

Contribución al Conocimiento Científico y Tecnológico en Oaxaca



ISSN: 2594-0171
Vol. 7 No. 7
Septiembre, 2023

El conocimiento científico como
un instrumento estratégico
de reconstrucción social



DIRECTORIO

Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez

Director CIIDIR Unidad Oaxaca

Subdirector Académico y de Investigación

Ing. Ángel Rosales Torres

Subdirector de Servicios Educativos e Integración Social

Ing. Alejandro Cruz Aguilar

Subdirector Administrativo

M. en I. José Navarro Antonio

Jefe del Departamento de Investigación

M. en C. Gabriel Isaías Cruz Ruíz

Jefe del Departamento de Posgrado

L.C. Elinora Orozco Arango

Jefa del Departamento de Servicios Educativos

M. en D. Ariel Ortiz Mendoza

Jefe de la Unidad Politécnica de Integración Social

C.P. Salma Paulina Cervantes Cruz

Jefa del Departamento de Capital Humano y Recursos Financieros

Jefe del Departamento de Recursos Materiales y Servicios

L.D.G. Angélica Ortiz López

Coordinadora de Enlace y Gestión Técnica

L.I. Justo César Marcial Aguilera

Jefe de la Unidad de Informática

CUERPO DE ÁRBITROS DEL VOL. 7, CCCTO

Dra. Alejandra Ramírez Martínez

Dra. Araceli Vera Guzmán

Dra. Beatriz Quiroz González

Dra. Carolina Romero Salazar

Dra. Cintia Natalia Martín Regalado

Dra. Ivet Gallegos Marín

Dr. Alejandro Vázquez Feijoo

Dr. Carlos Inocencio Cortes Martínez

Dr. Edgar García Sánchez

Dr. Edwin Antonio Ojeda Olivares

Dr. Omar Augusto Hernández Flores

Dr. Pastor Teodoro Matadamas Ortiz

M. en C. Mario César Lavariega Nolasco

M. en I. José Navarro Antonio

COMITÉ EDITORIAL

Editor en Jefe

Dr. Sadoth Sandoval Torres

Editores Asociados

Dr. Juan Rodríguez Ramírez

Dr. Pastor Teodoro Matadamas Ortiz

M. en C. Mario César Lavariega Nolasco

M. en I. José Navarro Antonio

Responsables de la Edición

Ing. Dulce María del Rosario Montaña Hernández

L. en E. Paulo Nava Arellanes

M. en I. José Navarro Antonio

Instituto Politécnico Nacional

Unidad Profesional "Adolfo López Mateos"

Zacatenco, Alcaldía Gustavo A. Madero

C.P. 07738, Ciudad de México.

Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional

Unidad Oaxaca

Hornos No. 1003, Col. Noche Buena,

Santa Cruz Xoxocotlán C.P. 71230. Oaxaca.

Teléfono: (951) 517 0610 Ext. 82769

Contribución al Conocimiento Científico y Tecnológico en Oaxaca, Año 7, Vol. 7, Núm. 7, septiembre 2023, es una publicación anual editada por el Instituto Politécnico Nacional, a través del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional CIIDIR – Unidad Oaxaca. Calle Hornos No. 1003, Col. Noche Buena, Municipio de Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca. México, C.P. 71230. Teléfonos: 951 517 06 10, ext. 82769, <http://www.ciidiroaxaca.ipn.mx/cccto/>, Editor responsable: Dr. Sadoth Sandoval Torres. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2017-060817174800-203. ISSN: 2594-0171, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número, Unidad de Informática del CIIDIR – UNIDAD OAXACA del IPN: L.I. Justo César Marcial Aguilera. Calle Hornos No. 1003, Col. Noche Buena, Municipio de Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca. México, C.P. 71230, fecha de la última modificación, 25 de septiembre de 2023. Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación. Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización del Instituto Politécnico Nacional.

PRESENTACIÓN

La ciencia en México está profundamente enraizada al conocimiento de los pueblos nativos cuyas vidas estaban fuertemente vinculadas al mundo físico y natural. Los mayas tenían un profundo conocimiento de los fenómenos naturales, tales como el ciclo del agua, regeneración vegetal y eventos astronómicos. Este conocimiento no sólo era importante por sus aplicaciones en agricultura, sino también por razones religiosas y políticas. Es necesario recordar que, en el año de 1521, Tenochtitlan, el corazón del imperio azteca, fue conquistado por los españoles. A su llegada, los españoles quedaron impresionados por las colecciones de flora y fauna, y por los jardines que eran propiedad de los Tlatoanis, y que utilizaban para el estudio, preservación y reproducción de algunas especies (Riedlinger et al., 2020). Ese conocimiento, motivó a los españoles a iniciar una serie de expediciones, para registrar y estudiar especímenes de flora y fauna. En 1821, ocurre la independencia de México, y casi inmediatamente inicia la Institucionalización de la ciencia. En 1833 se funda la primera sociedad científica en el continente americano y la cuarta en el mundo, "La Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística" (Azuela Bernal, 2012). Durante el siglo XIX se producen diferentes publicaciones para el público en general, siendo "Mosaico mexicano" (1843-1846) una de las más populares. Esta publicación presentaba descubrimientos científicos, y describía fenómenos naturales, además de presentar poesía, eventos históricos, consejos prácticos para agricultura, biografías de celebridades, etc. (Cuevas, 2002).

El inicio del siglo XX fue marcado profundamente por la revolución mexicana, y en 1920, José Vasconcelos, presidente de la Universidad Nacional de México, inicia una tarea por la educación, la cual incluía un ambicioso programa editorial. Se menciona que en 1960 da inicio la era moderna de la comunicación de la ciencia en México, lo que hoy conocemos como "comunicación pública de la ciencia" (Riedlinger et al., 2020). A partir de entonces, se observan esfuerzos importantes

para producir obra editorial e impulsar la escritura y difusión del conocimiento científico.

En CCCTO nos complace seguir contribuyendo modestamente a la comunicación de la ciencia mediante la publicación de artículos de investigación. Así pues, compartimos con ustedes el volumen número 7 de nuestra publicación digital, y lo hacemos en un marco de festejo, pues en el presente año, el CIIDIR Unidad Oaxaca, cumple su 40 aniversario. Quiero reconocer y agradecer el gran esfuerzo realizado por todo el equipo de trabajo. Deseo que, al leer nuestra publicación, el público en general encuentre información interesante e importante, y de esta forma, CCCTO aporte su grano de arena a la difusión de conocimiento científico.

Dr. Sadoth Sandoval Torres
Editor en Jefe

REFERENCIAS

Azuela Bernal, L. (2012). La Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística, la organización de la ciencia, la institucionalización de la Geografía y la construcción del país en el siglo XIX. *Investigaciones Geográficas*, (52). <https://doi.org/10.14350/rig.30346>

Cuevas, C. (2002). Historia y divulgación de la ciencia en México. En: Dirección General de Divulgación de la Ciencia (ed.), *Antología de la divulgación de la ciencia en México* (pp. 121-29). México: Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Riedlinger, M., Broks, P., Gascoigne, T., Massarani, L., Leach, J., Schiele, B., & Lewenstein, B. V. (2020). *Communicating Science*. ANU Press. <https://doi.org/10.22459/CS.2020>

CONTENIDO

Artículo	Página
<p>Análisis de la transferencia de calor en un colector solar utilizando un modelo de radiación superficie-superficie</p> <p>Montes Luna Jaciel, Sandoval Torres Sadoth, Hernández Bautista Emilio, Rodríguez Ramírez Juan, Méndez Lagunas Lilia L.</p>	07-17
<p>Modelos para la predicción de gas metano por residuos sólidos urbanos en Oaxaca de Juárez, México</p> <p>Pérez Belmonte Nancy Merab, Sandoval Torres Sadoth, Belmonte Jiménez Salvador Isidro</p>	18-37
<p>Revisión del cambio de uso del suelo en el istmo de Tehuantepec y Veracruz</p> <p>Hernández Sánchez, Rosa Isabel, Belmonte Jiménez Salvador Isidro, Hernández Sánchez Cesar, Ladrón de Guevara Torres María de los Ángeles, Juárez Morales Manuel</p>	38-47
<p>Modelo matemático de la cinética de secado de carne de cabra utilizando regresión no lineal</p> <p>Hernández Flores Omar Augusto, Beristain Ríos Diego, Carrillo Luis Valeria, Hernández Bautista Jorge, Romero Salazar Carolina, Sandoval Torres Sadoth</p>	48-60
<p>Efecto del proceso de liofilización en las propiedades estructurales de fresas (<i>Fragaria ananassa</i>)</p> <p>López Díaz Andrea Selene, Barragán Iglesias Josué, Tenorio Islas Delsy, Rodríguez Ramírez Juan, Méndez Lagunas Lilia Leticia</p>	61-73
<p>Análisis de la factibilidad de un Scall como alternativa al agua subterránea</p> <p>Juárez Morales Manuel, Torres Zárate Silvia Rocío, Ladrón de Guevara Torres María de los Ángeles, Belmonte Jiménez Salvador Isidro, Hernández Sánchez Rosa Isabel</p>	74-89
<p>Caracterización físico-química de tres especies de forofitos en un encinar de la mixteca oaxaqueña</p> <p>Mondragón Chaparro Demetria, Ramírez Martínez Adriana, Hernández Álvarez Gustavo Ramiro</p>	90-107
<p>Propiedades sensoriales de productos panificados adicionados con polisacáridos de semilla linaza (<i>Linum usitatissimum</i>)</p> <p>Méndez Lagunas Lilia Leticia, Ramírez Rodríguez Juan, Barriada Bernal Luis Gerardo, Terán Quintas Fernando, López Díaz Andrea Selene</p>	108-116

ANÁLISIS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN COLECTOR SOLAR UTILIZANDO UN MODELO DE RADIACIÓN SUPERFICIE-SUPERFICIE

Montes Luna, Jaciel¹, Sandoval Torres, Sadoth¹, Hernández Bautista, Emilio², Rodríguez
Ramírez, Juan¹, Méndez Lagunas, Lilia Leticia¹

¹Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo
Integral Regional (CIIDIR) Unidad Oaxaca. Hornos No. 1003, Col. Noche Buena, C.P.
71230. Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca.

²Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Oaxaca, Departamento de
Ingeniería Química.

Autor de correspondencia: jmontes12106@alumno.ipn.mx

Recibido: 25 de julio de 2023

Aceptado: 09 de septiembre de 2023

Publicado en línea: 25 de septiembre de 2023

Resumen

En el presente trabajo se analiza el funcionamiento de un colector solar plano con convección natural. Se implementó una simulación computacional y se realizaron experimentos para validar la simulación. En los experimentos se registraron diferentes variables y se comparó principalmente la temperatura del aire a la salida. Para acoplar la radiación térmica a la dinámica de fluidos computacional se utilizó el modelo de radiación superficie - superficie. Se diseñó un modelo 3D del colector solar, los resultados demuestran que para una radiación máxima de 1138 W/m^2 , la temperatura máxima a la salida del colector fue de 343.15 K . Se

obtuvieron valores del error cuadrático medio (RSME) de 1.90 y 7.11 K para las temperaturas de salida en las dos secciones principales del colector. En el tiempo 12600 segundos se alcanzó la temperatura máxima con una constante de tiempo de 21.86.

Palabras clave: convección natural, dinámica de fluidos computacional, radiación térmica.

Abstract

In this work, the operation of a flat plate solar collector with natural convection for air heating was analyzed. A computational simulation was implemented and different experiments were carried out to validate the simulations. In the experiments, different variables were recorded and the air temperature was primarily compared. To couple thermal radiation to the fluid dynamics, the surface to surface radiation model was used. A 3D model of the flat solar collector was designed, and the results showed that for a maximum radiation of 1138 W/m^2 , the maximum temperature in the outlet was 343.15 K. We computed the root mean square error (RMSE) values for the output temperatures in the two main sections, obtaining values of 1.90 and 7.11 K. The maximum temperature was reached at 12600 seconds with a time constant of 21.86.

Key words: computational fluid dynamics, natural convection, thermal radiation.

Introducción

El calentamiento de aire es un proceso importante para diferentes operaciones, como el procesamiento de alimentos, el curado de materiales y la calefacción en

residencias. Los colectores planos son una alternativa para realizar dicha actividad (Verma et al., 2020). Un colector solar consiste en un captador de la radiación solar que transfiere la energía térmica a un

fluido de trabajo. Un colector solar de placa plana proporciona un paso para el aire proporcionando una placa absorbente sobre otra placa, tiene una o más cubiertas transparentes dispuestas sobre la placa (absorbedor), en el fondo y a los lados se proporciona un material aislante para reducir pérdidas (Goel et al., 2021).

La simulación de colectores solares por medio de la dinámica de fluidos computacional es una herramienta que se utiliza para analizar, diseñar y optimizar diferentes sistemas energéticos. En el análisis de un colector solar están involucrados fenómenos complejos como la radiación térmica, el régimen de flujo de aire, y la humedad relativa del ambiente, etc. Por lo que el uso de soluciones numéricas aproximadas es una alternativa para su estudio. (Mahapatra & Tripathy, 2019). Potgieter et al., (2020) evaluaron un colector solar de aire mediante la dinámica de fluidos computacional y lo validaron

experimentalmente. Los autores tomaron en cuenta en la simulación computacional la transferencia de calor por conducción, convección y la radiación a través del modelo de radiación superficie – superficie en donde se asume que las superficies son cuerpos grises y difusos. La simulación se realizó utilizando el software ANSYS Fluent. El error promedio entre la temperatura pronosticada y los resultados experimentales para los diversos puntos de comparación fueron de 9.165 K.

Este trabajo presenta un análisis mediante el uso de técnicas de dinámica de fluidos computacional para analizar la transferencia de calor en un colector. Los datos numéricos son contrastados contra los datos experimentales.

Materiales y métodos

Descripción del sistema

Se utilizó un colector solar plano, diseñado e instalado en el CIIDIR Unidad Oaxaca. El colector solar consta de una cubierta de vidrio dividida en dos secciones de 0.727 m de ancho por 0.965 m de largo, como se muestra en la Figura 1.

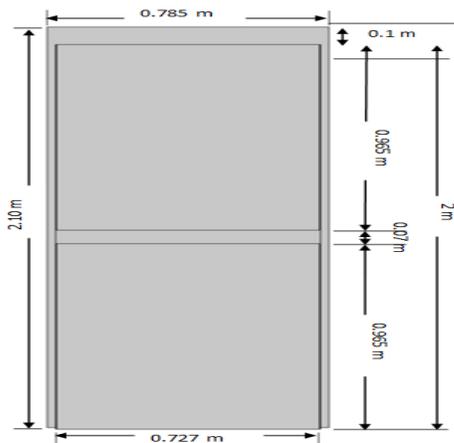


Figura 1. Dimensiones del colector solar plano.

El colector está montado sobre una superficie de madera, que funciona como aislante, con dimensiones de 0.785 m de ancho por 2.10 m de longitud.

La placa absorbedora consta de 9 tubos de aluminio de 0.076 m x 0.045 m x 2 m de longitud, con un espesor de 0.002 m, acomodados horizontalmente y cubiertos con laca negra para una mayor

absorbancia. El colector está colocado con una inclinación de 40°, y fue instrumentado con sensores para registrar la irradiancia, la temperatura del ambiente, la humedad relativa, la temperatura del aire de entrada y salida, además de la temperatura de la placa de aluminio.

Experimento

Se colocaron diferentes sensores en la parte central del colector solar del colector de tal manera que los parámetros medidos fueran representativos. Los valores de irradiancia se midieron cada 600 segundos, la temperatura del ambiente, temperatura del aire de salida de los tubos se denominó $T1$, temperatura del aire de salida entre la placa de vidrio y los tubulares se denominó $T2$ se midieron cada minuto. Se realizó un experimento en las instalaciones del CIIDIR-Oaxaca el 16 de febrero del 2023 en un horario de 09:00 a 17:00 horas. Todas las variables fueron

grabadas utilizando un sistema de adquisición de datos.

Modelo matemático

Se implementó un modelo 3D, considerando al aire como fluido incompresible, el vidrio como un cuerpo gris, y el modelo se resolvió en estado estacionario. Se resolvieron simultáneamente las ecuaciones de conservación de masa, de momentum y energía en el software COMSOL Multiphysics 4.3b.

Las expresiones matemáticas necesarias para resolver este sistema acoplado de ecuaciones diferenciales corresponden a una ecuación que describe el perfil de velocidades, otra que describa las interacciones de energía en función de la temperatura y la ecuación de continuidad que describe a un sistema incompresible en movimiento. Estas relaciones matemáticas son mostradas a continuación.

Ecuaciones de conservación

$\nabla(\rho u) =$ conservación de masa

$\rho(u \cdot \nabla)u = [-\nabla P I + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) -$

$\frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot u)I] + F$ conservación de momento

$(\rho C_p u \nabla T) = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q$ conservación de energía

Donde:

$\rho =$ densidad (kg/m³)

$u =$ vector velocidad (m/s)

$P =$ presión (Pa)

$\mu =$ viscosidad dinámica (Pa.s)

$F =$ vector Fuerza (N/m³)

$C_p =$ calor específico a presión constante (J/(kg K))

$K =$ Conductividad Térmica (W/K m)

$T =$ Temperatura absoluta (K)

$Q =$ fuentes de calor distintas del calentamiento viscoso (W/m³)

Modelo de radiación superficie- superficie

$$q = G - J$$

$$G = G_m(J) + G_{ext} + G_{amb}$$

$$(1 - \varepsilon)G = J - \varepsilon\sigma T^4$$

<p>Donde:</p> <p>G= flujo de radiación entrante o irradiancia (W/m^2)</p> <p>J = flujo radiativo saliente total o radiosidad. (W/m^2)</p> <p>G_m (J)=irradiación mutua (W/m^2)</p> <p>G_{ext}=irradiación por fuentes externas (W/m^2)</p> <p>$G_{amb} = F_{amb}e_b T_{amb}$ irradiación del ambiente (W/m^2),</p> <p>F_{amb} es el factor vista y T_{amb} es la temperatura en las direcciones incluidas en el factor vista</p> <p>ε = emisividad de la superficie</p> <p>σ= constante de Stefan Boltzmann $5.67E-8 W/m^2R^4$</p> <p>T= temperatura de la superficie en R</p>	<p>la pared no se mueve. Esto es en la interacción fluido-sólido.</p> <p><i>Aislamiento térmico</i></p> <p>Esta condición de frontera significa que no hay flujo de calor a través de la frontera.</p> <p style="text-align: center;">$n \cdot (k\nabla T) = 0$</p> <p><i>Valores iniciales</i></p> <p>Para la simulación se registraron los valores experimentales iniciales: irradiancia, temperatura ambiente, la temperatura de la placa aluminio, velocidad del aire, y la temperatura de entrada del colector. Se utiliza un valor de emisividad de la placa de vidrio y de aluminio de $\varepsilon = 0.94$ y $\varepsilon = 0.82$ respectivamente.</p> <p>Se realizaron simulaciones a diferentes coeficientes de transferencia de calor h (W/m^2K) y velocidades de aire v (m/s).</p> <p><i>Malla</i></p> <p>Se utilizó una malla extra gruesa con 68752 elementos de dominio, 16448</p>
<p><i>Condiciones frontera</i></p> <p><i>Condición de no deslizamiento</i></p> <p>La condición nos dice $u = 0$ en ambos lados de la frontera; es decir, el fluido en</p>	

elementos de contorno y 1708 elementos, Se utilizó una PC con procesador AMD Ryzen 7 5700G 8 núcleos y 32 GB de memoria RAM.

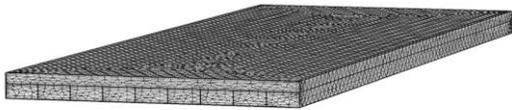


Figura 2. Malla extragruesa del colector solar.

RSME

Se calculó del error cuadrático medio (RSME) el cual proporciona una medida cuantitativa de la diferencia entre los resultados de la simulación y los valores experimentales, es útil para comparar diferentes modelos o ajustar parámetros de simulación para reducir el error.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\text{valor simulado} - \text{valor experimental})^2}{N}}$$

Constante de tiempo

Se calculó la constante de tiempo, que representa el tiempo que le toma al colector solar alcanzar aproximadamente

el 63.2% de su máxima temperatura después de ser expuesto a una fuente de calor como la irradiancia, se expresa de la siguiente manera:

$$t_{cst} = 0.632[(T_{of} - T_a) - (T_{oi} - T_a)]$$

Donde:

T_{of} : Temperatura del aire en la salida del colector después del tiempo t (K).

T_a : Temperatura del aire circundante (K).

T_{oi} : Temperatura del aire en la entrada del colector (K).

t_{cst} =: Constante de tiempo.

Resultados y discusión

Los parámetros climáticos medidos fueron la irradiancia y temperatura ambiente en las instalaciones del Centro Interdisciplinario de investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR Unidad Oaxaca) el día 16 de febrero del 2023. La Figura 3 muestra la evolución de estos parámetros. La irradiancia y la

temperatura ambiente son de suma importancia ya que tienen un impacto en el desempeño del colector solar plano, se observa que, desde el amanecer hasta el atardecer, la irradiancia y la temperatura ambiente aumentan gradualmente y alcanzan un valor máximo y luego disminuyen. Los valores máximos de irradiancia se registran entre las 12:00 (10800 segundos) y las 14:00 (18000 segundos) horas, variando de (438 W/m² a 1138 W/m²) por lo tanto el día se caracteriza por ser de tipo cielo despejado y la temperatura ambiente varía entre 292.15 K y 303.15 K

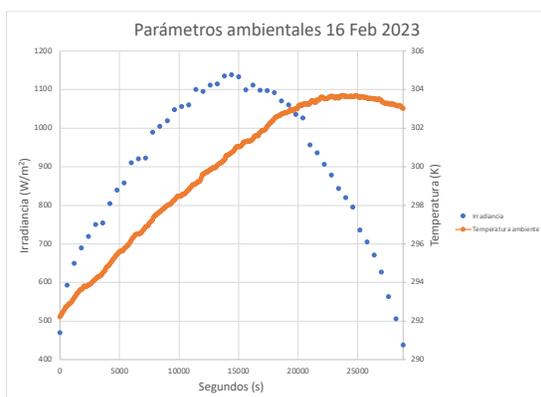


Figura 3. Parámetros ambientales durante el experimento.

La Figura 4 muestra los resultados de simulación. T_{1sim} es la temperatura simulada del aire que sale del colector con diferentes coeficientes de transferencia de calor y velocidades del aire. Se observa el efecto que tiene el coeficiente h en las diferentes simulaciones, se observa que la simulación realizada con h de 18 W/m²K y una velocidad de 0.08 m/s muestra un comportamiento similar a los datos experimentales, el valor del error cuadrático medio (RSME) es de 1.9 K como se indica en la Tabla 1.

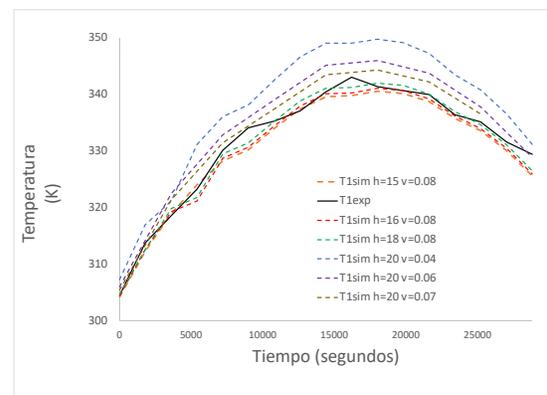


Figura 4. Simulaciones a diferentes velocidades de aire v y coeficientes de transferencia de calor h de T_1 simulado vs T_1 experimental.

La Figura 5 muestra los resultados de la simulación. T_{2sim} es la temperatura simulada del aire que se encuentra entre la placa de vidrio y los tubos con diferentes coeficientes de transferencia de calor y velocidades del aire. Se observa el efecto que tiene el coeficiente h en las diferentes simulaciones. Los resultados muestran que la simulación realizada con h de 20 W/m^2K y una velocidad de 0.06 m/s muestran un comportamiento similar con los datos experimentales, el valor del error cuadrático medio (RSME) es de 1.97 K como se indica en la Tabla 1.

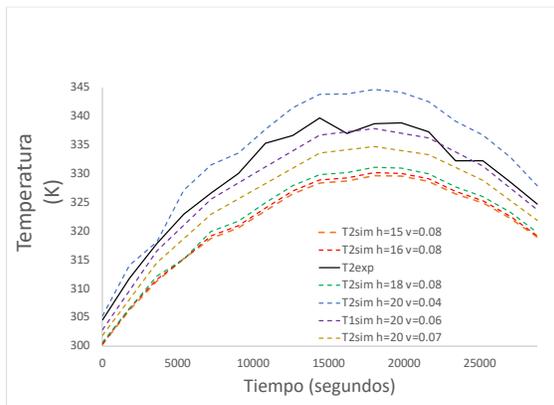


Figura 5. Simulaciones a diferentes velocidades de aire v y coeficientes de transferencia de calor h de T_2 simulado vs T_2 experimental.

Tabla 1. Error cuadrático medio de diferentes simulaciones.

Simulación	Malla	RSME T1 (K)	RSME T2 (K)
$h=15$ $v=0.08$	extragruesa	2.26	8.20
$h=16$ $v=0.08$	extragruesa	2.10	7.81
$h=18$ $v=0.08$	extragruesa	1.90	7.11
$h=20$ $v=0.04$	extragruesa	7.0	4.49
$h=20$ $v=0.06$	extragruesa	3.37	1.97
$h=20$ $v=0.07$	extragruesa	2.45	4.34

La Figura 6 muestra los datos de la constante de tiempo para el caso T_1 . La constante de tiempo nos indica que a los 12600 segundos de realizarse el experimento la temperatura de salida del colector alcanzó aproximadamente el 63.2% de su temperatura máxima.

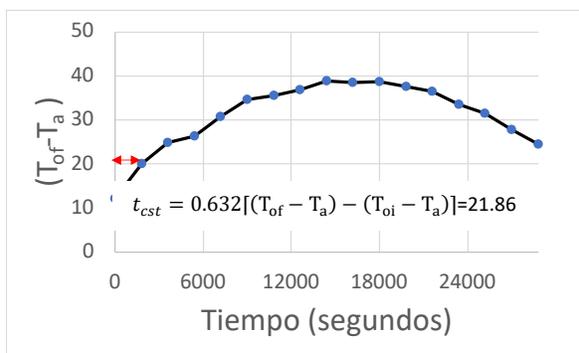


Figura 6. Constante de tiempo.

Conclusiones

A partir de resultados experimentales y de un modelo matemático, se analizó y simuló la evolución de temperatura del aire a la salida de un colector solar plano.

La temperatura del aire se simuló correctamente al considerar la irradiancia y la temperatura ambiente.

Las simulaciones numéricas representan los datos experimentales con un error cuadrático medio de 1.90 K para $T1$ con un coeficiente de transferencia de calor de 18 W/m^2 y a una velocidad de 0.08 m/s, sin embargo, bajo estos mismos parámetros el error cuadrático medio para $T2$ es de 7.11

K el cual se aleja de los valores experimentales de manera considerable. Bajo estas observaciones se recomienda que en futuras simulaciones se estudien aspectos relacionados con el cálculo del coeficiente de transferencia de calor, así como con las mejoras en el código computacional, principalmente en lo que se refiere al régimen del fluido.

Referencias

- Goel, V., Hans, V. S., Singh, S., Kumar, R., Pathak, S. K., Singla, M., Bhattacharyya, S., Almatrafi, E., Gill, R. S., & Saini, R. P. (2021). A comprehensive study on the progressive development and applications of solar air heaters. *Solar Energy*, 229, 112–147.
- Mahapatra, A., & Tripathy, P. P. (2019). Thermal performance analysis of natural convection solar dryers under no load condition: experimental

- investigation and numerical simulation. International Journal of Green Energy, *16*(15), 1448–1464.
- Potgieter, M. S. W., Bester, C. R., & Bhamjee, M. (2020). Experimental and CFD investigation of a hybrid solar air heater. *Solar Energy*, *195*, 413–428.
- Verma, S. K., Gupta, N. K., & Rakshit, D. (2020). A comprehensive analysis on advances in application of solar collectors considering design, process and working fluid parameters for solar to thermal conversion. *Solar Energy*, *208*, 1114–1150.

Artículo

MODELOS PARA LA PREDICCIÓN DE GAS METANO POR RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN OAXACA DE JUÁREZ, MÉXICO

Pérez Belmonte, Nancy Merab¹, Sandoval Torres, Sadoth¹, Belmonte Jiménez, Salvador Isidro¹

¹Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR) Unidad Oaxaca. Hornos No. 1003, Col. Noche Buena, C.P. 71230. Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca.

Autor de correspondencia: nperezb1600@alumno.ipn.mx

Recibido: 28 de julio de 2023

Aceptado: 09 de septiembre de 2023

Publicado en línea: 25 de septiembre de 2023

Resumen

Los tiraderos a cielo abierto y rellenos sanitarios han sido el principal método de disposición final de residuos sólidos urbanos (RSU), impactando en el ambiente y la salud. El sector de RSU es la tercera fuente que más emisiones antropogénicas de metano (CH_4) emite. El CH_4 es un gas de efecto invernadero (GEI) y contaminante climático de vida corta (CCVC), su tiempo de vida en la atmósfera es de 12 años, sin embargo, su potencial de calentamiento es 28 veces mayor comparado con el dióxido de carbono (CO_2). Esta investigación aborda el escenario actual y de tendencia de las emisiones de CH_4 . La metodología consistió en elaborar series de población y generación de RSU para la aplicación de 2 modelos de decaimiento de primer orden y predecir numéricamente la emisión de metano por la

disposición final de RSU. Así mismo se realizó el análisis de sensibilidad, considerando la constante de velocidad de primer orden (k) y el potencial de generación de metano (L_0). El modelo simple mostró que en el año 2022 se generaron 659,627.4 m³ de metano, en tanto que, el modelo simple modificado calculó un valor de 343,526.9 m³ para el mismo año. El modelo simple mostró una estimación de emisión mayor que el modelo simple modificado porque este considera una fase inicial y final de generación de metano. Los modelos de predicción de metano son útiles para tener referencia de la generación de CH₄ para establecer una línea base y posteriormente proponer acciones y políticas públicas para la minimización de emisiones de CH₄.

Palabras clave: contaminantes climáticos de vida corta, emisión, gases de efecto invernadero, modelo de decaimiento de primer orden, sitio de disposición final.

Abstract

Open dumps and landfills have been the main method of final disposal of municipal solid waste (MSW), impacting the environment and health. The MSW sector is the third largest source of anthropogenic methane (CH₄) emissions. CH₄ is a greenhouse gas (GHG) and short-lived climate pollutant (SLCP), its lifetime in the atmosphere is 12 years, however, its warming potential is 28 times higher compared to carbon dioxide (CO₂). This research addresses the current and trending scenario of CH₄ emissions. The methodology consisted of developing a data series of population and generation of MSW for the application of 2 models of first order decay to predict the emission of methane by the final disposal of MSW. Likewise, a sensitivity analysis was performed, considering the first-order velocity constant (k) and the methane generation potential (L_0). The simple model predicted 659,627.4 m³ of

CH₄ for the year 2022, and the modified simple model a value of 343,526.9 m³ for the same year. The simple model showed a higher emission estimate than the modified simple model because it considers an initial and final phase of methane generation. Methane prediction models are useful to establish a reference of CH₄ generation, and in this way to establish a baseline and subsequently propose actions and public policies for the minimization of CH₄ emissions.

Keywords: disposal sites, emission, first-order decay model, greenhouse gases, short-lived climate pollutants.

Introducción

En la actualidad el manejo de Residuos Sólidos (RS) representan uno de los sectores con problemas ambientales más complejos de resolver (Loganath et al., 2021). En el mundo, actualmente se generan en promedio 2,010 millones de toneladas por año de RSU, esta cantidad se espera que aumente en alrededor de 3,400 millones de toneladas para el año 2050, lo que mostrará un aumento del 70 por ciento para los próximos años (Kaza et al., 2018). Lo anterior será resultado de diferentes factores tales como, el aumento de la

población, toda vez que a mayor población se tiene una mayor generación de residuos (Kua et al., 2022), así como el desarrollo económico de las sociedades, la cual impacta en los patrones de consumo, y en la urbanización de las ciudades (Paes et al., 2020) además de los cambios en los estilos de vida (Kumar & Sharma, 2014).

La generación de residuos sólidos en México se ha incrementado sustancialmente, pues en el año 2020 se estimó una cantidad de 120,128 Ton/día; es decir, 17,233 Ton/día más que las registradas en el año 2012 (SEMARNAT,

2020). En el estado de Oaxaca, la generación total diaria de RSU y Residuos de Manejo Especial (RME) fue de 3,244.072 Ton/día en el año 2013, la cual representó un incremento de un 7.78 por ciento respecto a las 3,1000 Ton/ día en el año 2008 (Gobierno del estado de Oaxaca, 2013)

A nivel mundial los tiraderos a cielo abierto y rellenos sanitarios son el principal método de disposición de residuos sólidos, con un 37 por ciento (Kaza et al., 2018). Lo que implica un problema ambiental y de salud.

En México, de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 para la selección, construcción y operación de sitios de disposición final (SDF), estos se clasifican en 3 tipos. Rellenos sanitarios, sitios controlados y tiraderos a cielo abierto. La distribución de los SDF en México es la siguiente: 163 rellenos sanitarios (7.4 %) y

2,034 tiraderos a cielo abierto (92.6 %)(Rueda-Avellaneda et al., 2021)

En Oaxaca existen 385 SDF, de los cuales 7 cuentan con báscula, 14 con sistema para la captura de biogás y lixiviados, 16 con geomembrana, 73 con un cercado perimetral y 270 no tienen ningún tipo de infraestructura para el manejo de residuos sólidos (SEMARNAT, 2020), por lo que el mayor porcentaje corresponde tiraderos a cielo abierto.

Los tiraderos a cielo abierto presentan varios impactos en diferentes ámbitos, por ejemplo, en la salud, pues permiten la transmisión de enfermedades por vectores, riesgo por lesiones ocasionado por objetos punzocortantes a las personas que recuperan algún tipo de material en los tiraderos, y la afectación al sistema respiratorio por la quema de residuos (Sáez & Urdaneta, 2014). En lo que respecta al impacto ambiental se contaminan los mantos freáticos con

nitratos y metales pesados que se infiltran por la generación de lixiviados en el proceso de descomposición, así como la generación de biogás, con lo cual se emiten gases a la atmósfera como el metano (CH_4) y el dióxido de carbono (CO_2) (Sáez & Urdaneta, 2014). En el aspecto social, los rellenos sanitarios son sitios que han provocado la oposición pública, pues el 42 % de la población cercana a estos sitios no está de acuerdo por la apariencia visual, la presencia de fauna nociva, polvos y olores, lo que provoca un descontento social que podría provocar cierres prematuros (Rueda-Avellaneda et al., 2021).

El sector de RSU es la tercera fuente que más emisiones antropogénicas de CH_4 emite, considerando que se generan 800 millones de toneladas de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ al año en todo el mundo (Molina et al., 2018). A nivel mundial el sector de residuos sólidos

contribuye con un 20 % de estas emisiones (CCAC, 2021a).

La concentración de metano en la atmósfera ha variado durante la últimas 4 décadas, sin embargo, en la última década este incremento ha sido el más grande en los últimos 37 años. En 1993 se registraron 1,644.69 partes por billón (ppb) en tanto que en 2022 se registraron 1,911.84 ppb (NOAA, 2023). En 1990 se estimó una emisión de 129.6 Gg de $\text{CO}_{2\text{eq}}$, y para 2015 se estimaron 21,920.6 Gg de $\text{CO}_{2\text{eq}}$, lo que representa una tasa de incremento media anual del 22.8 % (INECC, 2018).

El CH_4 es un gas de efecto invernadero con un tiempo de vida en la atmósfera de 12 años, el cual, comparado con el CO_2 , tiene un tiempo de vida menor, sin embargo, su potencial de calentamiento es mucho mayor. En 100 años, el CH_4 tiene una capacidad de calentamiento 28 veces mayor que el CO_2 . Así también es

considerado un contaminante climático de vida corta (CCVC), el cual está vinculado al cambio climático (CCAC, 2021b).

Con la importancia de estos aspectos, la investigación fue estimar la emisión de metano por la disposición final de residuos sólidos urbanos en Oaxaca de Juárez, empleando modelos de decaimiento de primer orden para establecer un marco de referencia y posteriormente proponer escenarios de minimización de metano por esta actividad.

Materiales y métodos

El sitio de disposición final se encuentra ubicado en la zona conurbada del municipio de Oaxaca de Juárez, Oaxaca, México. En este SDF se disponían los residuos sólidos de 24 municipios, hasta que, en el año 2022 se llevó a cabo el cierre. El SDF es un sitio controlado, con disposición en celdas de confinamiento, cuenta con infraestructura para la

recolección y tratamiento de lixiviados y venteo de biogás, compactación y cobertura de RSU, sin embargo, se desconocen datos de ingreso de residuos diarios. La temperatura media anual de la estación climática más cercana a este sitio es de 20 °C y la precipitación media anual (PMA) corresponde a 484.8 milímetros (mm).

Población y generación de RSU en la ciudad de Oaxaca

Se elaboró una serie de datos de la evolución de la población y de la generación de residuos Per-cápita (Kg/Hab-día) con datos del Instituto Nacional de Población y Vivienda (INEGI) y de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD) para obtener una generación total de RSU en la ciudad de Oaxaca de Juárez. En 1991 se registraron 52,554.72 Ton/año, y en 2022, 108,314.21 Ton/año, como se detalla en la Figura 1.

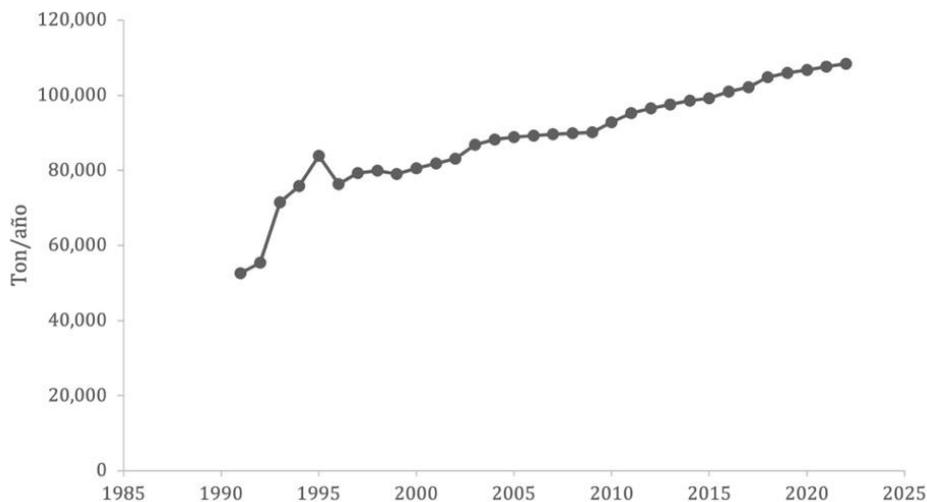


Figura 1. Evolución de la generación de RSU Ton/año en la ciudad de Oaxaca de Juárez de 1991 a 2022.

Composición de residuos sólidos

La composición de los RSU se refiere al porcentaje de cada subproducto que conforma la masa total de los residuos. Este indicador se expresa como porcentaje en peso (%). En la zona de estudio, el mayor porcentaje de los residuos corresponde a residuos de naturaleza orgánica: 32 % a residuos alimenticios, 10 % a residuos de jardinería, 4 % es papel, 3 % es trapo, y 2 % es cartón; por otra parte, los residuos inorgánicos se distribuyen de la siguiente manera: residuos finos 10 %, otros residuos con 9 %, vidrio 2 %, PET 2

% (Figura 2) (Gobierno del Estado de Oaxaca, 2013).

Modelos de estimación de emisión de metano

La predicción de la generación de biogás se puede modelar empíricamente empleando modelos de generación de acuerdo con el orden de la cinética de descomposición de la materia orgánica en la que se fundamentan (Amini et al., 2012). Estos se pueden clasificar en: modelos de orden cero, primer orden, segundo orden, multifase o una combinación de órdenes.

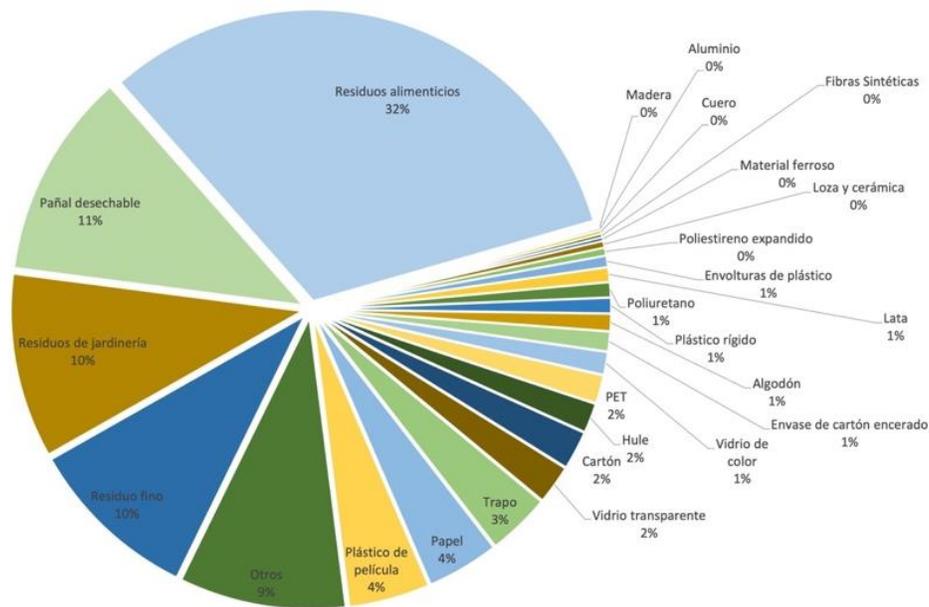


Figura 2. Porcentaje de subproductos de RSU en la zona de estudio.

Modelos de decaimiento de primer orden

La mayoría de los modelos para predecir la generación de biogás en los vertederos se fundamentan en el modelo de decaimiento de primer orden, por sus siglas en inglés first order decay (FOD). Este modelo considera el efecto que tiene el tiempo de estancia de los residuos para la generación de biogás (Faour et al., 2007). Se consideraron 2 modelos de primer orden: 1) El Modelo simple de

primer orden, donde la constante de velocidad de reacción influye en la relación de la concentración de la materia orgánica, y 2) El Modelo simple modificado de primer orden, que asume que la generación de metano es baja y aumenta hasta un máximo antes de disminuir exponencialmente. Las ecuaciones y simbología se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Modelos de primer orden y ecuaciones respectivas

Modelo	Ecuación	Índice de símbolos
Simple de primer orden	$Q = ML_0 k e^{-k(t-t_0)}$ ecuación 1	<p>Q = tasa de generación de metano en volumen de tiempo ($m^3/año$)</p> <p>M = masa de residuos (Ton)</p> <p>L_0 = potencial de generación de metano (m^3/Ton)</p> <p>t = tiempo (años)</p> <p>t_0 = tiempo de inicio de generación</p> <p>k = constante de velocidad de primer orden ($año^{-1}$)</p>
Simple de primer orden modificado	$Q = ML_0 \frac{k+s}{s} [1 - e^{-s(t-t_0)}] k e^{-k(t-t_0)}$ ecuación 2	<p>Q= tasa de generación de metano en volumen de tiempo ($m^3/año$)</p> <p>M = masa de residuos (Ton)</p> <p>L_0 = potencial de generación de metano (m^3/Ton)</p> <p>t = tiempo (años)</p> <p>t_0 = tiempo de inicio de generación</p> <p>k = constante de velocidad de primer orden ($año^{-1}$)</p> <p>s = constante de fase de primer orden</p>

En varios estudios se ha demostrado que los resultados de la aplicación del modelo de orden cero no son precisos por errores relativamente altos; a diferencia de los modelos de primer orden, que presentan menor error al comprar los datos del modelo con datos medidos en campo, por otra parte, incrementar el orden implica que el modelado se complique. La incertidumbre y la precisión en los modelos mejora al aumentar el orden en el modelado (Amini et al., 2012).

Cálculo de parámetros de entrada

Se realizó la estimación de los parámetros k y L_0 en función de las condiciones específicas del sitio, el valor de k refiere a la tasa de degradación y puede ser afectado por diferentes variables entre ellos el pH, la temperatura del medio, y el contenido de humedad (Faour et al., 2007). Cada componente de los residuos sólidos se degrada a una tasa diferente. Los valores de k reportados en la literatura varían de

0.01 a 0.21 año⁻¹ (Amini et al., 2012). Y se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$k = 3.2 \times 10^{-5}(x) + 0.01$$

ecuación 3

Donde:

x = Precipitación media anual (mm)

Para este parámetro se consideró el promedio de PMA de la estación más cercana al SDF la cual da como resultado 484.8 mm/año.

El valor de L_0 está en función de la naturaleza de los residuos depositados, considerando que cada componente de los residuos tiene una degradación diferente de acuerdo con el contenido de Carbono Orgánico Degradable (DOC). De acuerdo con la EPA, (2008) los valores de L_0 varían de 6 a 270 m³/Mg, así mismo sugiere un valor predeterminado de 100 m³/Mg dato obtenido en estudios experimentales en 40 rellenos sanitarios (EPA, 2008).

El valor de L_0 se puede estimar de acuerdo con las directrices del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) mediante la siguiente ecuación (IPCC, 2006).

$$L_0 = \text{DOC} \cdot \text{DOC}_F \cdot F \cdot \frac{16}{12} \cdot \text{MFC}$$

ecuación 4

Donde:

DOC = Carbono Orgánico Degradable

DOC_F = Fracción del DOC que puede degradarse

F = Fracción de metano en biogás generado

16/12 = cociente de pesos moleculares CH_4/C

MFC = Factor de corrección de metano

Análisis de sensibilidad de k y L_0 de los 2 modelos

En análisis de sensibilidad de los parámetros k y L_0 se realizó de acuerdo con la metodología de Vogt y Augenstein (1997), para explorar la respuesta de salida del modelo con un cambio en el valor de

un parámetro, para la variación del parámetro k se fijó $L_0=106 \text{ m}^3/\text{Mg}$ y para la variación del parámetro L_0 se fijó $k=0.026$. En la Tabla 2 se muestran los valores de variación de cada parámetro.

Tabla 2. Valores para análisis de sensibilidad

Valores	k (año ⁻¹)	L_0 (m ³ /Mg)
EPA	0.02	100
Estimados	0.026	106
específicos del sitio		
Valores superiores	0.032	112
	0.038	118
	0.044	124

Resultados y discusión

Parámetros k y L_0

El valor calculado para k fue de 0.026 año⁻¹, en tanto que la EPA considera 0.02 año⁻¹ para el rango de PMA y Escamilla et al., (2017) para la misma zona consideró $k=0.04 \text{ año}^{-1}$ esta diferencia se debe a que para su análisis consideró una PMA mayor

a la de este estudio, toda vez que el valor de k está en función de las condiciones climáticas (Vu et al., 2017), sin embargo, el valor se encuentra dentro del rango utilizado para este tipo de análisis (0.01 a 0.21 año^{-1}). El valor de L_0 fue de $106 \text{ m}^3/\text{Mg}$, en tanto que la EPA propone un valor estándar de $100 \text{ m}^3/\text{Mg}$ y Escamilla et al (2017) para la misma zona consideró un valor de $90.71 \text{ m}^3/\text{Mg}$ la diferencia se debe a que considera otros porcentajes en la composición de residuos, considerando que el valor de L_0 es de acuerdo con las características de los residuos (Vu et al., 2017), sin embargo, el valor se encuentra dentro del rango que marca la EPA (6 a $270 \text{ m}^3/\text{Mg}$). El valor de este parámetro varía entre países. En América Latina tenemos los siguientes valores: Un rango de 69 a $200 \text{ m}^3/\text{Mg}$ para Colombia, 70 , 96 , $200 \text{ m}^3/\text{Mg}$ para Costa Rica, Guatemala

con valores de 71 , 89 , $198 \text{ m}^3/\text{Mg}$ y México con rangos de valores de 69 - $202 \text{ m}^3/\text{Mg}$ (Krause et al., 2016).

Estimación de metano por el modelo simple y modelo simple modificado

En la Figura 3 se muestran los valores por cada año de la generación de CH_4 en m^3 al aplicar los dos 2 modelos. Resultados que corresponden al municipio de Oaxaca de Juárez.

El modelo simple estimó en 1991 $320,055.2 \text{ m}^3$ de metano y para el año 2022 mostró una estimación de $659,627.4 \text{ m}^3$, por lo que tiene un incremento de $350,350.3 \text{ m}^3$ en los 32 años estimados. El modelo simple modificado muestra un resultado de estimación en el año 1991 de $166,681.3 \text{ m}^3$ y para el año 2022 mostró una estimación de $343,526.9 \text{ m}^3$, lo cual refleja un incremento de $182,458.2 \text{ m}^3$ en los 32 años.

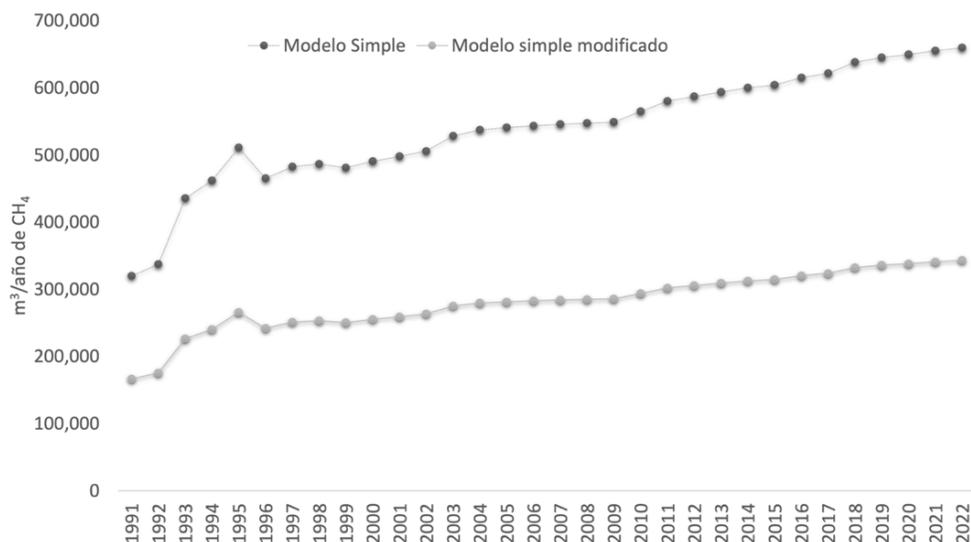


Figura 3. Resultados de la estimación de CH₄ por el modelo simple de primer orden y modelo modificado de primer orden de 1991 a 2022.

Los modelos simple y modificado de primer orden consideran el efecto del agotamiento del DOC a lo largo del tiempo (Kamalan et al., 2010), el comportamiento de la curva es exponencial, es decir se incrementa hasta llegar a un máximo y posterior empieza a decaer (Colomer Mendoza et al., 2016). Por lo que el comportamiento de los resultados de los dos modelos incrementa con cada año de disposición de residuos considerando que cada año igual incrementa la generación de RSU hasta el año 2022, el cual fue el

último año de disposición, se espera que a partir de este año en que se dejaron de disponer los residuos, los resultados de ambos modelos empiecen a decaer, considerando los supuestos de estos modelos se espera una disminución después del cierre (Thompson et al., 2009).

En la investigación de Colomer et al., (2016), mostró resultados donde los modelos simple y modificado de primer orden sobrestiman las emisiones de biogás en comparación con las mediciones en el

sitio. Por otra parte, se comparó los resultados de este trabajo con los de la investigación que realizó Escamilla et al., (2020) en la misma zona, el resultado fue de 83.02 m³/min de CH₄, la diferencia radica en que empleó modelo LandGEM desarrollado por la EPA, además el ingreso promedio anual de generación y los parámetros k y L₀ son diferentes, lo que implica que los resultados de la estimación sean diferentes, en este sentido se de tener cuidado al comparar los resultados del modelado de los rellenos sanitarios toda

vez que se consideran diferentes parámetros de entrada a los modelos, métodos y suposiciones (Vu et al., 2017).

Análisis de sensibilidad

Las Figuras 4 y 5 muestran que a medida que se incrementaron los valores del parámetro k y L₀ incrementó la generación de CH₄ lo que indica que el modelo simple es sensible si se aumentan los valores de estos, al igual que los resultados mostrados por Vogt y Augustin (2017), donde la tasa de generación de metano aumenta con los incrementos en k.

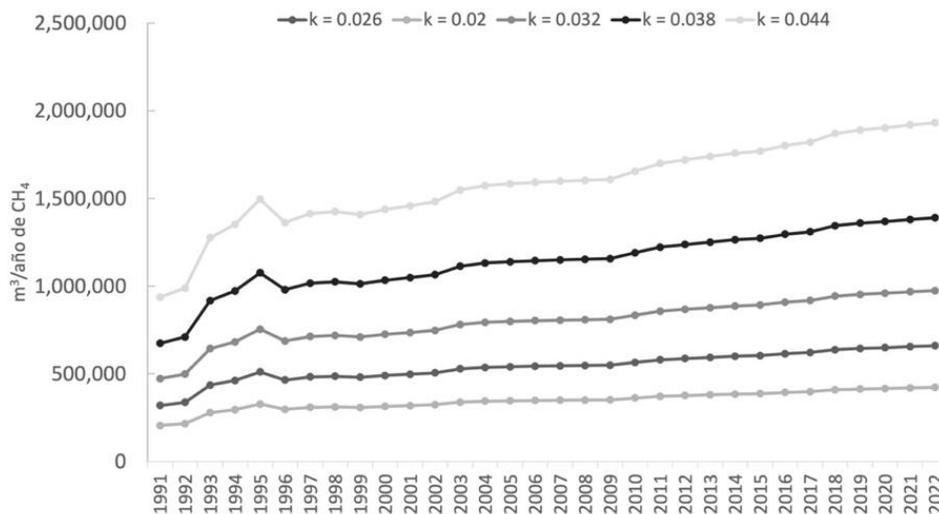


Figura 4. Resultados de análisis de sensibilidad del parámetro k en el modelo simple.

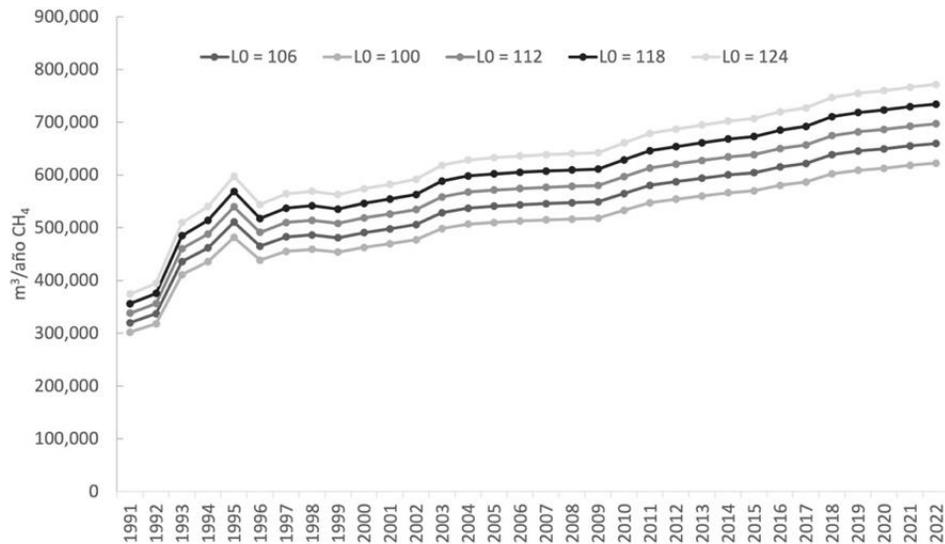


Figura 5. Resultados del análisis de sensibilidad del parámetro L_0 en el modelo simple.

Las Figuras 6 y 7 muestran el incremento en los valores de salida del modelo cuando se aumentaron los valores del parámetro k y L_0 lo que indica que el modelo simple modificado es sensible si se aumentan los

valores de los parámetros al igual que los resultados mostrados por Vogt y Augustin (2017), donde la tasa de generación de metano aumenta con los incrementos en k y L_0

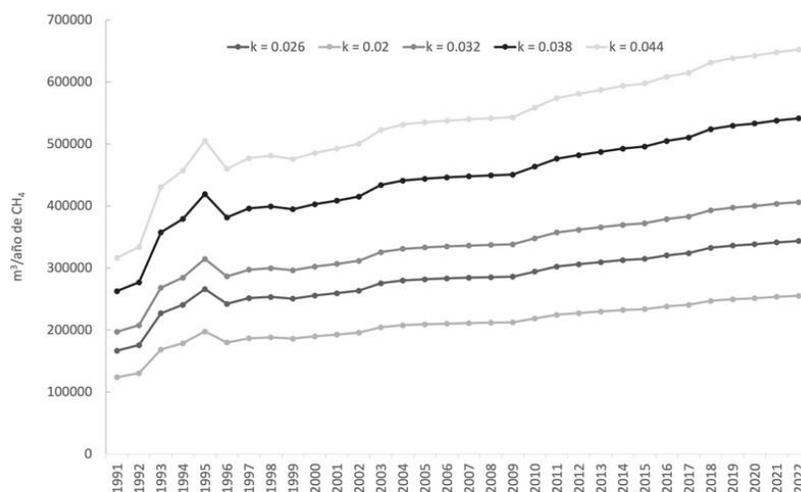


Figura 6. Resultados de análisis de sensibilidad del parámetro k en el modelo simple modificado.

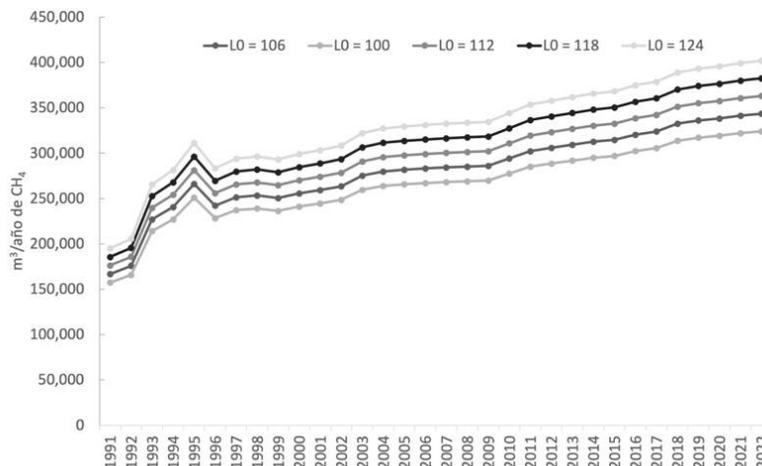


Figura 7. Resultados del análisis de sensibilidad del parámetro L0 en el modelo simple.

Conclusiones

La estimación de gas metano emitido durante la disposición final de residuos sólidos urbanos es muy importante por sus implicaciones en el medio ambiente y la salud.

En este trabajo se estimaron los volúmenes de gas metano empleando dos modelos de decaimiento de primer orden. Se calcularon los parámetros de entrada $k = 0.26$ y $L0 = 106 \text{ m}^3/\text{Mg}$ según las condiciones de operación del SDF y el clima del sitio, lo que permitió aplicar los modelos y compararlos. De acuerdo con el

análisis, el modelo simple estimó para el año 2022 $659,627.4 \text{ m}^3$ de metano y modelo simple modificado estimó $343,526.9 \text{ m}^3$ de metano para el año 2022. Oaxaca de Juárez. El modelo simple mostró una estimación mayor a la del modelo simple modificado. Ambos modelos son sensibles a los valores de entrada k y $L0$, siendo más sensibles al parámetro k . La predicción numérica de la generación de metano muestra información relevante para tomar decisiones, pues considera la composición de los residuos, con lo que se estima la

emisión de gases contaminantes en esta zona.

Referencias

Amini, H. R., Reinhart, D. R., & Mackie,

K. R. (2012). Determination of first-order landfill gas modeling parameters and uncertainties. *Waste Management*, 32(2), 305-316.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.021>

CCAC. (2021a). *Beneficios y costos de mitigar las emisiones de metano / Coalición Clima y Aire Limpio*. <https://www.ccacoalition.org/content/benefits-and-costs-mitigating-methane-emissions>

CCAC. (2021b). *Methane / Climate & Clean Air Coalition*. <https://www.ccacoalition.org/short-lived-climate-pollutants/methane>

Colomer Mendoza, F. J., García Darás, F., Esteban Altabella, J., Robles Martínez,

F., & Aranda, G. (2016). Emisiones gaseosas de un relleno sanitario en México. Comparación con modelos de generación de biogás. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(Residuos sólidos), 113-122.

<https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.05.08>

EPA. (2008). *Background Information Document for Updating AP42 Section 2.4 for Estimating Emissions from Municipal Solid Waste Landfills / Science Inventory / US EPA*. https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NRMRL&dirEntryId=198363

Faour, A. A., Reinhart, D. R., & You, H. (2007). First-order kinetic gas generation model parameters for wet landfills. *Waste Management*, 27(7), 946-953. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006>.

- 05.007 Available Landfill Gas Models. *Journal of Environmental Science and Technology*, 4(2), 79-92. <https://doi.org/10.3923/jest.2011.79.92>
- Gobierno del estado de Oaxaca. (2013). *Resumen ejecutivo del Programa Estatal para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial en el estado de Oaxaca.* Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050.* Washington, DC: World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
- INECC, I. N. de E. y C. (2018). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero.* gob.mx. <http://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>
- IPCC. (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero 3.1.* <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol5.html>
- Kamalan, H., Sabour, M., & Shariatmadari, N. (2010). A Review on Krause, M. J., W. Chickering, G., Townsend, T. G., & Reinhart, D. R. (2016). Critical review of the methane generation potential of municipal solid waste. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 46(13), 1117-1182. <https://doi.org/10.1080/10643389.2016.1204812>
- Kua, H. W., He, X., Tian, H., Goel, A., Xu, T., Liu, W., Yao, D., Ramachandran, S., Liu, X., Tong, Y. W., Dai, Y., Peng,

- Y., & Wang, C.-H. (2022). Life cycle climate change mitigation through next-generation urban waste recovery systems in high-density Asian cities: A Singapore Case Study. *Resources, Conservation and Recycling*, 181, 106265.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106265>
- Kumar, A., & Sharma, M. P. (2014). Estimation of GHG emission and energy recovery potential from MSW landfill sites. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 5, 50-61.
<https://doi.org/10.1016/j.seta.2013.11.004>
- Loganath, R., Mohammed Bin Zacharia, K., Kumar, A., Singh, E., Varma, V. S., & Sharma, D. (2021). System optimization models for solid waste management. En *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering* (pp. 349-371). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821009-3.00009-9>
- Molina, L., Puentes, A., Ortuzar, F., Zirath, S., Islas, I., Gonzalez, R., Masera, O., Bickel, J., Ortinez, A., Castelan-Ortega, O., Jenet, A., Pereira, G., Gavilán, A., Noyola, A., Huertas, J., Sosa Iglesias, G., Carvalho, S., Borgford-Parnell, N., Hernandez, T., & Prato, D. (2018). *Avances y Oportunidades en la Reducción de Contaminantes Climáticos de Vida Corta en América Latina y el Caribe*.
- NOAA. (2023). *Global Monitoring Laboratory—Carbon Cycle Greenhouse Gases*.
https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/
- Paes, M. X., De Medeiros, G. A., Mancini, S. D., Gasol, C., Pons, J. R., & Durany, X. G. (2020). Transition towards eco-efficiency in municipal solid waste management to reduce GHG emissions:

- The case of Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121370. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121370>
- Rueda-Avellaneda, J. F., Rivas-García, P., Gomez-Gonzalez, R., Benitez-Bravo, R., Botello-Álvarez, J. E., & Tututi-Avila, S. (2021). Current and prospective situation of municipal solid waste final disposal in Mexico: A spatio-temporal evaluation. *Renewable and Sustainable Energy Transition*, 1, 100007. <https://doi.org/10.1016/j.rset.2021.100007>
- Sáez, A., & Urdaneta, J. A. (2014). *Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe*. 20(3), 121-135.
- SEMARNAT. (2020). *Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos sólidos*.
- Thompson, S., Sawyer, J., Bonam, R., & Valdivia, J. E. (2009). Building a better methane generation model: Validating models with methane recovery rates from 35 Canadian landfills. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 29(7), 2085-2091. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.02.004>
- Vu, H. L., Ng, K. T. W., & Richter, A. (2017). Optimization of first order decay gas generation model parameters for landfills located in cold semi-arid climates. *Waste Management*, 69, 315-324. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.028>

REVISIÓN DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN EL ISTMO DE TEHUANTEPEC Y VERACRUZ

Hernández Sánchez, Rosa Isabel¹, Belmonte Jiménez, Salvador Isidro¹, Hernández Sánchez, Cesar², Ladrón de Guevara Torres, María de los Ángeles¹ Juárez Morales, Manuel¹

¹Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR) Unidad Oaxaca. Hornos No. 1003, Col. Noche Buena, C.P. 71230. Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca.

²Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Oaxaca

Autor de correspondencia: rihernandezs@ipn.mx

Recibido: 30 de julio de 2023

Aceptado: 09 de septiembre de 2023

Publicado en línea: 25 de septiembre de 2023

Resumen

El impacto ambiental que tiene el uso del suelo en los ecosistemas es de gran importancia ya que tiende a impactar de forma potencial los ecosistemas y la relación con la población. La presente investigación tiene como objetivo principal revisar el análisis del cambio de uso del suelo de manera cualitativa y cuantitativa en el Istmo de Tehuantepec y Veracruz, así como la tasa de cambio en el periodo del 2011 al 2017 con la finalidad de conocer los cambios que ha sufrido por las diversas actividades la población, así como el tipo de cambio que se ha presentado en este periodo de tiempo a partir de un análisis multitemporal, vectorial y espacial de los cambios del uso del suelo utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG). Se observó una pérdida espacial en la vegetación, cuerpos de agua y bosque en la zona

suroeste del área de estudio que existe cambios de pastizal a agrícola y asentamientos humanos, al reflejar los cambios principales de pastizal a agrícola y asentamientos humanos.

Palabras Clave: acuíferos, ecosistemas, población, socioeconómico, tasa de cambio

Abstract

The environmental impact that land use has on ecosystems is important since its use tends to potentially impact ecosystems and the relationship with the population. The main objective of this research is to determine qualitatively and quantitatively the change in land use in the Isthmus of Tehuantepec and Veracruz, as well as the rate of change in the period from 2011 to 2017 to know the changes it has suffered. due to the socioeconomic activities of the population and the impact that it will have on water resources, specifically in the eleven aquifers present in the study area, as well as the type of change that has occurred in this period from a multitemporal, vector and spatial analysis of land use changes using Geographic Information Systems (GIS). A spatial loss will be detected in the vegetation, bodies of water and forest in the southwestern part of the study area that there are changes from grassland to agricultural and human settlements, reflecting the main changes from grassland to agricultural and human settlements.

Key words: aquifers, ecosystems, exchange rate, population, socioeconomic

Introducción

En la actualidad las principales actividades económicas en el Istmo de Tehuantepec y Veracruz son: la agroindustria, la

petroquímica, la industria de energía eólica, actividades ganaderas, forestales agropecuarias, pesca caza y comercio de la población, estas son las que marcan la

economía de la región Cruz,2014). Sin embargo, pueden llegar a generar una presión en los recursos naturales como: el agua, suelo y aire provocando un desequilibrio entre los ecosistemas (Józefowska et al., 2020). Un ejemplo de ello son los cambios en el uso de suelo o cobertura vegetal provocados principalmente por la deforestación, extensión territorial, crecimiento urbano, entre otros (Flórez-Yepes et al., 2017); Salinas-Castillo et al., 2020). Estos cambios de uso de suelo son considerados una problemática, ya que la mayoría de las veces presentan una variabilidad con efecto negativo. En el caso del Istmo de Tehuantepec y Veracruz es un tema de gran interés debido a la propuesta del megaproyecto del corredor interoceánico (CIIT) en estas regiones, las cuales fueron consideradas principalmente por su localización y cualidades ecológicas, naturales y culturales, como un espacio de gran importancia para el desarrollo

económico del país (DOF, 2023). Por lo tanto, esta investigación tiene como objetivo principal revisar el cambio de uso de suelo para cuantificar el o los cambios ocurridos en diferentes periodos de tiempo en el área del corredor Interoceánico del Istmo de Tehuantepec, la cual fue definida por el Programa para el Desarrollo del Istmo de Tehuantepec (PDIT) 2020-2024 (DOF, 2023).

Materiales y métodos

El área de estudio (Figura 1) está conformada por un total de 79 municipios: 46 municipios de Oaxaca y 33 municipios de Veracruz. Estos municipios fueron elegidos por la proximidad a la vía del FIT, con una superficie aproximada de 48,000 km² (INEGI, 2017). En el área de estudio se encuentran los acuíferos de Coatzacoalcos, Tehuantepec, Morro Mazatan, Santiago Astata, Ostuta, Costera de Coatzacoalcos, acuíferos de Veracruz (VEDA), Sotapan Hueyapan, cuenca rio

Papaloapan y parte de la cuenca de Papaloapan en decreto de VEDA.

Para la revisión del cambio de uso de suelo se utilizaron la serie V y VI escala 1:250,000 del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI); las cuales fueron obtenidas a partir de una clasificación supervisada de las imágenes satelitales Landsat 5, 7 y 8. La serie V contiene el cambio de uso de suelo del periodo 2011 al 2014 y la serie VI del periodo 2014 al 2017. Por lo tanto,

la revisión realizada en esta investigación determinó el cambio de uso de suelo del 2011 al 2017 a partir de un análisis vectorial multitemporal y espacial, el cual se realiza mediante la intersección de capas de información de diferentes momentos a fin de reconocer cambios en los datos espaciales de un territorio mediante el software ARCGIS, de tal forma que se determina de manera cualitativa y cuantitativa las áreas que cambiaron y los principales cambios

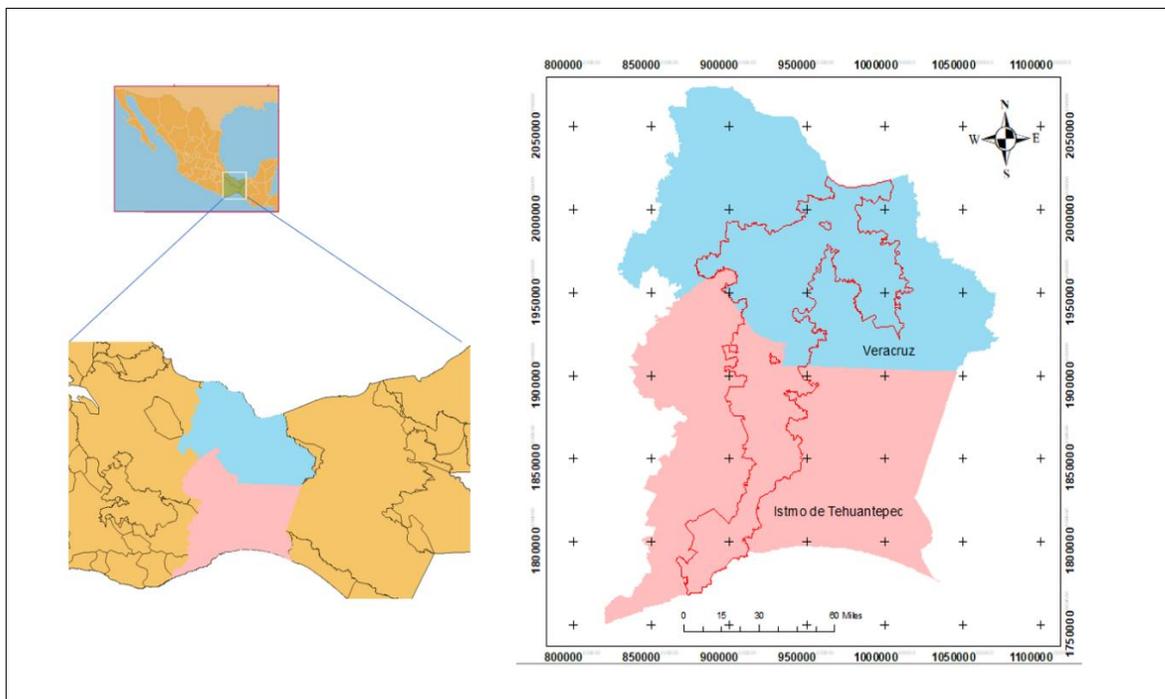


Figura 7 Área de estudio ubicada en la zona sureste, está conformada por el Istmo de Tehuantepec Oaxaca y Veracruz. En contorno rojo se observa la zona libre del corredor transístmico que va de Salina Cruz a Coatzacoalcos (SW-NE).

específicos entre coberturas (Franco, 2016).

Para ello se realizó una intersección entre las dos capas de las series (V y VI) para identificar los cambios en la cobertura de uso de suelo (Franco, 2016). Después se calculó el total de hectáreas donde se determinó un cambio y donde no se observaron cambios entre el 2011 y 2017, este procedimiento se realizó utilizando el software QGIS 3.28.0 mediante la herramienta Geoprocessing, y para la determinación de la discriminación de la cobertura de cambio de uso de suelo se utilizó una matriz de transición, la cual permite obtener para cada categoría de uso de suelo, ganancias, pérdidas, intercambios, cambio neto y cambio total entre dos fechas mediante la herramienta Calculator and Geometry de QGIS 3.8 (Pontius et al., 2004), para obtener de manera cualitativa los cambios en el periodo 2011 al 2017 con estos procesamientos realizados se obtuvo la

información necesaria para la generación de mapas de cambio de uso de suelo (Pontius et al., 2004), las hectáreas que sufrieron el cambio de uso de suelo y el tipo de cambio de uso de suelo. Finalmente se calculó la tasa de cambio (Hernández et al., 2021) de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$q = \left[\left(\frac{A2}{A1} \right)^{1/n} - 1 \right] * 100$$

donde:

q = tasa de cambio

$A1$ y $A2$ = Superficie tiempo final e inicial

n = tiempo entre fechas

Resultados y discusión

La Figura 2 muestra 24 diferentes tipos de uso de suelo para el año 2014 y 2017 pero de forma más general y sub-agrupando se pueden determinar ocho tipos de uso de suelo principalmente agricultura, asentamiento humano, bosque, cuerpo de agua, pastizal, selva y vegetación (primera y segunda mano).

De acuerdo con esta subclasificación, la Figura 3 muestra el cambio de uso de suelo en el periodo del 2011 al 2017 ubicando las áreas donde sí y no hubo cambio. Por lo tanto, se estimó un cambio de cobertura de suelo de 49 hectáreas aproximadamente. Los cambios se observaron principalmente en la zona suroeste del área de estudio, los cuales son:

- 1.-Pastizal a Selva, agricultura, asentamiento humano, vegetación y bosque.
- 2.- Cuerpos de agua a vegetación, agricultura, pastizal y asentamiento humano.

La Tabla 1 muestra el cálculo de la tasa de cambio (%) para las subagrupaciones, de acuerdo a la ecuación propuesta por Food and Agriculture Organization of the United Nations FAO (1995). La tasa de cambio del asentamiento humano es más visible en la región del Istmo se infiere es debido al crecimiento poblacional en ese periodo ya que durante el último

quinquenio (2010-2015) la población total de la región mostró una tasa de crecimiento de 5.64, derivado del incremento en 33,603 habitantes durante ese periodo (PDRI, 2016).

Tabla 1. Taza de cambio del uso de suelo de acuerdo a la ecuación propuesta por la FAO (1995)

Uso de suelo	Tasa de cambio (%)
Agricultura	0.5
Asentamiento humano	5
Bosque	-3.4
Cuerpo de agua	-1.3
Pastizal	-2.5
Selva	3.8
Vegetación	-2.8

Este crecimiento poblacional implica una afectación indirecta a los acuíferos por la demanda del recurso hídrico para la agricultura y el uso de la población ya que del 2010 al 2015 se incrementó un 10.11 % el acceso al agua entubada en el Istmo

de Tehuantepec (PDRI, 2016). Los acuíferos presentes en esta área son Tehuantepec, Morro Mazatan y Santiago Astata, los cuales, se encuentran suspendidos del libre alumbramiento de agua subterránea.

Conclusiones

De acuerdo a la revisión del análisis de la cobertura de uso de suelo a partir de las

series V y VI del INEGI se determinó el cambio de usos de suelo de forma cualitativa y cuantitativa en el área de estudio, así como la tasa de cambio y se observó que existe una pérdida considerable en la vegetación, cuerpos de agua y bosque principalmente en la zona suroeste del área de estudio, este reflejó un cambio de pastizal a agrícola y asentamientos humanos

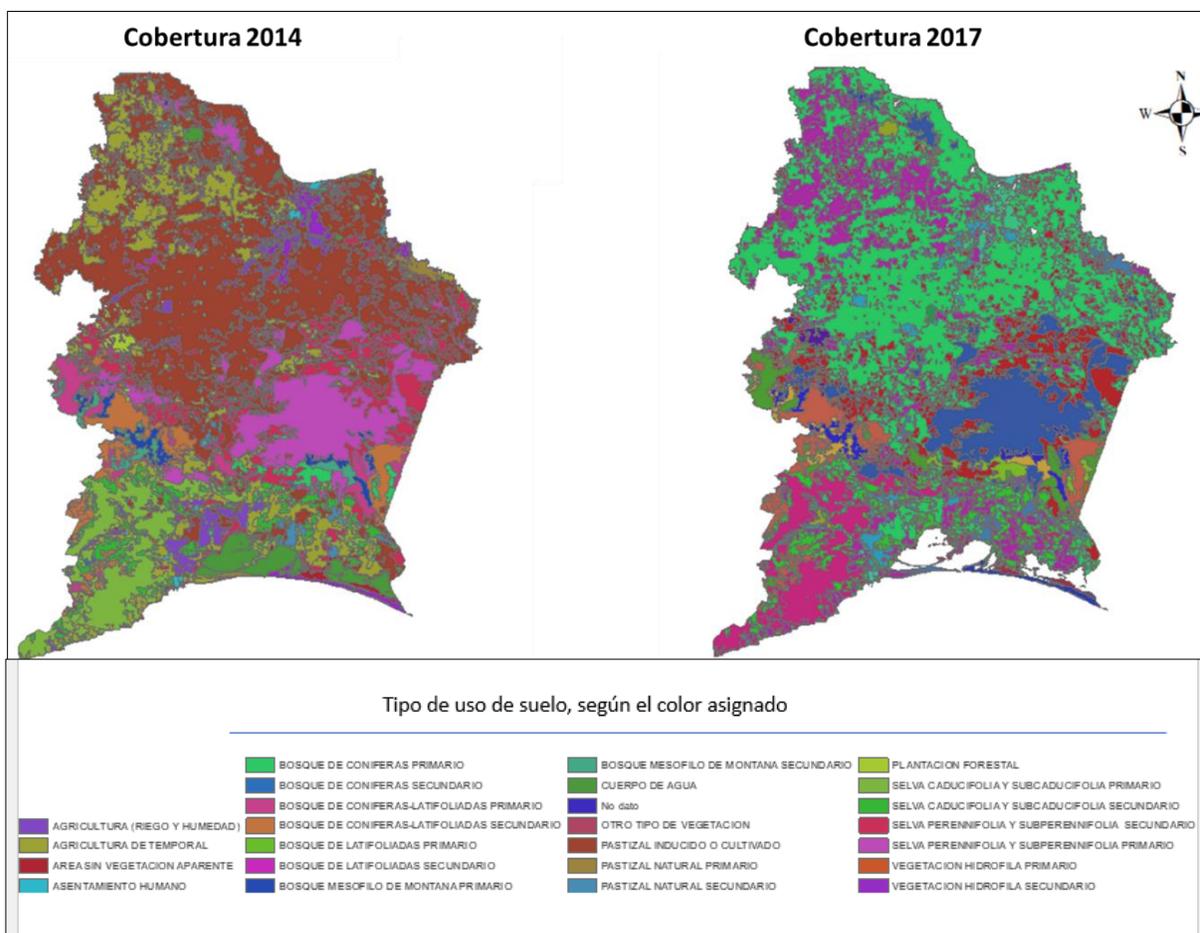


Figura 8. Cambio de uso de suelo en el periodo 2011 al 2017 en el área de estudio de acuerdo con la información adquirida de la serie V y VI del INEGI, se muestra suelo asignado a cada color.

Se recomienda un estudio más a detalle del cambio de uso de suelo a partir del procesado de imágenes satelitales de mayor resolución, que permita determinar el cambio de uso de suelo detalladamente y con mayor precisión en el área de estudio.

Referencias

Cruz, G. (2014), *Potencial de desarrollo económico de la zona de influencia del Corredor Transístmico mexicano: diagnóstico preliminar y propuesta metodológica*, publicación técnica No. 426 Instituto Mexicano del Transporte, en: <www.imt.mx>.

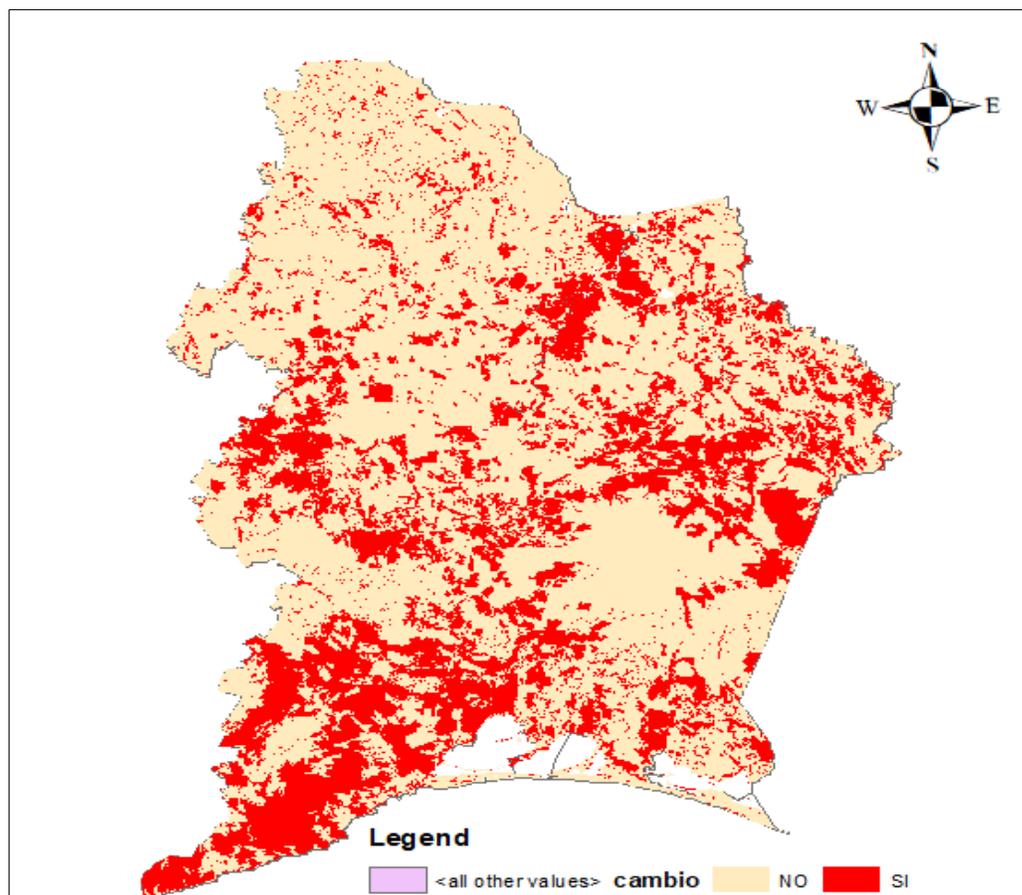


Figura 9. Se observan las áreas donde ocurrió un cambio de uso de suelo en el periodo 2014-2017 las zonas rojas indican áreas donde sí hubo un cambio y las zonas cremas indican áreas donde no hubo cambio en el uso del suelo.

- Diagnóstico. Plan de Desarrollo Regional Istmo (PDRI). Gobierno del Estado de Oaxaca 2016-2022 Versión 2020
- Diario Oficial de la Federación, 2023.- *PROGRAMA Institucional del Corredor Interoceánico del Istmo de Tehuantepec* 2023-2024. Pp. 35
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 1995. *Forest resources assessment 1990*, Global synthesis, FAO Forestry Paper 124, Rome. <http://www.fao.org/3/v5695e/V5695E00.htm>
- Flórez-Yepes, G. Y., Rincon-Santamaría, A., Cardona, P. S., & Alzate-Alvarez, A. M. (2017). Análisis multitemporal de las coberturas vegetales en el área de influencia de las minas de oro. *DYNA (Colombia)*, 84(201), 95–101.
- Franco, R. (2016). Análisis multitemporal vectorial en Argis. Guía de Caso. Univesidad Distrital Fransisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.
- Hernández, M. J. P., Acosta, E. H., Jiménez, R. S., Gervacio, C. G., & Reyes, S. M. (2021). Dynamics of changes in land use and vegetation due to anthropogenic activities in Zaachila, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(66). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i66.894>
- INEGI. (2017). INEGI Presenta Carta del Uso de Suelo y Vegetación Serie VI. *Comunicado de Prensa Núm. 535/17*, Página 1/2. Retrieved from <http://www.inegi.org.mx>
- Józefowska, A., Loaiza-Usuga, J. C., & Schmidt, O. (2020). Consequences of land-use changes for soil quality and function, with a focus on the EU and Latin America. In *Climate Change and Soil Interactions* (pp. 207-228). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818032-7.00008-4>
- Pontius Jr, R. G., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes

- while accounting for persistence. Agriculture, ecosystems & environment, 101(2-3), 251-268.
- QGIS Development Team (2010). Proyecto de la Fundación Geoespacial de Código abierto <http://www.qgis.org/es/site/>.
- Salinas-Castillo, W. E., Terrazas-Ruiz, M., Mora-Olivo, A., & Paredes-Hernández, C. U. (2020). Análisis multitemporal de cambios de uso de la tierra en San Fernando, Tamaulipas, durante el periodo 1987 a 2017. *CienciaUAT*, 14(2), 160. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v14i2.1298>
- Zavaleta, C. L. (2020). El desafío del corredor interoceánico del istmo de Tehuantepec. *Prospectus*, (4), 1957–1957.

Artículo

MODELO MATEMÁTICO DE LA CINÉTICA DE SECADO DE CARNE DE CABRA UTILIZANDO REGRESIÓN NO LINEAL

Hernández Flores, Omar Augusto¹, Beristain Ríos, Diego¹, Carrillo Luis, Valeria¹,
Hernández Bautista, Jorge², Romero Salazar, Carolina¹, Sandoval Torres, Sadoth³

¹Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca, Facultad de Sistemas Biológicos e
Innovación Tecnológica.

²Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca, Facultad de Medicina Veterinaria y
Zootecnia.

³Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo
Integral Regional (CIIDIR) Unidad Oaxaca. Hornos No. 1003, Col. Noche Buena, C.P.
71230. Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca.

Autor de correspondencia: ohernandez.ciencias@uabjo.mx

Recibido: 30 de julio de 2023

Aceptado: 09 de septiembre de 2023

Publicado en línea: 25 de septiembre de 2023

Resumen

En este artículo mostramos la utilidad de resolver modelos matemáticos utilizando regresión no lineal. Para ello, describimos brevemente cómo los modelos matemáticos creados por interpolación de polinomios por piezas y regresión polinomial presentan dificultades y desventajas en comparación con la regresión no lineal. Realizamos mediciones experimentales de secado de carne de cabra en un secador de túnel, a temperatura y velocidad del viento constantes y determinamos la humedad de la carne de cabra. Posteriormente, se utilizaron varios modelos de secado los cuales se resolvieron utilizando la regresión no lineal

para corroborar la eficacia de este procedimiento. El mejor ajuste se obtuvo con una modificación del denominado modelo “Wang-Singh”.

Palabras clave: convección, correlación de variables, deshidratado de carne, método de mínimos cuadrados, túnel de secado, velocidad de secado.

Abstract

We show the utility of solving mathematical models using nonlinear regression. We briefly describe how mathematical models created by piecewise polynomial interpolation and polynomial regression have difficulties and drawbacks compared to nonlinear regression. We carried out experimental measurements of goat meat drying in a tunnel dryer, at constant temperature and wind speed, and determined the moisture of the goat meat. Subsequently, various drying models were used, which were resolved using nonlinear regression to corroborate the effectiveness of this procedure. The best fit was obtained with a modification of the so-called “Wang-Singh” model.

Key words: convection, correlation of variables, dried meat, drying speed, least squares method, tunnel drying.

Introducción

El secado es una operación unitaria de la ingeniería química que consiste en la remoción de la humedad de un objeto no-gaseoso por medio de calor aplicado. Resulta incuestionable la importancia del secado en la actividad antropogénica ya

que incide directamente en la producción industrial, química, alimentos, biotecnología, agrícola, polímeros, cerámicos, farmacéutica, papel, minería, madera, por mencionar algunos ejemplos (Mujumdar, 2006). La evaluación del secado en túnel de secado es útil como

guía para una posible implementación tecnológica, por lo que es importante controlar diferentes variables que afectan la velocidad de secado, como, por ejemplo, la temperatura, la humedad, la velocidad de circulación del aire, el tipo y tamaño de las rodajas del alimento, etc. Un dispositivo tecnológico que puede implementarse es el secador solar. Si bien podría tener costos accesibles para comunidades agrícolas y ganaderas, también conlleva al problema intrínseco de la radiación solar que cambia constantemente durante todo el año, además de afectaciones por la lluvia y por agentes biológicos externos (Morales-Cruz et al., 2017).

Es deseable observar mediante varios modelos matemáticos el comportamiento de la carne al secarse para valorar puntos económicos y microbiológicos. Para este propósito requerimos de bases matemáticas relacionadas con el ajuste de curvas y el análisis de regresión (Motulsky

& Ransnas, 1987), con ello podemos realizar operaciones como la derivada, que, en el caso de la humedad removida de la carne de cabra, nos proporciona la velocidad de secado. El uso del análisis de regresión es amplio en las diferentes áreas de la ciencia, por citar algunas: en el almacenamiento de energía eléctrica (Cimmelli & Rogolino, 2022; Huang et al., 2023) el comportamiento de peces debido a la actividad antropogénica (Luis & Pasternack, 2023), en modelos de crecimiento para animales de granja (Van der Klein et al., 2023) en problemáticas medioambientales (Narimani et al., 2023; Uba et al., 2022; Uba & Ya'u, 2022), en el uso de inteligencia artificial en la ciencia e ingeniería de materiales (Singh & Singh, 2022), en la optimización de modelos de la ingeniería (Das et al., 2022; Zhang et al., 2023), etc. El análisis de correlación es una forma de conocer la relación entre dos variables continuas, mientras que, el análisis de regresión es una extensión

natural de la correlación, y nos permite hallar relaciones entre variables para que una variable sea predicha por una o muchas variables. De esta manera, el análisis de regresión no es solo un análisis de relación, sino también de predicción y explicación (Bolin, 2022). Usando un análisis de regresión, es posible hallar una ecuación para predecir el resultado deseado a partir de un conjunto de variables medidas.

Explicaremos brevemente el fundamento matemático de la regresión empleando un modelo no-lineal. Se toman M mediciones y se establece que cada medición puede aproximarse con $y_m = f(x_m; a_n) + \varepsilon_m$, siendo $f(x_m; a_n)$ un modelo (ecuación) no lineal conocido. Ahora bien, formalmente el termino de error ε_m sigue una distribución de probabilidad conjunta que para una distribución normal luce como:

$$p(y_m|a_n, \sigma^2) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{\frac{M}{2}}} \exp\left(-\frac{S}{2\sigma^2}\right),$$

donde

$$S(a_n) = \sum_{m=1}^M (y_m - f(x_m; a_n))^2,$$

es la suma de cuadrados residual para un modelo no-lineal. De acuerdo con lo anterior, la estimación de la máxima verosimilitud del conjunto de parámetros a_n se obtiene maximizando la función de verosimilitud (Seber & Wild, 1989). El logaritmo de la función de verosimilitud es:

$$L(a_n, \sigma^2) = -\frac{M}{2} \log 2\pi \sigma^2 - \frac{S}{2\sigma^2}.$$

Evidentemente $L(a_n, \sigma^2)$ es un máximo cuando S es un mínimo, esto es, una estimación de mínimos cuadrados para $a_n = a_n^*$ (Wells & Krakiwsky, 1971). Dado que $\partial^2 L / \partial (\sigma^2)^2 |_{(\sigma^*)^2} = -M / (2S^2) < 0$ se puede mostrar que a_n^* y $(\sigma^*)^2 = S(a_n^*) / M$ maximizan la verosimilitud. Con todo lo anterior

continuamos con la minimización de S dada por:

$$\frac{\partial}{\partial a_k} \sum_{m=1}^M (y_m - f(x_m; a_n))^2 \Big|_{a_k^*} = 0.$$

La ecuación anterior después de realizar las operaciones se puede escribir en la siguiente forma matricial, $\partial \mathbf{f}(\mathbf{Y} - \mathbf{f}) = \mathbf{0}$, donde $\{\mathbf{Y}\}_{m \times 1} = y_m$ es una matriz columna de M elementos, $\{\mathbf{f}\}_{m \times 1} = f_m$ es una matriz columna de M elementos con $f_m = f(x_m; a_k^*)$ y $\{\partial \mathbf{f}\}_{n \times m} = \partial f_m / \partial a_n |_{a_k^*}$ es una matriz de $N \times M$ elementos. La ecuación anterior puede escribirse como $(\partial \mathbf{f}^T \partial \mathbf{f})(\mathbf{Y} - \mathbf{f}) = \mathbf{0}$. Esta ecuación no se puede resolver analíticamente debido a la no linealidad de las funciones f_m , por lo que se recurren a metodologías numéricas que empleen algoritmos de resolución iterativos para hallar los parámetros a_k^* . Los procesos iterativos requieren en general de estimar

adecuadamente la solución inicial para asegurar la convergencia de la solución.

En este trabajo presentamos mediciones experimentales de la humedad de carne de cabra en función del tiempo, en un túnel de secado a temperatura fija. La carne no tuvo un pretratamiento y no se controló la humedad en el túnel. Comparamos diferentes modelos usando la regresión no lineal y con modelos usando funciones por piezas y modelos polinomiales usando regresión lineal. Mostramos las predicciones de los modelos estudiados.

Materiales y métodos

Material utilizado

Se utilizaron tiras de carne de cabra raza Boer, cortadas a un tamaño de 3x3x2 cm. El proceso para la obtención de las muestras fue el siguiente. Se sacrificó el animal, se seleccionó el lomo y se congeló por 48 horas. Posteriormente, se cortaron las muestras, se envasaron al vacío y se mantuvieron congeladas.

Secado de las muestras

El secado de las muestras de carne de cabra se realizó en un secador tipo túnel (flujo laminar), a una temperatura regulada de 70 °C y una velocidad de aire de 1 m/s. Todas las pruebas de secado tuvieron una duración del experimento fue de $t_f = 295$ minutos. Las muestras se enfriaron durante 24 horas a 1-3°C antes de realizar las mediciones, para asegurar que el agua de la carne se encuentre en estado líquido, evitar afectaciones por agentes biológicos y evitar el consumo energético por transiciones de fase sólido-líquido. Para los propósitos de este trabajo, se midió la masa de la muestra cada 5 minutos y se calculó humedad en base seca,

$$H_{bs}(t) = \frac{m(t) - m_s}{m_s}$$

donde $m_s = 6.1258 \text{ g}$ es la masa seca.

Modelado matemático

Existen muchos programas comerciales y no-comerciales que brindan múltiples

modelos matemáticos de acuerdo con el área científica -tecnológica de interés, además de la opción de la construcción de modelos propios. La principal desventaja de los programas comerciales es su alto costo y la imposibilidad de construir modelos propios de alta complejidad. Por otro lado, los programas de acceso libre presentan la desventaja de estar supeditados a la contribución del equipo de creadores. Lenguajes de programación de alto nivel como Phyton se utilizan para cómputo exhaustivo, caso contrario para el cálculo de polinomios interpolantes, polinomios por piezas y regresión no-lineal, no se requiere del manejo de grandes datos ni de realizar muchas operaciones. En vista de lo anterior, se pueden utilizar programas multipropósito como Scilab, R, OCTAVE, o bien un software propietario como MATLAB. Todos ellos cuentan con un lenguaje de programación nativo y son amigables con el usuario, además de contar con

bibliotecas especializadas que este trabajo utilizamos MATLAB como implementan el método de mínimos cuadrados para modelos no-lineales. En herramienta computacional.

cuadrados para modelos no-lineales. En

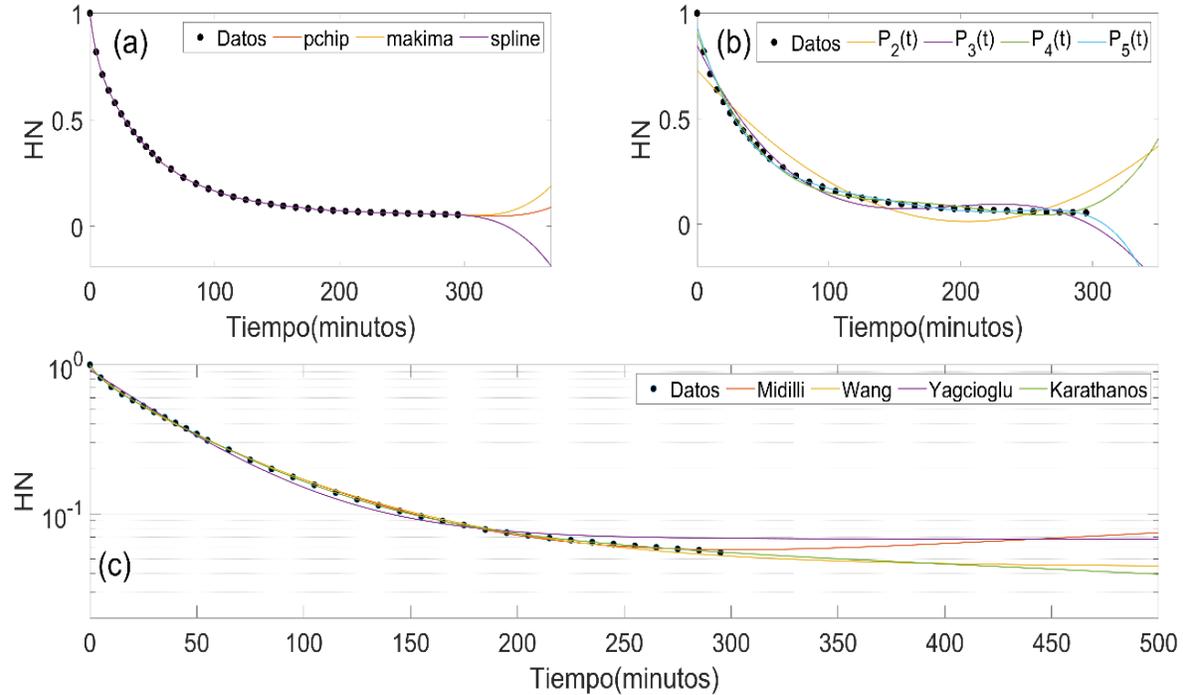


Figura 10. Modelado de la humedad en base seca normalizada HN. (a) los modelos son funciones por piezas (pchip, makima, spline); (b) los modelos son polinomios de grado N=2,3,4,5 cuyos coeficientes se obtuvieron mediante regresión lineal; (c) los modelos son funciones no lineales y los parámetros se obtuvieron con regresión no lineal.

Tabla 1 Modelos de MN utilizados en la regresión no-lineal

Modelo	Ecuación	Punto de partida
Midilli & Kucuk	$a \exp(-kt^n) + bt$	$a = 1, b = \frac{MN(t_f)}{t_f}, k = 0.1 \text{min}^{-1}, = 1$

Wang & Singh (modificado)	$b + a \exp(-kt^n)$	$a = 1 - b, b = MN(t_f), k = 0.1 \text{min}^{-1}, = 1$
Yagcioglu	$a \exp(-kt) + b$	$a = 1 - b, b = MN(t_f), k = 0.1 \text{min}^{-1}$
Karathanos	$a_1 \exp(-k_1 t) + a_2 \exp(-k_2 t) + a_3 \exp(-k_3 t)$	$a_1 = 1, a_2 = a_3 = 0, k_1 = k_2 = k_3 = 0.1 \text{min}^{-1}$

Resultados y discusión

Para la modelación matemática definimos la humedad en base seca normalizada (o tasa de humedad en base seca) como:

$$HN(t) \equiv \frac{H_{bs}(t)}{H_{bs}(t_0)} = \frac{m(t) - m_s}{m(t_0) - m_s}.$$

Aquí t_0 es el tiempo en el cual inicia el experimento, de esta manera, $m(t_0)$ representa la masa de la tira de carne de cabra antes de perder agua por el efecto de la transferencia de calor convectiva, este último proceso se debe reflejar en un comportamiento monótono decreciente de la masa, partiendo de $HN(t_0) = 1$ hasta $HN(t_\infty) = 0$, que corresponde a una masa $m(t_\infty) = m_s$.

La Figura 1.a muestra las mediciones de la humedad en base seca normalizada HN conforme transcurre el tiempo (puntos solidos), así como tres diferentes modelos de polinomios por piezas (pchip, makima, spline). Los polinomios interpolantes por piezas muestran un buen ajuste a los datos experimentales en el intervalo de tiempo

experimental. Las predicciones (tiempos mayores a t_f) de HN se obtuvieron por extrapolación. Se puede notar que las predicciones de HN presentan un comportamiento no físico dado que se espera una disminución gradual de la humedad o bien llegar a un valor constante. Para los modelos polinomiales por piezas, debido a la naturaleza de su construcción, no son diferenciables, y, por lo tanto, no es posible calcular la derivada temporal para conocer la velocidad de secado.

La regresión polinomial es un caso particular de la regresión lineal multivariada, en la figura 1.b se muestra la modelación de la humedad en base seca normalizada HN utilizando regresión polinomial (Bates & Watts, 1988). Las líneas de colores muestran el polinomio de ajuste $P_N(t)$ variando el grado del polinomio en $N = 1,2,3,4,5$ y se muestran las predicciones de cada modelo.

A diferencia de los polinomios por piezas, estos modelos de la humedad en base seca normalizada si pueden derivarse para hallar la velocidad de secado y utilizarse para predicciones. Estos modelos presentan el principal problema de que el orden de los polinomios debe ser bajo para no presentar oscilaciones y, por otro lado, en el valor inicial $t = t_0 = 0$, $P_N(0)$ discrepa de $HN(0) = 1$. Por otro lado, la extrapolación de los datos falla y con ello la posibilidad de estimar el valor de la humedad en tiempos largos.

La Figura 1.c muestra la regresión no lineal empleando los modelos (Draghici, 2021) descritos en la Tabla 1. Para una amplia y sistemática lista de modelos consultar a (Archontoulis & Miguez, 2015; Miguez et al., 2018). Se modifico el modelo original de Wang para que la humedad inicial en el modelo sea $1 = a + b$ y si consideramos que nuestros datos alcanzan la humedad de equilibrio,

entonces, el parámetro b representa el valor de la misma, y, por tanto, el parámetro a representaría la humedad perdida en el secado. Los diferentes modelos, en general, describen un buen ajuste del comportamiento de la humedad en el intervalo de tiempo en el cual se realizaron las mediciones, a excepción del modelo Yagcioglu que discrepa considerablemente. Las predicciones de los modelos Midilli y Yagcioglu presentan un comportamiento no físico ya que se incrementa la humedad, mientras que los modelos Wang (modificado) y Karathanos describen el correcto comportamiento asintótico de equilibrio con la humedad del aire de secado, siendo el modelo Wang (modificado) superior al modelo Karathanos dado que este último requiere más parámetros de ajuste, situación no deseable ya que siempre se busca modelos simples y con el número mínimo de parámetros de ajuste.

Conclusiones

El tiempo de secado de los productos cárnicos y la elección de las condiciones de secado depende de la capacidad de retención de agua de la carne. Lo anterior condiciona el comportamiento de la humedad con el paso del tiempo, alejándose del decaimiento puramente exponencial en secado. La modificación al modelo matemático de Wang describe mejor la variación exponencial de la humedad a lo largo del tiempo, además de brindar significado físico a los parámetros. Los valores de los parámetros para nuestra cinética de secado fueron $a=0.9483$, $b=0.0440$, $k=0.0548 \text{ min}^{-n}$ y $n=0.7830$, aquí b es la humedad de equilibrio que se estima se alcanzaría en aproximadamente 325 min, a es la humedad perdida por la tira de carne, que en este caso representa aproximadamente un 95% y k nos permite calcular que tanto ha disminuido la humedad en $t=k^{-1/n}$, que en nuestro

experimento, en 41 min ha disminuido alrededor de 40 %.

Agradecimientos

C.L.V. y B.R.D agradecen al CIIDIR las facilidades para realizar sus prácticas profesionales, en el marco del proyecto clave SIP-20220395.

Referencias

- Archontoulis, S. V., & Miguez, F. E. (2015). Nonlinear Regression Models and Applications in Agricultural Research. *Agronomy Journal*, 107(2), 786–798.
<https://doi.org/10.2134/agronj2012.0506>
- Bates, D. M., & Watts, D. G. (1988). *Nonlinear Regression Analysis and Its Applications*. Wiley.
<https://doi.org/10.1002/9780470316757>
- Bolin, J. H. (2022). *Regression Analysis in R*. Chapman and Hall/CRC.

- <https://doi.org/10.1201/9780429295843>
- Cimmelli, V. A., & Rogolino, P. (2022). New and Recent Results for Thermoelectric Energy Conversion in Graded Alloys at Nanoscale. *Nanomaterials*, 12(14), 2378. <https://doi.org/10.3390/nano12142378>
- Das, T., Goerlandt, F., & Tabri, K. (2022). An optimized metamodel for predicting damage and oil outflow in tanker collision accidents. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 236(2), 412–426. <https://doi.org/10.1177/14750902211039659>
- Draghici, O. (2021). Evaluation of mathematical models Which describe the process of drying goat meat. *Scientific Papers Series Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development*, 21(1), 237–240.
- Huang, Z., Wang, H., Yang, T., Liu, S., Li, H., Chen, J., & Wu, S. (2023). Thermal circuit model of prismatic lithium cell considering dynamic non-uniform characteristics during charging-discharging in energy storage. *Journal of Energy Storage*, 65, 107379. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107379>
- Luis, S. M., & Pasternack, G. B. (2023). Local hydraulics influence habitat selection and swimming behavior in adult California Central Valley Chinook salmon at a large river confluence. *Fisheries Research*, 261, 106634. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2023.106634>
- Miguez, F., Archontoulis, S., & Dokoohaki, H. (2018). *Nonlinear Regression Models and Applications* (pp. 401–447).

- <https://doi.org/10.2134/appliedstatistics.2016.0003.c15>
- Morales- Cruz, J., Juárez- Canales, G. B., Figueroa- González, J. J., & Mancillas- Medina, J. (2017). Evaluación de la deshidratación solar en carne de cabra (*Caprus dominiuniversi*), determinación de su composición química y compararla con una comercial. *Investigación y Desarrollo En Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 2, 370–375.
- Motulsky, H. J., & Ransnas, L. A. (1987). Fitting curves to data using nonlinear regression: a practical and nonmathematical review. *The FASEB Journal*, 1(5), 365–374. <https://doi.org/10.1096/fasebj.1.5.3315> 805
- Mujumdar, A. S. (2006). *Handbook of Industrial Drying* (A. S. Mujumdar, Ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420017618>
- Narimani, S., Davarpanah, S. M., Bar, N., Török, Á., & Vásárhelyi, B. (2023). Geological Strength Index Relationships with the Q-System and Q-Slope. *Sustainability*, 15(14), 11233. <https://doi.org/10.3390/su151411233>
- Seber, G. A. F., & Wild, C. J. (1989). *Nonlinear Regression*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/0471725315>
- Singh, J., & Singh, S. (2022). A review on Machine learning aspect in physics and mechanics of glasses. *Materials Science and Engineering: B*, 284, 115858. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2022.115858>
- Uba, G., Yakasai, H. M., & Abubakar, A. (2022). Limits of Detection Determination of Aflatoxin B1 using the Optical Waveguide Lightmode Spectroscopy via the Four-Parameter Logistic Model. *Bioremediation Science and Technology Research*,

- 10(2), 40–44. Wells, D. E., & Krakiwsky, E. J. (1971).
<https://doi.org/10.54987/bstr.v10i2.780> *The method of least squares* (Vol. 18).
Department of Surveying Engineering,
University of New Brunswick.
- Uba, G., & Ya'u, M. (2022). Test of the
Randomness of Residuals and
Detection of Potential Outliers for the
Modified Logistics Used in the Fitting
of the Growth Curve of Immobilized
Pseudomonas putida on Phenol.
*Journal of Environmental
Microbiology and Toxicology*, 10(1),
14–18.
<https://doi.org/10.54987/jemat.v10i1.692>
- van der Klein, S. A. S., Willems, O. W., &
Zuidhof, M. J. (2023). Multiphasic
mixed growth models for turkeys.
Journal of Animal Science, 101.
<https://doi.org/10.1093/jas/skad094>
- Zhang, G., Allaire, D., & Cagan, J. (2023).
Reducing the Search Space for Global
Minimum: A Focused Regions
Identification Method for Least Squares
Parameter Estimation in Nonlinear
Models. *Journal of Computing and
Information Science in Engineering*,
23(2).
<https://doi.org/10.1115/1.4054440>

EFFECTO DEL PROCESO DE LIOFILIZACIÓN EN LAS PROPIEDADES ESTRUCTURALES DE FRESAS (*Fragaria ananassa*)

López Díaz, Andrea Selene, Barragán Iglesias, Josué, Tenorio Islas, Delsy, Rodríguez
Ramírez, Juan, Méndez Lagunas, Lilia Leticia

Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo
Integral Regional (CIIDIR) Unidad Oaxaca. Hornos 1003, Colonia Noche Buena, Santa Cruz
Xoxocotlán, Oaxaca, México. CP. 71230

Autor de correspondencia: alopezd@ipn.mx

Recibido: 30 de julio de 2023

Aceptado: 09 de septiembre de 2023

Publicado en línea: 25 de septiembre de 2023

Resumen

Las fresas son un producto perecedero debido a la gran cantidad de agua en su composición, por lo cual, es necesario aplicar un método de conservación con la finalidad de aumentar su vida de anaquel. La liofilización es un proceso de secado, en el cual se obtiene un producto seco conservando sus propiedades nutricionales. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto del proceso de liofilización en la densidad real, aparente y la porosidad de fresas sometidas a pretratamientos de calcio, sacarosa y D-glucosa monohidratada. El proceso de liofilización mantuvo la forma y color de los cubos de fresa. Los valores de densidad real fueron mayores que los de densidad aparente, siendo el pretratamiento con hidróxido de calcio el que resultó en una mayor densidad real. La porosidad de todas las muestras fue cercana a 1, indicando una porosidad alta, característica de los productos deshidratados por

liofilización. La porosidad de estos productos es un parámetro importante debido a que influye en el grado de rehidratación de las muestras.

Palabras clave: secado, densidad real, densidad aparente, porosidad, procesamiento de frutas

Abstract

Strawberries are considered as perishable products due to the large amount of water in their composition, therefore, it is necessary to apply a conservation method to increase their shelf life. Freeze-drying is a drying process, in which the final dry product preserves its nutritional properties. The objective of this research was to evaluate the effect of the freeze-drying process on the porosity, apparent and true density of strawberries subjected to calcium, sucrose, and D-glucose monohydrate pretreatments. The freeze-drying process maintained the shape and colour of the strawberry cubes. True density values were higher than those for apparent density, where calcium pretreatment resulted in the highest true density value. The porosity of all the samples was close to 1, indicating a high porosity, characteristic of lyophilized products. Porosity is an important parameter for evaluating products, since it influences the degree of rehydration of the samples.

Keywords: drying, bulk density, apparent density, porosity, fruits processing

Introducción

La fresa (*Fragaria ananassa*) es una fruta nutritiva y rica en vitaminas, fibra y antioxidantes, pero presenta una vida de anaquel muy corta, típicamente 5 días a 0–4 °C (Mohammadi et al., 2021). La pérdida

de calidad de la fresa se debe principalmente a su contenido alto de humedad, lo cual promueve el ataque de microorganismos. Asimismo, la falta de una cubierta protectora contra daños físicos facilita la pérdida de agua y

magulladuras, lo que, a su vez, limita su comercialización y consumo (Li et al., 2017; Dhital et al., 2018).

En los últimos años, se han realizado diversas investigaciones para mejorar la vida útil y la calidad de las fresas. Existen diferentes técnicas de conservación, como tratamientos térmicos (Vicente et al., 2005), envasado en atmósferas modificadas (An et al., 2009), tratamientos osmóticos (Castelló et al., 2010), ultrasonido (Gani et al., 2016), tratamientos químicos (Llanos et al., 2018), películas comestibles (Yan et al., 2019) y liofilización (Castelló et al., 2007). Los pretratamientos de calcio y/o osmóticos previo al secado se utilizan para optimizar el proceso de secado y generar un producto final de características fisicoquímicas y de calidad organoléptica aceptables al consumidor. El pretratamiento con hidróxido de calcio se ha utilizado para incrementar la dureza y la cohesividad frutas procesadas, así como

aumentar la rapidez de secado (Barragán-Iglesias et al., 2019; Rodríguez-Ramírez et al., 2023). También se ha observado que el pretratamiento con sacarosa aumenta significativamente la tasa de rehidratación de fresas liofilizadas conservando una mejor estructura (Prosapio & Norton, 2017).

La liofilización es un proceso en el cual el agua se sublima mediante la transición directa del agua en el estado sólido (hielo) a vapor, omitiendo así el estado líquido y luego desorbiendo el agua de la capa "seca" (Nowak and Jakubczyk, 2020). Este método es ampliamente utilizado para la estabilización de alimentos, materiales biológicos y productos farmacéuticos de alta calidad, como proteínas, vacunas, bacterias y células de mamíferos ya que se conserva la calidad del producto seco (propiedades biológicas, nutricionales y organolépticas) (Ratti, 2001; Assegehegn et al., 2019). Como se mencionó anteriormente, el agua del material a

liofilizar debe estar completamente congelada. Esto inhibe los procesos químicos, bioquímicos y microbiológicos por lo que el sabor, el olor y el contenido de la mayoría de los nutrientes no cambian.

Otro aspecto relevante de la liofilización es que la eliminación de altos contenidos de agua por sublimación (tal como ocurre en los alimentos frescos) da como resultado la creación de una estructura altamente porosa por lo que la rehidratación de los liofilizados ocurre inmediatamente (Meda & Ratti, 2005; Jia et al., 2019). Considerando lo anterior, el objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto del proceso de liofilización en la densidad real y aparente, así como en la porosidad de fresas sometidas a pretratamientos de calcio, sacarosa, y D-glucosa monohidratada.

Materiales y Métodos

Materia prima Fresas (*Fragaria ananassa*) en estado de madurez organoléptica fueron adquiridas en el mercado local de Oaxaca de Juárez, Oaxaca, México. Las fresas se limpiaron, lavaron y desinfectaron con una solución de Microdyn® (Tavistock Holding AG, Suiza) al 0.4% en agua durante 10 minutos, antes de realizar los pretratamientos correspondientes.

Pretratamientos

Se utilizaron 3 pretratamientos: hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), sacarosa ($\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$) y D-glucosa monohidratada ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Las soluciones utilizadas se prepararon de la siguiente manera: hidróxido de calcio 1.5g de $\text{Ca}(\text{OH})_2/100\text{mL}$ de agua, sacarosa 40g de $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}/100\text{mL}$ de agua y D-glucosa monohidratada 40g de $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}/100\text{mL}$ de agua. La relación de la fruta/solución en todos los tratamientos fue de 1:5 (p/v).

Preparación de la fruta

Con la finalidad de homogeneizar las muestras sometidas a los pretratamientos y tener un volumen considerable para la determinación de las propiedades estructurales, las fresas se cortaron en cubos de 1.5 cm, resultando en un volumen aparente de 3.37 cm³. Posteriormente, los cubos se colocaron en la solución de hidróxido de calcio (5 min), la de sacarosa (60 min) y la de D-glucosa monohidratada (60 min).

Liofilización

Antes de iniciar el proceso, las muestras se congelaron a -10 °C durante 24 h, con el objetivo de igualar la temperatura en las muestras. La primera etapa del proceso consistió en colocar las muestras en la charola del liofilizador (SP VirTis Advantage Pro con controlador Intellitronics) para alcanzar una temperatura de -40 °C durante 340 min y así promover la formación de cristales de gran tamaño, lo cual favorece la

liofilización. En la segunda etapa llamada secado, las muestras se calentaron hasta 10 °C por 126 min a una presión de 26 Pa, posteriormente a -10 °C por 495 min y finalmente se pasó a una temperatura de 40 °C durante 590 min a una presión de 10 Pa.

Propiedades estructurales

Densidad real y aparente

La densidad real se calculó utilizando la masa y el volumen real de las muestras. El volumen real se midió con un estereopícnómetro (SPY-5DC, Quantachrome, U.S.A.) con la presión de nitrógeno (N₂) dentro del equipo fijada en 1.195 ± 0.001 kg_f/cm², un volumen de celda $V_c = 159.3687 \text{ cm}^3$ y un volumen añadido $V_A = 79.0140 \text{ cm}^3$. Previo a presurizar el sistema, el flujo N₂ para purga fue de 0.012 kg_f/cm² ± 0.001. Las determinaciones se realizaron por triplicado considerando 12 g de muestra (3 cubos). Los valores de la densidad real, a partir del volumen real se calcularon a

partir de las ecuaciones 1 y 2, respectivamente.

$$\rho_p = \frac{m}{V_p} \quad (1)$$

$$V_p = V_c + \frac{V_A}{1 - \frac{P_2}{P_3}} \quad (2)$$

Donde ρ_p es la densidad real (g/cm^3), m es la masa de las muestras (g), V_p es el volumen real (cm^3), V_c es el volumen de la celda (cm^3), V_A es el volumen añadido (cm^3), P_2 es la presión antes de introducir el volumen añadido (kgf/cm^2) y P_3 es la presión después de introducir el volumen añadido (kgf/cm^2).

La densidad aparente se midió considerando 4.00 ± 0.10 g (1 cubo) de una muestra utilizando el método de desplazamiento de volumen con n-hexano y un kit de densidad (YDK 01-OD, Sartorius). Las mediciones se llevaron a cabo dentro de ≈ 5 s para evitar que la muestra absorba el líquido de inmersión.

Los valores de la densidad aparente se

determinaron a partir del principio de fuerza boyante considerando las ecuaciones 3 y 4, respectivamente.

$$\rho_b = \frac{m_a(\rho_{lq} - 0.0012 \text{ g/cm}^3)}{0.99983 G} + 0.0012 \text{ g/cm}^3 \quad (3)$$

$$G = m_a - m_{lq} \quad (4)$$

Donde ρ_b es la densidad aparente de la muestra (g/cm^3), m_a es la masa de la muestra en el aire (g), m_{lq} es la masa de la muestra sumergido en el líquido (g) y G es la diferencia de masa de la muestra (g).

El volumen aparente se calculó considerando la relación de la masa final de la muestra y la densidad aparente.

Porosidad aparente

La porosidad aparente se calculó utilizando los datos de densidades real y aparente (Ec. 5). En el cual, el volumen de aire se considera como el volumen total de un material.

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{\rho_b}{\rho_p} \right) \quad (5)$$

Donde ε es la porosidad aparente (adimensional).

Análisis de datos

Los datos obtenidos para la densidad real, aparente y porosidad se expresaron como valores medios \pm desviación estándar. Los datos se analizaron mediante análisis de varianza unidireccional (ANOVA) y las diferencias significativas entre los pretratamientos mediante la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$.

Resultados y Discusión

La calidad de un producto deshidratado está generalmente relacionada con sus características ópticas (color y apariencia) y estructurales (densidad, porosidad, tamaño de poro y volumen específico) (Rodríguez-Ramírez et al., 2012). En la Figura 1 se muestra la apariencia de los cubos de fresa liofilizados. Al realizar la comparación visual entre las muestras sin

pretratamiento y aquellas sometidas a los diferentes pretratamientos, se observa que, en todos los casos, los cubos de fresa conservan su forma y color característico, sin embargo, las muestras sin pretratamiento y pretratadas con sacarosa presentaron un color más intenso, indicando que el color se conservó de una mejor manera después del proceso de liofilización, en comparación con las muestras sin liofilizar.

Se observó que el volumen macroscópico de los cubos de fresa no cambió durante el proceso de liofilización, lo cual coincide con lo reportado por Achanta y Okos (2000), debido a una insignificante contracción del tejido vegetal. Por otro lado, altas concentraciones de azúcar provocan un efecto en las muestras en términos de una reducción mínima de volumen y sin daño al tejido.

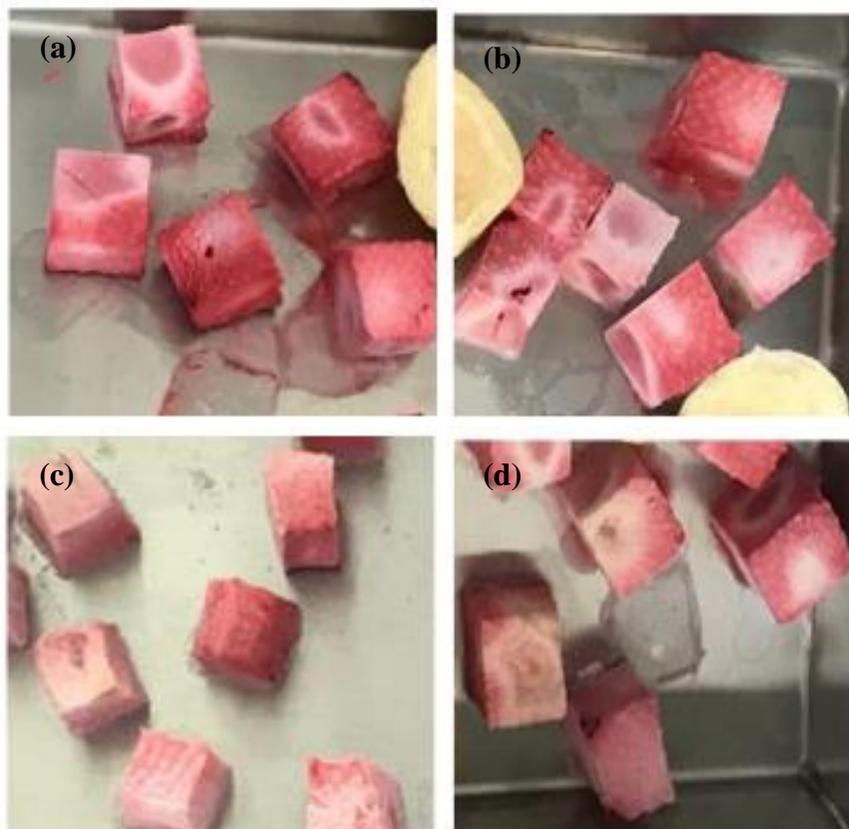


Figura 1. Apariencia de los cubos de fresa liofilizados. (a) sin pretratamiento, (b) sacarosa, (c) D-glucosa monohidratada, (d) hidróxido de calcio.

Esta reducción mínima puede deberse a la gran pérdida de agua de las muestras a altas concentraciones y temperaturas por el incremento en la presión osmótica y gran relajación del tejido. En el caso del calcio, la estructura formada por los iones permite la salida de agua manteniendo la estructura de las muestras sin cambios relevantes en el volumen (Barragán-Iglesias et al., 2019).

Por otra parte, las propiedades de densidad están relacionadas con la contracción y la porosidad, dependiendo del tamaño de la muestra. Asimismo, las variaciones en la porosidad y tamaño medio de poro, así como la distribución del tamaño y área del poro, tienen un efecto significativo en las propiedades mecánicas y de textura, así como en la calidad del material deshidratado).

Tabla 1. Densidad aparente, real y porosidad de las muestras liofilizadas.

Tratamiento	Volumen aparente (cm³)	Densidad aparente (g/cm³)	Densidad real (g/cm³)	Porosidad (adimensional)
Sin tratamiento	3.16 ± 0.32 ^a	0.29 ± 0.06 ^a	1.06 ± 0.04 ^a	0.73 ± 0.01 ^a
Hidróxido de calcio	3.21 ± 0.21 ^a	0.21 ± 0.01 ^b	1.65 ± 0.04 ^b	0.87 ± 0.01 ^b
Sacarosa	3.15 ± 0.15 ^a	0.28 ± 0.06 ^a	1.01 ± 0.08 ^a	0.72 ± 0.02 ^a
D-glucosa monohidratada	3.18 ± 0.32 ^a	0.33 ± 0.03 ^a	1.18 ± 0.15 ^a	0.72 ± 0.06 ^a

Letras diferentes en una misma columna indican diferencia significativa ($\alpha = 0.05$) entre los pretratamientos.

Los resultados de volumen aparente, densidad aparente, densidad real y porosidad se muestran en la Tabla 1.

La densidad real se define como el cociente de la masa entre el volumen de la muestra, sin considerar los poros del material (volumen real). Por otro lado, la densidad aparente es la relación entre la masa y el volumen de un material incluyendo los poros y el agua (volumen aparente). La porosidad es la relación entre el volumen de poros y el volumen total del producto, es decir, es una medida de espacios vacíos en el material (Rodríguez-Ramírez et al., 2012). La densidad y la

porosidad son propiedades importantes en la caracterización y predicción de la calidad de productos secos y procesados (Rodríguez-Ramírez et al., 2012).

De acuerdo con los resultados obtenidos, la porosidad de todas las muestras fue cercana a 1, indicando una porosidad alta, característica de los productos deshidratados por liofilización. Sin embargo, la mayor porosidad se encontró en las muestras sin tratamiento y con pretratamiento de hidróxido de calcio. De acuerdo con Achanta y Okos (2000) la alta porosidad de productos liofilizados puede

ser explicada por las bajas temperaturas empleadas por debajo de la temperatura de transición vítrea, provocando que el material permanezca en estado vítreo con un mínimo encogimiento durante el proceso de secado.

Por otro lado, se observa que la densidad aparente de las muestras sometidas al pretratamiento con hidróxido de sodio fue menor, comparada con los otros tratamientos. Por lo tanto, la densidad real en este tratamiento fue mayor, indicando una porosidad más alta. De acuerdo con Barragán-Iglesias et al. (2019), un pretratamiento con hidróxido de calcio modifica la microestructura del tejido vegetal. Aunque, los cambios microestructurales en los cubos de fresa no fueron analizados en el presente trabajo, es necesario recalcar que la densidad y porosidad de un material es afectada por la pérdida de estructura celular, lo cual facilita de migración de agua en el material.

Conclusiones

El proceso de liofilización de la fresa ayuda a conservar el producto por más tiempo, evitando la descomposición del producto fresco. El uso de pretratamientos antes del liofilizado puede reducir el tiempo de secado y mejorar la calidad de los productos deshidratados. Los pretratamientos como hidróxido de calcio, sacarosa y glucosa mejoran la transferencia de masa y calor durante la deshidratación y afectan positivamente las propiedades del producto final, manteniendo su estructura y calidad. El pretratamiento con sacarosa, además de preservar el color, mejora el sabor del producto final, haciéndolo más agradable para el consumidor.

Agradecimientos

Los autores A. S. López-Díaz y J. Barragán-Iglesias agradecen a CONAHCyT por el financiamiento para su estancia posdoctoral.

Referencias

- Achanta, S. & Okos, M.R. (2000). *Quality changes during drying of food polymers. In Drying Technology in Agriculture and Food Sciences*; Mujumdar, A.S., Ed.; Science Publishers: Enfield, NH, 133–147.
- An, D. S., Park, E., & Lee, D. S. (2009). *Effect of hypobaric packaging on respiration and quality of strawberry and curled lettuce. Postharvest Biology and Technology*, 52(1), 78-83.
- Assegehegn, G., Brito-de la Fuente, E., Franco, J. M., & Gallegos, C. (2019). *The importance of understanding the freezing step and its impact on freeze-drying process performance. Journal of pharmaceutical sciences*, 108(4), 1378-1395.
- Barragan-Iglesias, J., Rodriguez-Ramirez, J., Sablani, S.S. & Mendez-Lagunas, L.L. (2019). Texture analysis of dried papaya (*Carica papaya* L., cv. Maradol) pretreated with calcium and osmotic dehydration. *Drying Technology*, 37, 906–919.
- Castelló, M. L., Fito, P. J., & Chiralt, A. (2010). *Changes in respiration rate and physical properties of strawberries due to osmotic dehydration and storage. Journal of Food Engineering*, 97(1), 64-71.
- Castelló, M. L., Fito, P. J., Argüelles, A., & Fito, P. (2007). *Application of the SAFES (systematic approach to food engineering systems) methodology to strawberry freezing process. Journal of food engineering*, 83(2), 238-249.
- Dhital, R., Mora, N. B., Watson, D. G., Kohli, P., & Choudhary, R. (2018). *Efficacy of limonene nano coatings on post-harvest shelf life of strawberries. Lwt*, 97, 124-134.
- Gani, A., Baba, W. N., Ahmad, M., Shah, U., Khan, A. A., Wani, I. A., Masoodi, F.A. & Gani, A. (2016). *Effect of ultrasound treatment on physico-chemical, nutraceutical and microbial*

- quality of strawberry*. LWT-Food Science and Technology, 66, 496-502.
- Jia, Y., Khalifa, I., Hu, L., Zhu, W., Li, J., Li, K., & Li, C. (2019). *Influence of three different drying techniques on persimmon chips' characteristics: A comparison study among hot-air, combined hot-air-microwave, and vacuum-freeze drying techniques*. Food and Bioproducts Processing, 118, 67-76.
- Li, D., Ye, Q., Jiang, L., & Luo, Z. (2017). *Effects of nano-TiO₂-LDPE packaging on postharvest quality and antioxidant capacity of strawberry (Fragaria ananassa Duch.) stored at refrigeration temperature*. Journal of the Science of Food and Agriculture, 97(4), 1116-1123.
- Meda, L., & Ratti, C. (2005). *Rehydration of freeze-dried strawberries at varying temperatures*. Journal of Food Process Engineering, 28(3), 233-246.
- Mohammadi, L., Ramezani, A., Tanaka, F., & Tanaka, F. (2021). *Impact of Aloe vera gel coating enriched with basil (Ocimum basilicum L.) essential oil on postharvest quality of strawberry fruit*. Journal of Food Measurement and Characterization, 15, 353-362.
- Nowak, D., & Jakubczyk, E. (2020). *The freeze-drying of foods—The characteristic of the process course and the effect of its parameters on the physical properties of food materials*. Foods, 9(10), 1488.
- Prosapio, V. & Norton, I. (2017). *Influence of osmotic dehydration pre-treatment on oven drying and freeze-drying performance*. LWT—Food Science and Technology, 80, 401–408.
- Ratti, C. (2001). *Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review*. Journal of food engineering, 49(4), 311-319.
- Rodriguez-Ramirez, J., Barragan-Iglesias, J., Ramirez-Palma, A. J. & Mendez-Lagunas, L.L. (2023). *Effect of calcium*

- and osmotic pretreatments on mass transfer and texture parameters during processing of chilacayote (Cucurbita ficifolia Bouché). Journal of Food Processing and Preservation. Article ID 3873662, 14 pp.*
- Rodríguez-Ramírez, J., Mendez-Lagunas, L., López-Ortiz, A., & Torres, S. S. (2012). *True density and apparent density during the drying process for vegetables and fruits: A review. Journal of food science, 77(12), R146-R154.*
- Vicente, A. R., Costa, M. L., Martínez, G. A., Chaves, A. R., & Civello, P. M. (2005). *Effect of heat treatments on cell wall degradation and softening in strawberry fruit. Postharvest biology and Technology, 38(3), 213-222.*
- Yan, J., Luo, Z., Ban, Z., Lu, H., Li, D., Yang, D., Soleimani, M. & Li, L. (2019). *The effect of the layer-by-layer (LBL) edible coating on strawberry quality and metabolites during storage. Postharvest Biology and Technology, 147, 29-38.*

ANÁLISIS DE LA FACTIBILIDAD DE UN SCALL COMO ALTERNATIVA AL AGUA SUBTERRÁNEA

Juárez Morales, Manuel¹, Torres Zárate, Silvia Rocío¹, Ladrón de Guevara Torres, María de los Ángeles¹, Belmonte Jiménez, Salvador Isidro¹, Hernández Sánchez, Rosa Isabel¹

¹Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR) Unidad Oaxaca. Hornos No. 1003, Col. Noche Buena, C.P. 71230. Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca.

Autor de correspondencia: mjuarezm2300@alumno.ipn.mx

Recibido: 30 de julio de 2023

Aceptado: 09 de septiembre de 2023

Publicado en línea: 25 de septiembre de 2023

Resumen

La disponibilidad de agua para uso y consumo humano es cada vez menor, por efectos del crecimiento demográfico, cambio climático, contaminación de cuerpos de agua y sobreexplotación de acuíferos, por lo que es necesario plantear estrategias que coadyuven a disminuir la dependencia de estas fuentes. El objetivo de este trabajo es analizar la factibilidad de utilizar el agua pluvial para abastecer las necesidades del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR), Unidad Oaxaca como alternativa al uso de agua subterránea, mediante la determinación de parámetros de calidad de agua pluvial y la propuesta de implementación de un Sistema de Captación de Agua de Lluvia (SCALL). Se llevó a cabo el muestreo del agua subterránea según la normativa mexicana para procedimientos sanitarios para el muestreo NOM-230-SSA1-2002 y el cálculo de agua que se puede captar de acuerdo a los lineamientos técnicos

planteados por CONAGUA, SEMARNAT y la Organización Panamericana de la Salud. Los resultados de los análisis fisicoquímicos indican que el agua pluvial presenta mejor calidad con respecto al agua subterránea, al rebasar sólo el límite permisible del color verdadero indicado en la normativa mexicana para los límites permisibles de calidad del agua NOM-127-SSA1-2021, sin embargo, presenta contaminación por coliformes fecales. Por otra parte, la cantidad de agua pluvial es suficiente para abastecer las necesidades del edificio de posgrado, por lo que, sí se recomienda realizar una instalación de un SCALL, además de que los costos son relativamente bajos para la instalación de los componentes ausentes.

Palabras clave: agua pluvial, calidad del agua, contaminación.

Abstract

The availability of water for human use and consumption is decreasing, due to the effects of population growth, climate change, contamination of water bodies and overexploitation of aquifers, so it is necessary to propose strategies to help reduce dependence on these sources. This work aims to analyze the feasibility of using rainwater to supply the needs of the Interdisciplinary Research Center for Integral Regional Development (CIIDIR), Oaxaca Unit, as an alternative to the use of groundwater, by determining rainwater quality parameters and proposing the implementation of a Rainwater Harvesting System (SCALL). Groundwater sampling was carried out according to Mexican standards for sanitary procedures for sampling NOM-230-SSA1-2002 and the calculation of water that can be captured according to the technical guidelines established by CONAGUA, SEMARNAT, and the Pan American Health Organization. The results of the physicochemical analyses indicate that the rainwater has better quality than groundwater, exceeding only the allowable limit for true color indicated in the Mexican standard for allowable water quality limits

NOM-127-SSA1-2021; however, it is contaminated by fecal coliforms. On the other hand, the average amount of rainfall is sufficient to supply the needs of the postgraduate building; therefore, it is recommended to install a SCALL, in addition to the fact that the costs are relatively low for the installation of the missing components.

Keywords: rainwater, water quality, contamination.

Introducción

Debido al crecimiento demográfico de la población y al cambio climático, la disponibilidad de agua apta para uso y consumo humano es cada vez menor, siendo así que más de 2, 000 millones de personas en el mundo tienen problemas de escasez de agua (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2022; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2016)

Además, el acceso a agua de buena calidad favorece la higiene y a su vez previene enfermedades como la diarrea, infecciones respiratorias, entre otras (OMS, 2022),.

En México se considera que el 26% de los ríos, lagos y embalses son de buena calidad, en tanto que en el 74 % restante el

agua tiene diferentes grados de contaminación (Soriano-Hernández et al., 2017). Situación preocupante, ya que el agua de mala calidad repercute en la salud de las personas y las causas provienen en algunas ocasiones de las actividades antropogénicas, tal como en la cuenca Ayuquila-Armería donde se han encontrado sitios con hasta 90 % de eutrofización, con concentraciones de N y contaminación orgánica superiores a lo que fija la normatividad mexicana que establece los límites permisibles de contaminantes en descargas de aguas residuales NOM-001-ECOL-1996 (Mancilla-Villa et al., 2022). Asimismo, el Río Conchos presenta contaminación del agua, producto de aguas residuales

urbanas y desechos industriales (Pérez-Cutillas et al., 2019).

En ese mismo sentido, dentro de los pozos profundos ubicados en la periferia del Río Atoyac, considerado como corriente efluente, se han encontrado concentraciones altas de Ca, Mg y carbonatos, además de que la corriente de este Río tiene propiedades incrustantes y corrosivas (Julián-Soto, 2010). Soriano-Hernández et al., (2017) mencionan que se encontraron valores altos de amoníaco, nitrógeno orgánico, nitrógeno total, sólidos disueltos totales (SDT) y sólidos disueltos suspendidos en esta zona.

Además, los Valles Centrales de Oaxaca extraen importantes cantidades de agua subterránea para el servicio de agua potable de la zona conurbada de la ciudad, lo que ha coadyuvado a que el nivel freático este cada vez más profundo, lo cual dificulta la extracción de agua y el agotamiento del recurso en algunos pozos (Sandoval-Montes & Ramos-Leal, 2009).

Debido a lo anterior, es necesario implementar estrategias que aseguren el abastecimiento del vital líquido, por lo que, la recolección del agua pluvial es una técnica cada vez más recurrente, sobre todo en lugares donde hay escasez del mismo.

Por lo tanto, a través del presente trabajo se pretende analizar la factibilidad de utilizar el agua pluvial para abastecer las necesidades del CIIDIR, Unidad Oaxaca como alternativa al uso de agua subterránea, mediante la determinación de parámetros de calidad de agua pluvial y la propuesta de implementación de un SCALL a través del cálculo de la cantidad de agua que se podría captar y el costo que se necesita para implementar el mismo.

Materiales y métodos

El presente trabajo está planteado para el CIIDIR, Unidad Oaxaca, del Instituto Politécnico Nacional (IPN), con dirección en la calle Hornos No. 1003, Col. Noche

Buena, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca. México, con latitud 17°01'33" N y longitud 96°43'12" O y una elevación de 1528 msnm (Figura 1).

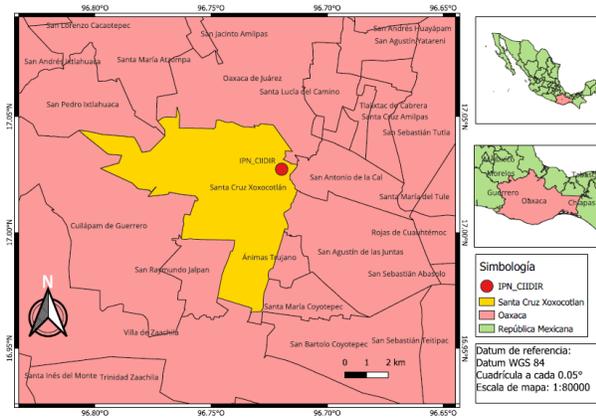


Figura 1. Mapa de ubicación.

Con respecto al muestreo del agua subterránea se siguió el procedimiento marcado en la NOM-230-SSA1-2002 (2005).

Mientras que, para el muestreo del agua pluvial, los países que se han interesado por la calidad de la misma, han realizado sus análisis siguiendo sus propias metodologías (Rojas-Valencia et al., 2012). Por lo tanto, para este estudio, se recolectó la muestra de agua pluvial para

análisis fisicoquímico en un recipiente previamente desinfectado con hipoclorito de sodio comercial, por otro lado, la muestra para análisis microbiológico se recolectó en un recipiente esterilizado con calor seco y se cubrió con gasas para minimizar su contaminación. Ambas muestras se mantuvieron en refrigeración hasta su análisis en laboratorio.

Mientras que, para el cálculo del volumen de agua pluvial promedio anual que se podría recolectar corresponde al área del techo del edificio de Posgrado. Esto debido a que en este edificio hay mayor concurrencia de alumnos, profesores y administrativos, por ser el lugar en el que se otorgan la mayor cantidad de materias presenciales.

Por lo tanto, para la determinación del cálculo del volumen de captación de agua, se toma de los “lineamientos técnicos: sistemas de captación de agua de lluvia con fines de abasto de agua potable a nivel vivienda” propuesto por la (Secretaría de

Medio Ambiente y Recursos Naturales & Comisión Nacional del Agua, 2016) y la “Guía de diseño para captación de agua de lluvia” de la Organización Panamericana de la Salud [OPS] (2004).

Por consiguiente, la demanda de agua mensual se calculó tomando en cuenta la población flotante con que cuenta el CIIDIR, de acuerdo a la matrícula de cada materia que se imparte en el edificio de Posgrado para el semestre 2023A, el personal administrativo que se encuentra de manera permanente y las personas de limpieza asignadas, el cual corresponde a 79 personas los días lunes, 126 martes, 130 miércoles, 131 jueves y 68 viernes. Se descontaron los días inhábiles y días de vacaciones de acuerdo con el calendario académico de modalidad escolarizada 2022-2023, excepto el personal de limpieza que asisten a trabajar aun en periodo vacacional.

Después, el cálculo del volumen de agua que se consume por persona se obtuvo

partiendo en primera instancia del número de veces que las personas van a realizar sus necesidades fisiológicas y considerando que los mingitorios no consumen agua, por lo que los hombres hacen uso del inodoro tan solo 1 vez al día y las mujeres al menos 2 veces; la relación de número hombre-mujer se calculó de acuerdo a la proporción de alumnos del CIIDIR, Unidad Oaxaca (60 % mujeres y 40 % hombres). Finalmente, la información de la cantidad de agua consumida para realizar limpieza se obtuvo directamente del personal de limpieza, a lo que mencionan que usan en promedio 4 botes de 19 litros al día por cada nivel, lo cual da un total de 152 litros/día.

Posteriormente, la precipitación se obtuvo en un análisis histórico del año 1981 al 2016 de la estación meteorológica ubicada en el municipio de Villa de Zaachila presenta lluvias con un promedio anual de precipitación de 734.76 mm (Comisión Nacional del Agua, s.f.).

Mientras que, el área de este lugar se determinó mediante una imagen tomada de Google Earth Pro-7.3.6.9345, el cual representa un valor de 788.52 m². Debido a que es una superficie impermeabilizada, el coeficiente de escurrimiento que le corresponde es de 0.9, de acuerdo con la normativa mexicana que especifica los criterios y requerimientos ambientales para la edificación NMX-AA-164-SCFI-2013.

Finalmente, para la propuesta de un SCALL, se toma la propuesta de la OPS (2004) y Sarar Transformación (2016), otra consideración importante es que el sistema de captación no empieza desde cero, ya que ya existen ciertos elementos como la canalización de toda el agua pluvial hasta un punto de desagüe que se encuentra a nivel de terreno natural.

Con lo que respecta al costo de implementación, los materiales fueron cotizados en su mayoría en “The Home Depot”, por ser una empresa presente en

gran parte de la República Mexicana y los costos puedan ser comparables en cualquier parte del país.

Resultados y discusión

Los resultados de los análisis fisicoquímicos del agua subterránea que abastece el edificio de posgrado del CIIDIR, y del agua pluvial se muestran en la Tabla 1, donde se compara con los valores límite permisibles de la NOM-127-SSA1-2021 (2022), de manera general, el agua pluvial presenta mejor calidad que la subterránea al rebasar sólo el límite permisible del color verdadero, mientras que la muestra del agua subterránea rebasa los siguientes límites permisibles: turbidez, color verdadero, dureza total, Fe y Mn.

Además, el agua subterránea tuvo una concentración de 737 mg/L de SDT, mientras que, el agua pluvial tuvo una concentración de 58 mg/L de SDT, que de acuerdo con la clasificación de la

Fundación Aquae (2021), el agua subterránea es de calidad regular y la pluvial es de excelente calidad y ambas catalogadas como aguas dulces.

Con respecto a los resultados de los análisis microbiológicos (Tabla 2), se observa que el agua subterránea no presentó Coliformes fecales o E. coli, por

lo que el riesgo para uso y consumo humano es mínimo, por el contrario, el agua pluvial presentó contaminación en todos los parámetros microbiológicos, rebasando los límites permisibles de la NOM-127-SSA1-2021 (2022), por lo cual no es apta para uso y consumo humano.

Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos del agua de subterránea y pluvial en comparación con los límites permisibles en México, Estados Unidos y la OMS.

Parámetros	Agua subterránea	Agua pluvial	Límites permisibles en NOM-127-SSA1-2021	Valor de referencia OMS (2018)	Nivel Máximo de contaminantes EPA 816-F-09-004
Físicos					
Turbidez	35.30 NTU	2.13 NTU	4 NTU		
pH	7.3	7.5	6.5-8.5		6.5-8.5
Color verdadero	79 UC	48 UC	15 UC		15 UC
Color aparente	Cristalino café	Cristalino turbio	---		
Químicos					
Alcalinidad Total	470 mg/L	104 mg/L	---		
Dureza total (CaCO ₃)	1719 mg/L	37 mg/L	500 mg/L		
Fluoruros (como F ⁻)	0.54 mg/L	0.21 mg/L	1.5 mg/L		2 mg/L
Nitratos (como N-NO ₃ ⁻)	1.40 mg/L	0.90 mg/L	11 mg/L	50 mg/L	10 mg/L
Nitritos (como N-NO ₂ ⁻)	0.18 mg/L	0.27 mg/L	0.90 mg/L	3 mg/L	1 mg/L
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	737 mg/L	58 mg/L	1000 mg/L		500 mg/L
Sodio	90 mg/L	25 mg/L	---		
Sulfatos (como SO ₄ ⁻²)	96 mg/L	<20 mg/L	400 mg/L		250 mg/L
Sustancias activas al azul de metileno	0.00 mg/L	0.00 mg/L	0.5 mg/L		
Metales y metaloides					
Cianuros Totales	0.022 mg/L	0.007 mg/L	0.07 mg/L		
Cobre	0.016 mg/L	0.003 mg/L	2 mg/L	2 mg/l	1.3 mg/L

Cromo Total	0.01 mg/L	0.003 mg/L	0.05 mg/L	0.05 mg/L	0.1
Hierro	0.31 mg/L	0.12 mg/L	0.3 mg/L		
Manganeso	0.160mg/L	0.015 mg/L	0.15 mg/L		
Residuales de la desinfección					
Cloro residual libre	0.00 mg/L	0.00 mg/L	0.2-1.5 mg/L		
Cloruros	138.13 mg/L	38.99 mg/L	---		250 mL/L

De acuerdo con Tallon et al. (2005) existe potencialmente patógenos de heces de la posibilidad de que la presencia de humanos y animales suspendidos en el coliformes fecales en la atmósfera aire. provengan de microorganismos

Tabla 2. Análisis microbiológicos del agua subterránea y el agua pluvial.

Resultados de los análisis	NOM-127-SSA1-2021		
Parámetro microbiológico	Agua subterránea	Agua pluvial	Límite permisible
Coliformes Fecales o E. coli	Ausencia	7 NMP/100 mL	Ausencia
Organismos coliformes	Ausencia	50 UFC/mL	Ausencia
Mesofílicos Aerobios	11 UFC/mL	115 UFC/mL	No indica

Por otra parte, el agua subterránea analizada presenta un valor más alto en color verdadero que el agua pluvial que puede deberse a que tiene mayor contacto con compuestos orgánicos de acuerdo con Fernández-Cirelli (2012) que menciona que el color en el agua lo producen compuestos de origen animal o artificial vertidos por las industrias.

A su vez, la muestra del agua subterránea presenta un alto grado de turbidez, al mismo tiempo el Fe y el Mg son los metales que se encuentran en mayor concentración y rebasan ligeramente el límite permisible según la normatividad mexicana.

En este estudio se encontraron altas concentraciones de Ca y carbonatos, lo que

indica alta concentración de dureza del agua subterránea, similar a lo encontrado por (Julián-Soto, 2010).

Aunque para la Organización Mundial de la Salud (2018) la dureza total, el Fe y Mg no representan una preocupación para la salud, si considera que pueden afectar la aceptabilidad del agua para consumo humano, por lo que recomienda el ablandamiento del agua.

Con respecto al área del techo del edificio de posgrado y el coeficiente de escurrimiento, el volumen promedio de captación anual corresponde a 521.44 m³.

En la tabla 3, se muestra la demanda

mensual de agua de acuerdo a los días hábiles de cada mes del calendario escolarizado 2022-2023 y al número de estudiantes, profesores y personal administrativo que tiene actividades en el edificio de posgrado, por lo que se puede observar que todos los meses tienen una demanda de agua distinta.

Sin embargo, en la Figura 3, se puede observar que el volumen de precipitación es mayor que la demanda, por lo cual la implementación de un SCALL satisface sin ningún problema la demanda para este edificio.

Tabla 3. Demanda de agua mensual en el edificio de posgrado del CIIDIR.

Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
No. de días hábiles	20	19	22	13	19	22	20	9	21	21	19	16
	11.	11.										
Demanda de agua por baño de hombres (m ³)	9	5	13.3	7.8	11.8	13.0	11.9	5.6	12.7	12.4	11.9	9.7
Demanda de agua por baño de mujeres (m ³)	9.0	8.7	10.0	5.9	8.9	9.8	9.0	4.2	9.5	9.3	9.0	7.3
Demanda de agua por limpieza (m ³)	3.3	3.0	3.5	3.0	3.5	3.3	3.2	3.5	3.3	3.2	3.3	3.3
	24.	23.										
Total (m ³)	2	2	26.8	16.7	24.2	26.1	24.1	13.3	25.5	24.9	24.2	20.3

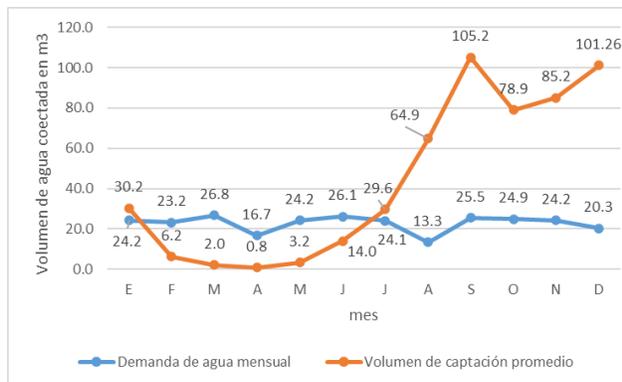


Figura 3. Volumen promedio de captación y volumen de demanda de agua en el edificio de posgrado del CIIDIR, Unidad Oaxaca.

A pesar de que el edificio de Posgrado no fue diseñado para recolectar agua pluvial, presenta condiciones óptimas para implementar un SCALL, ya que, permite dirigir el flujo hacia un punto de salida donde puede ser recolectado con facilidad de acuerdo con las características propuestas por Şahin & Manioğlu (2019). No obstante, la adopción de la utilización de los SCALL es una práctica escasa, por lo que se tienen que realizar más acciones para su implementación, ya que, el agua que se recolecta presenta buena calidad, desechando únicamente el volumen

correspondiente al de las primeras lluvias (Abu-Zreig et al., 2019).

La siguiente a considerar es el volumen óptimo del tanque de almacenamiento para el edificio de posgrado del CIIDIR, Unidad Oaxaca es de 207.75 m^3 para un techo de 788.52 m^2 , de acuerdo con el procedimiento propuesto por la OPS (2004). Sin embargo, si se construyera un tanque de almacenamiento para recolectar toda esta cantidad de agua, no sería aprovechada en su totalidad, ya que la demanda total asciende a $273.5 \text{ m}^3/\text{año}$ y actualmente el edificio de Posgrado del CIIDIR ya cuenta con una cisterna con una capacidad de 20 m^3 , por lo cual no se considera en este trabajo construir otra alterna.

Finalmente, el costo de implementación de un SCALL para el edificio de posgrado tendría un costo \$248.01 dólares (USD) de material (ver Tabla 4), tomando en cuenta que la infraestructura ya cuenta con algunos elementos previos como es el

direccionamiento a puntos de salida una cisterna donde se almacena agua canalizados, el techo se encuentra con actualmente (anexo 1).
 recubrimiento permeabilizado y ya existe

Tabla 4. Cálculo de los costos de un SCALL para el edificio de posgrado.

Clave / Partida	Material	Unidad	Cantidad	P.U.	Total
Separador de primeras lluvias	Tee de PVC de 3"	Pza.	1	\$1.49 USD	\$1.49 USD
	Tubo de PVC de 3"	Pza.	1	\$7.70 USD	\$7.70 USD
	Reducción de PVC de 3" a 2"	Pza.	1	\$17.71 USD	\$17.71 USD
	Cople de PVC de 2"	Pza.	1	\$1.10 USD	\$1.10 USD
	Reducción de PVC de 4" a 2"	Pza.	2	\$1.49 USD	\$2.99 USD
	Pelota de hule espuma de 4"	Pza.	1	\$0.72 USD	\$0.72 USD
	Tubo de PVC de 4"	Pza.	1	\$11.34 USD	\$11.34 USD
Canalización	Codo 90° de PVC de 2"	Pza.	3	\$1.84 USD	\$5.52 USD
	Tinaco de 600 L	Pza.	1	\$161.13 USD	\$161.13 USD
	Tubo de PVC de 2"	Pza.	1	\$5.67 USD	\$5.67 USD
	Cople de PVC de 2"	Pza.	1	\$1.10 USD	\$1.10 USD
	Reductor de turbulencia (conexión a cisterna del filtro de primeras lluvias)	Tubo de PVC de 2"	Pza.	1	\$5.67 USD
Rebosadero	Codo 90° de PVC de 2"	Pza.	3	\$1.84 USD	\$5.52 USD
	Tee de PVC de 2"	Pza.	1	\$2.25 USD	\$2.25 USD
	Tubo de PVC de 2"	Pza.	1	\$5.67 USD	\$5.67 USD
	Lija	Pza.	1	\$0.99 USD	\$0.99 USD
Total					\$248.01 USD

Conclusiones

A pesar de que el Río Atoyac es un cuerpo receptor de aguas residuales crudas y lixiviados de residuos sólidos, la calidad

del agua subterránea no presentó una alta contaminación de metales o microorganismos patógenos, y aunque el agua pluvial presentó una mejor calidad en

cuanto a parámetros fisicoquímicos, la contaminación por coliformes fecales no la hace apta para su uso y consumo humano, por lo tanto, ambos tipos de agua deben recibir tratamiento para su potabilización. Debido a que el agua en el CIIDIR se utiliza en su mayoría para el aseo de las instalaciones y para deshacerse de los desechos sanitarios, se considera que, sí es factible la implementación de un SCALL en el edificio de posgrado del CIIDIR, Unidad Oaxaca, además de que, los costos de materiales para la conexión al tanque de almacenamiento son relativamente bajos, además, de esta manera se contribuye significativamente a disminuir la dependencia directa del agua subterránea.

Referencias

Abu-Zreig, M., Ababneh, F., & Abdulla, F. (2019). Assessment of rooftop rainwater harvesting in northern Jordan. *Physics and Chemistry of the Earth*, 114.

<https://doi.org/10.1016/j.pce.2019.08.002>

02

Comisión Nacional del Agua. (n.d.). *Información Estadística Climatológica*. Retrieved February 9, 2023, from <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>

Fernández-Cirelli, A. (2012). *El agua: un recurso esencial*. *Química Viva*, 11(3), 147–170.

Fundación Aquae. (2021). *¿Cuál es la calidad perfecta del agua?* <https://www.fundacionaquae.org/wiki/calidad-agua/#:~:text=Seg%C3%BAAn%20la%20OMS%2C%20el%20nivel,600%20%E2%80%93%20900%3A%20Regular>

Julián-Soto, F. (2010). *La dureza del agua como indicador básico de la presencia de incrustaciones en las instalaciones domésticas sanitarias*. Ingeniería

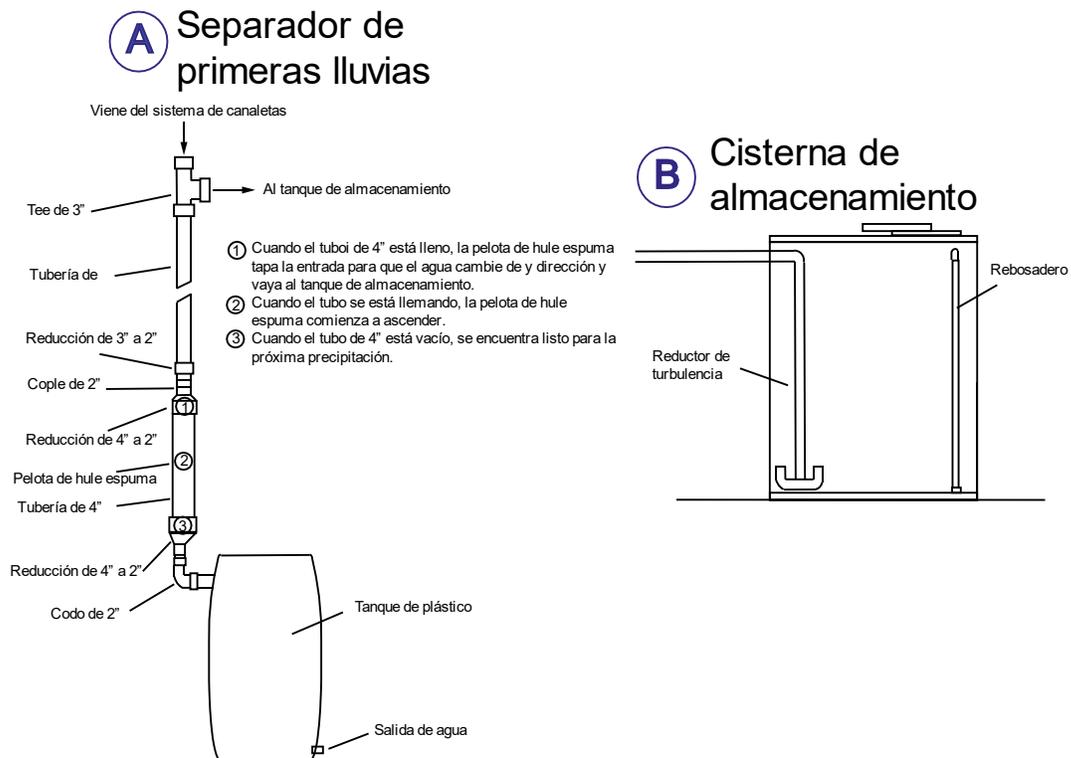
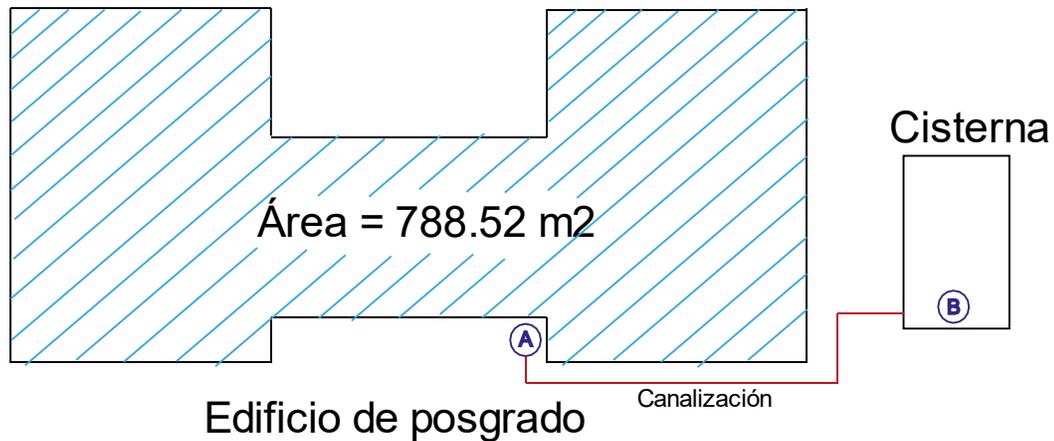
- Investigación y Tecnología, XL(2), 167–177.
- WHO Graphics, Suiza.
<http://apps.who.int/>
- Mancilla-Villa, O. R., Gómez-Villaseñor, L., Olguín-López, J. L., Guevara-Gutiérrez, R. D., Hernández-Vargas, O., Ortega-Escobar, H. M., Flores-Magdaleno, H., Can-Chulim, Á., Sánchez-Bernal, E. I., Cruz-Crespo, E., & Palomera-García, C. (2022). *Contaminación orgánica por coliformes, Nitrógeno y Fósforo en los ecosistemas acuáticos de la cuenca Ayuquila-Armería, Jalisco, México*. *Revista de Ciencias Biológicas y de La Salud*, XXIV(1), 5–14.
<http://biotecnia.unison.mx>
- NOM-230-SSA1-2002, Diario Oficial de la Federación (2005).
- NOM-127-SSA1-2021, Diario Oficial de la Federación (2022).
- Organización Mundial de la Salud. (2018). *Guías para la calidad del agua de consumo humano (Cuarta edición)*. Organización Mundial de la Salud. (2022). *Agua para consumo humano. Organización Mundial de La Salud*.
- Organización Panamericana de la Salud. (2004). *Guía de diseño para captación del agua de lluvia*.
- Pérez-Cutillas, P., Amado-Álvarez, J. P., Segovia-Ortega, E. F., Conesa-García, C., & Alarcón-Cabañero, J. J. (2019). *La degradación ambiental y sus efectos en la contaminación de las aguas superficiales en la cuenca del río Conchos (Chihuahua - México)*. *Cuadernos Geográficos*, 58(1), 47–67.
<https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v58i1.6636>
- Rojas-Valencia, M. N., Gallardo-Bolaños José Roberto, & Martínez-Coto, A. (2012). *Implementación y caracterización de un sistema de captación de agua de lluvia*. *Revista*

- Especializada En Ciencias Químico-Biológicas, 15(1), 16–23.
- Şahin, N. İ., & Manioğlu, G. (2019). *Water conservation through rainwater harvesting using different building forms in different climatic regions. Sustainable Cities and Society*, 44, 367–377.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.010>
- Sandoval-Montes, I., & Ramos-Leal, J. A. (2009). *Mapeo del riesgo a la contaminación del agua subterránea en los Valles Centrales de Oaxaca, México*. *Revista Geográfica*, 145, 169–181.
- Sarar Transformación, S. C. (2016). *Manual de uso, mantenimiento y construcción. Sistema doméstico de cosecha de lluvia*.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2016). *Informe de la situación del medio ambiente en México*. Compendio de estadísticas ambientales. Indicadores clave, de desempeño ambiental y de crecimiento verde. Edición 2015.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, & Comisión Nacional del Agua. (2016). *Lineamientos técnicos: sistema de captación de agua de lluvia con fines de abasto de agua potable a nivel vivienda*.
- Soriano-Hernández, X. Y., Velasco-Velasco, V. A., Ruiz-Luna, J., Caballero-Gutiérrez, P. U., Ramírez-Santiago, E., & Enríquez del-Valle, J. R. (2017). *Análisis de Nitrógeno, sólidos suspendidos y disueltos totales en el Río Atoyac, Oaxaca*. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 4(2), 152–163.
- Tallon, P., Magajna, B., Lofranco, C., & Leung, K. T. (2005). *Microbial indicators of faecal contamination in water: a current perspective*. *Water, Air and Soil Pollution*, 166, 139–166.

ANEXO 1

Sistema de Captación de Agua de Lluvia

Vista en planta



Fuente: Elaborado a partir de OPS (2004) y Sarar Transformación (2016).

Artículo

CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE TRES ESPECIES DE FOROFITOS EN UN ENCINAR DE LA MIXTECA OAXAQUEÑA

Mondragón Chaparro, Demetria¹, Ramírez Martínez, Adriana¹, Hernández Álvarez, Gustavo Ramiro¹

¹Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR) Unidad Oaxaca. Hornos No. 1003, Col. Noche Buena, C.P. 71230. Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca.

Autor de correspondencia: aramirez1400@alumno.ipn.mx

Recibido: 30 de julio de 2023

Aceptado: 09 de septiembre de 2023

Publicado en línea: 25 de septiembre de 2023

Resumen

Las características de los árboles hospederos (forofito) determinan el comportamiento de las epífitas vasculares (EV) a nivel comunidad, población e individuo. Es por esto que conocer el mayor número de características de los forofitos, es fundamental para entender las variaciones de las EV creciendo sobre diferentes especies de forofitos. En este estudio evaluamos las características físicoquímicas de tres especies de encinos (*Quercus rugosa*, *Q. martinezii* y *Q. castanea*) con diferentes comunidades de EV. Encontramos variaciones en la concentración de compuestos alelopáticos, fósforo, potasio, altura, diámetro de altura al pecho, rugosidad y capacidad de retención de agua; no así en pH, tasa de exfoliación, apertura del dosel, humedad relativa y temperatura dentro de la copa. Las diferencias de algunas

características de los forofitos ayudan a explicar la variación en la abundancia, riqueza y composición de las epífitas que los colonizan.

Palabras clave: árbol hospedero, bromelias, catequinas, fenoles, orquídeas.

Abstract

Host tree (phorophyte) traits determine the behavior of vascular epiphytes (VE) at the community, population and individual levels. Knowing as many phorophyte characteristics as possible, is fundamental to understand the variations of VE growing on different phorophyte species. In this study we evaluated the physicochemical characteristics of three oak species (*Quercus rugosa*, *Q. martinezii* and *Q. castanea*) with different EV communities. Variations were found in the concentration of allelopathic compounds, phosphorus, potassium, height, diameter at breast height, roughness and water retention capacity; but not in pH, exfoliation rate, canopy openness, relative humidity and canopy temperature. Differences in some phorophyte characteristics help to explain the variation in abundance, richness and composition of the epiphytes that colonize them.

Key words: host tree, bromeliads, catechins, phenols, orchids.

Introducción

Las epífitas vasculares son plantas que germinan y se establecen sobre otras plantas (generalmente árboles) y aunque no se alimentan directamente de estas (Zotz, 2013) guardan una estrecha relación con su hospedero; debido a que las

características de los forofitos donde se establecen influyen en su comportamiento, tanto a nivel individual, poblacional y comunidad (Einzmann et al., 2014; Ramírez-Martínez et al., 2022; Ticktin et al., 2016). Por ejemplo, los árboles más grandes y viejos presentan una mayor

riqueza y abundancia de epífitas vasculares (Osie et al., 2022; Woods et al., 2015); así mismo, epífitas creciendo sobre árboles perennes en ambientes estacionales presentan mayores tasas de sobrevivencia, crecimiento y fecundidad que aquellos individuos creciendo sobre árboles caducifolios (Einzmann et al., 2014). Además, se ha observado que especies de bromelias epífitas establecidas en árboles semidecíduos (*Quercus* spp.) muestran mayores tasas de crecimiento poblacional que aquellas establecidas en árboles perennes (*Pinus* spp.) durante los años más húmedos (Ticktin et al., 2016).

Dentro de las características físicas de los árboles hospederos que se ha reportado que influyen en diferentes aspectos ecológicos de las epífitas, se encuentran las de la corteza (ej. estabilidad, textura y capacidad de retención de agua), por ejemplo, los árboles con altas tasas de exfoliación son colonizados con menor frecuencia que aquellos de cortezas más

estables (López-Villalobos et al., 2008).

En cuanto a la textura, se ha observado que las cortezas rugosas y fisuradas permiten un mejor anclaje de las semillas de las epífitas, mientras que las cortezas lisas no facilitan la colonización (Benzing, 1990; Zimmerman & Olmsted, 1992). La humedad es importante durante la germinación y el establecimiento de las epífitas, por lo que una corteza con una alta capacidad de absorción y retención de agua incrementa la calidad del forofito para especies de epífitas que requieren de estas condiciones (Callaway et al., 2002; Zarate-García et al., 2020).

Las características químicas de los hospederos como la presencia de metabolitos secundarios y contenido nutrimental de sus escorrentías foliares y corticales, también pueden influir en el comportamiento de epífitas (Wagner et al., 2015). Existen reportes que las sustancias alelopáticas pueden inhibir la germinación de semillas y el crecimiento de plántulas

de epífitas (Frei & Dodson, 1972; Valencia-Díaz et al., 2010). Por otro lado, escorrentías ricas en nitrógeno, fósforo y potasio aumentan el crecimiento y reproducción de epífitas (Zotz, 2013).

El microclima que perciben las epífitas dentro de los hospederos también puede ser importante (Woods et al., 2015).

Algunos elementos que determinan la arquitectura del forofito son el ángulo, diámetro y distribución de las ramas, así como la densidad foliar (Wagner et al., 2015), también tienden a influir en el microclima al que se verán expuestas las epífitas (Callaway et al., 2002). Por ejemplo, la densidad foliar afecta la temperatura, la humedad relativa y la intensidad lumínica. Por lo tanto, árboles caducifolios tendrán ambientes más soleados y secos, lo que tiende a afectar negativamente el crecimiento de epífitas (Einzmann et al., 2014).

Así, en un encinar de la zona de la mixteca se observó que la abundancia y diversidad

de epífitas vasculares variaba entre ciertas especies de encinos, por lo que para poder explicar dicha variación se evaluaron diferentes características fisicoquímicas, que nos pudieran ayudar a explicar las diferencias en abundancia y riqueza de epífitas vasculares observadas en esa zona.

Materiales y Métodos

1. Sitio y especies de estudio

El muestreo se realizó en un bosque de encino a una altitud de 2579 m.s.n.m, en la localidad de Tooxi, en el municipio de Santo Domingo Yanhuitlán en la Mixteca Oaxaqueña (coordenadas 17°33'57.34" N y 97°22'19.28" O, elevación 2,579 m.s.n.m; (Figura 1). El sitio de estudio presenta una temperatura media de 14.36 ± 1.34 °C y una precipitación promedio mensual de 67.02 ± 68.67 mm con una marcada estación de secas que va de noviembre a abril (Ramírez-Martínez et al., 2022).

Las especies de forofitos evaluadas fueron *Quercus castanea* Née, *Q. martinezii* C.H.

Mull y *Q. rugosa* Née, ya que visualmente presentaban variación en la riqueza y abundancia de epífitas. *Quercus castanea*: árboles deciduos que se distribuyen en gran parte del territorio mexicano y Guatemala, entre los 1900-3500 m.s.n.m (Rangel et al., 2002). *Quercus martinezii*: árboles deciduos que se distribuyen en Guerrero, Jalisco, México, Michoacán, Nayarit y Oaxaca a altitudes de 1800-2600 m.s.n.m (Valencia-A., 2004). *Quercus rugosa*: árboles semideciduos que se distribuyen en gran parte del territorio mexicano en bosques de pino-encino, pino, encino y matorrales xerofitos a altitudes de 1700-3500 m (Rangel et al., 2002; Valencia-A, 2004).

2. Riqueza y composición de epífitas

Para establecer que la variación en abundancia y riqueza observada, fuera estadísticamente diferente entre las tres especies de forofitos, dentro del cuadrante se eligieron aleatoriamente 10 árboles de la cada especie de encino y se registraron

las especies de epífitas y el número de individuos presentes de cada una de ellas, desde la base del tronco hasta las ramas más externas.

3. Medición de características físico-químicas

En esta sección damos una breve explicación de la metodología que se siguió para la medición de cada característica, pero si se requiere saber a mayor detalle se pueden consultar las tesis de Hernández-Álvarez (2021) y Ramírez-Martínez (2022). Cabe mencionar que existe una variación en la temporalidad de toma de datos debido a varias razones, los datos fueron tomados conforme lo iban requiriendo los trabajos de investigación de los coautores, y en otros casos los experimentos fallaban, por lo que se tenía que esperar al año siguiente para volver a tomar las muestras (ej. la colecta de escorrentías foliares).

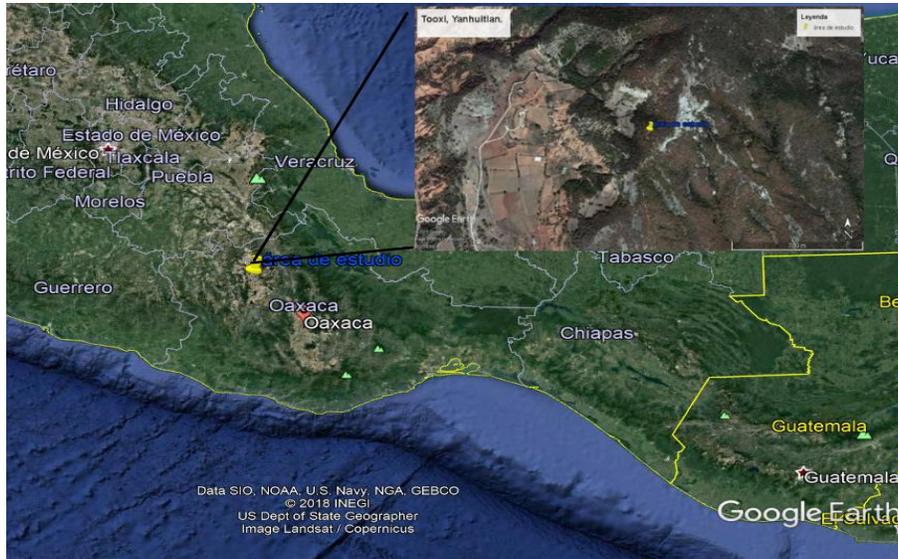


Figura 1. Área de estudio. En el recuadro grande se señala con un pin amarillo la localidad de Yanhuitlán, en el estado de Oaxaca; mientras que en el recuadro pequeño se señala el bosque de encino en Tooxi, Yanhuitlán, donde se realizó el estudio.

Estamos conscientes de que las características de los hospederos varían temporalmente, sin embargo, las comparaciones realizadas entre forofitos fueron hechas con datos tomados el mismo año en las tres especies de encino, es decir cada variable fue evaluada el mismo año en los tres forofitos.

pH: En septiembre de 2019, se seleccionaron aleatoriamente 10 árboles por especie a los que se les determinó el pH con la técnica descrita por Kricke (2002).

Concentración de compuestos alelopáticos: En enero de 2020, se seleccionaron aleatoriamente seis árboles por especie de forofito. Para determinar la concentración de fenoles (ácido gálico) se utilizó el método colorimétrico de Folin-Ciocalteu modificado por Singleton y Rossi (1965); en tanto que, para evaluar la concentración de flavonoides (catequinas) se usó el método de Zhishen et al., (1999).

Concentración de fósforo y potasio en escorrentías foliares: En febrero de 2018 se seleccionaron cinco árboles de cada

especie de forofito y se colectaron las escorrentías foliares en marzo del mismo año. Las muestras fueron enviadas al Servicio Geológico Mexicano (SGM), quienes evaluaron la concentración de minerales.

Altura y diámetro a la altura del pecho (DAP): La altura se determinó utilizando la metodología de López- López (2016) y el DAP de acuerdo a Gonzalez-Álvarez et al., (2003), durante enero de 2018.

Rugosidad: En marzo de 2018, se eligieron aleatoriamente 10 árboles de cada especie de forofito y se determinó su rugosidad modificando la metodología de Callaway et al. (2002).

Tasa de exfoliación: En 2018, se seleccionaron cinco árboles por especie de forofito. Se siguió la metodología propuesta por Jiménez-Salmerón et al. (2017).

Capacidad de retención de agua (CRA): En 2019, se tomaron tres muestras de corteza del tronco y de las ramas primarias

y secundarias de cinco árboles por especie de encino. Las cuales fueron evaluadas con metodología propuesta por Callaway et al. (2002).

Para tener una idea del microclima al que estas expuestas las epífitas en cada una de las especies de hospedero se midieron las siguientes características:

Apertura del dosel durante secas y

lluvias: En enero de 2018 para todos los árboles dentro del cuadrante, durante dos años, se tomaron fotografías hemisféricas mensuales debajo de cada árbol, desde 1,3 m entre 8 y 10 a.m. La apertura se estimó usando la metodología propuesta por Tichý (2016).

Temperatura y humedad relativa: En 2018 se seleccionaron cinco árboles de cada especie y en la parte media de las copas, que es donde se concentraba la mayor parte de individuos epífitos, se colocaron dispositivos Krestel drop 2 (Krestel Instruments®). Se tomaron datos mensuales hasta febrero de 2020.

4. Análisis estadísticos

Se aplicó estadística paramétrica (ANOVAS de una sola vía, con pruebas pareadas de Tukey), cada vez que cumplían los supuestos de normalidad y de ser continuos (las variables discretas fueron transformadas con la función de logaritmo natural; Zar, 1999). La diversidad fue calculada con el índice de Shannon (Moreno, 2001) en el programa PAST 4.03 y después se aplicó la fórmula sugerida por Jost (2006) para obtener la diversidad verdadera (D).

Resultados y discusión

Encontramos diferencias en abundancia y riqueza de epífitas entre especies de hospederos, lo cual concuerda con otros estudios que sugieren que las epífitas prefieren ciertas especies de hospederos sobre otras (Bernal et al., 2005; Callaway et al., 2002; Ramírez-Martínez et al., 2018). Para nuestro caso al parecer *Q. martinezii* es un hospedero idóneo ya que

mostró la mayor abundancia y riqueza (677 individuos epífitos pertenecientes a 7 especies) con respecto a los otros dos forofitos (Tabla 1). Esto también se vio reflejado en la diversidad de epífitas, la cual fue mayor en *Q. martinezii* (D=3.22) y menor en *Q. castanea* (D=1.09). Cabe mencionar que la diversidad en *Q. rugosa* fue similar (D=3.22) a la de *Q. martinezii* y esto pudo deberse, primero, a que no compartían la mayor parte de las especies excepto *Echeveria nodulosa* (Baker) Ed. Otto; y, segundo, a que las especies de epífitas presentes en ambas especies de forofitos estaban distribuidas de manera equitativa a diferencia de *Q. castanea* donde se ve una clara dominancia de *Tillandsia prodigiosa* (Lem.) Baker.

Los valores de pH fueron de 6.8 ± 1.03 para *Q. castanea* y 6.7 ± 0.40 para *Q. rugosa* y *Q. martinezii* (Tabla 2), los cuales no difirieron estadísticamente entre hospederos ($F_{(2,29)} = 0.02, P = 0.98$; Tabla 2). En general, estos valores pueden ser

considerados como ligeramente ácidos y coinciden con los valores encontrados para otras especies de hospederos de epífitas en un bosque mesófilo (Mehltreter et al., 2005) y un bosque subtropical (Pecoraro et al., 2021).

Con respecto a la concentración de metabolitos, si se encontraron diferencias entre especies de hospederos. *Quercus castanea* presentó la mayor concentración de ácido gálico (Tabla 2), la cual difirió estadísticamente de *Q. rugosa* y *Q. martinezii* ($F_{(2,17)} = 30994.2, P < 0.05$). El mismo patrón se observó para la concentración de catequinas ($F = 14581.7_{(2,17)}, P < 0.05$). Se ha reportado que los metabolitos secundarios tienen un

efecto inhibitorio en la germinación de semillas y crecimiento de individuos de estadios tempranos de epífitas vasculares (Frei & Dodson, 1972; Valencia-Díaz et al., 2010), por lo que esto podría explicar, en parte, la menor riqueza y abundancia de epífitas encontradas *Q. castanea*. Además, podría explicar la ausencia de orquídeas debido a que estos metabolitos secundarios pueden estar inhibiendo el crecimiento de hongos micorrícicos simbioses, los cuales son indispensables para la germinación de las semillas de orquídeas (Tedesoo et al., 2020).

Tabla 1. Especies de epífitas vasculares encontradas en tres especies de hospederos en un bosque de encino en Tooxi, Yanhuitlán, Oaxaca.

Espece de epífita	<i>Quercus martinezii</i>	<i>Quercus castanea</i>	<i>Quercus rugosa</i>
Familia Bromeliaceae			
<i>Tillandsia prodigiosa</i> (Lem.) Baker	396	253	182
<i>Tillandsia plumosa</i> Baker	18	3	12
Familia Crassulaceae			

<i>Echeveria nodulosa</i> (Baker) Ed. Otto	15	1	0
Familia Orchidaceae			
<i>Alamania punicea</i> Led.	82	0	48
<i>Oncidium brachyandrum</i> Lindl.	154	0	39
Familia Polypodiaceae			
<i>Polypodium martensii</i> Mett	3	0	2
<i>Pleopeltis konzatti</i> (Weath.) R. M. Tryon & A.F. Tryon	9	0	14
Total individuos	677	257	297

Aunado a alta concentración de metabolitos secundarios de *Q. castanea*, esta especie también presentó las menores concentraciones de potasio y fósforo en sus escorrentías foliares, dicho valores difirieron estadísticamente con respecto a *Q. rugosa* y *Q. martinezii* (Fósforo $F_{(2,14)} = 4.01$, $P < 0.05$; potasio $F_{(2,14)} = 10.07$, $P < 0.01$; Tabla 2). El fósforo y el potasio son macronutrientes importantes para en el crecimiento y reproducción de las plantas

(Bhatla & Lal, 2018; Winkler & Zotz, 2010); y para el caso de epífitas vasculares se ha reportado una mayor abundancia y crecimiento de epífitas en árboles con escorrentías ricas en estos nutrientes (Benzing, 1990; Callaway et al., 2002; Marler, 2018), por lo que esta característica también ayuda a explicar la menor abundancia y riqueza de epífitas existentes en *Q. castanea*.

Tabla 2. Características químicas de tres especies de encinos (*Quercus*), con diferentes cargas de epífitas vasculares, en el un encinar de la mixteca Oaxaqueña.

Especie de forofito	Metabolitos secundarios		Minerales en escorrentías foliares	
	pH	Catequinas mg/ml	Ácido gálico mg/ml	Potasio mg/l

<i>Q. castanea</i>	6.8 ± 1.03 A	2.99 ± 0.04 A	22.30 ± 0.15 A	0.12 ± 0.01 B	0.87 ± 0.41 B
<i>Q. rugosa</i>	6.7 ± 0.40 A	0.49 ± 0.00 B	1.53 ± 0.07 B	0.15 ± 0.05 AB	2.76 ± 1.16 A
<i>Q. martinezii</i>	6.7 ± 0.40 A	0.51 ± 0.01 B	2.150 ± 0.12 B	0.16 ± 0.03 A	2.56 ± 1.06 A

En lo que respecta a las características físicas de los árboles hospederos también se encontraron diferencias entre estos (Tabla 3). Para la altura hubo ligeras diferencias entre especies de hospederos ($F_{(2,77)} = 6.332, P < 0.01$) siendo los árboles de *Q. martinezii* los más altos y con mayores DAP junto con los de *Q. rugosa* ($F_{(2,79)} = 4.04, P = 0.02$). Las cortezas más rugosas y con mayor capacidad de retención de agua también correspondieron a *Q. martinezii* y *Q. rugosa* ($F_{(2,44)} = 9.23, P = 0.0005$). En lo que concierne a la exfoliación, no observamos que ocurriera este fenómeno

para ninguna de las especies de hospederos. El mayor tamaño de *Q. martinezii* y *Q. rugosa*, ofrece una mayor superficie de colonización que pudiera estar facilitando el establecimiento de las EV, favoreciendo una mayor abundancia y riqueza de estas (Bernal et al., 2005). Aunado a esto, sus cortezas rugosas podrían facilitar el anclaje de semillas y con una mayor probabilidad de germinación debido a que las cortezas de estos dos hospederos tienen una mayor capacidad de retención de agua (Callaway et al., 2002; Einzmann & Zotz, 2017).

Tabla 3. Características físicas de tres especies de encinos (*Quercus*), con diferentes cargas de epífitas vasculares, en el un encinar de la mixteca Oaxaqueña.

Característica	<i>Q. castanea</i>	<i>Q. martinezii</i>	<i>Q. rugosa</i>
Altura del árbol (m)	8.60 ± 2.6 AB	9.69 ± 1.43 B	7.74 ± 2.05A

DAP (cm)	3.92 ± 0.25 B	5.87 ± 0.39 A	5.53 ± 0.59 A
Rugosidad	3.92 ± 0.25 B	5.87 ± 0.3 A	5.53 ± 0.59 A
Tasa de exfoliación	0	0	0
CRA	0.20 ± 0.09 B	0.28 ± 0.07 A	0.33 ± 0.09 A

*Los resultados para *Q. rugosa* y *Q. martinezii* ya han sido previamente publicados en Ramírez-Martínez et al. (2022).

Con respecto a las características para la medición del microclima, no se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas en ninguno de los tres parámetros climáticos evaluados (Tabla 4). Esto puede deberse a que nuestros dispositivos no capturaron la variación microclimática presente en el dosel. Sin embargo, se observan ligeras variaciones entre periodos y estaciones lo cual necesita ser analizado a más detalle en lo posterior.

Tabla 4. Características microclimáticas de tres especies de encinos (*Quercus*), con diferentes cargas de epífitas vasculares, en el un encinar de la mixteca Oaxaqueña

Parámetro	Especie de hospedero		
	<i>Q. castanea</i>	<i>Q. martinezii</i>	<i>Q. rugosa</i>
<i>Apertura del dosel</i>			
Periodo 1 secas	34.70 ± 12.19	35.25 ± 12.83	32.67 ± 8.79
Periodo 2 secas	35.21 ± 12.27	36.17 ± 11.60	33.42 ± 7.43
Periodo 1 lluvias	34.37 ± 4.63	34.93 ± 3.97	34.65 ± 2.84
Periodo 2 lluvias	37.31 ± 5.62	34.48 ± 3.22	37.19 ± 2.57
<i>Humedad relativa</i>			
Periodo 1 secas	69.58 ± 7.71	65.11 ± 7.43	68.16 ± 7.59
Periodo 2 secas	63.61 ± 11.25	62.05 ± 11.27	68.56 ± 10.48
Periodo 1 lluvias	80.40 ± 8.94	78.56 ± 8.40	81.10 ± 8.67
Periodo 2 lluvias	79.96 ± 11.57	80.00 ± 11.62	84.49 ± 9.71
<i>Temperatura</i>			
Periodo 1 secas	13.4 ± 1.78	13.92 ± 1.46	13.71 ± 1.70

Periodo 2 secas	14.6 ± 1.91	14.29 ± 1.74	14.57 ± 0.90
Periodo 1 lluvias	14.47 ± 0.95	14.08 ± 0.56	14.43 ± 1.84
Periodo 2 lluvias	14.96 ± 1.55	14.62 ± 1.40	14.88 ± 1.52

Conclusiones

Existen variaciones en las características físicas como altura, DAP, rugosidad y capacidad de retención de agua; en características químicas como la concentración de compuestos alelopáticos y cantidad de fósforo y potasio en las escorrentías foliares. Estas variaciones ayudan a explicar las diferencias en abundancia, riqueza y diversidad de epífitas entre las diferentes especies de *Quercus* evaluadas.

Referencias

Benzing, D. H. (1990). *Vascular Epiphytes: General Biology and Related Biota* (1.^a ed.). Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511525438>

Bernal, R., Valverde, T., & Hernández-Rosas, L. (2005). Habitat preference of the epiphyte *Tillandsia recurvata* (Bromeliaceae) in a semi-desert environment in Central Mexico. *Canadian Journal of Botany*, 83(10), 1238-1247.

<https://doi.org/10.1139/b05-076>

Bhatla, S. C., & Lal, M. A. (2018). *Plant Physiology, Development and Metabolism*. Springer.

Callaway, R. M., Reinhart, K. O., Moore, G. W., Moore, D. J., & Pennings, S. C. (2002). Epiphyte host preferences and host traits: Mechanisms for species-specific interactions. *Oecologia*, 132(2), 221-230.
<https://doi.org/10.1007/s00442-002-0943-3>

- Einzmann, H. J. R., Beyschlag, J., Hofhansl, F., Wanek, W., & Zotz, G. (2014). Host tree phenology affects vascular epiphytes at the physiological, demographic and community level. *AoB Plants*, 7. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plu073>
- Einzmann, H. J. R., & Zotz, G. (2017). Dispersal and establishment of vascular epiphytes in human-modified landscapes. *AoB PLANTS*, 9(6), plx052. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plx052>
- Frei, J. K., & Dodson, C. H. (1972). The Chemical Effect of Certain Bark Substrates on the Germination and Early Growth of Epiphytic Orchids. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, 99(6), 301-307. <https://doi.org/10.2307/2997072>
- González-Álvarez, J. G., Taboada-Álvarez, M. F., Anta-Barrio, M., Dorado-Castedo, F., Aranda-Dieguez, U., Alboreca-Rojo, ALBERTO, A., & Ruiz-Gonzalez, A. D. (2003). *Dendrometría*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Hernández-Álvarez, G. (2021). Efecto del forofito sobre la germinación de *Alamania punicea* y *Oncidium brachyandrum* [Tesis de maestría inédita]. Instituto Politécnico Nacional -CIIDIR Oaxaca.
- Jiménez-Salmerón, R., Valencia Díaz, S., Toledo, V., & Alejandro, F.-P. (2017). Bark peeling does not explain the distribution of epiphytes between six phorophyte species of a tropical dry forest of Mexico. *Plant Ecology and Evolution*, 150, 257-264. <https://doi.org/10.5091/plecevo.2017.1256>
- Jost, L. (2006). Entropy and diversity. *Oikos*, 113(2), 363-375. <https://doi.org/10.1111/j.2006.0030-1299.14714.x>
- Kricke, R. (2002). Measuring Bark pH. En P. L. Nimis, C. Scheidegger, & P. A. Wolseley (Eds.), *Monitoring with*

- Lichens—Monitoring Lichens* (pp. 333-336). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-010-0423-7_30
- López- López, M. Á. (2016). Un procedimiento alternativo al tradicional para la medición de alturas con clinómetro. *Madera y Bosques*, 11(2), 69-77. <https://doi.org/10.21829/myb.2005.1121257>
- López-Villalobos, A., Flores-Palacios, A., & Ortiz-Pulido, R. (2008). The relationship between bark peeling rate and the distribution and mortality of two epiphyte species. *Plant Ecology*, 198(2), 265-274. <https://doi.org/10.1007/s11258-008-9402-5>
- Marler, T. E. (2018). Host Tree Identity Influences Leaf Nutrient Relations of the Epiphyte *Dendrobium guamense* Ames. *Horticulturae*, 4(4), 43. <https://doi.org/10.3390/hort404043>
- Mehltreter, K., Alejandro, F.-P., & Garcia-Franco, J. G. (2005). Host preferences of low-trunk vascular epiphytes in a cloud forest of Veracruz, Mexico. *Journal of Tropical Ecology*, 21, 651-660. <https://doi.org/10.1017/S0266467405002683>
- Moreno, C. (2001). *Métodos para medir la biodiversidad* (Vol. 1). Manuales y tesis SEA.
- Osie, M., Shibru, S., Dalle, G., & Nemomissa, S. (2022). Habitat fragmentation effects on vascular epiphytes diversity in Kafa biosphere reserve and nearby coffee agroecosystem, southwestern Ethiopia. *Tropical Ecology*, 63(4), 561-571. <https://doi.org/10.1007/s42965-022-00223-3>
- Pecoraro, L., Rasmussen, H. N., Gomes, S. I. F., Wang, X., Merckx, V. S. F. T.,

- Cai, L., & Rasmussen, F. N. (2021). Fungal diversity driven by bark features affects phorophyte preference in epiphytic orchids from southern China. *Scientific Reports*, 11(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90877-1>
- Ramírez-Martínez, A., Mondragón, D., Valverde, T., & Chávez-Servia, J. L. (2018). Spatial variation in host preference in the endangered epiphytic bromeliad *Tillandsia carlos-hankii*. *Acta Oecologica*, 92, 75-84. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2018.08.008>
- Ramírez-Martínez, A. (2022). Host tree effect on demography and phenology of epiphytic species. [Tesis de doctorado inédita]. Instituto Politécnico Nacional -CIIDIR Oaxaca.
- Ramírez-Martínez, A., Ticktin, T., & Mondragon, D. (2022). Host tree species effects on long-term persistence of epiphytic orchid populations. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fevo.2022.1059136>
- Rangel, S., Carlos, E., Zenteno, R., de Lourdes, M., & Enríquez, A. (2002). El Género *Quercus* (Fagaceae) en el Estado de México. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 89(4), 551-593. <https://doi.org/10.2307/3298595>
- Singleton, V. L., & Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16(3), 144-158. <https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144>
- Tedersoo, L., Bahram, M., & Zobel, M. (2020). How mycorrhizal associations drive plant population and community biology. *Science*, 367(6480), eaba1223. <https://doi.org/10.1126/science.aba1223>

- Tichý, L. (2016). Field test of canopy cover estimation by hemispherical photographs taken with a smartphone. *Journal of Vegetation Science*, 27(2), 427-435.
<https://doi.org/10.1111/jvs.12350>
- Ticktin, T., Mondragón, D., & Gaoue, O. G. (2016). Host genus and rainfall drive the population dynamics of a vascular epiphyte. *Ecosphere*, 7(11), e01580.
<https://doi.org/10.1002/ecs2.1580>
- Valencia-A, S. (2004). Diversidad del género *Quercus* (Fagaceae) en México. *Botanical Sciences*, 75, Article 75.
<https://doi.org/10.17129/botsci.1692>
- Valencia-Díaz, S., Flores-Palacios, A., Rodríguez-López, V., Ventura-Zapata, E., & Jiménez-Aparicio, A. R. (2010). Effect of host-bark extracts on seed germination in *Tillandsia recurvata*, an epiphytic bromeliad. *Journal of Tropical Ecology*, 26(6), 571-581.
- Wagner, K., Mendieta-Leiva, G., & Zotz, G. (2015). Host specificity in vascular epiphytes: A review of methodology, empirical evidence and potential mechanisms. *AoB PLANTS*, 7.
<https://doi.org/10.1093/aobpla/plu092>
- Winkler, U., & Zotz, G. (2010). 'And then there were three': Highly efficient uptake of potassium by foliar trichomes of epiphytic bromeliads. *Annals of Botany*, 106(3), 421-427.
<https://doi.org/10.1093/aob/mcq120>
- Woods, C. L., Cardelús, C. L., & DeWalt, S. J. (2015). Microhabitat associations of vascular epiphytes in a wet tropical forest canopy. *Journal of Ecology*, 103(2), 421-430.
<https://doi.org/10.1111/1365-2745.12357>
- Zarate-García, A. M., Noguera-Savelli, E., Andrade-Canto, S. B., Zavaleta-Mancera, H. A., Gauthier, A., & Alatorre-Cobos, F. (2020). Bark water storage capacity influences epiphytic orchid preference for host trees. *American Journal of Botany*, 107(5),

- 726-734. <https://doi.org/10.1002/ajb2.1470>
- Zhishen, J., Mengcheng, T., & Jianming, W. (1999). The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. *Food Chemistry*, 64(4), 555-559. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(98\)00102-2](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(98)00102-2)
- Zimmerman, J. K., & Olmsted, I. C. (1992). Host Tree Utilization by Vascular Epiphytes in a Seasonally Inundated Forest (Tintal) in Mexico. *Biotropica*, 24(3), 402-407. JSTOR. <https://doi.org/10.2307/2388610>
- Zotz, G. (2013). The systematic distribution of vascular epiphytes – a critical update. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 171(3), 453-481. <https://doi.org/10.1111/boj.12010>

PROPIEDADES SENSORIALES DE PRODUCTOS PANIFICADOS ADICIONADOS CON POLISACÁRIDOS DE SEMILLA LINAZA (*Linum usitatissimum*)

Méndez Lagunas, Lilia Leticia¹, Ramírez Rodríguez, Juan¹, Barriada Bernal, Luis Gerardo²,
Terán Quintas, Fernando³, López Díaz, Andrea Selene²

¹Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR) Unidad Oaxaca. Hornos No. 1003, Col. Noche Buena, C.P. 71230. Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca.

²Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología, Instituto Politécnico Nacional.

³Tecnológico Nacional de México campus Oaxaca, Departamento de Ingeniería Química.

Autor de correspondencia: lmendezla@ipn.mx

Recibido: 30 de julio de 2023

Aceptado: 09 de septiembre de 2023

Publicado en línea: 25 de septiembre de 2023

Resumen

La demanda creciente de productos saludables se ha enfocado a utilizar materiales vegetales como los mucílagos de semillas que otorguen beneficios a la salud. En este trabajo se evaluaron algunas propiedades nutrimentales (concentración de azúcares y proteínas) del mucílago de linaza (*Linum usitatissimum*) secado por aspersion, así como la morfología del polvo. Además, se evaluó el efecto de su adición a masas panificadas (con base en harina de trigo) en los parámetros de textura (dureza, gomosidad, cohesión, adhesividad, elasticidad y masticabilidad). Los análisis fisicoquímicos se realizaron de acuerdo con las normas oficiales

mexicanas, la morfología mediante microscopía electrónica de barrido y los parámetros de textura mediante análisis de perfiles de fuerza-compresión. Los resultados obtenidos muestran que la adición de mucílago ocasionó que la dureza, la gomosidad y la masticabilidad del producto panificado disminuyera; mientras que la cohesión y la adhesividad aumentaron.

Palabras clave: harina de trigo, mucílago, secado por aspersión, textura.

Abstract

The growing demand for healthy products has focused on using plant materials such as seed mucilage that provide health benefits. In this work, some nutritional properties (sugar and protein concentration) of spray-dried linseed mucilage (*Linum usitatissimum*) were evaluated, as well as the morphology of the powder. In addition, the effect of its addition in bread doughs (based on wheat flour) on the texture parameters (hardness, gumminess, cohesion, adhesiveness, elasticity, and chewiness) was evaluated. The physicochemical analyzes were carried out according to the official Mexican standards, the morphology by scanning electron microscopy and the texture parameters by force-compression profile analysis. The results obtained showed that hardness, gumminess, and chewiness of the baked product decreased with the addition of mucilage, while cohesion and adhesiveness were increased.

Keywords: wheat flour, mucilage, spray drying, texture.

Introducción

El auge en el consumo de *alimentos funcionales* se debe al aporte nutrimental

que ofrecen en la dieta, incluyendo

moléculas con actividad nutracéutica y/o

farmacológica que mejoran la salud del consumidor.

Se ha evaluado el empleo de diversas oleaginosas como aditivos alimentarios capaces de mejorar las propiedades tecnofuncionales y sensoriales de embutidos, lácteos, fórmulas alimenticias, así como en productos panificados (Cherif, 2021).

Los mucílagos incluyen un conjunto de polisacáridos de origen vegetal (Janía et al., 2009) y en la industria de los alimentos se emplean como agentes emulsificantes, espesantes y aglutinantes (Dugarte et al., 2020).

La semilla de linaza (*Linum usitatissimum*) se emplea como materia prima para la obtención de aceites comestibles (Yang et al., 2021); mientras que los subproductos de este proceso, principalmente fibra insoluble, encuentran aplicación limitada en la industria de la panificación como

aditivo nutrimental (Figuerola et al., 2008; Shearer y Davies, 2005).

Tanto la semilla entera de linaza, así como los subproductos de la obtención de aceite pueden aprovecharse como fuente de mucílagos para la industria alimenticia. Uno de los principales inconvenientes en el empleo de mucílagos de linaza crudos (sin más tratamientos fisicoquímicos que los empleados en la extracción en solventes polares) lo constituye su susceptibilidad a la acción de diversas bacterias y levaduras.

La estabilización térmica de mucílagos de linaza (p. ej. mediante secado por aspersion) como medio de preservación y de mejoramiento de los costos asociados a su almacenamiento y traslado no ha sido estudiado; aún más, se desconoce el efecto que dicho proceso puede tener en las propiedades tecno-funcionales y/o sensoriales de los alimentos en las

fórmulas alimenticias en donde puede ser empleado.

El presente estudio tiene como objetivo caracterizar las propiedades sensoriales de productos panificados con base de harina de trigo adicionados con mucílago de linaza.

Materiales y métodos

Materia prima. Las semillas de linaza fueron adquiridas en el mercado local. Previo a su empleo, las semillas se sometieron a un proceso de limpieza para eliminar partículas extrañas.

Extracción de mucílago. El mucílago se extrajo de acuerdo a la metodología descrita por Kaewmanee et al., (2014) con ligeras modificaciones.

La extracción se realizó empleando agua a 85°C como solución extractora. El tiempo de proceso se fijó en 2 horas y la relación entre la semilla y la solución extractora fue de 1:20 y 1:10 (p/v).

Concentración. Se utilizó un evaporador rotatorio (Hei-VAP industrial, Heidolph) para concentrar el mucílago, utilizando una presión de 78 mbar y una temperatura de 40°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) hasta evaporar el 50% del volumen inicial.

Secado por aspersión. Se utilizó un secador por aspersión escala piloto (Niro Atomizer) equipado con un atomizador rotatorio. Las condiciones de operación fueron: temperatura de entrada del aire 150°C; temperatura de salida 87°C; y velocidad de alimentación 0.03 L/min.

Azúcares reductores totales y directos. La determinación se realizó de acuerdo con la metodología de la Norma Mexicana NMX-F-496-SCFI-2011.

Contenido de proteínas. La determinación de las proteínas en las muestras de mucílago de linaza se realizó de acuerdo con la metodología de la Norma Mexicana NMX-F-068-S-1980, empleando un factor de ajuste de 6.25,

Morfología de polvos. Se utilizó un microscopio electrónico de barrido ambiental (eSEM-FEI Quanta 250) operado a 5.00 kV para observar las características morfológicas del polvo de mucílago obtenido después del secado por aspersión.

Formulación del producto panificado. La masa panificable se formuló de acuerdo con la Tabla 1. La masa panificable que contiene la harina refinada de trigo se le denominará harina testigo, mientras que a la mezcla panificable adicionada con mucílago de linaza se le denominará harina fortificada.

Previo al proceso de cocción, la masa panificable quedó en reposo por 1 h a una temperatura de 30°C, para posteriormente ser nuevamente amasada y eliminar el exceso de dióxido de carbono.

Se procedió a una cocción de masa panificable mediante horneado convectivo a una temperatura de 180°C por 30 min.

Tabla 1. Formulación de masas panificables

	Harina testigo	Harina fortificada
Harina refinada de trigo (g)	350	250
Harina integral de linaza (g)	0	100
Mucílago de linaza (mL)	0	30
Aceite vegetal	20	20
Lecha entera (mL)	50	50
Levadura activa (g)	8	8
Azúcar refinada (g)	50	50

Análisis de perfiles de textura (TPA).

Los atributos sensoriales de los productos panificados se evaluaron mediante un texturómetro (TA1, Lloyd Instruments Ametek) de acuerdo con la metodología de Barragán-Iglesias et al. (2019). Se emplearon 10 muestras de cada formulación y se evaluó la dureza,

gomosidad, cohesión, adhesividad, elasticidad y masticabilidad.

Análisis estadístico.

El análisis de los datos se realizó mediante un ANOVA con un nivel de confianza del 95% con el software Minitab 16.

Resultados

Caracterización fisicoquímica del mucílago de linaza.

El contenido de proteínas en el mucílago secado por aspersión fue de 245.66 ± 12.2 mg por gramo de harina panificable en base seca. La concentración de los azúcares reductores directos fue de $60.52 \pm 2.4\%$ y la de los azúcares reductores totales fue de $70.25 \pm 5.3\%$.

Morfología. La morfología de los polvos del mucílago resultó en aglomeraciones de partículas presumiblemente huecas, con estructuras amorfas y con signos de colapso al interior (Figura 1).

Este tipo de morfología ha sido descrita como la predominante en materiales orgánicos secados por aspersión (García-Cruz *et al.*, 2011). En el secado por aspersión de mucílago de *Opuntia* spp. (nopal) se han reportado materiales con diferentes tipos de aglomeración, en donde se ha propuesto que este efecto se debe a electricidad estática del material y las fuerzas de Van der Waals entre las moléculas de polisacáridos que constituyen al mucílago (León-Martínez *et al.*, 2010).

Se ha encontrado que el colapso se debe a la interacción que sucede antes del secado por aspersión entre almidones, polisacáridos y agua (formación de geles en la fase acuosa) (León-Martínez *et al.*, 2010).

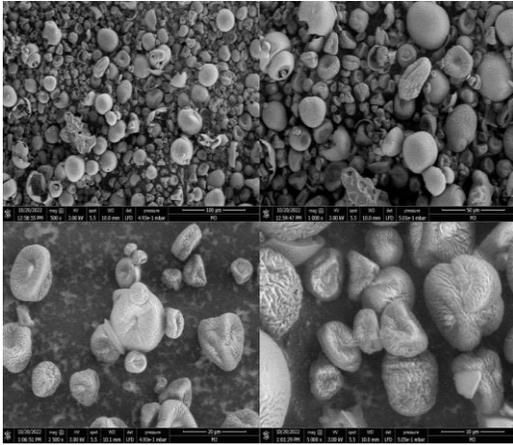


Figura 1. Morfología de los polvos de mucílago de linaza secado por aspersión.

Evaluación sensorial de masas panificadas. Los resultados de las propiedades sensoriales, medidas como parámetros de textura, se muestran en la Tabla 2. Exceptuando la elasticidad de la miga de pan, en todos los demás atributos sensoriales evaluados, la adición de mucílago de linaza modifica significativamente los parámetros medidos ($p < 0.05$).

Tabla 2. Propiedades sensoriales en las masas panificadas

	Harina testigo	Harina fortificada
--	-------------------	-----------------------

Dureza (N)	91.22±8.94 ^a	49.70±1.33 ^b
Cohesividad	3.99±0.27 ^a	4.24±0.34 ^b
Adhesividad (N mm)	0.22±0.08 ^a	4.33±2.12 ^b
Gomosidad (N)	22.93±2.85 ^a	11.78±0.87 ^b
Elasticidad	0.55±0.02 ^a	0.46±0.02 ^a
Masticabilidad (N)	12.71±1.56 ^a	5.43±0.59 ^b

Letras diferentes en una misma fila indican diferencia significativa ($p < 0.05$) entre muestras.

La adición del mucílago de linaza ocasiona que la dureza, la gomosidad y la masticabilidad del producto panificado disminuya; mientras que la cohesividad y la adhesividad aumenta.

Conclusiones

La adición del mucílago de linaza en productos panificados con base en harina de trigo refinada modifica varias de las propiedades sensoriales de los mismos. La aplicación de este mucílago en la industria panificadora deberá analizarse desde el

punto de vista de las propiedades deseadas en el producto final.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo técnico de M.C. Marlene Cruz Gracida y M.C. Christopher García Cerqueda.

Referencias

Cherif, A. O. (2021). *Oilseeds as functional foods: Content and composition of many phytochemicals and therapeutic alternatives*. In *Functional Foods-Phytochemicals and Health Promoting Potential*. IntechOpen.

Dugarte, N. Y., Molina, F. A. & García, M. A. (2020). *Application of mucilages in the agro-food sector*. *Ciencia y tecnología de los alimentos*, 30(1), 70–77.

Figuerola, F., Muñoz, O. & Estévez, A. M. (2008). *La linaza como fuente de*

compuestos bioactivos para la elaboración de alimentos. *Agro Sur*, 36(2), 49–58.

García-Cruz, E. E. (2011). *Optimización del secado por aspersión de mucílago de pitahaya (Hylocereus undatus) en función de sus propiedades reológicas*. [Tesis. Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional]. <https://www.repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/15620>.

Jania, G.K., Shahb, D. P., Prajapatia, V. D. & Jain, V. C. (2009). *Gums and mucilages: versatile excipients for pharmaceutical formulations*. *Gums and mucilages/Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 4(5), 308–322.

Kaewmanee, T., Bagnasco, L., Benjakul, S., Lanteri, S., Morelli, C. F., Speranza, G. & Cosulich, M. E. (2014).

- Characterization of mucilages extracted from seven Italian cultivars of flax.* Food Chemistry, 148(1), 60-69.
- León-Martínez, F. M., Méndez-Lagunas, L. L. & Rodríguez-Ramírez, J. (2010). *Spray drying of nopal mucilage (Opuntia ficus-indica): Effects on powder properties and characterization.* Carbohydrate Polymers, 81(4), 864–870.
- MX-F-496-SCFI-2011 (2011). Industria azucarera y alcoholera- determinación de reductores totales en azúcar y materiales azucarados. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/114868/NMX-f-496-SCFI-2011.pdf>
- NOM-F-68-S-1980 (1980). Alimentos. Determinación de proteínas. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4858024&fecha=04/08/1980#gsc.tab=0
- Shearer, A. E. & Davies, C. G. (2005). *Physicochemical properties of freshly baked and stored whole-wheat muffins with and without flaxseed meal.* Journal of Food Quality, 28(2), 137–153.
- Yang, J., Wen, C., Duan, Y., Deng, Q., Peng, D., Zhang, H & Ma, M. (2021). *The composition, extraction, analysis, bioactivities, bioavailability, and applications in food system of flaxseed (Linum usitatissimum L.) oil: a review.* Trends in Food Science & Technology, 118 (1), 252-260.



www.ipn.mx

Hornos No. 1003, Col. Noche Buena, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca. México. C.P. 71230
www.ciidiroaxaca.ipn.mx / correo electrónico: ciidiroaxaca@ipn.mx
Teléfono: (951) 517 0610 Ext. 82700