**

Innovación = **Creatividad + Perseverancia + Seguridad Psicológica + Administración de riesgo**

Con la ayuda de los equipos de trabajo y expertos del consejo se integran los elementos en el modelo de la **Figura 3**.

A continuación, se resaltan puntos clave de éxito del modelo que se acordaron con el equipo de implementación.

- 1. Comunicación e involucramiento.** Debe existir un plan de comunicación que dé cobertura a cada paso del modelo. Deben participar representantes de todas las líneas de la organización, incluyendo al director general y departamentos de servicios. Debe cubrir múltiples canales, presenciales, a distancia e híbridos.

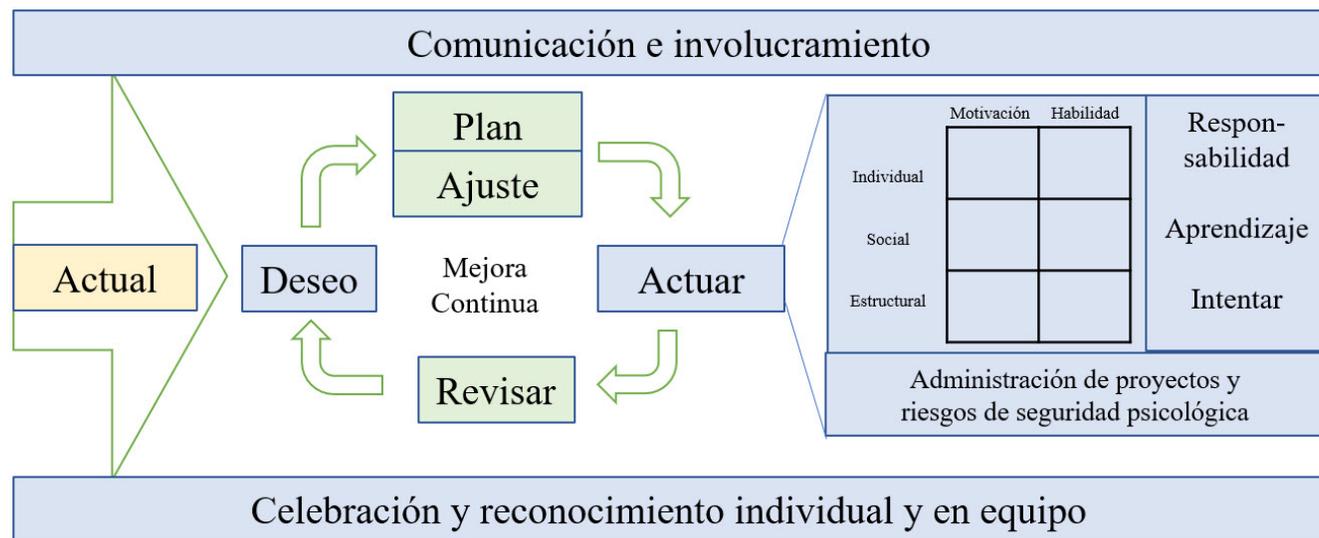


Figura 3. Modelo de implementación del cambio para equipos de trabajo profesionales en México.



2. **Situación actual y deseo.** Descripción vívida de comportamientos deseados. Identificación de indicador de éxito observable y medible correlacionado al comportamiento. Asegurarse de que es un deseo comunitario y no de una(s) persona(s). Identificar y comunicar el beneficio claro y directo del comportamiento deseado.
3. **Ciclo de mejora.** Inspirado en el ciclo PHVA Shewhart/Deming (Martins, 2022). Iniciar y cerrar el ciclo con “Plan y Ajuste”, ejecutar el modelo **ModMEX** (modelo complementado de cambio y perfil mexicano), se revisan acciones e indicadores; y cerrar con calibración de la definición de deseo.
4. **ModMex.** Núcleo del modelo que conjunta la exploración de fuentes y mecanismos de influencia, las fórmulas ganadoras, la administración de proyectos y riesgos y la “Seguridad Psicológica” necesaria para fomentar la creatividad e innovación. El resultado es una hoja de ruta con proyectos de implementación de comportamientos que se ejecutan mediante un *Playbook* (plan de trabajo) anual.
5. **Celebración y reconocimiento.** Enmarcando junto con el paso 1, la celebración y reconocimiento individual y en equipo es trascendental. Utilizar métodos apropiados de reconocimiento (en especie y económica). Es importante no esperar al final, sino hacerlo reconociendo avances y comportamientos.

Talleres de definición de Plan de Trabajo. Se definieron tres talleres de trabajo para ejecutar el paso 4 de ModMEX, y obtener un plan de trabajo para implementar los comportamientos requeridos. El primero fue de líderes organizacionales, el segundo fue de líderes técnicos, y el tercero fue de representantes de grupos diversos de la compañía.

Los tres grupos siguieron el modelo, y utilizando los datos cualitativos de las encuestas y la estructura de “6 fuentes de influencia” anteriormente mencionadas, obteniendo un total de diez proyectos de implementación. Los nombres de los proyectos se omiten por protección a la información propietaria de la empresa.

Ejecución de plan de trabajo. Se tuvo seguimiento de la ejecución del plan de trabajo, en donde participaron equipos de en promedio 10 personas por proyecto, y se llevó un monitoreo mensual con reportes de progreso a todos los niveles, de acuerdo con el plan de comunicación.

Durante la ejecución de los proyectos del plan de trabajo se buscó hacer un énfasis marcadamente en los negocios I y III del Centro de Ingeniería, con el objetivo de tener un par de “grupos pseudo-controlados”, y observar alguna diferencia entre los grupos en términos del impacto en sus resultados.

Los negocios de enfoque tuvieron énfasis en elementos reconocidos por la cultura local: **involucramiento de líderes** cuidando la **seguridad psicológica** de los participantes, **seguimiento en la ejecución** de las iniciativas, y cantidad de **celebración** a nivel individual y grupal. Es decir, se llevaron a cabo los procesos de identificación de proyectos y talleres sin ninguna diferencia (elementos 2 y 4), pero se tomó énfasis al aplicar los pasos 1, 3 y 5.

Resultados

Encuesta de medición después de aplicación. Se procedió a la ejecución de proyectos, y se envió la segunda encuesta para revisar el impacto de las acciones en indicadores de comportamientos y comparar con los resultados base con los comportamientos deseados. En la **Tabla 7** se observan los resultados después de la primera intervención.

Los resultados muestran nueve preguntas arriba de 70% y cuatro por debajo; cuando en la medición base se observaron sólo seis preguntas por arriba del 70% y siete por debajo. Siguiendo la fórmula NPS, tenemos 73%, contra un 68% de base. Si utilizáramos la referencia de la **Tabla 2**, se mueve de una categoría de “MUY BIEN” a una de “EXCELENTE”. Pero ¿es esta una mejora estadísticamente significativa?

Si comparamos uno a uno el resultado por pregunta (**Tabla 8**), podemos ver diferencias entre ambas mediciones con una diferencia mayor de 4% en NPS en ocho preguntas, y una diferencia positiva en diez de trece preguntas. En la **Tabla 9** vemos que el negocio I subió 11%, el II 3%, el III 9%, y IV 7%; todos por encima del 70%, y en la **Tabla 10**, vemos los resultados en comparativa de la medición base y los resultados después de la intervención.

Tabla 7. Comparación de resultados por pregunta entre medición piloto y estado inicial.

Preguntas	Fuertemente en desacuerdo	Moderadamente en desacuerdo	Sin opinión	Moderadamente de acuerdo	Fuertemente de acuerdo	Pro	Neu	Det	Tot	NPS
P1	5	17	29	175	517	692	29	22	743	90%
P7	9	23	43	179	489	668	43	32	743	86%
P2	5	21	57	184	476	660	57	26	743	85%
P3	5	26	59	233	420	653	59	31	743	84%
P5	12	27	64	284	356	640	64	39	743	81%
P9	9	22	99	196	417	613	99	31	743	78%
P4	11	46	52	313	321	634	52	57	743	78%
P13	19	51	62	220	391	611	62	70	743	73%
P8	14	24	150	184	371	565	150	38	743	70%
P10	11	27	178	181	346	527	178	38	743	66%
P6	19	71	129	277	247	524	129	90	743	58%
P12	19	71	190	245	218	463	190	90	743	50%
P11	20	97	140	295	191	496	140	117	743	50%
TOTAL	158	523	1252	2966	4760	7726	1252	681	743	73%

Discusión

Retomando la pregunta de la significancia estadística en la mejora, realizando pruebas de hipótesis para observar si el cambio por medición es estadísticamente significativo entre los resultados de la medición base

Tabla 8. Comparación entre estado inicial y 1ra. Intervención.

Preguntas	Muestra inicial	Muestra intervención	Variación
P1	90%	90%	0%
P2	86%	85%	0%
P3	80%	84%	4%
P4	68%	78%	10%
P5	74%	81%	7%
P6	48%	58%	11%
P7	81%	86%	5%
P8	68%	70%	1%
P9	77%	78%	2%
P10	66%	66%	0%
P11	43%	50%	6%
P12	38%	50%	13%
P13	68%	73%	5%
TOTAL	68.1%	72.9%	5%

y la primera intervención, y analizando con el mismo método de chi cuadrada, se observan valores *p* que confirman la significancia estadística.

Los resultados se presentan en la **Tabla 11** y se puede confirmar que existe significancia estadística en las preguntas 3, 4, 5, 6 y 12; significancia limitada en las preguntas 7 y 11; y un impacto positivo, pero con una significancia no confirmada en las preguntas 1, 2, 8, 9, 10 y 13.

Sin embargo, es posible argumentar que en las preguntas 1 y 2 el resultado ya era significativamente alto y debido a eso difícilmente superable, dando como resultado un impacto realmente limitado sólo en las preguntas 8, 9 y 10.

Con relación a la discusión del impacto en los negocios de grupos pseudo-controlados, se observa que el impacto en los indicadores para los negocios con énfasis en involucramiento con seguridad psicológica, seguimiento en la ejecución de las iniciativas, y celebración a nivel individual y grupal, tuvieron un resultado claramente superior con un incremento de 11% y 9% de NPS, contra un incremento de 3% y 7% para los dos grupos con modelo nominal.

**Tabla 9.** Comparación de resultados totales de 1ra. Intervención por negocio.

Equipo	Fuertemente en desacuerdo	Moderadamente en desacuerdo	Sin opinión	Moderadamente de acuerdo	Fuertemente de acuerdo	Pro	Neu	Det	Tot	NPS
I	0	8	25	60	310	370	25	8	403	90%
II	120	368	915	2079	3122	5201	915	488	6604	71%
III	9	51	96	292	462	754	96	60	910	76%
IV	29	96	216	535	866	1401	216	125	1742	73%
TOTAL	158	523	1252	2966	4760	7726	681	681	9659	73%

Conclusiones

Se concluye que el modelo propuesto con los éxitos de los modelos internacionales, adicionados a los elementos característicos del perfil mexicano y los elementos complementarios de las fórmulas ganadoras pueden tener un impacto significativo en cambios de comportamiento complicados, como el tener un ambiente de trabajo inclusivo.

Los elementos involucrados y presumiblemente exitosos dado los resultados y el análisis del caso de aplicación son:

1. Comunicación e involucramiento
2. Definición de situación actual y deseo
3. Establecimiento de ciclo de mejora
4. Modelo complementado con fórmulas ganadoras con la producción de un plan de acción
5. El establecimiento de un programa de celebración y reconocimiento

Aunque no es concluyente que este modelo pueda ser efectivo en múltiples casos de administración de cambio, si lo es el haber encontrado un impacto en diez de los trece comportamientos identificados en el

Tabla 10. Comparación por negocio entre base y 1ra. Intervención.

Preguntas	Muestra inicial	Muestra intervención	Variación
I	79%	90%	11%
II	68%	71%	3%
III	67%	76%	9%
IV	66%	73%	7%
TOTAL	68%	73%	5%

caso práctico mostrado; y dónde el caso práctico involucra un volumen de impacto en una organización de más de 1, 300 empleados con un problema complejo de cultura organizacional.

El modelo se ha implementado como proceso de cambio en la compañía para futuros ciclos de la mejora continua en el tema, y para la implementación de nuevos procesos de administración de cambio, con lo cual es posible seguir obteniendo datos que hagan posible obtener mayor confirmación de la efectividad del modelo propuesto.

El resultado empírico de impacto cuando el modelo hace énfasis en un involucramiento con **seguridad psicológica, seguimiento en la ejecución** de las

Tabla 11. Valores p de diferencia entre encuestas: Base y 1ra.

Preguntas	Base vs. Intervención	Interpretación
P1	0.6892	Dependientes. No diferencia
P2	0.6379	Dependientes. No diferencia
P3	0.0682	Significancia estadística
P4	0.0161	Significancia estadística
P5	0.0158	Significancia estadística
P6	0.0095	Significancia estadística
P7	0.1910	Significancia estadística limitada
P8	0.3597	Dependientes. No diferencia
P9	0.2804	Dependientes. No diferencia
P10	0.6242	Dependientes. No diferencia
P11	0.1284	Significancia estadística limitada
P12	0.0009	Significancia estadística
P13	0.2644	Dependientes. No diferencia
TOTAL	0.0000	Significancia estadística

iniciativas, y **celebración a nivel individual y grupal** es claramente mayor, lo cual corresponde a la investigación documental de los elementos del perfil mexicano y a la propuesta conceptual de incluir fórmulas ganadoras como complemento de los valores de la compañía en términos de:

1. Ejecución
2. Asertividad
3. Colaboración
4. Comunicación efectiva
5. Innovación

Futuras líneas de investigación. La investigación deja pendiente el evaluar la significancia individual de los elementos del modelo en el impacto logrado. Será necesaria una investigación factorial y experimental con muestras controladas, en donde podamos comparar muestras con intervención y muestras sin intervención.

Adicionalmente, se hace énfasis que tanto el modelo como el caso práctico fueron limitados a la experiencia de implementación de un equipo de ingeniería con una demografía específica descrita y no es posible concluir lo mismo para poblaciones considerablemente diferentes sin un número mayor de casos de aplicación.

Referencias

- Arciniega Ayala J (2013). El liderazgo como factor de cambio organizacional. <http://132.248.9.195/ptd2013/agosto/0699806/0699806.pdf>
- Béjar R, Rosales H (2005). *La identidad nacional mexicana como problema político y cultural*. Nuevas Miradas. Biblioteca del CRIM.
- Bob Von Der Linn (2011). Overview of GE's Change Acceleration Process (CAP). *Agility Science*. <https://bvonderlinn.wordpress.com/2009/01/25/overview-of-ge-change-acceleration-process-cap/>
- Bossidy L, Charan R (2002). *Execution; the discipline of getting things done*. Penguin Random House.
- Bungay M. (2016). *The coaching habit: say less, ask more, & change the way you lead*. Box of Crayon Press.
- Cameron E, Green M (2015). *Making sense of change management*. Kogan Page.
- Catalyst. Workplaces that Work for Women (2020). *Why diversity and inclusion matter: quick take*. Catalyst. <https://www.catalyst.org/research/why-diversity-and-inclusion-matter/>
- Covey SM, Merrill R (2008). *The Speed of the Trust: The one Thing that Changes Everything*. Free Press.
- Covey SR (2013). *The 7 habits of the highly effective people. 25th Anniversary ed*. Simon & Schuster.
- Crucial Learning. (2022). *Workplace learning that changes lives*. Crucial Learning: <https://cruciallearning.com/>
- Díaz-Guerrero R (1994). *Psicología del mexicano*. México: Trillas.
- Díaz-Guerrero R (2013). *Psicología del mexicano 2: bajo las garras de la cultura*. Mexico: Trillas.
- Franklin M (2021). *Agile change management*. Kogan Page.
- GLOBESMART® (2022). *Core values and implications for business*. GLOBESMART®: <https://globesmart.aperianglobal.com/>
- Guerra A (25 de Mayo de 2022). El perfil del líder mexicano. Querétaro, Querétaro, México. https://docs.google.com/forms/d/1sWrfGzwxifE17WJ8dEBnrWXHARw_IltCJcaownM48v8/edit
- Hales C (1993). *Managing through organisation, the management process*. Routledge Publications.
- Hanif A, Ahsan A, Syed Ibrahim M, Qaisar Jamal F (2019). Towards successful business process improvement - An extension of change acceleration model. *Plos One*. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0225669>
- Harrison K (1 de Junio de 2020). *VUCA analysis for issue planning and management is a valuable tool*. Cutting Edge PR Insights: <https://cuttingedgepr.com/use-vuca-analysis-for-better-issue-planning-and-management/>
- Hernández Sanpieri R, Fernandez Collado C, Baptista Lucio M (2014). *Metodología de la investigación* (6a ed.). McGraw Hill.
- Hiatt JM (2006). *ADKAR: A model for change in business, government and our community*. Prosci.
- Howard Lowe T (2021). *Dealing with microaggression as an employee*. LinkedIn: <https://www.linkedin.com/learning/dealing-with-microaggression-as-an-employee/what-to-do-if-you-witness-microaggressions-against-others?u=58256457>
- Instituto Mexicano de Economía del Comportamiento (24 de Abril de 2020). *LIVE: Modelos de cambio de comportamiento - ¿Cuáles existen y para qué sirven? [Archivo de Video]*. Youtube.



- <https://www.youtube.com/watch?v=eztv8wK0cik&list=PLOTku18wuDQvHzRhg3iXSb4K--7Z4K-bl&index=7>
- Instituto Mexicano de Economía del Comportamiento (22 de Junio de 2020). *Webinar: Modelos de Cambio de Comportamiento*. [Archivo de Video]. Youtube.
- <https://www.youtube.com/watch?v=wHfz3fnpBYk&list=PLOTku18wuDQvHzRhg3iXSb4K--7Z4K-bl&index=8>
- Juarez Letechipía JM (17 de Junio de 2020). *Liderazgo en la cultura mexicana*. [Archivo de Video]. Youtube.
- <https://www.youtube.com/watch?v=aBgPEplACQ4>
- Juarez Letechipía JM (17 de Junio de 2020). *Liderazgo en la cultura mexicana*. Mexico.
- <https://www.youtube.com/watch?v=aBgPEplACQ4>
- Mario Alonso Puig (25 de Abril de 2022). *El proceso de cambiar conductas. Conferencia Mario Alonso Puig*. [Archivo de Video]. Youtube.
- <https://www.youtube.com/watch?v=-JBOQiNoKIs&list=PLOTku18wuDQvHzRhg3iXSb4K--7Z4K-bl&index=10>
- Martins J (22 de Octubre de 2022). *Asana. ¿Qué es el Ciclo Planificar-Hacer-Verificar-Actuar (PHVA)?*
- <https://asana.com/es/resources/pdca-cycle>
- Maxwell JC (2019). *Leadershift: the 11 essential changes every leader must embrace*. Harper Collings Leadership.
- Mi Propio Jefe. (5 de Octubre de 2017). *5 Características de líderes mexicanos*. Negocios y PyMES:
- <https://mipropiojefe.com/5-caracteristicas-los-lideres-mexicanos/>
- Nandram SS, Bindlish PK (2017). *Managing VUCA Through Integrative Self-Management*. Switzerland: Springer.
- Padua J (2004). *Técnicas de investigación aplicadas a las ciencias sociales*. Ciudad de México: Fondo de Cultura Económica.
- Patterson K, Grenny J, Maxfield D, McMillan R, Switzler A (2005). *Crucial confrontations: tools for resolving broken promises, violated expectations, and bad behavior*. McGraw Hill.
- Patterson K, Grenny J, Maxfield D, McMillan R, Switzler A (2007). *Influencer: the power to change anything*. McGraw Hill.
- Patterson K, Grenny J, McMillan R, Switzler A (2002). *Crucial conversations: tools for talking when stakes are high*. McGraw Hill.
- Patterson K, Grenny J, Switzler A, McMillan R, Maxfield D (2012). *Change anything: the new science of personal success*. Grand Central Publishing.
- Paz O (1950). *El laberinto de la soledad*. Fondo de Cultura Económica.
- Polk JD (2011). Lean six sigma, innovation, and the change acceleration process can work together. *Physician Exec.*, 38-42.
- <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21302748/>
- Prosci (2020). *Prosci methodology*. Prosci. People. Change. Results.: <https://www.prosci.com/methodology-overview?hsLang=en-us>
- Ramos S (1934). *El perfil del hombre y la cultura en México*. Colección Austral.
- RENTENTLY (18 de Abril de 2022). *What is a good net promoter score? (2022 NPS Benchmark)*. Net Promoter Score: <https://www.rentently.com/blog/good-net-promoter-score/>
- Scott K (2019). *Radical candor: be a kickass boss without losing your humanity*. St. Martin's Press.
- Sinek S (2011). *Start with why: how great leaders inspire everyone to take action*. Portfolio/Penguin.
- Tang KN (2019). *Leadership and change management*. Thailand: Springer.
- Walker S (2018). *The captain class: the hidden force that creates the world's greatest teams*. Random House.
- Zanna MP, Devine P, Olson JM (2013). *Advances in experimental social psychology*. San Diego: Elsevier Inc. doi: 10.1016/B978-0-12-407236-7.00001-2
- Zunzunegui JM (2014). *Los Mitos que nos dieron traumas*. Grijalbo.

PRIMER INFORME Dra. Yarabí Ávila González Rectora



Estamos transformando a la Universidad Michoacana: Rectora

La doctora Yarabí Ávila González rinde su primer informe de actividades y destaca el trabajo en equipo que se ha alcanzado “Nada nos detiene”, afirmó la rectora Yarabí Ávila González al rendir su primer informe de actividades al frente de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), en donde resaltó que muchas metas se cumplieron y otras fueron rebasadas, y es gracias al equipo fuerte y comprometido que trabaja todos los días para alcanzar el sueño de ser la mejor institución educativa de México.

En la Posta de Veterinaria, frente al H. Consejo Universitario, la doctora Ávila González enumeró los logros que se han tenido en este primer año de actividades, reconociendo a cada uno de los equipos de trabajo que caminaron en un mismo sentido para lograrlo y destacó que es gracias a esos resultados que hoy todos podemos caminar con la frente en alto, mirar a la comunidad a los ojos, saludar y gritar “Pis pas” porque no tenemos nada de qué apenarnos o escondernos”.

Apuntó que el informe es una semblanza general de lo que se ha hecho en los distintos rubros, sin maquillar datos o triunfos porque ninguna persona de la comunidad nicolaita lo merece, ya que hablar con la verdad permite crecer y avanzar. La Universidad Michoacana, dijo, representa la universalidad y la diversidad, es la modernidad y por ello, se ha reivindicado el valor de las diversidades y se ha integrado en la tarea una mirada que incide en la

defensa de los Derechos Humanos que significan el respeto al libre pensamiento, la paz, la pluralidad, la tolerancia, la equidad, la democracia, la inclusión, la sustentabilidad y la corresponsabilidad con la rendición de cuentas.

“Pero aún no estamos satisfechos y ahora es un buen momento para hacer balances, para agradecer y para expresar deseos de éxito a esta comunidad, es apenas nuestro primer año y es momento de hacer un alto y continuar evaluándonos”.

Ávila detalló que el informe se divide en diferentes capítulos, algunos de ellos como: La Casa de Hidalgo, El Sueño de Quiroga, El Aula de Morelos, El Corazón de Ocampo, La Cuna de Héroe, El Crisol de Pensadores, Legado Nicolaita y la Herencia de Pascual Ortiz Rubio, “todo ello haciendo y recordando a quienes forman parte de nuestra historia y quienes nos han dejado precisamente eso, un gran legado”.

Detalló que las y los integrantes del Gabinete compartieron las acciones realizadas, ya que ellas y ellos han vivido de cerca cada logro y son quienes deben representarlo. “Seguiremos construyendo confianza porque esa no se gana hasta que nosotros no demostramos con acciones lo que nosotros tenemos, el deseo de hacer”.

La rectora reconoció la labor de cada una de las personas que integran la comunidad nicolaita, al señalar que “todas y todos contamos, todos tenemos voz, lo que no tenemos son deseos de destruir o dañar a alguien, mucho menos de lastimar nuestro patrimonio, pues es el legado de grandes hombres y grandes mujeres”.



De igual forma, agradeció el trabajo y el acompañamiento del Consejo Universitario, que dijo, ha tenido mucho que ver para que esta transformación al interior de la Universidad Michoacana sea una realidad.

Resaltó el papel que juega la Universidad Michoacana en la vida pública, al referir que lo que en la Casa de Hidalgo se decide impacta en todo el estado, “no es casual que muchos actores ajenos a esta institución busquen figurar en nuestra vida interna, deberían pensarlo mucho mejor, porque aquí se albergan cerca de 54 mil estudiantes que representan también a sus familias, aquí se albergan casi siete mil trabajadores entre docentes y administrativos que también cuentan sus familias, por lo tanto, somos una gran familia”.

Sostuvo que se continuará siendo sensible cuando se requiera, pero también tajantes cuando las acciones son ventajosas y no suman o multiplican en favor de la UMSNH, al tiempo que invitó a que todas y todos a trabajar en conjunto, “hay muchos proyectos que requiere que todas las manos estemos unidas para poderlos lograr”.

Antes de iniciar con las intervenciones de las y los integrantes del Gabinete, la rectora hizo entrega del Primer Informe al secretario General, Javier Cervantes Rodríguez, con el fin de que lo haga llegar al Consejo Universitario y para que la comunidad nicolaita esté enterada de estas acciones.

Las y los asistentes al evento realizado en la Posta de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, escucharon los logros en materia académica, administrativa, financiera, en seguridad, en difusión cultural, en investigación científica, en igualdad de género y cultura de paz y en infraestructura, por mencionar algunos.

Participaron en el informe los secretarios General, Académico, Administrativo y de Difusión Cultural y Extensión Universitaria, Javier Cervantes, Antonio Ramos, Edgar Martínez y Miguel Ángel Villa, respectivamente; la secretaria Auxiliar, Monika Gutiérrez; el tesorero, Enrique Eduardo Román; la

coordinadora de Planeación, Infraestructura y Fortalecimiento Universitario, Cindy Lara y el Coordinador de la Investigación Científica, Jesús Campos.

También asistieron al evento, el secretario Particular, Javier Cervantes Martínez; el abogado general, Raúl Carrera; la contralora, Ana Delia Quintero; el director de Tecnologías de la Información y Comunicación, Octavio Aparicio, así como directoras y directores de Facultades, Escuelas e Institutos nicolaitas, funcionarios, estudiantes, moradores y moradoras de las Casas del Estudiante y representantes de diversas dependencias estatales y municipales.



El 98 por ciento de la matrícula de la Universidad Michoacana cursa programas de calidad. Es decir, el 90 por ciento de las carreras que se imparten gozan de reconocimiento de calidad nacional o internacional.

Uno de los más grandes pendientes que encontramos, fue el rezago de trámites de títulos profesionales. Se agilizó la entrega de títulos en pergamino, expidiéndose 4 mil 800, además de la impresión de 25 mil títulos electrónicos.

Se aprobaron 586 proyectos en donde se invirtieron más de 18 millones de pesos. Esto, aunado a los 13 más aprobados con el Conahcyt en donde se destinaron más de 17 millones de pesos y 112 proyectos aprobados por el ICTI con una bolsa de 18.8 millones de pesos.

De mil 138 Profesores-investigadores de tiempo completo (asociados y titulares), 603 pertenecen al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores

del CONAHCYT. En 2023 se sumaron otros 48 nicolaitas.

Se creó la oficina que se encarga de tramitar patentes y derechos intelectuales. Están en trámite 5 patentes y 5 registros de software y obras. Se obtuvo el certificado de derechos de autor de la marcha “Cuna de héroes, crisol de pensadores” de la banda de guerra.



Más de 300 mil personas han sido beneficiadas con las más de 7 mil 400 actividades que se han desarrollado, pero vale la pena resaltar la creación del Himno Nicolaita y la conformación del Coro Universitario y el Octeto Somos Nicolaitas.

Se han firmado 117 convenios de colaboración, que buscan la vinculación académica, la investigación, la movilidad nacional e internacional y el servicio social y las prácticas profesionales. En total, tenemos en vigencia 350 acuerdos institucionales.

Se accedieron a 25 millones de pesos con los que se han adquirido seis camionetas, equipo de cómputo y de laboratorios, además de equipo especializado para estudiantes de la Licenciatura en Seguridad Pública y Ciencias Forenses.

El impulso al deporte y las artes marcan la administración de la rectora Yarabí Ávila González. En esta administración se puso en marcha la celebración de las Rodadas Nicolaitas. Cada mes se recorren 10 kilómetros en Morelia.

Esta administración ha dado un paso histórico al crear la Coordinación General de Igualdad de Género, Inclusión y Cultura de Paz, un anhelo de miles de

voces, que fue escuchado por la rectora Yarabí Ávila González.

Nuestra comunidad no puede ser rehén de ningún agente externo, por lo que se instalaron arcos de seguridad en las preparatorias de Morelia, además de que se reactivó el Sistema de Vigilancia y Monitoreo, que implica seguridad durante las 24 horas del día en Ciudad Universitaria.

De manera inédita, se pudo cumplir con recursos propios el pago de salarios y prestaciones de sus trabajadores y académicos hasta el mes de noviembre, aunado a que cubrió la totalidad de la última nómina del año y el 47% del aguinaldo.

El 2023 fue nuestro primer año, y con la voluntad y el trabajo de todas y todos, logramos una bolsa de 154 millones de pesos en 33 obras de gran calado. Tenemos la seguridad de que, el que el 2024 reforzaremos nuestras acciones.

Una de las obras más importantes es la construcción de la Unidad Profesional de Zamora, con el respaldo del gobierno de Alfredo Ramírez Bedolla. Esperamos que este año sea culminada la obra que se postergó desde hace una década.

La ampliación del edificio de MultiDes, así como las construcciones en las facultades de Psicología y Bellas Artes, son inversiones muy significativas, aunado al fortalecimiento de la Facultad de Odontología con equipamiento y la rehabilitación del Centro Universitario de Estudios de Posgrado.

Esperamos tener en unas semanas más las techumbres de las canchas de basquetbol en CU, en donde se hace una inversión importante. Asimismo, pronto tendremos en funcionamiento la primera cancha de fútbol rápido.

Se pusieron en marcha los trabajos de construcción de la primer alberca olímpica con una inversión de recursos propios superior a los 32 millones de pesos, con recursos propios.

Página legal y créditos

CIENCIA NICOLAITA, Año 32 no. 90, abril de 2024, es una publicación cuatrimestral editada por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo a través de la Coordinación de la Investigación Científica, Av. Francisco J. Mújica, s/n, Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Tel. 443 316 74 36, 443 327 23 66, y 443 322 35 00, <http://www.cic.cn.umich.mx>, ciencianicolaita.publicaciones@umich.mx. Editor: Dr. José López Bucio. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2013-072913082200-203, ISSN: 2007-7068, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número, Coordinación de la Investigación Científica, Edificio C-2., Av. Francisco J. Mújica, s/n, Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Tel. 443 316 74 36y Fax 443 327 23 66. Responsable de la última actualización de este Número, Área de Tecnologías y Procesos de Información de la Coordinación de la Investigación Científica, Hugo César Guzmán Rivera, fecha de última modificación, 22 de marzo de 2024.

Ciencia Nicolaita no. 90 fue formada y preparada para su versión electrónica, en el Área Editorial del Departamento de Comunicación de la Ciencia de la Coordinación de Investigación Científica. Edificio C-2, Ciudad Universitaria, Morelia.

Fotografía de la portada: Lago de Camécuaro, Michoacán.

Derechos de uso

Se permite la reproducción, publicación, transmisión, difusión en cualquier modo o medio de cualquier parte del material contenido en el archivo (únicamente texto sin imágenes) sin alterar o modificar el original, con fines de referencia y/o reproducción, académicos o educacionales, con excepción de los personales o comerciales, citando la fuente de referencia y otorgando el crédito correspondiente al autor y al editor.

Sitio web implementado por el equipo de la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo sobre la plataforma OJS3/PKP.