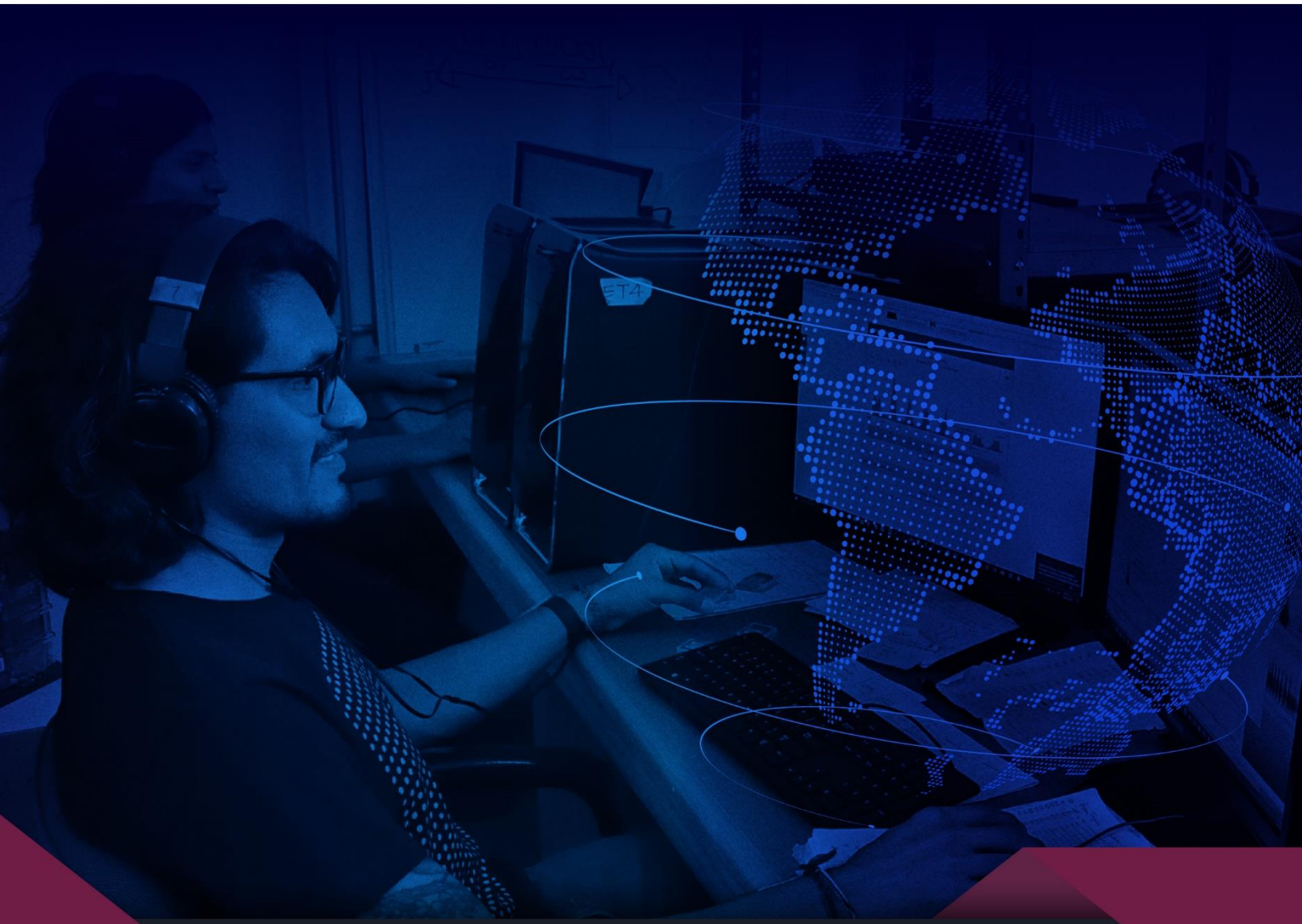
EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

Instituto Politécnico Nacional
"La Técnica al Servicio de la Patria"

Contribución al Conocimiento Científico y Tecnológico en Oaxaca

ISSN: 2594-0171



CCCTO 2021

Vol. 5, N° 5
27 de septiembre, 2021

CIIDIR OAXACA Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca

www.ipn.mx

CONTENIDO

Artículo	Página
Estimación de la recarga anual del acuífero de San Andrés Ixtlahuaca, Oaxaca. Martínez Hernández Fernando Humberto, Belmonte Jiménez Salvador Isidro y Ladrón de Guevara Torres María de los Ángeles	03-10
Análisis por microtomografía de Rayos X de cubos de papas secadas por convección forzada. Pérez Santiago Ángel Sandoval Torres Sadoth, Hernández Bautista Emilio, Léonard Angélique y Plougonven Erwan	11-20
Cultivo de *Ganoderma lucidum* en medios enriquecidos con material lignocelulósico. E. Ramos Juárez, E. Reyes Rodríguez, C. López Sánchez y F. J. Palma Cruz	21-28
Caracterización preliminar de suelos salinos en presencia de *agave potatorum zucc.* Hernández Canseco Jessie, Bautista Cruz Martha Angélica y Sánchez Mendoza Saúl	29-39
Fenología y estado poblacional de *Echeveria nodulosa* en un bosque estacional en Oaxaca. Ramírez Martínez Adriana y Mondragón Chaparro Demetria	40-49
Diseño sostenible de aulas para escuelas en condiciones precarias mediante software especializado en análisis bioclimático. Salazar Ruiz Josué Daniel, Alavéz Ramírez Rafael y Caballero Montes José Luis	50-62
Importancia de las mujeres indígenas en la seguridad alimentaria. Caso San Juan Tabaá, Oaxaca. Vicente Fabián Rosalina, Pérez Flores María Eufemia y Jurado Celis Silvia Nuria	63-71
Análisis bibliométrico de valoración económica de servicios ecosistémicos con método de transferencia de beneficios. Ramírez Cabrera Christian, Regino Maldonado Juan y Toledo López Arcelia	72-83
Notas para la divulgación científica sobre el origen del socavón de Santa María Zacatepec, Puebla. Campos Enríquez José Oscar y Lermo Samaniego J.F.	84-89

ISSN: 2594-0171
Contribución al Conocimiento Científico y Tecnológico en Oaxaca
Año 5, Vol. 5, No. 5, 27 de Septiembre, 2021

DIRECTORIO

Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez
Director CIIDIR Unidad Oaxaca

Dr. Pastor Teodoro Matadamas Ortiz
Subdirector Académico y de Investigación

Ing. Ángel Rosales Torres
Subdirector de Servicios Educativos e Integración Social

Ing. Alejandro Cruz Aguilar
Subdirector Administrativo

Dr. Carlos Espinoza Nájera
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 A. Martín Hernández Tolentino
Jefe del Departamento de Capital Humano y Recursos Financieros

Ing. Hilario Sánchez García
Jefe del Departamento de Recursos Materiales y Servicios

Lic. Angélica Ortiz López
Coordinadora de Enlace y Gestión Técnica

L.I. Justo César Marcial Aguilera
Jefe de la Unidad de Informática

COMITÉ EDITORIAL

Editor en Jefe

Dr. Sadoth Sandoval Torres

Editores Asociados

M.A. Laura Lourdes Gómez Hernández

Dr. Juan Regino Maldonado

Dr. José Luis Chávez Servia

Dr. José Antonio Santos Moreno

Responsables de la Edición

Dr. Pastor Teodoro Matadamas Ortiz

Dr. Carlos Espinoza Nájera

Ing. Dulce María del Rosario Montaño Hernández

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 5, Vol. 5, Núm.5, septiembre 2021, 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, 20 de septiembre de 2021. 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.

ISSN: 2594-0171
Contribución al Conocimiento Científico y Tecnológico en Oaxaca
Año 5, Vol. 5, No. 5, 27 de Septiembre, 2021

PRESENTACIÓN

"La CIENCIA es la rama del conocimiento que más ha contribuido a nuestra comprensión del mundo natural y social, y gracias a sus vínculos con la religión, las visiones del mundo, las economías y las tecnologías también ha sido una influencia fundamental en nuestra cultura"[1]. Estas son algunas de las líneas con las cuales el Dr. Michael R. Matthews nos propone una reflexión sobre la importancia de la ciencia en la vida y desarrollo de las sociedades. Es difícil imaginar un mundo sin ciencia, ¿cómo sería nuestro mundo sin ella?

Hace ya muchos siglos, en la vasta región que se despliega desde los ríos Éufrates y Tigris hasta las montañas del Líbano, florecieron algunas de las más esplendorosas civilizaciones: los sumerios, los acadios, y finalmente los babilonios. Diversos hallazgos dan fe de la inmensa riqueza de estas sociedades y del conocimiento particular que tenían de las matemáticas. En el caso de Babilonia, muchas de las tablillas descubiertas en los últimos dos siglos, abordan un contenido matemático impresionante, sugiriendo que los Babilonios tenían ya conocimiento del famoso teorema de Pitágoras y de la teoría de números, todo esto mucho antes de que la antigua Grecia produjera su primer gran matemático[2].

Es decir, existe un registro histórico invaluable, que da testimonio del interés que el ser humano ha mostrado en temas de ciencia, sea para diseñar construcciones, producir alimentos, o dar explicación a diferentes fenómenos de la naturaleza, por citar algunos ejemplos.

Han pasado muchos siglos, la humanidad sigue enfrentando dificultades, y ahora somos testigos de las bondades de la ciencia, así como del daño que ha producido en diferentes campos de aplicación, como la guerra. Un tema tan profundo y tan complejo, que ha dado origen a interminables debates. Es en este entorno, en el que hago referencia a los atributos de la tradición liberal de la enseñanza de la ciencia: Cuando hacemos ciencia, deberíamos recordar los ideales aristotélicos de la verdad, la bondad y la belleza, pues son elementos que las personas deberían cultivan en sus diferentes esferas. Para asuntos intelectuales se debería buscar la verdad, en asuntos morales la bondad, y en los asuntos artísticos y creativos, la belleza.

Dada esta breve reflexión, Contribución al Conocimiento Científico y Tecnológico, continúa siendo un espacio para la generación de conocimiento, para la reflexión académica, para la difusión de los hallazgos de investigación, para dar explicación a problemas complejos o al menos aportar mayor información. Entendemos también, que el esfuerzo si bien es valioso, también es limitado.

En el presente número el lector, encontrará artículos de investigación que abordan temas relacionados con el agua, el procesamiento de alimentos, la caracterización de suelos, la fenología, entre otros. Espero que los lectores puedan apreciar los métodos para abordar diferentes temáticas, de su diversidad, de sus alcances y limitaciones.

Quiero expresar un sincero agradecimiento a los editores asociados, a los árbitros, a los autores, al comité editorial, diseñadores, web master, a los funcionarios, y en fin, a todo el equipo que hace posible la continuidad de esta revista. Me parece que, con esta modesta obra, seguimos poniendo “La Técnica al servicio de la Patria”.

Dr. Sadoth Sandoval Torres

Editor en Jefe

[1] Matthews, M.R. 2015, Science Teaching: The Contribution of History and Philosophy of Science, 2nd, Routledge, New York.

[2] Maor, E. 2010. The Pythagorean Theorem: A 4,000-Year History. Revised edition. Princeton University Press.

ISSN: 2594-0171
Contribución al Conocimiento Científico y Tecnológico en Oaxaca
Año 5, Vol. 5, No. 5, 27 de Septiembre, 2021

Artículo

Estimación de la recarga anual del acuífero de San Andrés Ixtlahuaca, Oaxaca

Martínez Hernández, Fernando Humberto[1]; Belmonte Jiménez, Salvador Isidro [1]; Ladrón de Guevara Torres, María de los Ángeles[1]
[1]Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca

*Autor de correspondencia: fhmartinezh1800@alumno.ipn.mx

Recibido: 31 de julio de 2021
Aceptado: 6 de septiembre de 2021
Publicado en línea: 27 de septiembre de 2021

Resumen

La recarga de un acuífero es uno de los principales parámetros que estructuran un modelo hidrogeológico, ya sea conceptual o numérico. Al agua que infiltra desde el suelo, percolando hacia la zona vadosa y llegando hasta el nivel freático se le conoce como recarga. Las metodologías para la obtención de la recarga son variadas, sin embargo, para elegir la indicada debemos considerar la cantidad de variables que podemos obtener, así como la accesibilidad y fiabilidad de los datos de la zona de estudio. El objetivo de esta investigación es estimar el valor de la recarga del acuífero libre de San Andrés Ixtlahuaca mediante un balance hídrico de suelos. Se analizaron y homogeneizaron estadísticamente los datos de temperatura y precipitación de las 13 estaciones más cercanas a la zona de estudio y posteriormente con un análisis de polígonos de Thiessen se eligió la estación más representativa. Se realizaron 8 pruebas de infiltración de doble anillo en un muestreo dirigido para obtener la infiltración básica del suelo. Se procesó en un sistema de información geográfica los datos de geología, tipo de suelo, vegetación y pendiente, para discretizar la zona en polígonos. Con esta información, se utilizó la metodología de Schosinsky para la obtención del parámetro de recarga anual del acuífero en cada polígono. Se estimó que la recarga anual del acuífero de San Andrés Ixtlahuaca es de 359092.197 m3/año. Este resultado es la base para futuras investigaciones sobre obras de retención, gestión y modelación numérica.

Palabras clave: Agua subterránea, infiltración, permeabilidad, suelo.

Abstract

The recharge of an aquifer is one of the main parameters that structure a hydrogeological model, either conceptual or numerical. The water that infiltrates from the ground, percolating towards the unsaturated zone and reaching the water-table is known as recharge. The methodologies for obtaining the recharge are varied, however, to choose the indicated one we must consider the number of variables that we can obtain, as well as the accessibility and

reliability of the data from the study area. The objective of this research is to estimate the value of the recharge of the San Andrés Ixtlahuaca free aquifer through a soil water balance. The temperature and precipitation data from the 13 stations closest to the study area were statistically analyzed and homogenized, and later, with a Thiessen polygon analysis, the most representative station was chosen. 8 double ring infiltration tests were performed in a targeted sampling to obtain basic soil infiltration. Geology, soil type, vegetation and slope data were processed in a geographic information system to discretize the area into polygons. With this information, the Schosinsky methodology was used to obtain the annual aquifer recharge parameter in each polygon. It was estimated that the annual recharge of the San Andres Ixtlahuaca aquifer is 359092.197 mm / year. This result is the basis for future research on retention, management and numerical modeling works.

Keywords: Groundwater, infiltration, permeability, soil.

Introducción

Las características del agua subterránea (grandes reservas, distribución apropiada, buena calidad, resistencia a fluctuaciones estacionales y a la contaminación) hacen que presente menor susceptibilidad a contaminantes y a variaciones ambientales, lo que garantiza que en el futuro se contará con el recurso hídrico (Cerón et al., 2021). No obstante, casos como el acuífero de San Andrés Ixtlahuaca donde se extrae agua, pero se tiene poco o nulo conocimiento de sus zonas de recarga e hidrodinámica del sistema, hace que el recurso en esa zona se vea comprometido.

La cuantificación de las entradas en un sistema acuífero es una de las principales incógnitas al momento de generar modelos hidrogeológicos. Existen diversas metodologías desde variaciones en el nivel freático, índices de superposición, calibración de un modelo numérico, entre otros. El objetivo de este estudio es estimar la recarga del sistema acuífero de San Andrés Ixtlahuaca con la metodología de Schosinsky (2006), pues además de tomar en cuenta características hidrogeológicas, también considera al ecosistema.

Materiales y métodos

Área de estudio

La microcuenca de San Andrés Ixtlahuaca forma parte de la Subcuenca Alto Atoyac, Oaxaca y tiene una superficie de 9.48 km^2, de los cuales solo 2.33 km^2 corresponden al acuífero libre (Figura 1). Limita al norte con el municipio de San Felipe Tejalapam, al sur con San Pedro Ixtlahuaca y al este con Santa María Atzompa. Predomina el clima (A)C(wo) semicálido subhúmedo el cual afecta a toda la vegetación de la zona. La microcuenca posee una pendiente media de 3.11 % y una elevación promedio de 1710 m (INEGI, 2021).

Temperatura y precipitación

Se realizó un análisis de los datos de precipitación y temperatura de las estaciones climatológicas que se encontraron en un radio de 30 kilómetros de la microcuenca de San Andrés Ixtlahuaca.

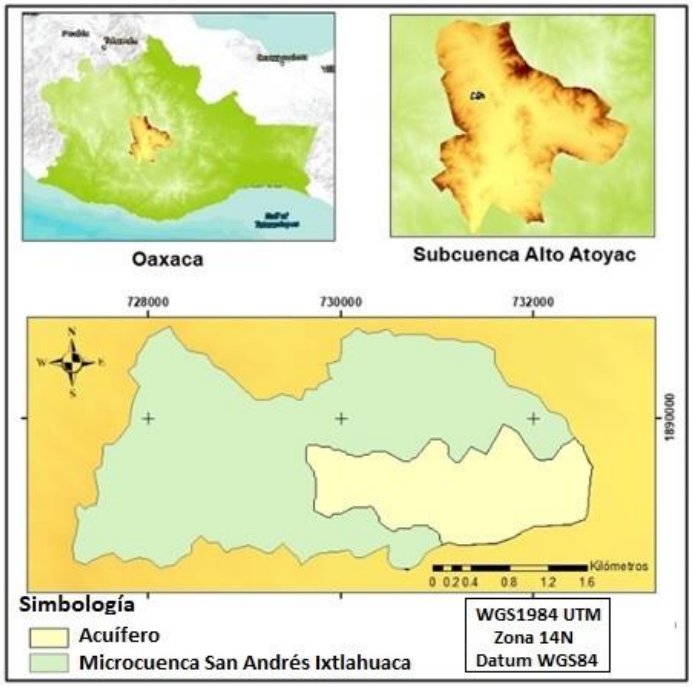


Figura 1. Localización de la microcuenca de San Andrés Ixtlahuaca, Oaxaca

Se identificaron 13 estaciones que, por la falta de datos y calidad en ciertos periodos de tiempo, pasaron por un proceso de homogeneización y relleno de datos faltantes con el paquete Climatol en el software Rstudio Versión 1.3.13 apoyados de la metodología señalada en Pita (2018).

Se identificó un periodo en común con datos disponibles entre las 13 estaciones que va desde 1976 al 2017 y se obtuvieron los valores medios acumulados mensuales de cada estación. Con el método de polígonos de Thiessen se concluyó que la estación Jalapa del Valle (20044) es la más representativa para la microcuenca.

Permeabilidad del suelo

Un parámetro importante para obtener la recarga de un acuífero es la velocidad de infiltración del suelo saturado en los primeros 10 cm de profundidad. Dicho valor se obtuvo en campo con un infiltrómetro de doble anillo, analizando los diferentes tipos de suelo encontrados en la zona. Las pruebas se realizaron considerando el instructivo para la medición de infiltración del Ministerio de agricultura ganadería y pesca argentina (2015). Para obtener el resultado de velocidad de infiltración básica se utilizó la ecuación de Reynolds & Elrick (1990) y Reynolds et al. (2002) evaluada en las pruebas de Macías et al. (2018).

Evapotranspiración potencial

Dada la escasez de información climatológica en la zona de estudio se consideraron los métodos de Blaney & Criddle y Thornthwaite, siendo este último el seleccionado para la

evaluación del estudio teniendo en cuenta las observaciones de los trabajos de Bautista et al. (2009), Van Der Schrier et al. (2011) y Bautista-Perdomo (2013). Thornthwaite (1948) requiere de la temperatura media mensual (obtenida en este estudio) y de las horas de luz solar que corresponden a la zona de estudio de latitud 17° (Allen, R. G. et al., 1998; Sánchez San Román, 2017).

Recarga

Considerando a Tóth (2009) y Vázquez-Báez et al. (2019), quienes mencionan que se tiene que integrar el ambiente y los ecosistemas en los procesos del funcionamiento del agua subterránea, para el parámetro recarga, se eligió la metodología de Schosinsky (2006), la cual parte de la discretización de la zona por polígonos de Thiessen tomando similitudes entre los parámetros de geología (INEGI, 1984), estaciones climatológicas y permeabilidad de suelo. La recarga mensual para cada polígono se explica con la ecuación 1:

$$Rp = Pi + HSi - HSf - ETR \quad \textbf{Ecuación 1}$$

donde:

Rp = Recarga potencial mensual en mm/mes.
Pi = Precipitación que infiltra en mm/mes.
HSi= Humedad del suelo al principio del mes en mm
HSf = Humedad del suelo al final del mes en mm
ETR = Evapotranspiración real en mm/mes

Para la Pi se requieren las características de pendiente (INEGI, 2013), cobertura vegetal (INEGI, 2013a) y permeabilidad del suelo. Por su parte, ETR, HSi y HSf se obtienen con los parámetros de evapotranspiración potencial (Thornthwaite, 1948) tipo y humedad de suelo (INEGI, 2007), horas de sol (Allen, R. G. et al., 1998; Sánchez San Román, 2017), punto de marchitez, retención por follaje y capacidad de campo (estos últimos tres parámetros identificados y ponderados de acuerdo al tipo de suelo encontrado en las tablas de Schosinsky (2006).

Una vez reunida toda la información y procesada en un sistema de información geográfica se procedió a obtener el volumen de la recarga por polígono que está dado por la ecuación 2:

$$V=Rp*A \quad \textbf{Ecuación 2}$$

donde:

V= Volumen de recarga (m3/año)
Rp= Recarga potencial del acuífero (mm/año)
A= Área del polígono o cuenca donde se genera la recarga (m^2)

Resultados y conclusiones

El análisis de precipitación en la estación de Jalapa del Valle (20044) mostró un promedio anual para la zona de estudio de 793.7 mm/año, siendo junio y septiembre los meses con más precipitación.

Para el parámetro de temperatura se encontró que el promedio anual es de 20.35 °C, siendo el mes de mayo el más caluroso (Figura 2).

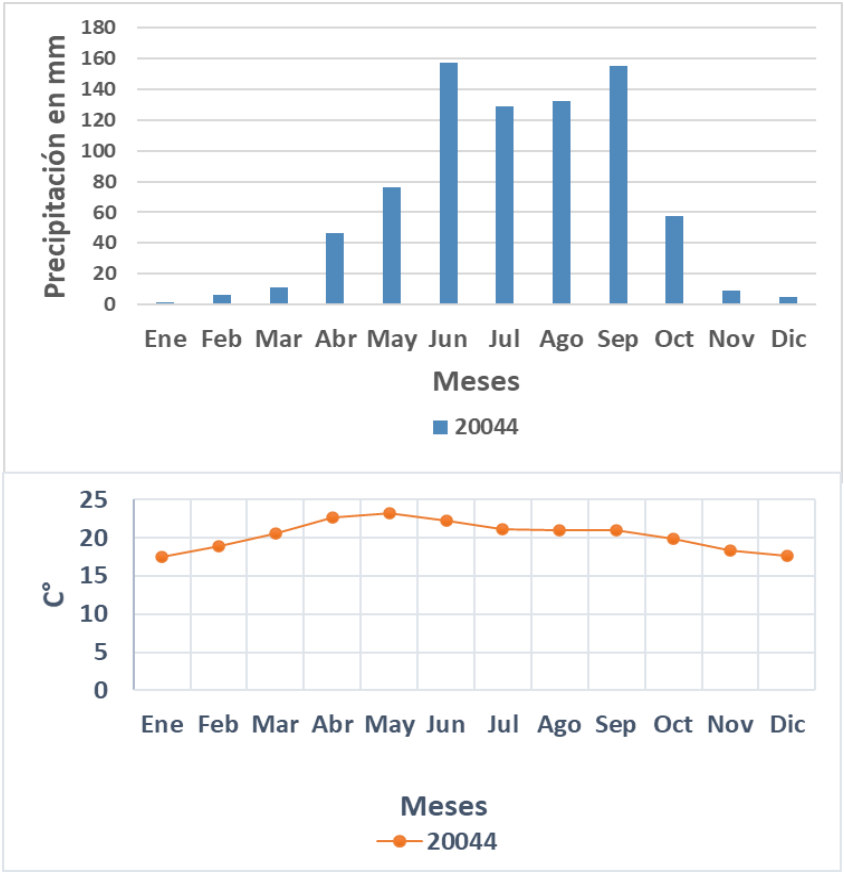


Figura 2. Figura 2. Precipitación y temperatura mensual de San Andrés Ixtlahuaca

La figura 3 detalla la localización de las 8 pruebas de infiltración, así como la discretización de la microcuenca en polígonos. La mayor parte de la microcuenca al norte y oeste posee afloramiento de roca ígnea con suelo con profundidades inferiores a 10 cm, por lo que las pruebas de infiltración no se pueden realizar.

Como ejemplo se planteó la prueba número 8 donde los anillos no pudieron insertarse más de 5 cm. En adición, el polígono que representa la prueba 8 tiene pendientes pronunciadas y poca vegetación, concluyendo que la recarga al acuífero en todo el polígono solo sucedería a través de fracturas en la roca, sin embargo, la metodología propuesta no toma en cuenta ese parámetro.
Con la ecuación de Thornthwaite (1948) se obtuvo una evapotranspiración potencial de 936.1 mm/año. En la tabla 1 se resumen los resultados que se obtuvieron de las pruebas de infiltración y la metodología para la obtención de la recarga y evapotranspiración real por Schosinsky (2006) en cada polígono.

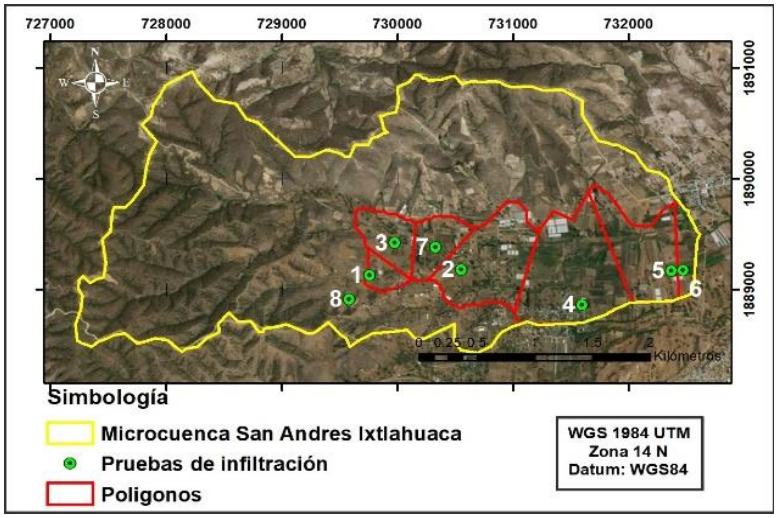


Figura 3. Localización de las pruebas de infiltración y discretización de la microcuenca de San Andrés Ixtlahuaca en polígonos

No se tomó en cuenta las zonas de afloramiento de roca metamórfica en el estudio, sin embargo, es importante señalar que las fracturas de esta roca también pueden llevar a infiltraciones y potencialmente a la recarga del acuífero (Sánchez, 2016), por lo que es importante su evaluación con otras metodologías.

Tabla 1. Resultados por polígono de la velocidad de infiltración básica, la evapotranspiración real y recarga de la microcuenca de San Andrés Ixtlahuaca.

Número de prueba	Área del polígono (m^2)	Duración de la prueba de infiltración (h)	Velocidad de infiltración en campo (mm/h)	Velocidad de infiltración básica (mm/h)	Evapotrans-piración real (m^3/año)	Recarga (m^3/año)
1	84185.43	2	12	3.73	28212.24228	8267.25056
2	540691.59	0.5	240	117.95	273125.1436	91636.2169
3	203741.76	1	72	32.18	102918.1857	34530.0805
4	739507.45	1.5	30	13.65	376781.1596	116087.614
5	447751.87	0.36	600	266.81	226177.5401	75884.8264
6	123093.75	1.1	0	0	20380.32445	0
7	192862.15	0.23	300	151.24	97422.45558	32686.2081
8	7155209.23	0.15	0	0	1570745.346	0

La recarga total de la microcuenca de San Andrés Ixtlahuaca es de 359092.197 m3/año. Esto representa un 4.81 % de la precipitación total, la cual es una cifra que concuerda con el promedio de recarga de México de un 6.4 % según CONAGUA (2018). Lo restante se va con la evapotranspiración real con un total de 2695762.398 m3/año y con la escorrentía. Estos resultados son la base para crear modelos numéricos y para poder conocer con mayor detalle el funcionamiento del acuífero.

Referencias bibliográficas

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotraspiration guidelines for computing crop water requirements. In *FAO Irrigation & drainage Paper 56. FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations,Roma*.

Bautista-Perdomo, J. M. (2013). *Modelo de flujo del sistema acuífero de la cuenca Alto Atoyac, Oaxaca (Tesis de maestría)*. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca.

Bautista, F., Bautista, D., & Delgado-Carranza, C. (2009). Calibration of the equations of Hargreaves and Thornthwaite to estimate the potential evapotranspiration in semi-arid and subhumid tropical climates for regional applications. *Atmosfera*, *22*(4), 331–348.

Bellino, N. (2012). *Aguas subterráneas. Conocimiento y explotación*. Instituto de ingeniería sanitaria, Facultad de ingeniería. https://www.academia.edu/9973481/Aguas_Subterráneas_Conocimiento_y_Explotación_2012_Página_1_AGUAS_SUBTERRANEAS

Cerón, L. M., Sarria, J. D., Torres, J. S., & Soto-Paz, J. (2021). Agua subterránea: tendencias y desarrollo científico. *Información Tecnológica*, *32*(1), 47–56. https://doi.org/10.4067/s0718-07642021000100047

CONAGUA. (2018). *Estadisticas del agua en México*. http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf

INEGI. (1984). *Conjunto de datos vectoriales Geológicos serie I. Oaxaca*.

INEGI. (2007). *Conjunto de datos vectoriales de la carta Edafológica escala 1:250 000 serie II*.

INEGI. (2013a). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000 serie V Conjunto Nacional Oaxaca de Juárez*.

INEGI. (2013b). *Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0)*.

INEGI. (2021). *Datos para Sistemas de Información Geografica de sistemas hidrológicos*. Simulador de Flujos de Agua En Cuencas Hidrográicas (SIATL) v. 4. http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#

Macías, J., Vargas, A., & Arellano, F. (2018). Conductividad hidráulica en dos sitios del valle central de costa rica: análisis comparativo de tres metodologías de ensayo en la zona no saturada. *Revista Geológica de América Central*, *59*, 71–96. https://doi.org/10.15517/rgac.v59i0.34160

Ministerio de agricultura ganaderia y pesca Argentina. (2015). Medición De La Infiltración En El Suelo Mediante Infiltrómetros Doble Anillo. In *Gobierno de argentina*. http://www.prosap.gov.ar/Docs/INSTRUCTIVO _R014_ infiltrometro doble anillo.pdf

Pita, O. (2018). *Deteccion de cambio climatico en la cuenca del rıo Conchos, mediante ındices climaticos (Tesis de Maestría)*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Reynolds, W. D., & Elrick, D. E. (1990). Ponded Infiltration From a Single Ring: I. Analysis

of Steady Flow. *Soil Science Society of America Journal*, *54*(5), 1233–1241. https://doi.org/10.2136/sssaj1990.03615995005400050006x

Reynolds, W. D., Elrick, D. E., & Youngs, E. G. (2002). Field Methods (Vadose and Saturated Zone Techniques). In *Methods of soil analysis. Part* (Vol. 4).

Sánchez, R. I. (2016). *Prospección de aguas subterráneas en los valles centrales de Oaxaca a partir de los métodos geofísicos, gravimetría y magnetometría y resistividad eléctrica (Tesis de Maestría)*. INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL.

Sánchez San Román, F. J. (2017). Hidrologia superficial y subterranea. In *Universidad de Salamanca, España*. Createspace Independent Pub.

Schosinsky, G. N. (2006). Cálculo de la Recarga Potencial de Acuíferos Mediante Un Balance Hídrico De Suelos. *Revista Geológica de América Central*, *34–35*, 13–30.

Thornthwaite, C. W. (1948). An Approach Toward a Rational. *Geographical Review*, *38*(1), 55–94.

Tóth, J. (2009). *Gravitational Systems of groundwater Flow. Theory, Evaluation, Utilization*. Cambridge University Press.

Van Der Schrier, G., Jones, P. D., & Briffa, K. R. (2011). The sensitivity of the PDSI to the Thornthwaite and Penman-Monteith parameterizations for potential evapotranspiration. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, *116*(3), 1–16. https://doi.org/10.1029/2010JD015001

Vázquez-Báez, V., Rubio-Arellano, A., García-Toral, D., & Mora, I. R. (2019). Modeling an aquifer: Numerical solution to the groundwater flow equation. *Mathematical Problems in Engineering*, *2019*. https://doi.org/10.1155/2019/1613726

ISSN: 2594-0171
Contribución al Conocimiento Científico y Tecnológico en Oaxaca
Año 5, Vol. 5, No. 5, 27 de Septiembre, 2021

Artículo

Análisis por microtomografía de Rayos X de cubos de papas secadas por convección forzada

Pérez Santiago, Angel[1]; Sandoval Torres, Sadoth[1]; Hernández Bautista, Emilio[2]; Léonard, Angélique [3]; Plougonven, Erwan[3]
[1] Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Oaxaca, Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, C.P. 71230, México.
[2] Instituto Tecnológico de Oaxaca/ Tecnológico Nacional de México
[3] Chemical Engineering research unit, ULiége, Belgium.

*Autor de correspondencia: ssandovalt@ipn.mx

Recibido: 31 de julio de 2021
Aceptado: 6 de septiembre de 2021
Publicado en línea: 27 de septiembre de 2021

Resumen

La contracción de alimentos durante el secado es un fenómeno que impacta en la calidad microestructural de estos materiales. Para estudiar este fenómeno, se implementaron experimentos de secado en un micro secador a 50, 60 y 70 °C, a 20 % de humedad relativa y una velocidad del aire de 2 m/s. Para observar los patrones de deformación volumétrica, se implementó una técnica de microtomografía de rayos X acoplado a un análisis de imágenes para visualizar la forma y el tamaño de las muestras durante el secado. Asimismo, se realizaron simulaciones computacionales para cuantificar el stress volumétrico. El modelo simula las cinéticas de secado y permite estimar la deformación volumétrica. El modelo es validado con los datos experimentales. Una mayor temperatura incrementa la rapidez de secado e intensifica la deformación volumétrica. Las imágenes de microtomografía de rayos X, muestran la formación de cavidades al interior de las muestras a diferentes tiempos de secado.

Palabras clave: Cavidades de aire, deformación volumétrica, microtomografía de rayos X.

Abstract

Food shrinkage during drying is a phenomenon that impacts the microstructural quality of these materials. To study this phenomenon, drying experiments were implemented in a micro dryer at 50, 60 and 70 °C, at 20 % relative humidity and an air speed of 2 m/s. To observe the volumetric deformation patterns, an X-ray microtomography technique coupled with image analysis was implemented to visualize the shape and size of the samples during drying. Likewise, computer simulations were carried out to quantify the volumetric stress. The model simulates the kinetics of drying and allows estimating the volumetric deformation. The model is validated with the experimental data. A higher temperature increases the drying rate and intensify the volumetric deformation. The X-ray microtomography images show the formation of cavities inside the samples at different drying times.

Keywords: Air cavities, volumetric strain, x-ray microtomography.

Introducción

La industria tiene un interés en predecir y controlar la textura de los alimentos de origen vegetal, particularmente en relación con los tratamientos de procesamiento y/o poscosecha (Waldron et al., 1997). La industria alimentaria necesita el desarrollo de nuevos productos, procesos y equipos para impulsar la calidad y la seguridad. A medida que se prueban nuevos ingredientes, procesos y equipos, la capacidad predictiva de los modelos puede desempeñar un papel importante (Datta & Halder, 2008; Defraeye & Radu, 2018).

Los alimentos sufren cambios volumétricos durante el proceso de secado, sin embargo, la mayoría de los trabajos de investigación descuidan la deformación de los materiales alimenticios (Sandoval Torres & Allier González, 2015). Estos cambios van acompañados de la formación de tensiones de deformación internas, lo que resulta en una calidad inferior del producto (Itaya et al., 1995). Mayor & Sereno, (2004) señalan que la pérdida de agua y el calentamiento provocan tensiones en la estructura celular de los alimentos, lo que permite un cambio de forma y dimensión, y Fanta et al., (2014) explica que la contracción resulta del colapso de las células durante el evaporación de agua, que tiene un efecto negativo en la calidad del material. Dhall & Datta, (2011), desarrollaron un modelo para alimentos deformables. Suponiendo que el esqueleto sólido es un material hiperelástico incompresible, utilizaron un modelo neo-hookeano. Su modelo fue validado con datos experimentales para el secado por convección de rodajas de papa obtenidos de (Wang & Brennan, 1995). La contracción se calculó como cambios porcentuales en el grosor, el largo y el ancho de las muestras de papa. Encontraron una relación lineal entre el contenido de humedad y la contracción, observando la contracción de las rodajas de papa que se detiene por debajo de un contenido de humedad crítico. Para simular la deformación se puede abordar desde otro enfoque desarrollado en los últimos años, analiza el transporte de masa y calor en medios deformables considerando la teoría de la poroelasticidad de Biot. Esta perspectiva estudia el comportamiento de materiales cuyas microestructuras porosas están ocupadas por un fluido. Este enfoque se ha aplicado en sistemas como geomateriales, biomateriales, geles y polímeros, pero rara vez en alimentos (Curcio & Aversa, 2014; Dhall & Datta, 2011). Por simplicidad, solo se consideran dos fases, sólida y fluida. La teoría de la poroelasticidad combina la ley de Darcy con la tensión efectiva y la elasticidad no lineal de Terzaghi en un marco cinemático riguroso (Catherine & Jean-Jacques, 2008).

Por lo general, la medición experimental de la contracción por secado implica técnicas destructivas o inexactas, como los métodos de desplazamiento de volumen (Léonard et al., 2008). El impacto de los métodos de secado en la microestructura de los alimentos, hasta donde sabemos, queda por estudiar, aunque es un aspecto crucial en la calidad de los alimentos (Rahman et al., 2018). Muchos investigadores utilizan la microtomografía de rayos X (CT) para caracterizar diferentes materiales alimenticios de origen vegetal, como la manzana (Verboven et al., 2013), el kiwi (Cantre, East, et al., 2014), la frambuesa (Szadzińska et al., 2019), el mango (Cantre, Herremans, et al., 2014), la remolacha (Szadzińska et al., 2020) y el plátano (Madiouli et al., 2011). Esta técnica no destructiva está surgiendo en el campo de la ciencia de los alimentos (Rahman et al., 2018) y tiene potencial para visualizar la deformación durante el secado.

El objetivo de este trabajo es la simulación del encogimiento de cubos de papa (*Solanum tuberosum*) durante un proceso de secado convectivo. Asimismo, se simulan las cinéticas de secado basado en principios termodinámicos y fenomenológicos, el modelo de secado implementa la teoría poroelástica acoplada a la transferencia de calor y masa. Los resultados numéricos se validan con resultados experimentales obtenidos por microtomografía de rayos X.

Materiales y métodos

El material de estudio fueron papas (*Solanum tuberosum*), obtenidas en un supermercado local de Liège (Bélgica). Se cortaron cubos con aristas de 0,018 m de longitud. El modelo matemático 3D considera las ecuaciones de conservación de humedad (1), de energía (2), de aire seco (3), de deformación volumétrica (teoría de la poroelasticidad de Biot) (4) y la ley de Darcy para el movimiento del fluido (5) en cubos de papa de 0.018 m:

$$\frac{\partial W}{\partial t}+\frac{1}{\rho_s}(\nabla\cdot n_l+\nabla\cdot n_v+\nabla\cdot n_\sigma)=0 \quad (1)$$

$$\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t}+\rho_i C_{p_i} n_i\cdot\nabla T+\nabla\cdot(K\nabla T)+\lambda(n_v)=0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t}+\nabla\cdot(n_a)=0 \quad (3)$$

$$\rho S\frac{\partial \sigma_f}{\partial t}+\nabla\cdot\left(-\frac{\rho k}{\mu}\nabla\sigma_{pl}\right)+\rho\alpha_B\frac{\partial e_{vol}}{\partial t}=0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \sigma_{pl}}{\partial t}+\nabla\cdot\left(-\frac{\rho k}{\mu}\nabla n_\sigma\right)=0 \quad (5)$$

Los cubos de papa de 0.018 m. se secaron a tres temperaturas (50, 60 y 70 °C), con una humedad relativa del 20% y una velocidad del aire de 2 m/s. Los cubos se secaron en un micro secador, como se describe en estudios previos (Leonard et al., 2002). El micro-secador puede funcionar a temperaturas que oscilan entre 20 y 180 ° C. En este secador, el flujo de aire varía entre 0,3 y 5 m/s. La producción máxima de vapor con el flujo de aire más alto alcanza una humedad absoluta de aproximadamente 0.2 kg/kg de aire seco.

Los desplazamientos del material fueron registrados en un microtomógrafo Skyscan-1074 (Skyscan, Bélgica). La fuente de rayos X se fijó en 40 kV y 1 mA. Se utilizó una cámara de rayos X, 2D, 768x576 píxeles, de 8 bits con una resolución espacial de 41 μm como detector, como se describe en (Leonard et al., 2002). Se tomaron mediciones con un tiempo de exposición de 900 ms, cada 3.6 ° sobre 180°. Las adquisiciones de microtomografía computarizada (micro-CT) se entrelazaron con las mediciones de masa durante el secado.

La reconstrucción del material deshidratado se realizó utilizando el software NRecon de Skyscan (v. 1633), que proporciona secciones transversales de nivel de gris 2D. Al apilar todas las imágenes procesadas en 2D, se obtiene una imagen binaria en 3D, en la que los píxeles se asignan a la muestra o al vacío. Un simple análisis de componentes conectados de la fase vacía puede resaltar los poros dentro de la papa, cuando están presentes. El recuento de píxeles permite medir los volúmenes de las diferentes fases a partir del software FIJI.

La deformación volumétrica simulada se calculó como V/V0, donde V0 es el volumen inicial y V es el volumen en diferentes tiempos resueltos por el modelo

Resultados y discusión

Observamos que las simulaciones representan la cinética de secado experimental con alta precisión con valores de RMSE para las cinéticas de secado a 50, 60 y 70 ºC de 0.21, 0.13, 0.20 kg de agua/kg de materia seca, respectivamente (Figura 1).
La Figura 1, mostró que la forma de la cinética es influenciada por la temperatura. Tal como se ha observado en otros procesos de deshidratación de alimentos (Defraeye & Radu, 2018; Gulati & Datta, 2015; MacMinn et al., 2016), el tiempo se de secado se redujo cuando las muestras se expusieron a una mayor temperatura del aire de secado.

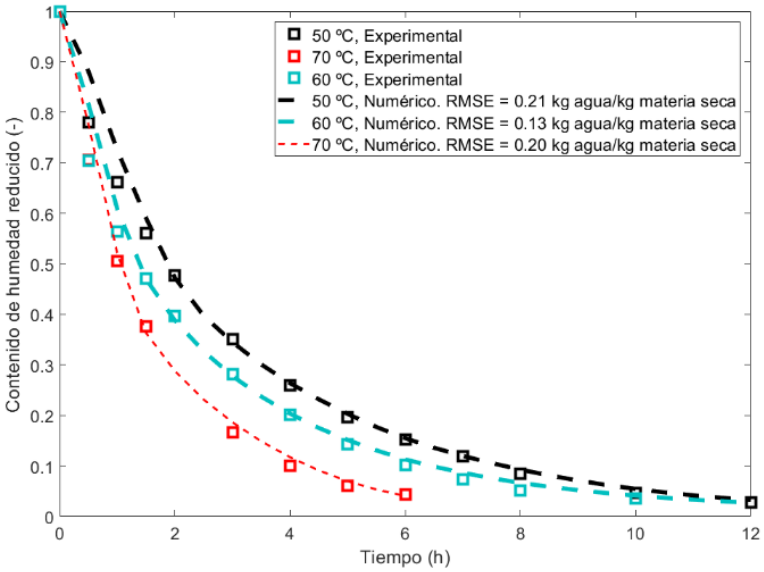


Figura 1. Cinética experimental y simulada a 2 m/s de flujo de aire y tres temperaturas de secado

Esta reducción del tiempo de secado se ha relacionado con una evaporación más intensa en la superficie de las muestras, la cual aumenta la velocidad de secado (Dhall & Datta, 2011). Asimismo, durante el secado de productos alimenticios, particularmente a temperaturas altas, puede desarrollarse un endurecimiento del tejido superficial. Este endurecimiento de la superficie (case-hardening) se opone a la resistencia al transporte de humedad en las regiones celulares de los tejidos internos y deteriora la capacidad de rehidratación de las muestras. En nuestros experimentos, se observó una capa delgada y significativamente seca en el exterior del material.

El modelo predice de manera aceptable la deformación volumétrica de las muestras secadas a 50, 60 y 70°C (0.31, 0.12, 0.23).
La deformación volumétrica experimental se calculó a partir de la información obtenida por microtomografía de rayos X. Observamos que la deformación volumétrica muestra un comportamiento lineal ideal cuando es graficada contra el contenido de humedad, figura 2.

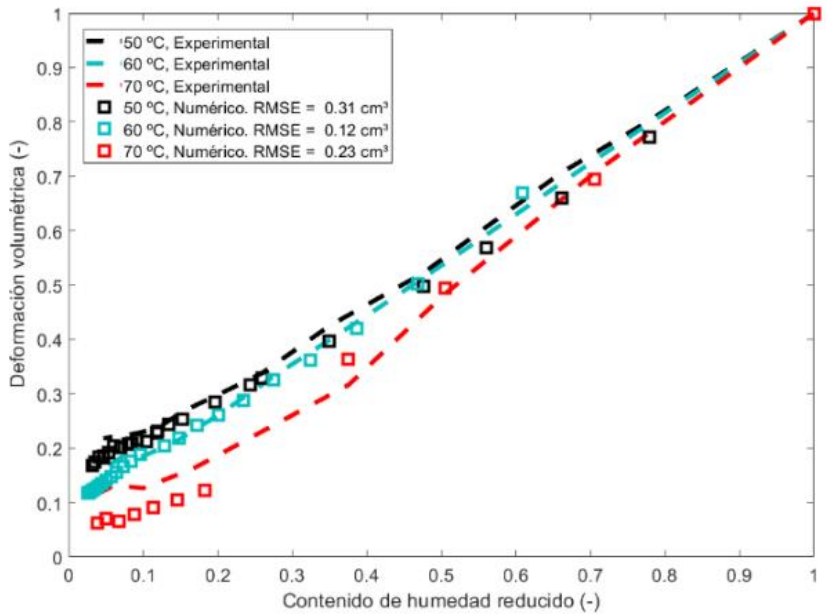


Figura 2. Deformación volumétrica experimental y simulada a 2 m/s de flujo de aire y tres temperaturas

Durante el secado se experimenta una intensa deformación que afecta las propiedades de la fase sólida, permitiendo una fuerte transición del estado gomoso al estado vítreo (modificación de la red de poros en la superficie), permitiendo la formación de una capa seca. El transporte de agua en un material celular depende de los mecanismos de transporte. En este caso, las muestras fueron expuestas a temperaturas que van de los 50 a los 70ºC. Según (Halder et al., 2011) el transporte intracelular ocurre en el secado a bajas temperaturas (por debajo de 52 ° C), la migración de la humedad se enfrenta a la resistencia de las membranas celulares, paredes celulares y espacios intercelulares. En oposición a la migración intracelular, el transporte extracelular ocurre durante el secado a altas temperaturas (por encima de 52 ° C), cuando se rompe la membrana celular.

Es interesante observar las curvas de deformación volumétrica contra el tiempo, pues se aprecia la tasa de encogimiento de las muestras y en qué momento dicha deformación volumétrica tiende a estabilizarse. La Figura 3, muestra los resultados numéricos y experimentales de la deformación volumétrica en función del tiempo de secado a 2 m/s

Los resultados revelan que la curva de pérdida de volumen sigue un comportamiento de secado de tipo cinético, lo que confirma una fuerte dependencia con el contenido de humedad. Asimismo, se observa que la temperatura tiene un efecto importante en la pérdida de volumen, ya que a 70 ºC, los valores de deformaciones volumétricas disminuyen a mayor velocidad con respecto a 50 y 60 ºC.

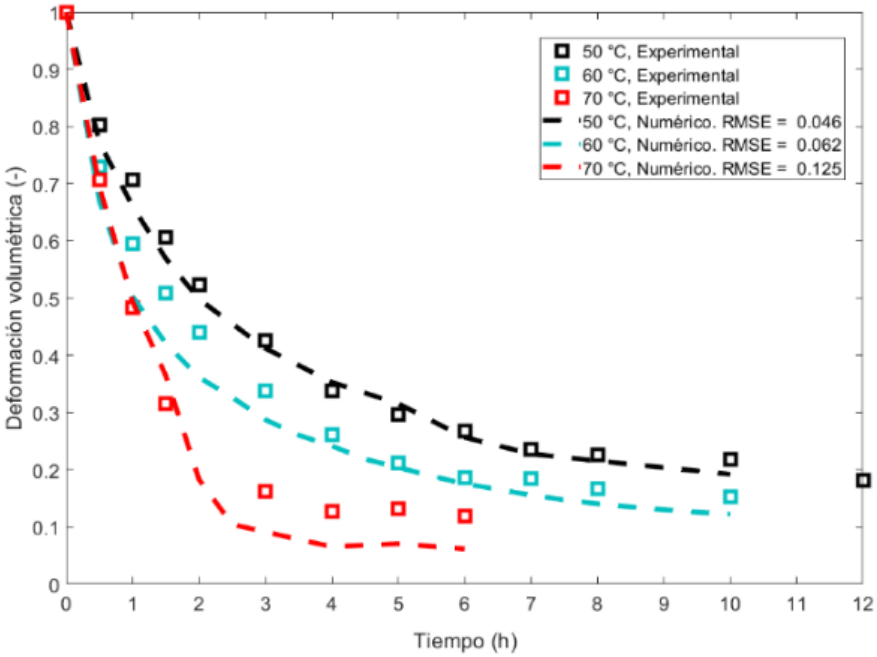


Figura 3. Deformación volumétrica en función del tiempo a 2 m/s de flujo de aire y tres temperaturas

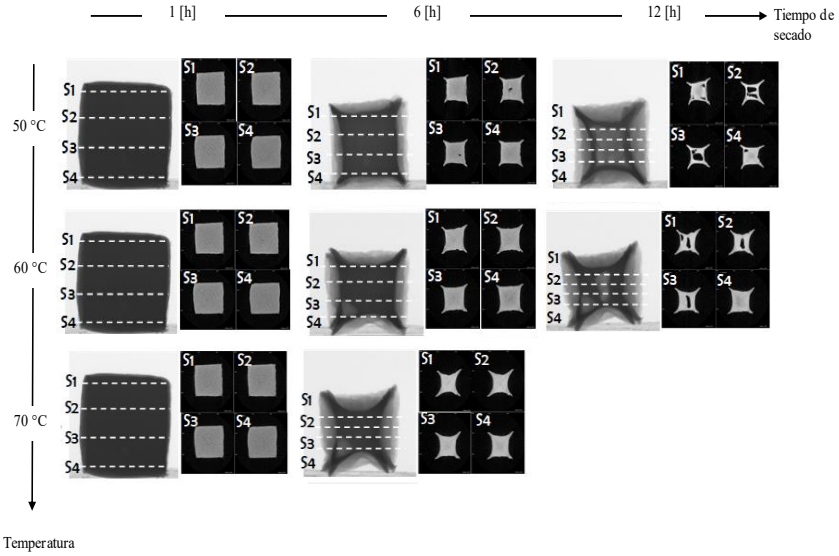


Figura 4. secciones 2D por microtomografia de rayos x. Datos experimentales a 2 m/s de flujo de aire y tres temperaturas (S1, S2, S3 y S4 son los cortes en diferentes puntos).

En las Figura 4, se observa cómo la superficie es afectada de manera más drástica en comparación al centro del material, pasando de un estado gomoso a un estado vítreo conforme avanza el secado. Esto sugiere cuando la superficie presenta un estado vítreo, la cantidad de agua líquida que se pierde no se compensa por igual por las células que se contraen disminuyendo la rapidez de secado cuando la superficie presenta un estado vítreo.

La Figura 4 también revela que en las primeras horas de secado solo hay un cambio de volumen, y a medida que avanza el tiempo, el cambio de forma es afectado por la temperatura y este cambio de forma es acompañado con un cambio de densidad dentro del material (espacios vacíos). Al inicio del proceso de secado se observa una intensidad de colores dominantes en gris oscuro y negro, lo cual hace referencia a la presencia del material y el fluido. Sin embargo, al final del secado se observa que domina una escala de gris claro. Esto debido a que el material solo tiene la presencia del material sólido y dentro se han formado cavidades de aire (color negro).

Conclusiones

En este trabajo se resolvió un modelo matemático poroelástico de secado para simular las cinéticas de secado y la deformación volumétrica de cubos de papa.

Las simulaciones numéricas predicen correctamente las cinéticas experimentales y el encogimiento volumétrico. Nuestro modelo es una herramienta predictiva del proceso de secado.

El comportamiento de la contracción del material es evidenciado por simulación numérica y por microtomografía de rayos X. La microtomografía de rayos X permite observar la deformación de los cubos de papa al final del secado y la densidad de la fase sólida.

La porosidad es más importante en la superficie y en el centro de las muestras. Los resultados numéricos describen correctamente los experimentales obtenidos mediante el procesamiento de imágenes por microtomografía de rayos X.

En el futuro, el modelo debería considerar la formación las cavidades de aire en las muestras, con el fin de elucidar las implicaciones de este fenómeno en la calidad del material.

Nomenclatura

Símbolo	Descripción
C_p	Calor específico (J/kg K)
e_{vol}	Deformación volumétrica
k	Conductividad térmica (W/m K)
n	Flux (m/s)
P	Presión de poro (Pa)
t	Tiempo (s)
T	Temperatura (°C)
W	Contenido de humedad (kgagua/kgsólido seco)
ρ	Densidad (kg/m^3)

λ	Conductividad térmica (W/(m·K))
S	Coeficiente de almacenamiento específico
σ	Esfuerzo normal (Pa)
α_B	Coeficiente de Biot-Willis
μ	Viscosidad (kg/m s)

Subíndices

a	Aire
f	Fluido
i	Aire, vapor y liquido
s	Sólido
l	liquido
v	vapor
a	Aire seco

Referencias bibliográficas

Cantre, D., East, A., Verboven, P., Trejo Araya, X., Herremans, E., Nicolaï, B. M., Pranamornkith, T., Loh, M., Mowat, A., & Heyes, J. (2014). Microstructural characterisation of commercial kiwifruit cultivars using X-ray micro computed tomography. *Postharvest Biology and Technology*, *92*, 79–86. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2014.01.012

Cantre, D., Herremans, E., Verboven, P., Ampofo-Asiama, J., & Nicolaï, B. (2014). Characterization of the 3-D microstructure of mango (Mangifera indica L. cv. Carabao) during ripening using X-ray computed microtomography. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *24*, 28–39. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.12.008

Catherine, B., & Jean-Jacques, B. (2008). Séchage des produits alimentaires Appareils et applications. *Techniques de l'ingénieur Opérations unitaires du génie industriel alimentaire*, *base docum*(ref. article : f3002). https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agro-th2/operations-unitaires-du-genie-industriel-alimentaire-42430210/sechage-des-produits-alimentaires-f3002/

Curcio, S., & Aversa, M. (2014). Influence of shrinkage on convective drying of fresh vegetables: A theoretical model. *Journal of Food Engineering*, *123*, 36–49. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.09.014

Datta, A. K., & Halder, A. (2008). Status of food process modeling and where do we go from here (Synthesis of the outcome from brainstorming). *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *7*(1), 117–120. https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2007.00037.x

Defraeye, T., & Radu, A. (2018). Insights in convective drying of fruit by coupled modeling of fruit drying, deformation, quality evolution and convective exchange with the airflow. *Applied Thermal Engineering*, *129*, 1026–1038.

https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.082

Dhall, A., & Datta, A. K. (2011). Transport in deformable food materials: A poromechanics approach. *Chemical Engineering Science*, *66*(24), 6482–6497. https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.09.001

Fanta, S. W., Abera, M. K., Aregawi, W. A., Ho, Q. T., Verboven, P., Carmeliet, J., & Nicolai, B. M. (2014). Microscale modeling of coupled water transport and mechanical deformation of fruit tissue during dehydration. *Journal of Food Engineering*, *124*, 86–96. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.10.007

Gulati, T., & Datta, A. K. (2015). Mechanistic understanding of case-hardening and texture development during drying of food materials. *Journal of Food Engineering*, *166*, 119–138. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.05.031

Halder, A., Datta, A. K., & Spanswick, R. M. (2011). Water transport in cellular tissues during thermal processing. *AIChE Journal*, *57*(9), 2574–2588. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/aic.12465

Itaya, Y., Kobayashi, T., & Hayakawa, K.-I. (1995). Three-dimensional heat and moisture transfer with viscoelastic strain-stress formation in composite food during drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *38*(7), 1173–1185. https://doi.org/10.1016/0017-9310(94)00245-Q

Leonard, A., Blacher, S., Marchot, P., & Crine, M. (2002). Use of X-ray Microtomography to follow the convective heat drying of wastewater sludges. *Drying Technology*, *20*(4–5), 1053–1069. https://doi.org/10.1081/DRT-120004013

Léonard, A., Blacher, S., Nimmol, C., & Devahastin, S. (2008). Effect of far-infrared radiation assisted drying on microstructure of banana slices: An illustrative use of X-ray microtomography in microstructural evaluation of a food product. *Journal of Food Engineering*, *85*(1), 154–162. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.07.017

MacMinn, C. W., Dufresne, E. R., & Wettlaufer, J. S. (2016). Large Deformations of a Soft Porous Material. *Physical Review Applied*, *5*(4), 044020. https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.5.044020

Madiouli, J., Sghaier, J., Orteu, J.-J., Robert, L., Lecomte, D., & Sammouda, H. (2011). Non-contact Measurement of the Shrinkage and Calculation of Porosity During the Drying of Banana. *Drying Technology*, *29*(12), 1358–1364. https://doi.org/10.1080/07373937.2011.561460

Mayor, L., & Sereno, A. M. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, *61*(3), 373–386. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00144-4

Rahman, M. M., Joardder, M. U. H., & Karim, A. (2018). Non-destructive investigation of cellular level moisture distribution and morphological changes during drying of a plant-based food material. *Biosystems Engineering*, *169*, 126–138. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.02.007

Sandoval Torres, S., & Allier González, A. L. (2015). Linear and Nonlinear Drying Behavior in Tuberous Crop Slices. *Drying Technology*, *33*(5), 559–569. https://doi.org/10.1080/07373937.2014.955919

Szadzińska, J., Łechtańska, J., Pashminehazar, R., Kharaghani, A., & Tsotsas, E. (2019). Microwave- and ultrasound-assisted convective drying of raspberries: Drying kinetics and microstructural changes. *Drying Technology*, *37*(1), 1–12. https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1433199

Szadzińska, J., Mierzwa, D., Pawłowski, A., Musielak, G., Pashminehazar, R., &

Kharaghani, A. (2020). Ultrasound- and microwave-assisted intermittent drying of red beetroot. *Drying Technology*, *38*(1–2), 93–107. https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1624565

Verboven, P., Nemeth, A., Abera, M. K., Bongaers, E., Daelemans, D., Estrade, P., Herremans, E., Hertog, M., Saeys, W., Vanstreels, E., Verlinden, B., Leitner, M., & Nicolaï, B. (2013). Optical coherence tomography visualizes microstructure of apple peel. *Postharvest Biology and Technology*, *78*, 123–132. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2012.12.020

Waldron, K. W., Smith, A. C., Parr, A. J., Ng, A., & Parker, M. L. (1997). New approaches to understanding and controlling cell separation in relation to fruit and vegetable texture. *Trends in Food Science & Technology*, *8*(7), 213–221. https://doi.org/10.1016/S0924-2244(97)01052-2

Wang, N., & Brennan, J. G. (1995). A mathematical model of simultaneous heat and moisture transfer during drying of potato. *Journal of Food Engineering*, *24*(1), 47–60. https://doi.org/10.1016/0260-8774(94)P1607-Y

ISSN: 2594-0171
Contribución al Conocimiento Científico y Tecnológico en Oaxaca
Año 5, Vol. 5, No. 5, 27 de Septiembre, 2021

Artículo

Cultivo de *Ganoderma lucidum* en medios enriquecidos con material lignocelulósico

Ramos Juárez, E. [1]; Reyes Rodríguez, E. [2]; López Sánchez, C. [1]; Palma Cruz, F. J. [2]
[1]Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Oaxaca, Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica. Avenida Ing. Víctor Bravo Ahuja No. 125, esquina Calzada Tecnológico, C.P. 68030.
[2] Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Oaxaca, División de Estudios de Posgrado e Investigación. Av. Ing. Víctor Bravo Ahuja No. 125, esquina Calzada Tecnológico, C.P. 68030.

*Autor de correspondencia: claudia.ls@oaxaca.tecnm.mx

Recibido: 6 de agosto de 2021
Aceptado: 6 de septiembre de 2021
Publicado en línea: 27 de septiembre de 2021

Resumen

Los hongos basidiomicetos tienen múltiples usos para el ser humano, las especies comestibles y medicinales son de gran interés por su valor comercial. Hongos medicinales como Ganoderma lucidum (Curt.: Fr.) P. Karst poseen sustancias bioactivas útiles para el tratamiento de distintas enfermedades. Comúnmente el cultivo del hongo se realiza en tronco, para obtener el cuerpo fructífero, por tal motivo, el objetivo de este trabajo fue realizar la incorporación de material lignocelulósico proveniente de árboles de pino, encino y nogal adicionándolo como suplemento a los medios de cultivo comerciales AEM, ADS y PDA, para estudiar el crecimiento micelial y determinar el efecto que causan en el crecimiento radial del micelio. Con esto es posible determinar la adaptabilidad del hongo al material lignocelulósico de estudio, para el análisis de datos se implementó el modelo logístico para calcular la velocidad máxima de crecimiento (Vmax), tiempo en alcanzar la máxima velocidad (tmax) y el tiempo de adaptación de la cepa al medio (tlat). Se encontró que para el medio PDA suplementada con nogal la Vmax fue de 3.04 cmh-1, con un periodo de adaptación de 36.07 h y un tmax de 136.92 h., mientras que la Vmax menor se registró en medio AEM suplementado con encino.

Palabras clave: Ganoderma, basidiomicetos, parámetros, enriquecimiento.

Abstract

Basidiomycete mushrooms have multiple uses for humans, edible and medicinal species are of great interest for their commercial value. Medicinal mushrooms such as *Ganoderma lucidum* (Curt.: Fr.) P. Karst possess useful bioactive substances for the treatment of various diseases. Commonly the cultivation of the fungus is carried out on the trunk, to obtain the fruiting body, for this reason, the objective of this work was to incorporate lignocellulosic material from pine, oak and walnut trees, adding it as a supplement to commercial culture

media. AEM, ADS and PDA, to study mycelial growth and determine the effect they cause on the radial growth of the mycelium. With this, it is possible to determine the adaptability of the fungus to the lignocellulosic material of study, for the data analysis the logistic model was implementer to calculate the maximum growth speed (Vmax), time to reach the maximum speed ($_{tmax)}$ and the adaptation time from the strain to the middle (t_{lat}). It were found that for the PDA medium supplemented with walnut, the Vmax was 3.04 cmh-1, with an adaptation period of 36.07 h and a t_{max} of 136.92 h., while the lower Vmax was recorded in AEM medium supplemented with oak.

Key words: Ganoderma, parameters, radial growth, enrichment

Introducción

Los hongos basidiomicetos son de gran interés comercial por las distintas propiedades que tienen, principalmente las especies comestibles y medicinales. Estas últimas contienen una gran cantidad de sustancias bioactivas como los polisacáridos y ácidos nucleicos que le dan los efectos medicinales al estimular el sistema inmune y antioxidante o los triterpenos que poseen actividad anticancerígena (Arce-Torrez, et al., 2020). El hongo *Ganoderma lucidum* (Curt.: Fr.) P. Karst es una especie causante de pudrición blanca en la madera, pertenece a la clase de hongos basidiomicetos, de la familia Ganodermataceae del orden Poliporales (Hapuarachchi et al., 2020). Las propiedades medicinales de G. lucidum son muy variadas, actualmente muchas personas lo consumen para la prevención y tratamiento de enfermedades que requieren de un sistema inmune balanceado. Entre sus efectos medicinales están: los antitumorales, antiinflamatorios, inmunomoduladores, actividad antidiabética, antibiótica y antiviral (Hapuarachchi et al., 2020). Por esta razón, G. lucidum es una especie con gran potencial para el desarrollo de medicamentos, lo que le da valor económico. La fermentación en medio solido es el método tradicional para el cultivo de hongos basidiomicetos y es posible utilizar casi cualquier residuo orgánico como sustrato, por lo que el cultivo de hongos comestibles y medicinales es una gran alternativa en el tratamiento de residuos de distintas industrias (Ibarra, 2019).

Debido a que este hongo se cultiva principalmente en residuos con un alto contenido de lignina se decidió añadir madera de encino y nogal como suplemento debido a que G. lucidum se puede encontrar de manera natural creciendo en este tipo de árboles, mientras que es menos frecuente encontrarlo en especies coníferas. Por consiguiente, es necesario realizar estudios para determinar los parámetros cinéticos de crecimiento que permitan inferir el grado de aceptabilidad del hongo al sustrato, para ello, los modelos matemáticos como el modelo logístico son utilizados para describir el crecimiento poblacional respecto al tiempo en distintos sistemas biológicos, esto se representa a través de una curva de crecimiento que es una representación logarítmica del número de individuos. En esta curva por lo regular se encuentran tres fases: la fase de adaptación o de latencia, la fase de crecimiento exponencial que es donde se calcula la Vmax de crecimiento (Garre et al., 2016) y la fase estacionaria que ocurre cuando los nutrientes en el medio no son suficientes para que el microorganismo pueda reproducirse (Izquierdo y Ramírez et al., 2019).

El objetivo de esta investigación fue estudiar el efecto que tiene el tipo de sustrato (material lignocelulósico) en el crecimiento micelial del hongo Ganoderma lucidum.

Metodología

Material biológico

Se utilizó la cepa de Ganoderma lucidum (ITOMG001) de la colección de microorganismos del Laboratorio de Control Ambiental perteneciente al Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica del Instituto Tecnológico de Oaxaca.

Preparación de inóculos

A partir de un cultivo axénico, se procedió a tomar parte del micelio del hongo, colocándolo en medio agar dextrosa Sabouraud (ADS), agar extracto de malta (AEM) y agar dextrosa y papa (PDA) esterilizado a 15 Lb por 15 minutos. La siembra se realizó colocando 1 cm2 del medio de crecimiento del cultivo base y se incubó a 30°C hasta completar el crecimiento en la totalidad del medio.

Preparación de los medios enriquecidos

Los medios de cultivo control ADS, AEM, y PDA fueron enriquecidos adicionando madera de encino (E), nogal (N) y a manera de comparación se utilizó madera de pino (P). La madera utilizada se obtuvo de la parte conocida como albura del tronco de los árboles, dicha madera se cortó en partículas pequeñas de un promedio de 2 mm de longitud. Los medios de cultivo fueron esterilizados a 15 Lb de presión por 15 min, mientras que la madera se esterilizó bajo las mismas condiciones por 40 min. En la zona estéril se adicionó un gramo de madera por cada caja Petri con medio de cultivo antes de que el medio solidificara. Se preparó una caja Petri suplementada con cada una de las maderas y la caja de control por cada medio.

Inoculación de micelio

Se utilizó una pipeta Pasteur de vidrio para cortar un círculo de agar inoculado con Ganoderma lucidum (ITOMG001) y se colocó en el centro de cada caja. Las cajas se incubaron a una temperatura de 28 °C.

Cinética de crecimiento radial

En cada caja Petri suplementada y en los controles, se realizó la siembra del micelio de G. lucidum (ITOMG001) a partir de traspaso, con ayuda de un horadador estéril se colocó un círculo de agar con micelio del inoculo en el centro de cada unidad de estudio. El diámetro del inoculo fue de aproximadamente 8 mm. A partir de las 72 h se comenzó a tomar lectura del diámetro de crecimiento continuando con la lectura cada 24 h.

Determinación de parámetros cinéticos

Los parámetros cinéticos fueron determinados empleando el modelo Logístico de crecimiento radial (ec.1) con base a los datos experimentales. Por otro lado, los parámetros: velocidad máxima de crecimiento micelial (ec.2) se determinó a partir de la pendiente máxima de la tangente a la curva del modelo logístico; el tiempo en alcanzar la velocidad

máxima se calculó con respecto a la ec.3 y tiempo de latencia con la ec.4 como el punto en el que la máxima tangente intercepta el eje horizontal.

$$D(t) = \frac{a}{b + c * e^{-d*t}} \ldots (ec.1)$$

$$v_{max} = \frac{a * b}{4b} \ldots \ (ec.2)$$

$$t_{max} = \frac{\ln\left(\frac{c}{b}\right)}{d} \ldots (ec.3)$$

$$t_{lat} = \frac{\ln\left(\frac{c}{b}\right) - 2}{d} \ldots (ec.4)$$

Resultados y discusión

Con respecto al análisis de los datos experimentales en correlación con el modelo, podemos observar que los mejores medios de crecimiento fueron AEM (Figura 1) y PDA (Figura 2), concordando con lo reportado por Reyes et al. (2019) en estudios con *Lentinula edodes* (Shiitake). No obstante, se obtuvo variabilidad en los valores calculados para T_{max} y T_{lat} (Tabla 1), con respecto al medio AEM se observó en el control una T_{max} de 129.5 h y una T_{lat} de 15.68 h, mientras que al suplementar el medio con encino, se presentó una disminución con valores de T_{max} de 95.6 h y una T_{lat} de 10.03 h, respectivamente. Al comparar las figuras 1 y 2 a las 96 h se observa disminución en la velocidad de crecimiento en el medio AEM (Figura 1), lo que sugiere que se aproxima la etapa de crecimiento estacionario, en el medio PDA se mantiene una colonización constante reportándose un diámetro de crecimiento de 6.3 cm a las 168 h, en contraste a lo observado por Quintana et al. (2018) en cepas de Pleurotus ostreatus, reportando un diámetro de crecimiento de 7.8 cm a las 168 h. En los medios PDA enriquecidos se reportó una disminución de T_{max} y T_{lat}, con excepción del nogal donde se presentaron valores de 136.9 y 36.07 respectivamente.

Por otro lado, es importante destacar que al suplementar los medios con materiales lignocelulósicos, se observó que favorecen el crecimiento del hongo, esto quiere decir que el hongo G. lucidum estudiado es capaz de producir enzimas celulolíticas y lignolíticas, para acceder a la celulosa y consumirla en forma de D-glucosa (Cerda, 2016). En las figuras 1, 2 y 3 podemos notar la diferencia entre el crecimiento en las medios enriquecidas principalmente con encino y nogal, especialmente en los medios ADS y PDA donde a las 160 h se reportó un diámetro de crecimiento entre 6 y 7 cm, mientras que el medio de control y con pino solo alcanzo 3 cm esto en el medio ADS, mientras que, en PDA a las 160 h para encino y nogal se obtuvo un diámetro mayor a 8 cm, mayor que el medio de control con 6 cm de diámetro y por último en pino con un diámetro inferior a 5 cm. Coello-Loor et al. (2017) reportaron un mayor crecimiento de Pleurotus spp. en PDA con enriquecimiento con cascarilla de arroz (CaPDA) y la combinación de cascarilla de arroz y maracuyá (CaCmPDA). Los datos obtenidos con el modelo logístico de acuerdo a las ecuaciones (2), (3) y (4) se muestran en la tabla 1. Como podemos observar la V_{max} de crecimiento en el medio PDA aumento al suplementar el medio con nogal (0.302 cmh-1), mientras que en los medio ADS y AEM suplementados con nogal no superaron los 0.2 cmh^{-1}.

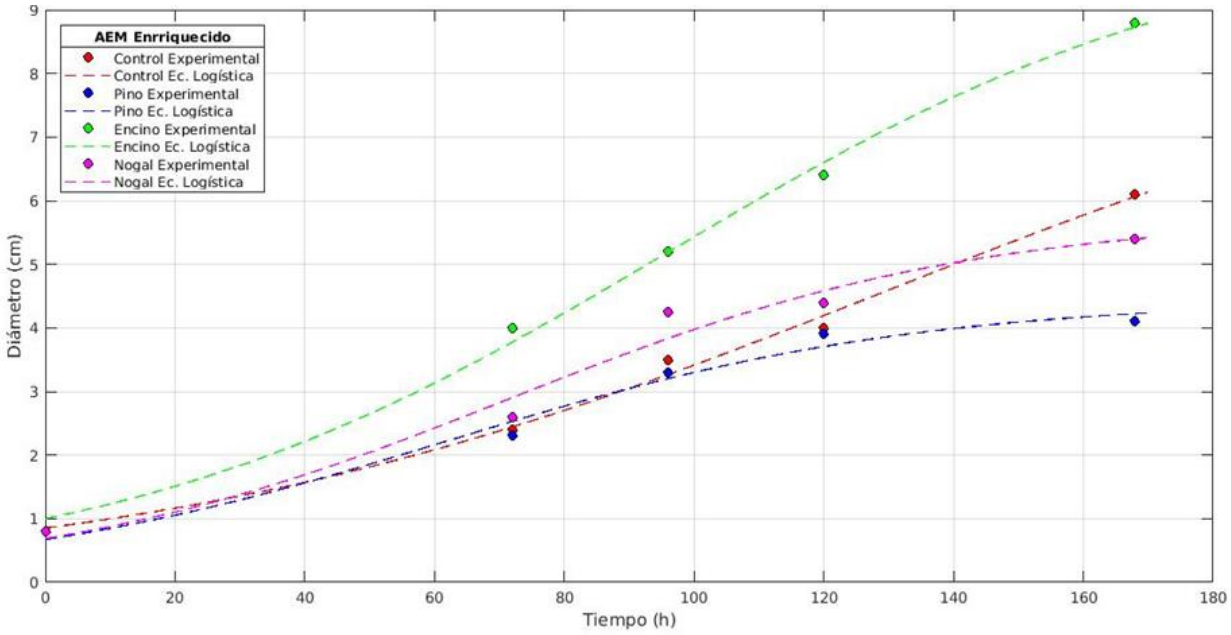


Figura 1. Comparativa de crecimiento micelial radial de Ganoderma lucidum (ITOMG001) en medio AEM enriquecido.

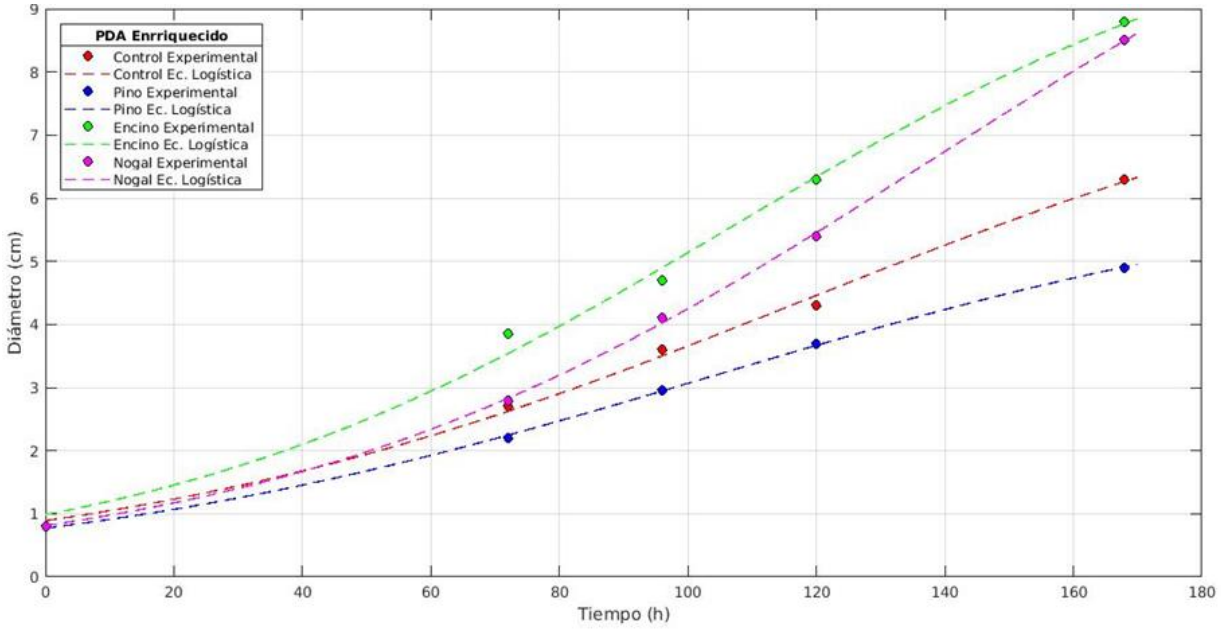


Figura 2. Comparativa de crecimiento micelial radial de Ganoderma lucidum (ITOMG001) en medio PDA enriquecido.

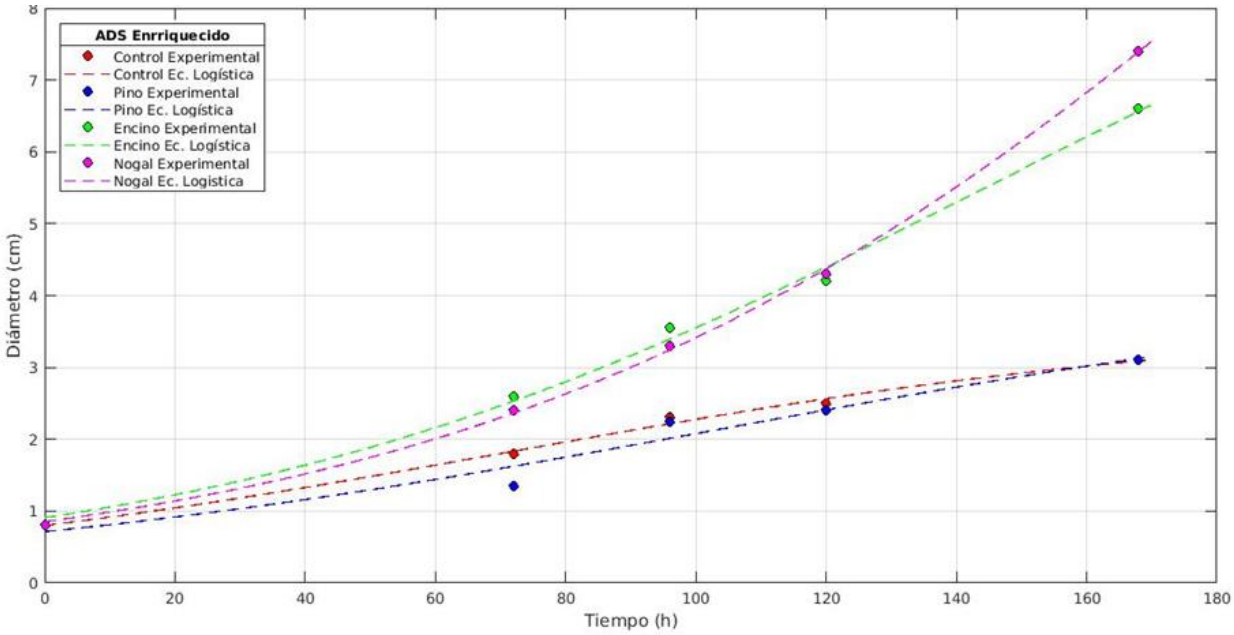


Figura 3. Comparativa de crecimiento micelial radial de *Ganoderma lucidum* (ITOMG001) en medio ADS enriquecido.

Tabla 1. Parámetros cinéticos con respecto al modelo Logístico de crecimiento radial en medio enriquecido

Medio enriquecido	Parámetros cinéticos			
	V_{max}	T_{max}	T_{lat}	R^2
	AEM			
Control	0.2064	129.5175428	15.68715004	0.9936
Pino	0.16395	61.95218243	-9.88689803	0.9822
Encino	0.09685	95.65036565	10.0339273	0.9961
Nogal	0.1543	71.38154369	-0.07254705	0.9762
	PDA			
Control	0.25175	117.9116033	9.627899968	0.9969
Pino	0.189275	103.466248	-1.19099952	0.9996
Encino	0.14355	106.5217401	14.8627117	0.9951
Nogal	0.302	136.9279162	36.07062927	0.9997
	ADS			
Control	0.18165	71.11855614	-41.2409944	0.9985
Pino	0.221	103.4472088	-25.3357918	0.9575
Encino	0.14615	144.0950402	24.33456118	0.9956
Nogal	0.198875	205.6175227	74.55592377	0.9995

Por otra parte, en los medios de control la menor V_{max} de crecimiento se observó en ADS (0.18165 cmh^{-1}), mientras que AEM y PDA lograron una velocidad de crecimiento de 0.2064

cmh^{-1} y 0.25175 cmh^{-1}, respectivamente. Sin embargo, presentó una mayor velocidad de crecimiento en medio AEM con respecto a lo reportado por Valenzuela-Cobos *et al.* (2020) con *P. ostreatus* en el mismo medio obtuvo una V_{max} de crecimiento de 0.048 cmh^{-1} (cepa PO) y con *L. edodes* reporto una V_{max} de 0.01153 cmh^{-1}(cepa LC). En contraste con lo reportado por Reyes *et al.* (2019) para *L. edodes* (cepa ITO-03) una V_{max} de 0.0115 cmh^{-1} y 0.0117 cmh^{-1} en PDA y AEM respectivamente. Por lo que de acuerdo con estos datos *Ganoderma lucidum* presenta una velocidad de crecimiento mayor a *L. edodes* y *P. ostreatus*.

Trabajo a futuro

Se plantea realizar cinéticas de fermentación sumergida en agitación a 120 rpm en distintos medios para determinar biomasa (métodos gravimétricos) y análisis de proteína (análisis Bradford), con el fin de definir el uso de esta biomasa como un producto nutracéutico.

Conclusiones

Fue posible comprobar un efecto positivo en el crecimiento micelial al suplementar el medio con los diferentes sustratos. Si bien en los datos de la tabla 1 se puede ver que la máxima velocidad de crecimiento en los medios suplementadas no siempre supero la obtenida en el control, de la misma manera, el tiempo en alcanzar la velocidad máxima y el periodo de latencia disminuyeron en la mayoría de los casos, mientras que, los medios suplementadas alcanzaron un diámetro de crecimiento mayor al del control. *G. lucidum* presentó mayor crecimiento y presencia de micelio vigoroso en los medios suplementados con material lignocelulósico, por lo tanto, la incorporación de estos resulta ventajosa para la propagación y conservación de cepas de interés comercial.

La especie vegetal que se utilizó en el enriquecimiento tuvo distintos efectos en los medios de cultivo, el nogal (*Juglans regia* L.***)*** aumentó considerablemente la V_{max} en el medio PDA, de manera análoga, aumento la t_{max} y T_{lat}. Mientras que en el medio AEM el nogal no incremento la V_{max} respecto al control, al igual que, disminuyo la t_{max} y T_{lat}. Por consiguiente, es importante considerar la relación existente entre el crecimiento y el tipo de material lignocelulósico empleado como fuente de enriquecimiento.

Referencias bibliográficas

Arce-Torres, L. F., I. Gómez-Díaz., M. Monge-Artavia., & J. Prado-Cordero. 2020. *Metabolitos secundarios con actividad medicinal extraídos de hongos provenientes de Centroamérica.* Revista Tecnología En Marcha. 33(3), 80–89.

Cerda, M. L. 2016. Enzimas modificadoras de la pared celular vegetal. Celulasas de interés biotecnológico papelero. *Tesis de doctorado*. Facultad de Biología. Universidad de Barcelona.

Coello-Loor, C. D., J.H. Avellaneda- Cevallos., J. H., A.E. Barrera- Álvarez., A. E., M.M. Peña-Galeas., P.F. Yépes- Macías. & E. R. Racines- Macías. 2017. *Evaluación del crecimiento y producción de biomasa de dos cepas del género Pleurotus spp., cultivadas en un medio agar con diferentes sustratos*. Ciencia y tecnología. 10 (2), 33-39.

Garre, P.A., J.A.L. Egea. & P.E. Fernández. 2016. Modelos matemáticos para la descripción del crecimiento de microorganismos patógenos en alimentos. Anuario de Jóvenes Investigadores. 9, 160-163.

Hapuarachchi, K.K., C. R. Cheng., T. Wen., R. T. Jeewon. & P. Kakumyan. 2017. Therapeutic potential of Ganoderma species: Insights into its use as traditional medicine. Mycosphere. 8(10), 1653-1694.

Ibarra, A.I. 2019. *Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el cultivo de hongos Basidiomicetos. Tesis de licenciatura*. Universidad Abierta y a la Distancia de México.

Izquierdo, P. M. I. & C.L.A. Ramírez. 2019. *Determinación del efecto del tipo de sustrato y tipo de fuente de carbono, en la cinética de crecimiento del hongo Aspergillus oryzae en medio sólido. Tesis de licenciatura*. Universidad Nacional del Centro del Perú.

Quintana, Z. J., C.O. Moncayo., C.J. Vera. & A.A. Álvarez. 2018. *Crecimiento radial de hongos ostras (Pleurotus ostreatus y Pleurotus sapidus) sobre residuos sólidos de soya, arroz y tusa de maíz*. CONAMTI 2018. 5 (14), 77-79.

Reyes, R.E., S.C. López. & C.F.J. Palma. 2019. *Modelo logístico de crecimiento in vitro de Shiitake (Lentinula edodes) en diferentes medios de cultivo*. III Congreso Nacional de Investigaciones microbiológicas. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Valenzuela- Cobos. J.D., R.O. Rodríguez-Grimón, G. R., Jara, B. M., Grijalva, E. A., Zied, M.L. Jara-Bastidas., A. Grijalva-Endara., D.C. Zied., M.E. Garín-Aguilar., & G. Valencia del Toro. 2020. *Modelamiento de crecimiento micelial de cepas parentales híbridas y reconstituidas de Pleurotus y Lentinula*. Revista Mexicana de Ingeniería Química. 19 (1), 165-174

ISSN: 2594-0171
Contribución al Conocimiento Científico y Tecnológico en Oaxaca
Año 5, Vol. 5, No. 5, 27 de Septiembre, 2021

Artículo

Caracterización preliminar de suelos salinos en presencia de *Agave potatorum* zucc

Hernández Canseco, Jessie[1]; Bautista Cruz, Martha Angélica[2]; Sánchez Mendoza, Saúl[3]
[1]Estudiante del Programa de Doctorado en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales. Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR-Oaxaca, Hornos 1003, Xoxocotlán, Oaxaca, México, 71230.
[2]Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR-Oaxaca, Hornos 1003, Xoxocotlán, Oaxaca, México.
[3]NovaUniversitas, Carretera Oaxaca a Puerto Ángel km 35.5. 71510 Ocotlán de Morelos, Oaxaca, México.

*Autor de correspondencia: jhernandezc2014@alumno.ipn.mx

Recibido: 31 de julio de 2021
Aceptado: 6 de septiembre de 2021
Publicado en línea: 27 de septiembre de 2021

Resumen

La salinidad y la sequía se consideran los factores abióticos mayormente responsables de la disminución del rendimiento de los cultivos. Una alternativa para mejorar la resistencia de los cultivos y la fertilidad del suelo es el uso de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR, por sus siglas en inglés). El objetivo de este trabajo fue identificar suelos salinos en algunas localidades del Valle del Estado de Oaxaca, México con potencial para aislar PGPR resistentes a la salinidad de la rizósfera de *A. potatorum*. Para ello, se recorrieron localidades donde crece *A. potatorum*, se midió la conductividad eléctrica del suelo *in situ* con un conductímetro marca Hanna, y se colectaron muestras de suelo rizosférico que se llevaron al laboratorio y almacenaron en refrigeración a 4 ºC. Se determinaron algunas propiedades físicas y químicas de la fertilidad del suelo que presentó la mayor conductividad eléctrica. La conductividad eléctrica promedio fluctuó de 0.16 a 1.53 dS m^{-1}. Mediante el análisis de fertilidad se confirmó que el suelo de la localidad San Pablo Villa de Mitla, es ligeramente salino de acuerdo con la clasificación de la NOM-021-RECNAT-2000, así mismo, se determinó que se trata de un suelo moderadamente ácido, con contenido moderadamente bajo de materia orgánica, fósforo disponible, hierro y manganeso; algunos micronutrientes como el zinc, cobre y boro se encontraron en cantidades muy bajas. Con base en lo reportado en la literatura, la rizósfera de las plantas de *A. potatorum* analizada en este estudio, podría albergar halobacterias promotoras del crecimiento vegetal.

Palabras clave: Bacterias halotolerantes, salinidad, agave silvestre, sequía.

Abstract

Salinity and drought are considered the abiotic factors most responsible for the decrease in crop yield. An alternative to improve crop resistance and soil fertility is the use of plant

growth promoting rhizobacteria (PGPR). The main aim of this work was to identify saline soils in some localities of the Valley of the State of Oaxaca, Mexico with the potential to isolate salinity resistant PGPR from the rhizosphere of *A. potatorum*. Localities where *A. potatorum* grows were recorded. The electrical conductivity of the soil was measured *in situ* with a Hanna brand conductivity meter, and rhizospheric soil samples were collected wich were taken to the laboratory and stored under refrigeration at 4 ºC. Some physical and chemical properties of soil fertility were determined for the site that presented the highest electrical conductivity. The average electrical conductivity in the soil fluctuated from 0.16 to 1.53 dS m^{-1}. Through the fertility analysis it was confirmed that the soil of the San Pablo Villa de Mitla locality is slightly saline according to the classification of NOM-021-RECNAT-2000. Likewise, it was determined that it is a moderately acidic soil, with moderately low content of organic matter and nutrients such as phosphorus, iron and manganese; some micronutrients such as zinc, copper and boron were found in very low amounts. Based on what has been reported in the literature, the rhizosphere of *A. potatorum* plants analyzed in this study could harbor plant growth promoting halobacteria.

Key words: Halotolerant bacteria, salinity, wild agave, drought stress.

Introducción

En la actualidad, uno de los retos más importantes a nivel mundial es producir 50% más de alimentos, forraje y biocombustible de los que se producían en 2012 para satisfacer la demanda de una población creciente, la cual se estima que alcance los 9,700 billones de personas para el año 2050 (FAO, 2017).

Factores abióticos como la salinidad, sequía, altas y bajas temperaturas y la toxicidad por metales pesados, impactan negativamente en la productividad de los cultivos (Kulkarni *et al*., 2020) y son causantes de la pérdida del 50% de la producción agrícola (Sangiorgio *et al*., 2020). La salinidad y la sequía son considerados los principales tipos de estrés abiótico que afectan severamente el crecimiento de los cultivos en las zonas áridas y semiáridas (Zhou *et al*., 2017; Ayangbenro y Babalola, 2020). La misma actividad agrícola propicia la salinización de los suelos mediante el riego con agua de mala calidad, sistemas de cultivo inapropiados y uso excesivo de fertilizantes minerales convencionales y plaguicidas (Etesami y Glick, 2020; Abbas *et al*., 2019).

Aunque las zonas áridas y semiáridas son regiones poco productivas, su uso agrícola en el futuro podría ayudar a enfrentar la continua pérdida de suelos fértiles en el planeta, el cual presenta una tasa de reducción del 1 al 2% anual de suelos cultivables (Etesami y Maheshwari, 2018). Debido a lo anterior, es de crucial importancia desarrollar nuevas tecnologías y cultivos resistentes a estos tipos de estrés.

Una alternativa para mejorar la resistencia de los cultivos y la fertilidad del suelo en estas regiones, es el uso de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (Plant Growth Promoting Rhizobacteria o PGPR por sus siglas en inglés), las cuales tienen un gran potencial para la agricultura ya que incrementan la producción de los cultivos y protegen a las plantas contra distintas presiones ambientales que incluyen heladas, salinidad, sequía y estrés por la presencia de contaminantes xenobióticos (Pathania *et al*., 2020).

Durante las últimas dos décadas, una estrategia enfocada a la sustitución parcial o total de los insumos agrícolas sintéticos ha sido la aplicación de inoculantes bacterianos elaborados a partir de una, dos o más especies de bacterias tipo PGPR con características metabólicas de interés (Valenzuela-Ruiz *et al*., 2018; Baez-Rogelio *et al.*, 2017). La selección de bacterias tipo PGPR con habilidades de tolerancia a distintos tipos de estrés ha sido sugerida previamente como un aspecto relevante para la selección de bacterias que integran un inoculante pues así se garantiza su viabilidad cuando son aplicadas al campo (Etesami y Maheshwari, 2018).

Las halobacterias son microorganismos que emplean una variedad de estrategias para crecer y sobrevivir en ambientes salinos. De acuerdo al grado de tolerancia a la salinidad se clasifican en halotolerantes o halófilas. Las primeras pueden sobrevivir en medios hasta con un 25% de NaCl o en ausencia de este, mientras que, las halófilas necesitan sal para su crecimiento y se clasifican en: ligeramente halófilas (1 a 3% NaCl), halófilas moderadas (3 a 15% NaCl) y halófilas extremas (15 a 25% NaCl) (Margesin y Schinner, 2001).

Por otro lado, las plantas de ambientes áridos y semi-áridos han desarrollado varias estrategias adaptativas, como un sistema radicular extensivo y profundo que les posibilita explorar el suelo a una profundidad mayor. Otras, como los agaves y cactus tienen un metabolismo ácido crasuláceo que les permite fijar dióxido de carbono durante la noche para prevenir una alta evaporación durante el día (Ehleringer *et al*., 1993). Un factor clave por el cual las plantas se pueden adaptar a estas condiciones es supuestamente su microbioma (de Zelicourt *et al*., 2013; Ortiz *et al*., 2015).

Algunos estudios han demostrado que las plantas adaptadas a ambientes salinos o desérticos, son una fuente útil de bacterias tolerantes a la salinidad y la sequía (Alishahi *et al*., 2020; Kavamura *et al*., 2013).

En el Estado de Oaxaca (México) se utilizan alrededor de nueve especies de agave para la producción de mezcal, de las cuales *Agave angustifolia Haw*. es la de mayor demanda y la única que se cultiva de forma significativa en suelos semiáridos (OEIDRUS-SAGARPA, 2011). Las otras ocho especies de agave son colectadas de poblaciones silvestres o semi-cultivadas principalmente en cercos vivos con poco o nulo manejo cultural. Tal es el caso del *A. potatorum* Zucc, coloquialmente conocido como maguey papalomé o maguey tobalá, una especie de que se usa para elaborar un mezcal muy demandado (Sánchez-López, 2005) que se distingue por su alta calidad debido a la proporción de compuestos aromáticos volátiles que contiene (Vera *et al*., 2009). Al ser una especie silvestre, o cultivada en extensiones pequeñas, no existe mucha información referente a su manejo agronómico, además, poco se conoce sobre las comunidades bacterianas halotolerantes asociadas a la rizósfera de las plantas del género *Agave*.
El objetivo de este trabajo fue identificar suelos salinos, donde crezca *A. potatorum* con potencial para aislar bacterias resistentes a salinidad asociadas a las raíces de este agave, útiles en la elaboración de inoculantes que en un futuro contribuyan a incrementar la productividad de esta especie de agave.

ISSN: 2594-0171
Contribución al Conocimiento Científico y Tecnológico en Oaxaca
Año 5, Vol. 5, No. 5, 27 de Septiembre, 2021

Materiales y Métodos

En cuatro localidades del estado de Oaxaca: 1) Reserva Ecológica Reyes Mantecón, 2) Santa María Vigallo, Zimatlán, 3) Santiago Matatlán (plantaciones Mezcal Los Danzantes) y 4) San Pablo Villa de Mitla (plantaciones Casa Parador Espadín), se visitaron sitios donde crecen ejemplares de *A. potatorum* silvestre y semicultivado. En cada sitio y cerca de una planta de *A. potatorum*, se midió la conductividad eléctrica (CE) *in situ* con un conductímetro de suelo marca Hanna (Fig. 1), para clasificar el suelo con base en la salinidad de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2002) (Tabla I). Se tomaron 4 submuestras de suelo de aproximadamente 200 g en la rizósfera de 5 plantas de *A. potatorum* a una profundidad de 20 a 25 cm en cada localidad. Posteriormente, las 20 submuestras obtenidas se mezclaron para obtener una muestra compuesta que se almacenó a 4 ºC hasta su análisis en laboratorio.

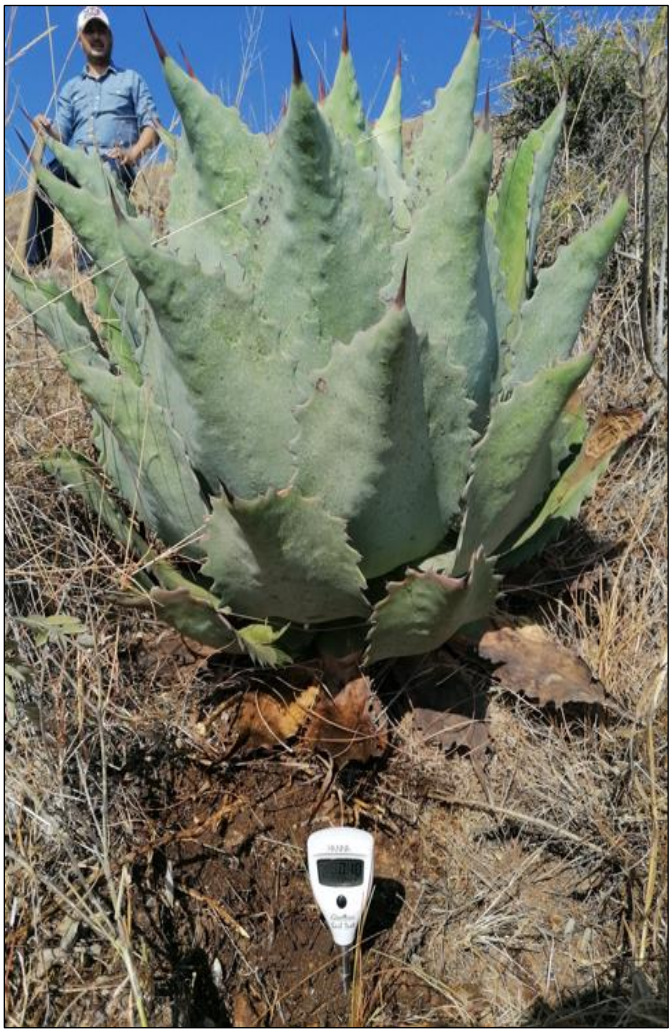


Figura 1. Monitoreo de la conductividad eléctrica *in situ* en la rizósfera de *Agave potatorum*.
Tabla I. Clasificación de suelos de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000.

CE dS m^{-1} a 25°C	Efectos
< 1.0	Efectos despreciables de la salinidad
1.1 - 2.0	Muy ligeramente salino
2.1 - 4.0	Moderadamente salino
4.1 - 8.0	Suelo salino
8.1 - 16.0	Fuertemente salino
> 16.0	Muy fuertemente salino

Una parte de la muestra de suelo en el que se registraron los valores más altos de conductividad eléctrica, se secó al aire, se tamizó por una malla de 2 mm de abertura y se homogeneizó por el método de cuarteo para la determinación de algunas propiedades físicas y químicas como densidad aparente (método de la probeta), textura (método de Bouyoucos), materia orgánica (Walkley y Black), pH (potenciométrico, relación suelo:agua, 1:2), fósforo disponible (Bray) y cationes intercambiables (extracción con acetato de amonio 1N, pH 7.0), según el método establecido en la NOM-021-SEMARNAT-2000 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2002).

El Fe, Zn, Mn, Cu y B se obtuvieron mediante digestión seca y se cuantificaron por espectrometría de emisión atómica por plasma acoplado inductivamente (ICP-AES) (Alcantar-González y Sandoval-Villa, 1999). La determinación del contenido de $N\text{-}NO_3$ se realizó mediante un electrodo selectivo de iones (medidor de iones LAQUA twin).

Resultados y Discusión

La conductividad eléctrica promedio de cada sitio de muestreo se reporta en la Tabla II y fluctuó de 0.16 a 1.53 dS m^{-1}. Tres localidades presentaron niveles despreciables de salinidad, sin embargo, el suelo de la localidad San Pablo Villa de Mitla presentó el valor más alto de CE y de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 se clasificó como ligeramente salino.

Con base en los valores registrados de conductividad eléctrica de los suelos colectados y lo reportado en la literatura sobre la distribución y tolerancia de las halobacterias, se considera probable el hallazgo de halobacterias en la rizósfera de las plantas de *A. potatorum* presentes en las 4 localidades de muestreo, ya que en estudios previos se han aislado e identificado halobacterias en ambientes de diversas partes del mundo que van desde sitios con conductividades eléctricas muy elevadas (168.1 dS m^{-1}) como en los lagos salinos de Romania (Ruginescu *et al*., 2020), hasta suelos donde se desarrollan cultivos sensibles a la salinidad que presentan conductividades eléctricas muy reducidas (0.047 dS m^{-1}) (Sarkar *et al.*, 2018). Incluso, este tipo de bacterias se han aislado de agua dulce como en el Río Ezzu en Nigeria (Agu *et al*., 2017).

Tabla II. Conductividad eléctrica promedio en las localidades de muestreo.

Localidad	CE (dS m^{-1})
Reserva Ecológica Reyes-Mantecón	0.16
Santa María Vigallo-Zimatlán	0.16
Los Danzantes, Santiago Matatlán	0.41
Casa Parador Espadín, San Pablo Villa de Mitla	1.53

Por otro lado, el análisis de las propiedades físicas y químicas del suelo colectado en San Pablo Villa de Mitla, indicó que se trata de un suelo moderadamente ácido, de textura media y bajo en sales (Tabla III). Con un contenido moderadamente bajo de materia orgánica, fósforo disponible, manganeso y hierro, mientras que, el zinc, cobre y boro se encontraron en cantidades muy bajas (Tabla IV).

Tabla III. Propiedades físicas y químicas de un suelo ligeramente salino colectado en la localidad de San Pablo Villa de Mitla, Oaxaca (México).

Propiedad	Valor	Clasificación
Clase textural	Franco	-
Densidad aparente	1.13 g cm^{-3}	-
pH	6.14	Mod. ácido
Salinidad (CE)	1.62 dS m^{-1}	Mediano

Algunos estudios han aislado bacterias muy eficientes en la promoción del crecimiento vegetal en la rizósfera de plantas halófitas o xerófitas que habitan suelos pobremente fértiles o ambientes estresantes (Kumar *et al*., 2019). Kavamura *et al.* (2013) aislaron bacterias PGPR resistentes a sequía de la rizósfera de cactus de regiones semiáridas en Brasil durante la estación de sequía.

Otros estudios han demostrado mejoras significativas en las propiedades de suelos poco fértiles con la aplicación de inoculantes bacterianos (Arora *et al*., 2020), que pueden mejorar significativamente la disponibilidad de nutrientes como N, P, K y Fe en el suelo, generalmente, sin afectar la estructura de la comunidad microbiana ya existente (Chaudhary *et al*., 2020).

Propiedad	Valor
Materia orgánica	1.33 %
P-Bray	16 ppm
K	591 ppm
Ca	2143 ppm
Mg	180 ppm
Na	63.5 ppm
Fe	5.83 ppm
Zn	0.20 ppm
Mn	6.60 ppm
Cu	0.05 ppm
B	0.26 ppm
$N\text{-}NO_3$	26.8 ppm

Figura 2. Fertilidad del suelo colectado en San Pablo Villa de Mitla.

Particularmente, la aplicación de halobacterias promotoras del crecimiento vegetal aisladas de plantas que habitan ambientes salinos, ha incrementado los parámetros fisiológicos y de crecimiento de numerosos cultivos de interés comercial que incluyen a *Oryza sativa* (arroz), *Triticum aestivum* (trigo), *Vigna unguiculata* (L.) (frijol caupí), *Medicago sativa* (alfalfa), *Zea mays* (maíz), *Cuminum cyminum* (comino), *Glycine max* L. (soja), Solanum *lycopersicum* (tomate), *Beta vulgaris* L. (remolacha azucarera), entre otros (Zhou *et al*., 2017; Santos *et al*., 2018; Xion *et al*., 2019; Kearl *et al*., 2019; Yasmin *et al.*, 2020; Desoky *et al.*, 2020; Alishahi *et al.*, 2020; Tirry *et al*., 2021).

Otros estudios reportan incrementos en la tolerancia de algunos cultivos a otros tipos de estrés abiótico como la sequía, la toxicidad por metales pesados y contaminantes agrícolas en suelos salinos con la inoculación de halobacterias PGPR (Kaushal y Wani, 2016b; Al-Mailem *et al*., 2018; Masmoudi *et al*., 2019; Hassan *et al*., 2019).

El estrés debido a la baja fertilidad y a la presencia de salinidad en el suelo colectado en San Pablo Villa de Mitla sugieren que la rizófera de plantas de *A. potatorum* desarrolladas en este sitio puede ser un reservorio importante de halobacterias promotoras del crecimiento vegetal. De hecho, Kumar *et al.* (2019), indicaron que las bacterias aisladas de áreas propensas a estrés se desempeñan mejor en el incremento de la tolerancia de las plantas a condiciones de salinidad, sequía o toxicidad por metales pesados, que aquellas que son aisladas de regiones que no experimentan ningún tipo de estrés.

Conclusiones

La localidad de San Pablo Villa de Mitla en el Estado de Oaxaca, México, presentó suelos ligeramente salinos donde se desarrolla *A. potatorum*. Las propiedades físicas y químicas de este suelo indicaron condiciones deficientes de zinc, cobre y boro, y moderadamente bajas de materia orgánica, fósforo disponible, manganeso y hierro.

Con base en lo reportado en la literatura, la rizósfera de las plantas de *A. potatorum* analizada en este estudio es susceptible de albergar halobacterias promotoras del crecimiento vegetal a partir de las cuales pueden elaborarse inoculantes bacterianos eficientes en la protección de cultivos contra el estrés salino.

Agradecimientos

Este trabajo es financiado por el Instituto Politécnico Nacional a través de los proyectos SIP 20200643 y SIP 20210608. Al CONACYT por la beca para la realización de estudios de posgrado de la primera autora.

Referencias bibliográficas

Abbas, R., S. Rasul, K. Aslam, M. Baber, M. Shahid, F. Mubeen & T. Naqqash. (2019). Halotolerant PGPR: A hope for cultivation of saline soils. *Journal of King Saud University – Science*, 31, 1195-1201. doi.org/10.1016/j.jksus.2019.02.019

Agu, K. C., Nmecha, C. O., Ikedinma, J. C., Awah, N. S., Eneite, H. C., Victor-Aduloju, A. T., Umeoduagu, N., & Onwuatuegwu, J. T. C. (2017). Isolation and Characterization of Halotolerant Bacteria from Ezzu River Amansea, Awka, Anambra State. *Bioengineering and Bioscience*, 5 (4), 86-90. https://doi.org/10.13189/bb.2017.050404

Alcantar, G. G., & Sandoval, V. M. (1999). Manual de análisis químico de tejido vegetal, guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación. Instituto de Recursos Naturales Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México.

Alishahi, F., Alikhani, H. A., Khoshkholgh-Sima, N. A., & Etesami, H. (2020). Mining the roots of various species of the halophyte Suaeda for halotolerant nitrogen-fixing endophytic bacteria with the potential for promoting plant growth. *International Microbiology*, 23 (3), 415-427. https://doi.org/10.1007/s10123-019-00115-y

Al-Mailem, D. M., Eliyas, M., & Radwan, S. S. (2018). Ferric sulfate and proline enhance heavy-metal tolerance of halophilic/halotolerant soil microorganisms and their bioremediation potential for spilled-oil under multiple stresses. *Frontiers in Microbiology*, 9 (394), 1-12. https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00394

Arora, K. N., Fatima, T., Mishra, J., Mishra, I., Verma, S., Verma, R., Verma, M., Bhattacharya, A., Verma, P., Mishra, P., & Bharti, C. (2020). Halo-tolerant plant growth promoting rhizobacteria for improving productivity and remediation of saline soils. *Journal of Advanced Research*, *26*, 69-82. https://doi.org/10.1016/j.jare.2020.07.003

Ayangbenro A. & Babalola O. (2020). Reclamation of arid and semi-arid soils: The role of plant growth-promoting archaea and bacteria. *Current Plant Biology*, 100173. 10.1016/j.cpb.2020.100173

Baez-Rogelio, A., Morales-García Y. E., Quintero-Hernández, V. & J. Muñoz-Rojas. (2017). Next Generation of Microbial Inoculants for Agriculture and Bioremediation. *Microbial Biotechnology* 10 (1), 19-21. doi:10.1111/1751-7915.12448

Chaudhary, D. R., Rathore, A. P., & Sharma, S. (2020). Effect of halotolerant plant growth promoting rhizobacteria inoculation on soil microbial community structure and nutrients. *Applied Soil Ecology*, *150*, 103461. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103461

Desoky, E. S. M., Saad, A. M., El-Saadony, M. T., Merwad, A. R. M., & Rady, M. M. (2020). Plant growth-promoting rhizobacteria: Potential improvement in antioxidant defense system and suppression of oxidative stress for alleviating salinity stress in *Triticum aestivum* (L.) plants. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 30, 101878. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101878

de Zelicourt, A., Al-Yousif, M., Hirt, H. (2013). Rhizosphere microbes as essential partners for plant stress tolerance. *Molecular Plant*, 6 (2), 242-245.

Ehleringer J, Monson R. (1993). Evolutionary and ecological aspects of photosynthetic pathway variation. *Annual Review of Ecology Systematics*, 24, 411-39.

Etesami, H. & B. R. Glick. (2020). Halotolerant plant growth-promoting bacteria: Prospects for alleviating salinity stress in plants. *Enviromental and Experimental Botany*, 178 (2020), 104124.

Etesami, H., & Maheshwari, D. K. (2018). Use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) with multiple plant growth promoting traits in stress agriculture: Action mechanisms and future prospects. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 156 (January), 225-246. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.03.013

FAO. (2017). *The future of food and agriculture – Trends and challenges*. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, Italy.

Hassan, H. A., Dawah, S. E., & El-Sheekh, M. M. (2019). Monitoring the degradation capability of novel haloalkaliphilic tributyltin chloride (TBTCl) resistant bacteria from butyltin-polluted site. *Revista Argentina de Microbiología*, 51 (1), 39-46. https://doi.org/10.1016/j.ram.2017.12.002

Kaushal, M., & Wani, S. P. (2016b). Rhizobacterial-plant interactions: Strategies ensuring plant growth promotion under drought and salinity stress. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 231, 68-78. https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.031

Kavamura, V. N., Santos, S. N., Silva, J. L. da, Parma, M. M., Ávila, L. A., Visconti, A., Zucchi, T. D., Taketani, R. G., Andreote, F. D., & Melo, I. S. de. (2013). Screening of Brazilian cacti rhizobacteria for plant growth promotion under drought. *Microbiological Research*, *168* (4), 183-191. https://doi.org/10.1016/j.micres.2012.12.002

Kearl, J., McNary, C., Lowman, J. S., Mei, C., Aanderud, Z. T., Smith, S. T., West, J., Colton, E., Hamson, M., & Nielsen, B. L. (2019). Salt-tolerant halophyte rhizosphere bacteria stimulate growth of alfalfa in salty soil. *Frontiers in Microbiology*, 10 (1849), 1-13. https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01849

Kulkarni, J., Sharma, S., Srivastava, A. K., & Penna, S. (2020). Halotolerant microbes and their applications in sustainable agriculture. *In* Physiological and Biotechnological Aspects of Extremophiles. *INC*. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818322-9.00004-6

Kumar, A., Patel, J. S., Meena, V. S., & Srivastava, R. (2019). Recent advances of PGPR based approaches for stress tolerance in plants for sustainable agriculture. *Biocatalysis*

and Agricultural Biotechnology, 20 (2019), 101271. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101271

Margesin, R., & Schinner, F. (2001). Potential of halotolerant and halophilic microorganisms for biotechnology. *Extremophiles*, 5 (2), 73-83. https://doi.org/10.1007/s007920100184

Masmoudi, F., Abdelmalek, N., Tounsi, S., Dunlap, C. A., & Trigui, M. (2019). Abiotic stress resistance, plant growth promotion and antifungal potential of halotolerant bacteria from a Tunisian solar saltern. *Microbiological Research*, 229, 126331. https://doi.org/10.1016/j.micres.2019.126331

OEIDRUS-SAGARPA (Oficina Estatal de Información para el Desarrollo Rural Sustentable de Oaxaca-Secretaria de Agrícultura Ganaderia, Desarrollo Rural Pesca y Alimentación). (2011). Maguey mezcal, regiones productoras de Oaxaca. 2011. http://www.oeidrus-oaxaca.gob.mx/ biblioteca.html. (Consulta: octubre 15, 2009).

Ortiz, N., Armada, E., Duque, E., Roldan, A., Azcon, R. (2015). Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi and/or bacteria to enhancing plant drought tolerance under natural soil conditions: effectiveness of autochthonous or allochthonous strains. *Journal of Plant Physiology*, 174, 87-96.

Pathania, P., Rajta, A., Singh, P. C., & Bhatia, R. (2020). Role of plant growth-promoting bacteria in sustainable agriculture. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 30 (July), 101842. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101842

Ruginescu, R., Gomoiu, I., Popescu, O., Cojoc, R., Neagu, S., Lucaci, I., Batrinescu-Moteau, C., & Enache, M. (2020). Bioprospecting for novel halophilic and halotolerant sources of hydrolytic enzymes in brackish, saline and hypersaline lakes of Romania. *Microorganisms*, 8 (12), 1-16. https://doi.org/10.3390/microorganisms8121903

Sánchez, L. A. (2005). Oaxaca, tierra de maguey y mezcal. 2ª Edición. Instituto Tecnológico de Oaxaca. Oaxaca, México, 235 p.

Santos, A. de A., Silveira, J. A. G. da, Bonifacio, A., Rodrigues, A. C., & Figueiredo, M. do V. B. (2018). Antioxidant response of cowpea co-inoculated with plant growth-promoting bacteria under salt stress. *Brazilian Journal of Microbiology*, 49 (3), 513-521. https://doi.org/10.1016/j.bjm.2017.12.003

Sangiorgio, D., Cellini, A., Donati, I., Pastore, C., Onofrietti, C., & Spinelli, F. (2020). Facing climate change: Application of microbial biostimulants to mitigate stress in horticultural crops. *Agronomy*, *10* (6), 794. https://doi.org/10.3390/agronomy10060794

Sarkar, A., Ghosh, P. K., Pramanik, K., Mitra, S., Soren, T., Pandey, S., Mondal, M. H., & Maiti, T. K. (2018). A halotolerant *Enterobacter* sp. displaying ACC deaminase activity promotes rice seedling growth under salt stress. *Research in Microbiology*, 169 (1), 20-32. https://doi.org/10.1016/j.resmic.2017.08.005

Tirry, N., Kouchou, A., Laghmari, G., Lemjereb, M., Hnadi, H., Amrani, K., Bahafid, W., & El Ghachtouli, N. (2021). Improved salinity tolerance of *Medicago sativa* and soil enzyme activities by PGPR. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 31, 101914. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.101914

Valenzuela-Ruiz, V., M. Ayala-Zepeda, G. Luis Arellano-Wattenbarger, F.I. Parra-Cota, J. García-pereyra, G. N. Aviña-Martinez y S. De los Santos-Villalobos. (2018). Las colecciones microbianas y su potencial contribución a la seguridad alimentaria actual y futura. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 14 (1), 18-25.

Vera G. A. M., P. A. Santiago G., M. G. López. (2009). Compuestos volátiles aromáticos generados durante la elaboración de mezcal de *Agave angustifolia* y *Agave potatorum*. *Revista Fito- tecnia mexicana*, 32, 273-279.

Xiong, Y. W., Gong, Y., Li, X. W., Chen, P., Ju, X. Y., Zhang, C. M., Yuan, B., Lv, Z. P., Xing, K., & Qin, S. (2019). Enhancement of growth and salt tolerance of tomato seedlings by a natural halotolerant actinobacterium *Glutamicibacter halophytocola* KLBMP 5180 isolated from a coastal halophyte. *Plant and Soil*, 445 (12), 307-322. https://doi.org/10.1007/s11104-019-04310-8

Yasmin, H., Naeem, S., Bakhtawar, M., Jabeen, Z., Nosheen, A., Naz, R., Keyani, R., Mumtaz, S., & Hassan, M. N. (2020). Halotolerant rhizobacteria *Pseudomonas pseudoalcaligenes* and *Bacillus subtilis* mediate systemic tolerance in hydroponically grown soybean (*Glycine max* L.) against salinity stress. *PLoS ONE*, 15 (4), 1-26. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231348

Zhou, N., Zho, S., & Tian, C. Y. (2017). Effect of halotolerant rhizobacteria isolated from halophytes on the growth of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) under salt stress. *FEMS Microbiology Letters*, *364* (11), 1-8. https://doi.org/10.1093/femsle/fnx091

ISSN: 2594-0171
Contribución al Conocimiento Científico y Tecnológico en Oaxaca
Año 5, Vol. 5, No. 5, 27 de Septiembre, 2021

Artículo

Fenología y estado poblacional de *Echeveria nodulosa* en un bosque estacional en Oaxaca

Ramírez Martínez, Adriana[1]; Mondragón Chaparro, Demetria[1]
[1]Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR-Oaxaca, Hornos 1003, Xoxocotlán, Oaxaca, México.

*Autor de correspondencia: dmondragon@alumno.ipn.mx

Recibido: 31 de julio de 2021
Aceptado: 6 de septiembre de 2021
Publicado en línea: 27 de septiembre de 2021

Resumen

Conocer aspectos básicos de la ecología de una especie es fundamental para su conservación, por ello, evaluamos la fenología reproductiva y el estado de la población de *Echeveria nodulosa*, especie endémica de México y con valor ornamental, en un bosque de encino en Oaxaca. En enero de 2018, se marcaron siete individuos epífitos adultos y se monitorearon mensualmente hasta diciembre de 2020, las fenofases analizadas fueron formación de inflorescencia, floración, fructificación y liberación de semillas, se determinó fecha de inicio, fecha máxima actividad, frecuencia y duración. Para las estructuras poblacionales se marcaron los individuos presentes durante 2018 y 2019, los cuales se clasificaron en categorías de tamaño y se determinó el tipo de estructura. La formación de inflorescencias comenzó en julio, con un máximo de actividad en agosto; la floración en septiembre con un máximo de actividad en octubre, la formación y maduración de los frutos fue de diciembre a marzo y en este último mes también se comenzaron a liberar las primeras semillas con una máxima actividad en abril.

Todas las fenofases fueron anuales con duración intermedia. Durante 2018 se encontraron 23 individuos, que presentaron una estructura poblacional tipo I (principalmente plántulas e infantiles), en tanto que en 2019 se encontraron 10 individuos con una estructura tipo II (principalmente juveniles y adultos), al parecer como resultado de variación interanual de la precipitación. Si bien nuestro estudio amplió el conocimiento de la ecología de esta especie, es necesario realizar estudios para entender más profundamente, los mecanismos que regulan su fenología y demografía.

Palabra clave: Crassulaceae; ciclo de vida; epífita facultativa; planta suculenta

Abstract

Knowledge on the basic aspects of the ecology of a species is fundamental for its conservation. Therefore, we evaluated the reproductive phenology and the structure of a population of *Echeveria nodulosa*, an endemic to México species with ornamental value, in an oak forest in Oaxaca. In January 2018, we marked seven epiphytic adult individuals and monitored them monthly through December 2020. The phenophases we analyzed included

inflorescence formation, flowering, fruiting and seed liberation. For each phase we recorded onset and maximum activity dates, frequency, and duration. To analyze population structure, we marked all individuals present during 2018 and 2019, classifying them by size and determining the populations' structure types, depending on the distribution of size-classes. Inflorescence formation began on July, with a maximum activity in August; flowering began on September with a maximum activity in October; fruit formation and maturation occurred from December to March; and the first dispersing seeds were observed in March with a maximum activity in April. All phenophases had annual cycles with intermediate durations. During 2018 we found 23 individuals conforming a type I population structure (dominated by premature phases: seedlings and infants), while in 2019 we only found 10 individuals corresponding to a type II structure (dominated by intermedium and late phases: juvenile and adults), possibly as a result of inter-annual variation in precipitation patterns. Although our study broadened our knowledge on the biology of this species, further research is needed for in-depth understanding of the mechanisms regulating the phenology and demography of *E. nodulosa*.

Key Words: Crassulaceae; facultative epiphyte; life cycle, succulent

Introducción

El género *Echeveria*, (Crassulaceae), es endémico de América y se distribuye desde Texas hasta Argentina. México es el centro de su diversidad con 127 especies, de las cuales el 83% son endémicas, en donde el estado de Oaxaca es el más diverso (47 spp.) (Reyes-Santiago et al., 2011). Este género se caracteriza por incluir plantas herbáceas, suculentas, acaules, con hojas dispuestas en forma de roseta, con inflorescencias laterales. Poco se sabe de su biología reproductiva, pero se ha reportado que ciertas especies son auto incompatibles (Rodríguez-Rojas et al., 2015), mientras que otras no lo son (Álvarez-Álvarez et al., 2021; Parra et al., 1993); en cuestión de polinizadores, si bien la entomofilia es común en la familia, en el género se ha reportado la polinización por colibríes (Parra et al., 1993); la propagación asexual es común en el género (Reyes-Santiago et al., 2011; Ult, 1992). Crecen mayormente como saxicolas, aunque también se reportan como terrestres o epífitas y se les puede encontrar en bosques de pino, encino, matorrales xerofitos y ocasionalmente en selvas bajas caducifolias (Reyes-Santiago et al., 2011).

Dada la belleza de su morfología, las especies de este género son altamente apreciadas por horticultores y coleccionistas (Ortiz-Oliveros et al., 2021; Reyes-Santiago et al., 2011), lo que ha provocado que individuos, principalmente en la fase adulta, sean extraídos ilegalmente de sus hábitats naturales para su venta (Reyes-Santiago et al., 2011), esto, aunado con la pérdida de su hábitat ha puesto en peligro a 7 especies y 7 variedades (Álvarez-Álvarez et al., 2021; Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2010). Es por ello, que es importante desarrollar planes de manejo y conservación para estas especies, para lo cual se requiere conocer aspectos básicos de la biología de estas, como son aspectos de su fenología y su demografía. Desafortunadamente, existe muy poca información sobre estos aspectos, y en general sobre la biología de estas especies (Álvarez-Álvarez et al., 2021; Reyes-Santiago et al., 2011).

La fenología de plantas es el estudio de los eventos recurrentes (*e.g*. caída y brote de hojas, floración, fructificación y dehiscencia de frutos, etc.) dentro del ciclo de vida de estas y las causas de su ocurrencia, que pueden ser factores bióticos (*e.g.* interacción con polinizadores, dispersores, herbívoros, etc.), abióticos (*e.g*. variaciones en temperatura, precipitación, fotoperiodo, etc.) y filogenéticos (Lieth, 1974).

Conocer la fenología de las especies es importante para implementar estrategias de manejo y conservación de las especies, ya que con dicho conocimiento es posible, entre otras cosas, planear la conservación *ex situ* (como colectas de germoplasma), conocer la vulnerabilidad de las especies ante cambios climáticos y relacionarla con la presencia de competidores y depredadores, entre otros (Morellato et al., 2016; Peng et al. 2021).

Otro aspecto importante para comenzar a definir estrategias de conservación de una especie es el conocimiento del estado de sus poblaciones y poder reconocer los estadios más vulnerables dentro de su ciclo de vida; una forma rápida de obtener dicha información es a través de la determinación de sus estructuras poblacionales (Landi y Angiolini, 2011; Nurfadilan, 2020).

Las estructuras poblacionales son como una fotografía que muestran el estado actual de una población, a partir de la cual se pueden hacer inferencias de la magnitud de ciertos procesos demográficos, como la supervivencia, mortalidad y natalidad. Sin embargo, es importante considerar que si bien las estructuras brindan una idea bastante adecuada del estado actual de la población, este resultado es estático y brinda poca información del estado futuro de las mismas, por lo que es importante reforzarlas con estudios de dinámica poblacional a largo plazo.

El conocer el estado de las poblaciones, es crucial para aquellas especies en alguna categoría de riesgo o endémicas (Kienberg y Becker, 2017) o que están siendo aprovechadas, como es el caso de *Echeveria nodulosa* Baker Ed. Otto.

Esta especie es ampliamente utilizada como planta ornamental y se vende tanto en mercados nacionales como internacionales. A pesar de que su propagación por esquejes es fácil, individuos adultos de poblaciones silvestres son colectados para su venta, poniendo en riesgo sus poblaciones.

Por lo que, en este estudio exploramos la fenología y la estructura poblacional de *E. nodulosa*, una especie epífita facultativa (que puede crecer sobre otras plantas (epífita) o en el suelo (terrestre) en un bosque de encino estacional en la mixteca Oaxaqueña, con la finalidad de obtener información relevante que pueda ser utilizada en un futuro, para el desarrollo de planes para su conservación y aprovechamiento sostenible.

Materiales y Métodos

Sitio de estudio

El estudio se realizó en un bosque de encino con régimen de lluvias estacional, en la localidad de Santo Domingo, Yanhuitlán, Oaxaca (Figura 1). Este sitio se encuentra dentro del

Geoparque Global Mixteca alta, a 2577 m.s.n.m (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO], 2017). La precipitación anual acumulada es de 804 mm con un promedio mensual de 67.02 ± 68.67 mm, con máximos en los meses de junio y septiembre; la temporada de sequía comprende de octubre a abril. La temperatura media es de 14.36 ± 1.34 ° C, el promedio de las máximas de 23.27 ± 1.75 ° C y el de mínimas de 7.02 ± 2.87° C (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias [INIFAP], 2020).

La vegetación arbórea esta predominada *Quercus candicans* Neé, *Q. castanea* Neé, *Q. crasifolia* Humb. & Bonpl., *Q. rugosa* Neé, *Juniperus fláccida* Schltdl., *Arbutus xalapensis* Kunth y manchones de pinos (comúnmente introducidos por los programas de reforestación).

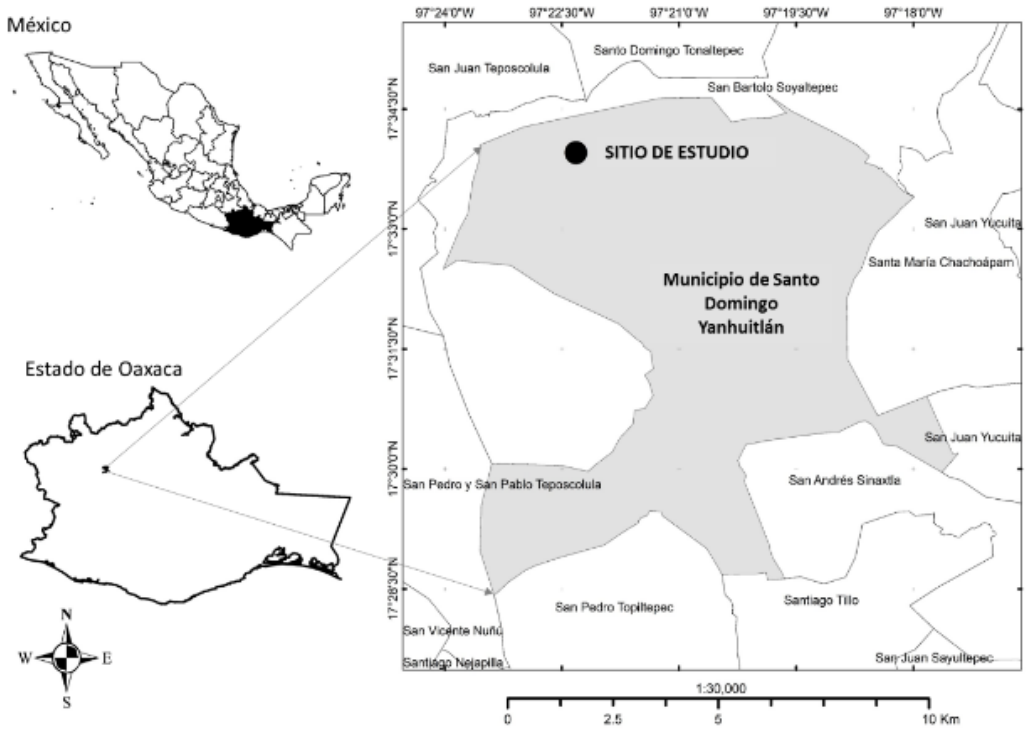


Figura 1. Localización del sitio dentro del municipio de Yanhuitlán, Oaxaca.

La flora epífita está representada por *Tillandsia bourgaei* Baker, *T. macdougallii*, *T. plumosa* Baker, *T. prodigiosa* (Lem.) Baker, *T. recurvata* (L.) L., *T. usneoides* (L.) L., *Pleopeltis conzatti* (Weath.) R. M. Tryon & A.F.Tryon, *Polypodium martensii* Mett., *Oncidium brachyandrum* Lindl. y *Alamania punicea* Lex. in La Llave & Lex.

Especie de estudio

Echeveria nodulosa es una planta herbácea perenne con hojas verdes (en ocasiones con máculas rojas) suculentas, simples, enteras, obovadas-cuneadas y filotaxia espiralada. Su inflorescencia es lateral y axilar compuesta por un tallo floral o pedúnculo que sostiene a las flores y brácteas en forma de racimo. Las flores de color naranja se arreglan en espiral a lo largo del pedúnculo, cada una sobre el pedicelo que se encuentra en la axila de una bráctea.

Los pedicelos llevan dos bractéolas (Figura 2). Esta especie probablemente es polinizada por colibríes, ya que fueron observados visitando estas plantas (obs. per)

En el área de estudio se encuentra creciendo tanto como terrestre como de forma epífita. Para este estudio, que formó parte de un estudio mayor sobre el efecto de los árboles hospederos en la demografía y fenología de epífitas vasculares (Ramírez-Martínez, 2021), se utilizaron individuos epífitos de *E. nodulosa*. Cabe mencionar que del total de árboles hospederos muestreados en el proyecto antes mencionado (21 árboles de *Quercus martinezii* C.H. Muller, 17 de *Q. rugosa* Née y 47 de *Q. castanea* Née), *E. nodulosa* solamente se encontró creciendo sobre cuatro árboles de *Q. martinezii* y un árbol *Q. rugosa*.

Metodología

Para seguir la fenología reproductiva, que comprende las fenofases de floración, fructificación y liberación de semillas, se marcaron siete individuos adultos de *E. nodulosa* (todos los presentes en el área de estudio), con etiquetas de plástico y se monitorearon mensualmente de enero de 2018 a diciembre de 2020. Con los datos recabados se estimaron:

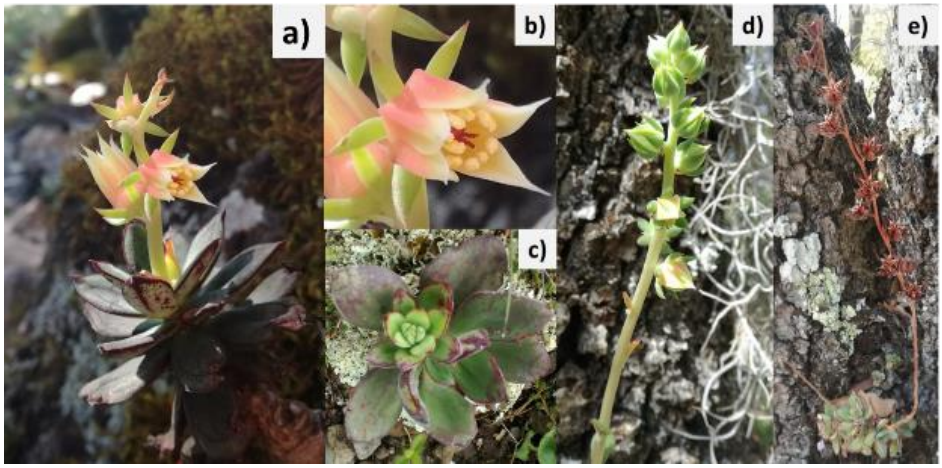


Figura 2. Planta completa de *Echeveria nodulosa* (a), flor (b), roseta (c), inflorescencia (d) y frutos abiertos (e).

• Tiempo de ocurrencia: esto incluye el mes de inicio y el mes de máxima actividad de cada fenofase.
• Frecuencia: se adaptó la propuesta de Newstrom et al. (1994) y cada evento fenológico se clasificó como continua (siempre reproductiva con ninguna o pocas interrupciones breves hasta 2 meses entre muchos episodios reproductivos), anual (solo un ciclo mayor por año, 1-9 meses de fase reproductiva), o subanual (más de un evento por año separados por intervalos de 2 meses o más entre episodios reproductivos).
• Duración: cuando una fenofase mostraba un patrón anual, se clasificó en breve (<1 mes), intermedia (2-5 meses) o prolongada (> 5 meses).

Para poder determinar la estructura poblacional de *E. nodulosa*, en 2018 se midieron todos los individuos, creciendo sobre los mismos árboles que los individuos adultos estudiados en la parte fenológica, a los que se les midió el ancho y alto de las rosetas, dicho procedimiento se repitió en 2019; posteriormente, se calculó el área de cada una de ellas con la fórmula de

un círculo y se establecieron cuatro categorías de tamaño. Las plántulas (p) tenían rosetas de 0.03 a 0.3 cm^2, los infantiles (i) de 0.31 a 4 cm, juveniles (j) de 4.1 a 12.6 cm^2 y los adultos (a) de más de 12.6 cm^2. Finalmente, se clasificó la estructura poblacional de acuerdo con lo propuesto por Landi y Angiolini (2011):

- Estructuras tipo I o dinámicas: la estructura está dominada por una alta proporción de individuos en las etapas tempranas (plántulas e infantiles), y sugiere que las poblaciones están creciendo.
- Estructuras tipo II o estables: se observa una mayor proporción de individuos de etapas intermedias (juveniles) y tardías (adultos), lo que sugiere que las poblaciones están estables.
- Estructuras tipo III o senescentes: las cuales están dominadas por individuos adultos y no existe evidencia alguna de reclutamiento activo, lo que sugiere que la población está decreciendo.

Resultados

Fenología

La formación de inflorescencias comenzó en julio, con una máxima actividad en agosto, la frecuencia de esta fenofase fue clasificada como anual, con una duración intermedia (4 meses). La floración comenzó en septiembre, con una máxima actividad en octubre, tuvo una frecuencia anual y duración intermedia de 3 meses.

La formación y maduración de las cápsulas se dio de diciembre a marzo y en este último mes también se comenzaron a liberar las primeras semillas con una máxima actividad en abril, ambas fenofases fueron anuales con duración intermedia (Figura 3).

Estado poblacional

En 2018 se encontraron 23 individuos (8 p, 14 i, 1 j, 1 a), los cuales presentaron una estructura dominada por individuos de etapas tempranas, por lo que se clasificó como dinámica o tipo I (Figura 4); en tanto que en 2019 solamente se encontraron 10 individuos (0 p, 4 i, 4 j, 2 a), con una preponderancia de individuos en etapas intermedias y tardías, por lo que la estructura se clasificó como estable o tipo II.

Discusión

La formación de inflorescencias de *E. nodulosa* en este sitio coincide con la temporada de lluvias, posiblemente esto les permite a las plantas producir biomasa y al mismo tiempo asignar recursos (agua y nutrientes) para reproducción. La floración comenzó a finales de la temporada de lluvias a diferencia de otras especies de epífitas que lo hacen al inicio (Ramírez-Martínez y Mondragón, 2020) y otras herbáceas terrestres que florecen a mediados de la misma. Esto podría evitar que *E. Nodulosa* compita con estas especies, ya que algunas también son visitadas por colibríes (Ruíz-Contreras, 2019). La liberación de semillas de *E. nodulosa* es durante la estación seca, en esta temporada la baja humedad presente puede favorecer la deshidratación de sus frutos foliculares y la liberación de las semillas justo antes del inicio de la estación de lluvias (Cortés-Flores et al., 2017).

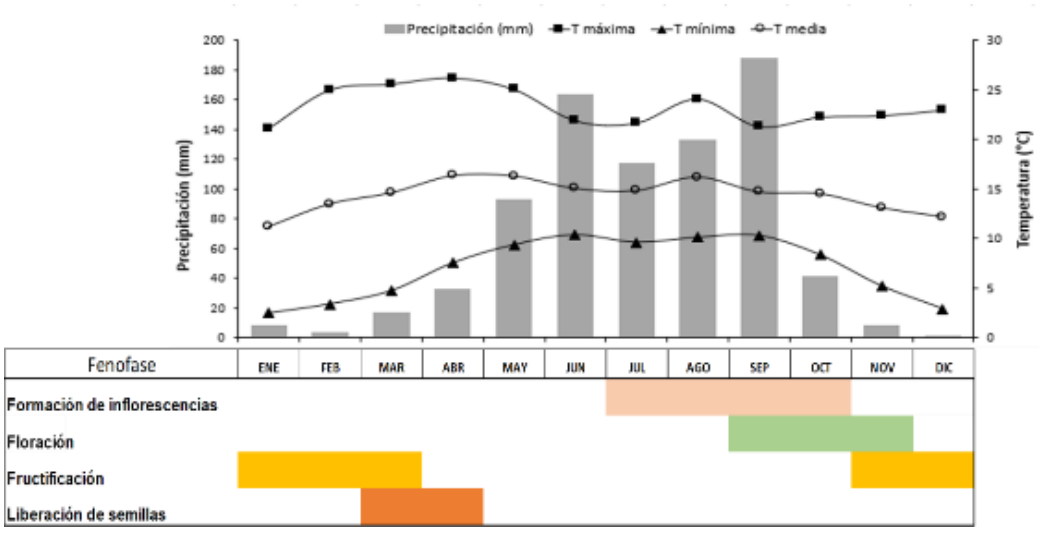


Figura 3. Climograma de Santo Domingo Yanhuitlán Oaxaca, en la parte superior; y calendario fenológico de *Echeveria nodulosa*, en la parte inferior

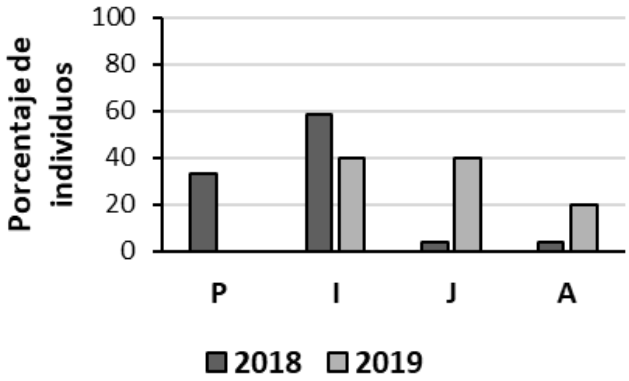


Figura 4. Estructura de una población de *Echeveria nodulosa* en Yanhuitlán, Oaxaca.

La interpretación del estado general de la población evaluada a través de las estructuras poblacionales de *E. nodulosa*, debe ser tomada con precaución. Primero, porque las estructuras muestran el estado de la población en un momento dado (como vimos en 2018 era tipo I y en 2019 tipo II) y debido al error asociado al bajo tamaño muestral (aunque eran todos los individuos epífitos presentes en la zona de estudio). Teniendo eso en consideración podemos decir que existe variación interanual en las estructuras poblacionales de *E. nodulosa*, resultado de que durante 2018 se encontró un número significativo de plántulas (8) e infantiles (14), cosa que en 2019 no. Esto pudiera ser el resultado de que durante 2017 se presentó una mayor precipitación, permitiendo la germinación de las semillas y la formación y sobrevivencia de plántulas, que fueron las que censamos en enero de 2018, ya que se sabe que la disponibilidad de agua es clave en estos estadios de vida de las epífitas (Mondragón et al., 2015).

Por otra parte 2018 fue uno de los años más secos reportados en la zona, lo que no permitió el reclutamiento y favoreció la mortalidad de individuos, ya que como se ha reportado para epífitas la falta de agua es una de las principales causas de muerte de los estadios prematuros (Mondragón et al., 2015). La presencia de años con alto reclutamiento de plántulas, resultado del incremento en la precipitación, ya ha sido reportado anteriormente para otras epífitas (Mondragón et al., 2004).

Conclusión

Nuestros resultados aportan información básica de la biología de *E. nodulosa*, especie muy poco estudiada, planteando la necesidad de realizar estudios más específicos para evaluar el efecto de la disponibilidad de agua y la competencia por polinizadores como modeladores de la fenología floral de esta especie, así como la necesidad de realizar estudios de dinámica poblacional a largo plazo, tanto de individuos epífitos como terrestres, para tener un mejor entendimiento del estado de la población, y de los factores bióticos y abióticos que lo regulan.

Agradecimientos

Al Instituto Politécnico Nacional por el financiamiento a través de los proyectos SIP-20195449 y 20200025. A CONACYT por la beca otorgada a ARM para la realización de sus estudios de doctorado.

Referencias bibliográficas

Álvarez-Álvarez, J., Vázquez-Santana, S. y García-Campusano, F. (2021) Sistemas de apareamiento y de cruza en *Echeveria strictiflora* y *Echeveria subalpina* (Crassulaceae) para su conservación y propagación *ex situ*. *Botanical Sciences*, 99(4), 807-822. https://doi.org/10.17129/botsci.2803

Begon, M., & Townsend, C. R. (2009). *Ecology: from individuals to ecosystems*. John Wiley & Sons.

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

Cortés-Flores, J., Hernández-Esquivel, K. B., González-Rodríguez, A., & Ibarra-Manríquez, G. (2017). Flowering phenology, growth forms, and pollination syndromes in tropical dry forest species: Influence of phylogeny and abiotic factors. *American Journal of Botany*, *104*(1), 39–49. https://doi.org/10.3732/ajb.1600305

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. (13 de mayo de 2021). Campo Experimental Pabellón - Laboratorio Nacional de Modelaje y Sensores Remotos. https://clima.inifap.gob.mx/lnmysr

Kienberg, O., & Becker, T. (2017). Differences in population structure require habitat-specific conservation strategies in the threatened steppe grassland plant *Astragalus exscapus*. *Biological Conservation*, *211*, 56–66. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.05.002

Landi, M. y Angiolini, C. (2011). Population Structure of *Osmunda regalis* in Relation to Environment and Vegetation: An Example in the Mediterranean Area. *Folia Geobotanica*, 46(1), 49–68. https://doi.org/10.1007/s12224-010-9086-1

Levassor, C., Ortega, M. y Peco, B. (1990). Seed bank dynamics of Mediterranean pastures subjected to mechanical disturbance. *Journal of Vegetation Science*, 1(3), 339–344. https://doi.org/10.2307/3235709

Lieth, H. (1974). *Phenology and Seasonality Modeling*. Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-51863-8

Martínez-Villegas, J. A., Orozco-Segovia, A., Sánchez-Coronado, M. E. y Pisanty-Baruch, I. (2012). Germination de *Sedum oxypetallum* (Crassulaceae) in a primary lava-field shrubland. *Plant Ecology*, 213(5), 871-881.

Mondragón, D., Durán, R., Ramírez, I. y Valverde, T. (2004). Temporal variation in the demography of the clonal epiphyte *Tillandsia brachycaulos* (Bromeliaceae) in the Yucatán Peninsula, Mexico. *Journal of tropical ecology*, 20(2), 189-200. https://doi.org/10.1017/S0266467403001287

Mondragón, D., Valverde, T. y Hernández-Apolinar, M. (2015). Population ecology of epiphytic angiosperms: A review. *Tropical Ecology*, 56 (1),1-39.

Morellato, L. P. C., Alberton, B., Alvarado, S. T., Borges, B., Buisson, E., Camargo, M. G. G., Cancian, L. F., Carstensen, D. W., Escobar, D. F. E., Leite, P. T. P., Mendoza, I., Rocha, N. M. W. B., Soares, N. C., Silva, T. S. F., Staggemeier, V. G., Streher, A. S., Vargas, B. C. y Peres, C. A. (2016). Linking plant phenology to conservation biology. *Biological Conservation*, 195, 60–72. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.12.033

Nurfadilan, S. (2020) Population structure of *Geodorum densiflorum* (Orchidaceae) in relation to habitat disturbance and vegetation characteristics. *Biodiversitas*, 21(4), 1422-1431. https://doi.org/10.13057/biodiv/d210421

Newstrom, L. E., Frankie, G. W. y Baker, H. G. (1994). A New Classification for Plant Phenology Based on Flowering Patterns in Lowland Tropical Rain Forest Trees at La Selva, Costa Rica. *Biotropica*, 26(2), 141–159. https://doi.org/10.2307/2388804

Oostermeijer, J. G. B., Van't Veer, R. y Den Nijs, J. C. M. (1994). Population structure of the rare, long-lived perennial *Gentiana pneumonanthe* in relation to vegetation and management in the Netherlands. *Journal of applied Ecology*, 31 (3), 428-438. https://doi.org/10.2307/2404440

Ramírez-Martínez, A. y Mondragón, D. (2020). La fenología de bromelias y orquídeas epífitas en un bosque de encino estacional. *Desde el herbario del CICY*, 12, 1–5.

Reyes Santiago, P. J., Islas Luna, M. A., Gónzalez Zorzano, O., Carrillo Reyes, P., Vergara Silva, F. R. y Brachet Ize, C. P. (2011). *Echeveria, Manual del perfil diagnostico del genero echeveria en México*. Universidad Nacional Autónoma de Chapingo.

Ruíz-Contreras, J. D. (2019). *Uso de epífitas vasculares por aves en un bosque de encino en Yanhuitlán, Oaxaca* [Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional]. http://literatura.ciidiroaxaca.ipn.mx:8080/xmlui/handle/LITER_CIIDIROAX/416

Thiede, J. y Eggli, U. (2007). Crassulaceae. en K. Kubitzki (Ed.), *Flowering Plants Eudicots. The families and genera of vascular plants* (Vol. 9, pp. 83-118) Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-32219-1_12

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (03 de junio 2021). *Mixteca Alta, Oaxaca Unesco Global Geopark (Mexico*). http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/earth-sciences/unesco-global-geoparks/list-of-unesco-global-geoparks/mexico/mixteca-alta-oaxaca/

Ortíz-Oliveros, H. B., Cruz, D., Flores-Espinoza, R. M., Santillán-Maloquías, I., Zarazpia-Ortega, G. y Villalva, A. (2021). Evaluation of the bioaccumulation of heavy metals

and 137Cs in succulent plants *Echeveria elegans*. *International Journal of Environmental Science and Technology*. https://doi.org/10.1007/s13762-021-03186-5

Parra, V., Fabian Vargas, C. y Eguiarte, L. E. (1993). Reproductive biology, pollen and seed dispersal, and neighborhood size in the hummingbird-pollinated *Echeveria gibbiflora* (Crassulaceae). *American Journal of Botany*, 80 (2), 153-159.

Peng, J., Wu, C., Wang, X. y Lu, L. (2021). Spring phenology outweighed climate change in determining autumn phenology on the Tibetan Plateau. *International Journal of Climatology*, 41 (6), 3725-3742. https://doi.org/10.1002/joc.7045

Rodríguez-Rojas, T. J., Andrade-Rojas, M., Canul-Ku, J., Castillo-Gutiérrez, A., Martínez-Fernández, E. y Guillén-Sánchez, D. (2015). Viabilidad de polen, receptividad del estigma y tipo de polinización en cinco especies *Echeveria* en condiciones de invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6 (1), 111-123.

Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2010). *Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección Ambiental-Especies nativas de México de flora u fauna silvestres - Categoría de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio - Lista de especies en riesgo*. Diario Oficial de la Federación 2da sección, 30 de diciembre de 2010.

ISSN: 2594-0171
Contribución al Conocimiento Científico y Tecnológico en Oaxaca
Año 5, Vol. 5, No. 5, 27 de Septiembre, 2021

Artículo

Diseño sostenible de aulas para escuelas en condiciones precarias mediante software especializado en análisis bioclimático

Salazar Ruiz, Josué Daniel[1]; Alavéz Ramírez, Rafael[1] ; Caballero Montes, José Luis[1]
[1]Instituto Politécnico Nacional - CIIDIR Unidad Oaxaca.

*Autor de correspondencia: josuedanyel.07@gmail.com

Recibido: 31 de julio de 2021
Aceptado: 6 de septiembre de 2021
Publicado en línea: 27 de septiembre de 2021

Resumen

El objetivo de este trabajo es elaborar el diseño sostenible (DS) de aulas para escuelas con condiciones precarias, mediante el uso de software especializado en análisis bioclimático. Se toma como caso de estudio la escuela telesecundaria de la localidad de Galea, Ocotlán, Oaxaca. Para el DS de las aulas se realizó un análisis climático del sitio, así como de los materiales de construcción tradicionalmente empleados en la región que permitieron conceptualizar la propuesta arquitectónica. Se utilizó el programa *Bioclimatic Analysis Tool* (BAT) para determinar las estrategias bioclimáticas aplicadas al diseño de las aulas considerando requerimientos térmicos, de humedad, ventilación y asoleamiento del sitio. Así mismo se realizó un estudio de materiales naturales de la región mediante un análisis energético con el que se determinaron sus valores de amortiguamiento y desfase térmico generados en la herramienta YTONG. Lo anterior, permitió la selección del sistema constructivo para el proyecto de la escuela telesecundaria seleccionada. Los resultados fueron la definición de estrategias de diseño para las aulas con orientación este-oeste, ventilación cruzada, muros dobles de materiales con retardo térmico de 8 horas aplicados en un sistema constructivo alternativo a base de Bloques de Tierra Comprimida (BTC) y bovedillas de fibra vegetal. Se concluye la viabilidad de las estrategias bioclimáticas obtenidas con el uso de herramientas tecnológicas y aplicaciones virtuales para el DS de aulas con materiales de baja conductividad térmica que contribuyan a crear ambientes de aprendizaje confortables.

Palabras clave: escuelas precarias; materiales alternativos; sustentabilidad

Abstract

This study proposes sustainably designed (SD) classrooms for at-risk schools using specialized software in bioclimatic analysis. The authors present a case study of a rural secondary school located in Galea, Ocotlán, Oaxaca –a small lower-class suburb–in southern Mexico. To plan SD classrooms, the authors accomplished a site-based climatic analysis and an analysis of construction materials traditionally used in this region. Together, these analyses support an architectural proposal. The authors used the Bioclimatic Analysis Tool (BAT) to determine several bioclimatic strategies related to the classrooms' design. This tool recorded the temperature, humidity, ventilation, and sunlight requirements of the site. In

addition, this study includes a survey of natural materials available in this region accomplished by an energy analysis (including their damping and thermal lag values generated with the YTONG tool). Results of this study guide systematic planning of classroom construction at the site, including an east-west classroom orientation, cross ventilation, double walls made of materials with 8-hour thermal damping in a construction system based on Compressed Earth Blocks (CEB) and plant-fiber vaulted ceilings. The study affirms the validity of bioclimatic strategies obtained using technology and the application of SD in classrooms by using low-thermal-conductive materials that promote comfortable learning environments.

Key words: at-risk shops; alternative materials; sustainability.

Introducción

La educación en el contexto de países como México representa un problema que puede ser abordado desde diferentes campos de acción. Son evidentes las carencias y retos que enfrenta la educación pública y que parten de las marcadas diferencias entre las diversas realidades, en contraste con las garantías que las leyes mexicanas establecen claramente como iguales, lo que evidencia el largo camino que queda por recorrer.

Para mejorar la calidad educativa y materializar dichas garantías legisladas por el estado, la infraestructura física educativa (IFE) es pieza clave, no solamente circunscrita a la respuesta técnica constructiva, sino a un conjunto de elementos que impactan la dinámica al interior de los centros escolares y su potencial para contribuir al mejoramiento integral de la escuela y su comunidad.

Las soluciones técnicas, muchas veces implementadas desde una visión generalizada del problema, han dejado de lado variables tan determinantes como el contexto sociocultural, el contexto físico —natural y construido— o las necesidades particulares de cada caso.

La situación actual originada por el momento coyuntural de la pandemia de COVID-19 y los retos de la industria 4.0 (Echeverria & Martínez, 2018), han convertido el concepto de *reaprender* en clave para la adaptación a la cuarta revolución industrial, y han hecho que la educación busque hacer frente a los cambios de manera más acelerada que nunca (Bermúdez & Ferrer, 2021) valiéndose de habilidades digitales que ya existían pero que ahora se vuelven imprescindibles para el desarrollo profesional y académico.

Es por todo lo anterior, qué este trabajo integra, —como parte determinante del proceso de diseño de una escuela telesecundaria— las variables climatológicas y su efecto en el confort mediante herramientas virtuales para la aplicación de criterios bioclimáticos. Esto forma parte de uno de los objetivos de la tesis: "*Arquitectura participativa y educativa en el proceso de diseño de infraestructura física educativa de la telesecundaria de Colonia Galea, Ocotlán, Oaxaca",* de la maestría profesional del IPN-CIIDIR Oaxaca como respuesta al problema de espacios educativos actualmente en condiciones precarias.

En esta investigación se presentan los resultados de la elaboración de una propuesta de DS de aulas para la escuela mencionada, realizado entre noviembre de 2020 y enero de 2021,

donde la pandemia terminó por dirigir el énfasis al empleo de métodos digitales que permitieron avanzar en el desarrollo del proyecto, al no poder concretar otras estrategias inicialmente planteadas.

El propósito es, por tanto, mostrar dicho proceso, desarrollado mediante metodologías bioclimáticas (Freixenet, 2004) que priorizan el uso de aplicaciones virtuales para proponer modelos de aulas sostenibles para atender la infraestructura en condiciones precarias que no cumplen con condiciones mínimas de habitabilidad, lo que sin duda afecta la calidad del aprendizaje de los estudiantes.

Materiales y métodos

Para realizar el diseño bioclimático de las aulas, se obtuvieron primeramente los datos de las Normales Climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (CONAGUA, 2020). La estación climática referida es la número 20080, ubicada en Ocotlán de Morelos, a tan solo 1.86 km del sitio de estudio. Como parte de la normatividad establecida por la Organización Meteorológica Mundial, el Servicio Meteorológico Nacional realiza el cálculo de las normales climatológicas cada 10 años para un periodo consecutivo de 30 años, empezando en un año 1 y terminando en un año 0. (CONAGUA, 2021) La Organización Meteorológica Mundial ha instado a que las normales climatológicas sean actualizadas cada diez años, por lo que la próxima actualización fue prevista para después de finalizado el 2020 (OMM, 2017). Sin embargo, al momento de esta publicación dicha actualización todavía no se encuentra disponibles en la red de estaciones climáticas operativas y suspendidas. La figura 1 muestra los datos que han sido tomados, correspondientes al periodo más próximo disponible, esto es de 1981 a 2010.

La información de las normales climatológicas muestra el comportamiento de la temperatura, precipitación y evaporación a lo largo de los años, por lo que estos datos fueron trasladados al software BAT *(Bioclimatic Análisis Tool)*, desarrollado por Rincón y Fuentes de la UAM-Azcapotzalco (Freixenet, 2014) para realizar los cálculos de la caracterización climática del sitio.

Diagnóstico de confort

Para la obtención de las gráficas correspondientes al diagnóstico de confort higrotérmico se utilizó el software BAT. Este diagnóstico proporciona información sobre diversas variables climatológicas del sitio, además de datos de los días-grado con el requerimiento de enfriamiento en el periodo febrero-junio, que es donde se da la mayor incidencia solar, considerando que según la clasificación de Köppen-García, la zona de estudio presenta un clima tipo semicálido, no es de tipo Ganges, no hay canícula, y el bioclima es Templado Seco.

ISSN: 2594-0171
Contribución al Conocimiento Científico y Tecnológico en Oaxaca
Año 5, Vol. 5, No. 5, 27 de Septiembre, 2021

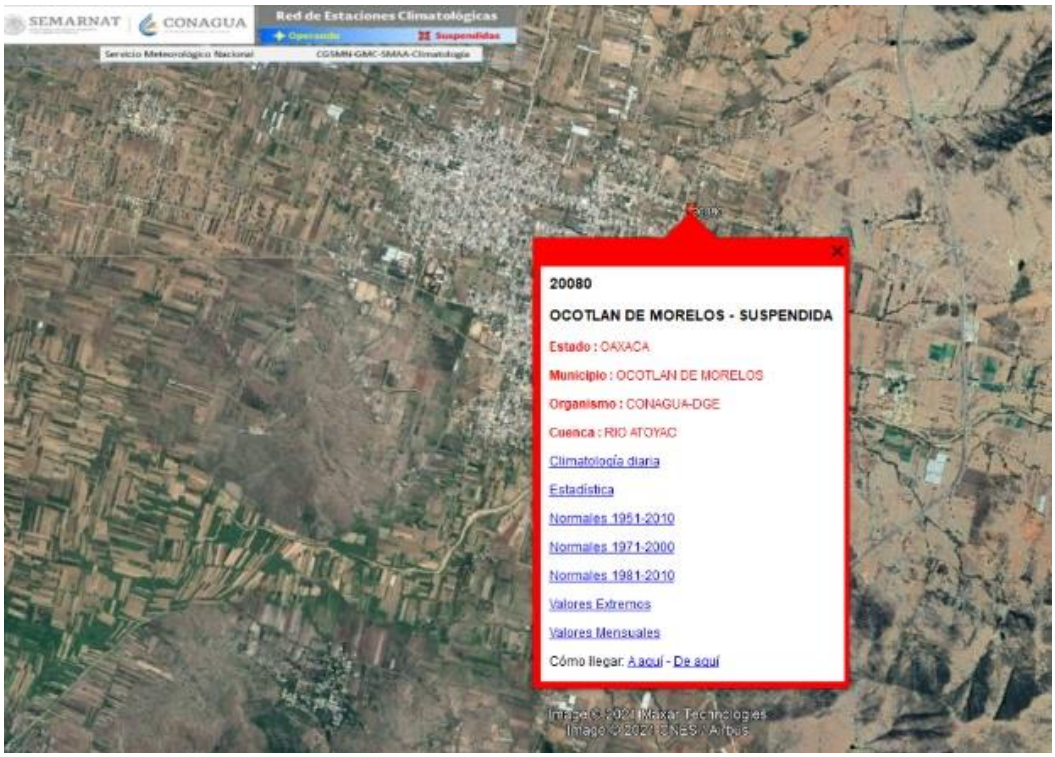


Figura 1. Obtención de datos climatológicos del sitio web de CONAGUA para la estación 20080.

La información diagnóstica de la temperatura muestra una incidencia solar que hace necesario el enfriamiento durante todo el año en Ocotlán de Morelos, salvo un breve requerimiento de condiciones de calentamiento en la temporada invernal. El análisis de la gráfica de temperaturas horarias proporciona los rangos de temperatura por horas durante el día, mientras que los rangos de humedad en la zona de estudio se mantienen estables durante la mayor parte del día.

Se identificó que en la zona existe un periodo lluvioso predominantemente de tres meses de junio a septiembre, declinando esta situación a partir del mes de octubre. Así mismo, se encontró que el *índice ombrotérmico* muestra la relación entre la temperatura y la precipitación, con este parámetro se confirman los meses de mayo a septiembre propicios para la captación de agua pluvial.

Tablas de Mahoney y gráficas bioclimáticas

A partir de las tablas de Mahoney (Evans, 2007) se obtuvieron las *estrategias de diseño bioclimático*, de acuerdo con los datos arrojados por el software BAT y luego de haber ingresado las variables de las normales climatológicas.

En este caso se sugieren, con base en las mismas, principalmente *muros masivos* con retardo térmico arriba de 8 horas; y *cubiertas masivas* con retardo similar. Se recomienda una ventilación constante y aberturas pequeñas a la altura de los ocupantes, tal como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Tablas de Mahoney con recomendaciones de acuerdo con los datos de las variables climatológicas procesadas en BAT. Fuente: Elaborado con datos del BAT.

ESTACIÓN 20080 OCOTLÁN DE MORELOS
TABLAS DE MAHONEY

INDICADORES / NÚM. INDICADORES	No.	RECOMENDACIONES
DISTRIBUCIÓN	1	Orientación Norte-Sur, eje largo Este-Oeste
	2	
ESPACIAMIENTO	3	
	4	Igual a 3 pero con protección de vientos
	5	
VENTILACIÓN	6	Locales de una galería. Ventilación constante
	7	
	8	
TAMAÑO DE ABERTURAS	9	
	10	
	11	Pequeñas (20% - 30%)
	12	
	13	
POSICIÓN DE ABERTURAS	14	En muros N y S, a la altura de los ocupantes en barlovento
	15	
PROTECCIÓN DE ABERTURAS	16	Sombreado total y permanente
	17	
MUROS Y PISOS	18	
	19	Masivos (arriba de 8 h de retardo térmico)
TECHUMBRE	20	
	21	
	22	Masiva (arriba de 8 h de retardo térmico)
ESPACIOS NOCTURNOS EXT.	23	
	24	

De acuerdo con el análisis climático paramétrico se recomiendan las siguientes estrategias bioclimáticas para el diseño: *ventilación natural cruzada*, *inercia térmica en muros* y *sombreado total en aberturas*. La ventilación y la radiación se pueden resolver mediante el diseño, pero la inercia térmica se logra con una adecuada selección de materiales.

En el presente trabajo se toma como estrategia principal la *inercia térmica*, al ser un factor importante que tiene una relación importante en el confort resultante en las edificaciones.

Resultados y conclusiones

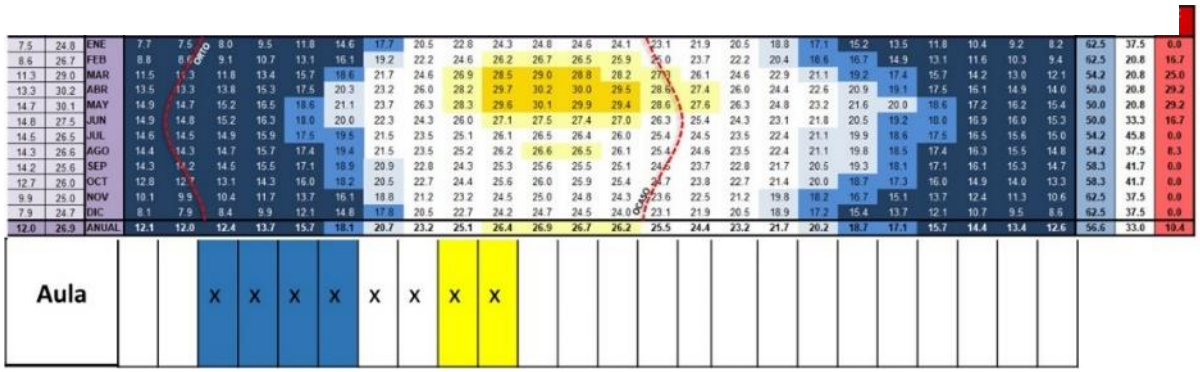
Conceptualización de las estrategias bioclimáticas

El análisis climático del sitio permitió identificar cuáles fueron las estrategias bioclimáticas a considerar para el diseño de las aulas, para lo cual fue determinante analizar los datos

arrojados sobre cómo se presentan las temperaturas horarias y la zona de uso horario de acuerdo con la ocupación de las aulas en condiciones precarias que ocupan los estudiantes de la telesecundaria de Galea.

En la tabla 2 se puede observar la distribución de usos horarios en los que habitualmente se llevan a cabo las clases en el centro escolar, haciendo uso de las aulas entre las 7:00 y las 14:00 horas, y el requerimiento térmico en el horario de 7 a 10 de la mañana, que es el de calentamiento durante todo el año, solo se presenta confort térmico en entre las 11:00 y 12:00 horas.

Tabla 2. Temperaturas horarias y zona de uso horario.
Fuente: Elaboración con datos del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).



Se observa que los materiales con los que está construida la escuela actualmente (láminas de zinc y madera de reúso), no ofrecen condiciones de habitabilidad térmica y que es necesaria su adecuación.

Una de las estrategias bioclimáticas determinadas para diseñar las aulas es el almacenamiento térmico durante el día a través de la *inercia térmica* de la losa y los muros, los cuales deberán tener la capacidad de conservar la energía térmica recibida y liberarla progresivamente, esto se da en función de la masa, densidad y calor específico del material, entre mayor sea el espesor de los muros, mayor inercia térmica existirá y por consiguiente, una mayor estabilidad térmica será el resultado de la estrategia en el confort de las aulas.

Propiedades termo-físicas de los sistemas convencionales.

Los sistemas constructivos convencionalmente utilizados en la edificación de escuelas en México son a base de concreto armado y mampostería. Con la finalidad de hacer una comparativa del sistema de muro y techo alternativo que se propone en este estudio, se elaboraron las fichas técnicas de los sistemas convencionales de uso común en México para muro y para losa (figura 2). Posteriormente se determinó su factor de decremento y retardo térmico (figura 3).

El amortiguamiento de onda térmico para el sistema de muro de ladrillo fue del 57% y el desfase térmico de 6 horas, mientras para el sistema de losa de concreto el amortiguamiento de onda térmico fue de 6.37%, y el desfase térmico de 1.8 horas (figura 3). Los resultados

anteriores muestran que estos sistemas no ofrecen un buen desempeño térmico acorde a los requerimientos señalados en las tablas de Mahoney (Tabla 1).

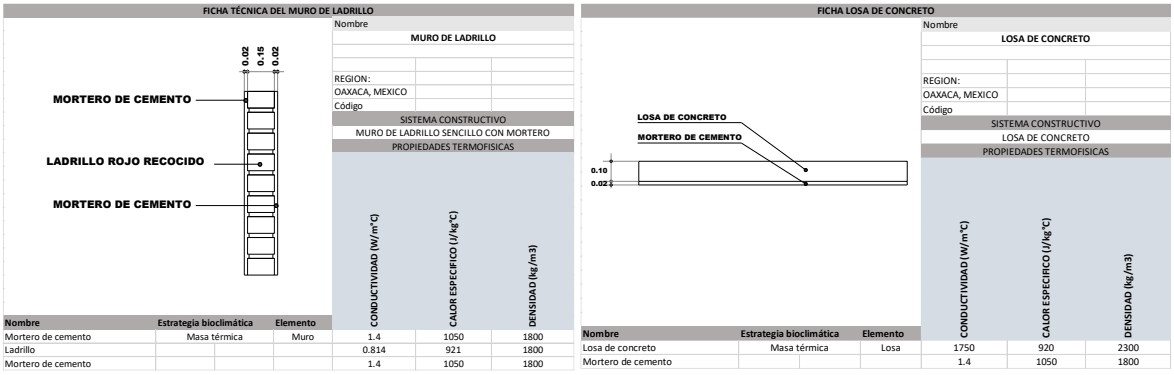


Figura 2. Fichas técnicas que indican las propiedades termo-físicas del sistema constructivo convencional: Muro de ladrillo (izquierda) y losa de concreto armado (derecha). Fuente: Elaborado a partir del software YTONG.

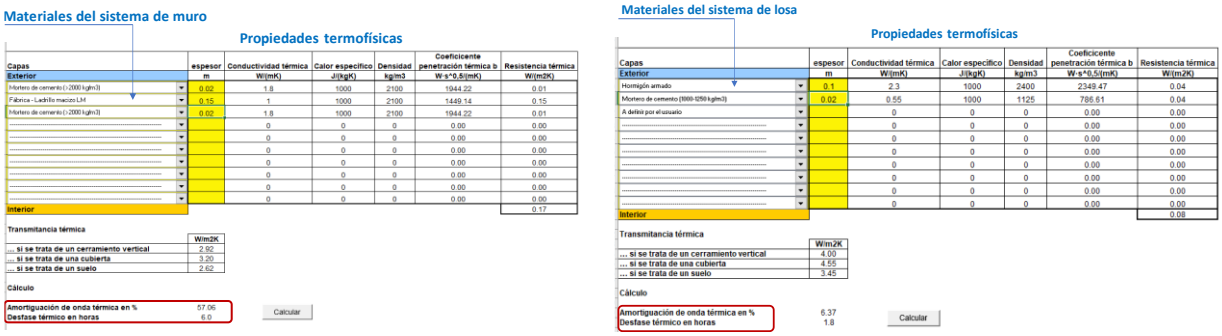


Figura 3. Cálculo del amortiguamiento de onda y desfase térmicos en horas, correspondiente al sistema constructivo convencional: Muro de ladrillo (izquierda) y losa de concreto armado (derecha).

Triángulos de confort y estrategias de diseño a partir de los materiales.

Para la definición de las estrategias de diseño, los *triángulos de confort y estrategias bioclimáticas* (Evans, 2007) arrojados al procesar los datos en el software BAT, marcan claramente que es necesaria una estrategia de inercia térmica (Figura 4).

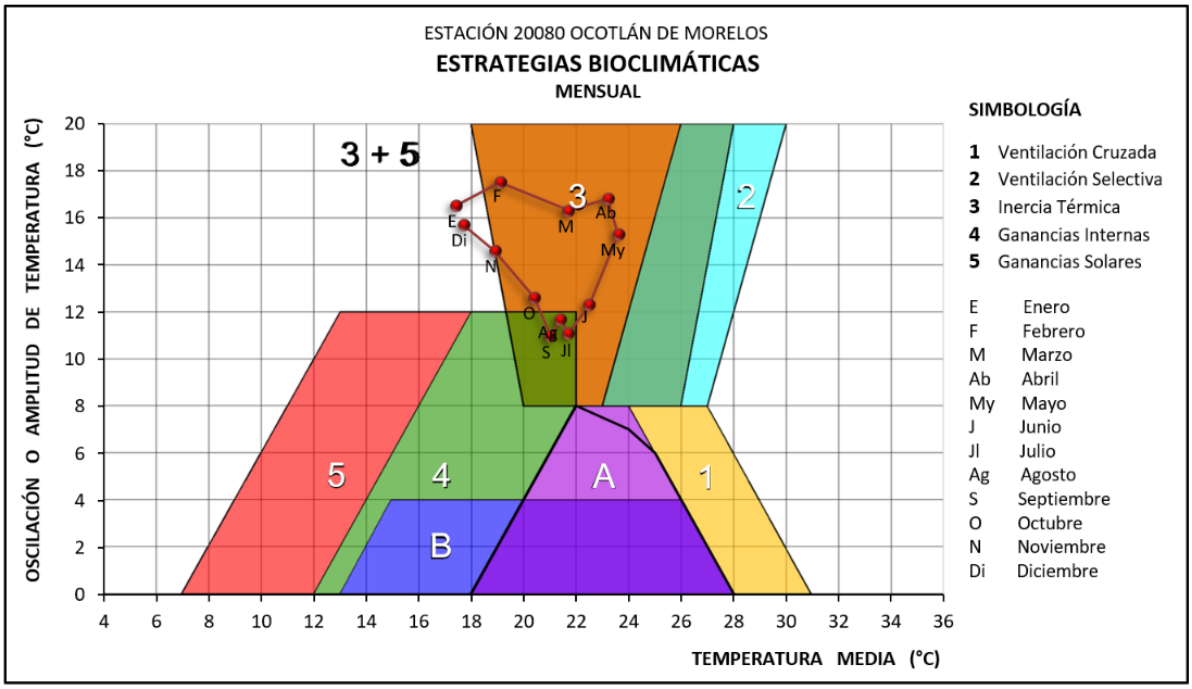


Figura 4. Estrategias bioclimáticas de acuerdo los triángulos de Confort de J.M. Evans. Fuente: Obtenido del software BAT tras procesar los datos de las variables climatológicas de CONAGUA.

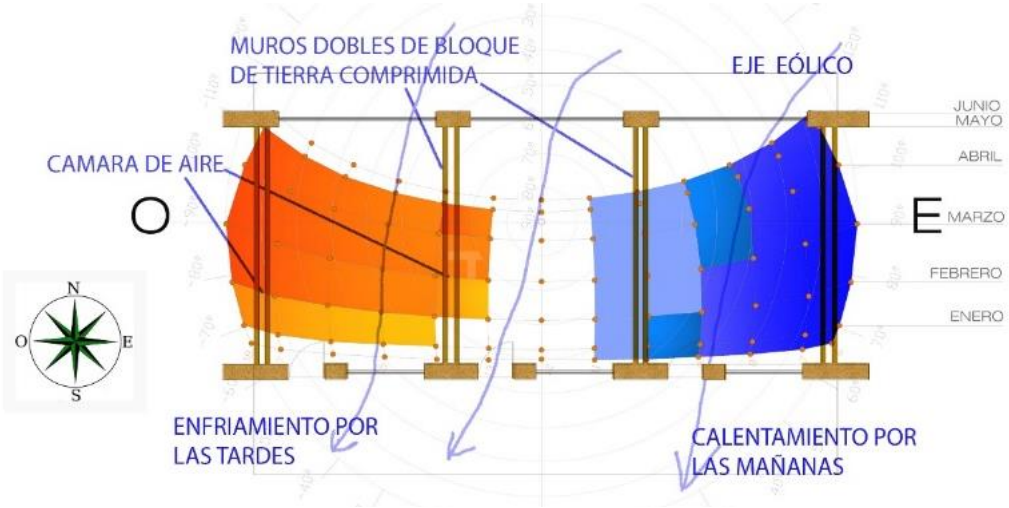


Figura 5. Conceptualización de estrategias bioclimáticas (grafica solar). Fuente: Elaboración propia.

La figura 5 muestra el resultado de la conceptualización de las estrategias bioclimáticas aplicadas a una propuesta modular inicial de las aulas. La orientación de las aulas tiene el sentido largo en el eje este-oeste, aprovechando la ventilación cruzada en el verano en las horas de sobrecalentamiento (esto se aprecia en la gráfica solar en color naranja).

Es notorio en la gráfica solar el bajo calentamiento (color azul) que se presenta hasta las 11:00 horas, por lo cual, se propone el sistema constructivo de bloques de tierra comprimida (BTC), a base de un muro doble, con un vacío en la parte central que genere una cámara de aire para incrementar el amortiguamiento térmico y acústico.

Para las estrategias bioclimáticas propuestas en los cerramientos de muros y cubierta de las aulas se consideró la inercia térmica a través de los BTC en el caso de muros, con un arreglo de muro doble. Este arreglo permitirá almacenar y retardar el calor por más de 8 horas. En el sistema de cubierta se empleará una bovedilla a base de fibra de bagazo de maguey que permitirá la aislación térmica debido a la baja conductividad térmica de las fibras vegetales (Figura 6).

Evaluación de amortiguamiento y desfase térmico de los cerramientos.

Del estudio térmico de los materiales propuestos para construir los muros y el techo de las aulas, se obtuvieron datos de *conductividad térmica*, *calor especifico* y *densidad*.

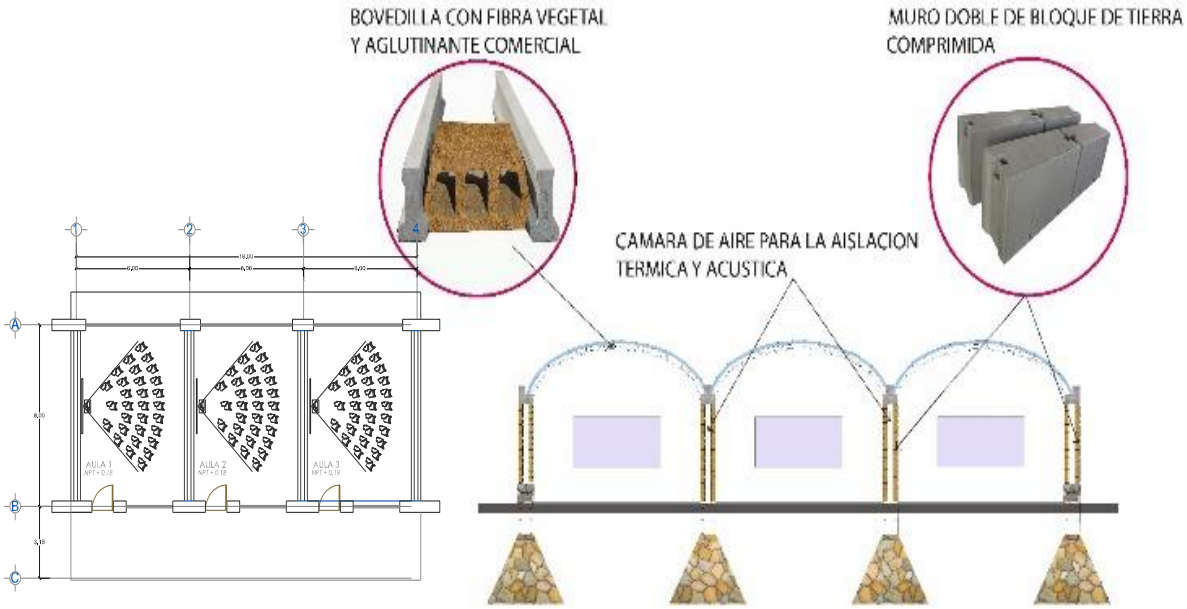


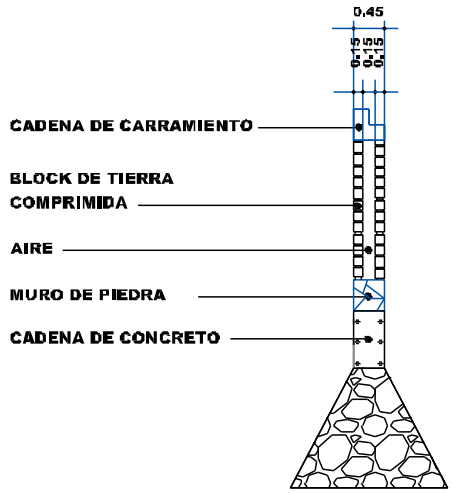
Figura 6. Planta arquitectónica de módulos de aulas y corte longitudinal que esquematiza las estrategias bioclimáticas como resultado del análisis bioclimático.
Fuente: Elaboración propia.

La evaluación del comportamiento térmico de los sistemas constructivos analizados (muros dobles de BTC con cámara de aire interior y techos tipo bóveda de fibra de maguey con capas de concreto y mortero) se centró en la identificación de un único parámetro, el *coeficiente de transmitancia térmica* o, su inverso, la *resistencia térmica*. Sin embargo, existen otros dos

parámetros de vital importancia: el *amortiguamiento* y el *desfase térmico* que también son importantes para este estudio.

La herramienta YTONG de la empresa Xella España Hormigón Celular S. A., permitió calcular la amortiguación de onda térmica y el desfase térmico para los muros y cubierta de las aulas.

FICHA TÉCNICA MUROBTC CON CAMARA DEAIRE



Nombre		
MURO DE BTC CON CAMARA DE AIRE		
REGION:		
OAXACA, MEXICO		
Código		
SISTEMA CONSTRUCTIVO		
Muro de adobe		
PROPIEDADES TERMOFISICAS		

Nombre	Estrategia bioclimática		Elemento	CONDUCTIVIDAD (W/m°C)	CALOR ESPECIFICO (J/kg°C)	DENSIDAD (kg/m3)
Muro de bloque de tierra comprimida	Masa térmica		Muro	0.85	900	2000
Aire				0.026	1063	1223
Muro de bloque de tierra comprimida				0.85	900	2000

Figura 7. Ficha técnica que indica el retardo térmico de la propuesta de sistema constructivo para muros; un muro doble a base de BTC con cámara de aire intermedia.
Fuente: Elaborado a partir del software YTONG.

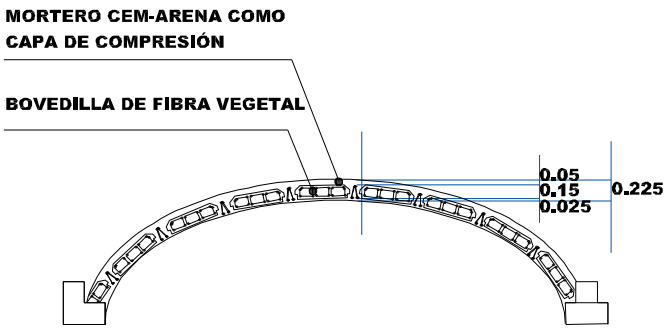
Se presentan las fichas técnicas de los materiales y sistemas constructivos propuestos en el diseño de las aulas, donde se especifican propiedades térmicas como calor especifico, densidad y conductividad térmica. La figura 7 presenta un doble muro de bloque de tierra comprimida (BTC), formando en su interior una cámara de aire, cada muro tiene un ancho de 15 cm, y el espacio de aire también es de 15 cm. La cimentación consiste en una cadena de desplante, posteriormente un rodapié de cantera y sobre este el muro doble de BTC. Las propiedades termo físicas de cada capa se detallan en la ficha técnica.

Una de las más importantes estrategias fue la selección de materiales de construcción con la premisa de aprovechar sus propiedades térmicas, la inercia térmica propia de los mismos.

Se encontró, a partir del análisis realizado, que el sistema de muro doble de bloques de tierra comprimida (BTC) con cámara de aire entre los bloques presentó un amortiguamiento térmico del 100% y un desfase térmico de 10 horas.

En la figura 8 se presenta el sistema de cubierta propuesto para las aulas, que se conforma con bovedillas de fibra vegetal, más una capa de compresión de concreto armado, para esta evaluación virtual presentó un amortiguamiento térmico del 93% con 10 horas de desfase térmico.

FICHA TÉCNICA TECHUMBRE BOVEDILLA BIODEGRADABLE



Nombre: **BOVEDILLA BIODEGRADABLE**

REGION: OAXACA, MEXICO

Código

SISTEMA CONSTRUCTIVO: BOVEDILLA BIODEGRADABLE

PROPIEDADES TERMOFISICAS

Nombre	Estrategia bioclimática	Elemento	CONDUCTIVIDAD (W/m°C)	CALOR ESPECIFICO (J/kg°C)	DENSIDAD (kg/m3)
Mortero cem-arena armado			2.3	1000	2400
Bovedilla			0.56	1800	1800
Mortero cem-arena			1.4	1050	2000

Figura 8. Ficha técnica que indica el retardo térmico de la propuesta de sistema constructivo para cubierta; bovedilla a base de fibra vegetal.
Fuente: Elaborado a partir del software YTONG.

El material vegetal que se propone en este sistema de techo se eligió de entre diversas posibilidades: henequén, *sisal*, fibra de piña, fibra de bagazo de coco y fibra de maguey. Al ser la fibra de bagazo de maguey un recurso que se puede obtener de los residuos de palenques de mezcal de la región, este elegido para el sistema constructivo.

Estudios realizados sobre fibras vegetales muestran que al agregarlas a una matriz polimérica en biocompuestos aumenta las propiedades mecánicas y estabilidad térmica (Pulido, et al., 2014). Además, las fibras lignocelulósicas, fibras vegetales como el bambú *(Bambusa emeiensis)*, bonote *(Cocos nucifera)*, lino *(Linum usitatissimum)*, sisal *(Agave sisalana)*, entre otros, presentan ventajas sobre las fibras sintéticas; como abundancia, baja densidad o ligereza, baja costos y biodegradabilidad (Edhirej, et al., 2017; Mukhopadhyay & Fangueiro, 2009).
Estos resultados confirman la selección adecuada de los materiales de origen natural, que, combinados con otros de tipo industrial, como el concreto, resultan apropiados para garantizar espacios confortables. El empleo de materiales naturales aislantes como estrategia

de diseño pasivo resulta benéfico para el diseño de espacios, logrando condiciones de habitabilidad, particularmente en el factor de confort térmico y acústico.

En las figuras 9 y 10 se presentan *renders* del diseño sustentable de las aulas de la escuela telesecundaria de Galea, Oaxaca; donde se aplicaron los estudios bioclimáticos y la selección adecuada de los materiales para su construcción.

Figuras 9 y 10. Imágenes virtuales de la propuesta de diseño sostenible (DS) resultante en los módulos de aulas para la telesecundaria de Galea, Ocotlán.
Fuente: Elaboración propia en los softwares ArchiCAD y Artlantis.

Conclusiones

El modelo de aulas bioclimáticas propuesto se desarrolló tomando en cuenta el estudio de las condiciones higrotérmicas que caracterizan el clima del sitio, a partir de software especializado y herramientas digitales que permitieron obtener las estrategias de diseño del proyecto.

Se tuvieron en consideración criterios de sustentabilidad, priorizando materiales naturales como tierra y fibras orgánicas, que demostraron a la vez un buen desempeño térmico y reivindican las características de la arquitectura vernácula de la región y el conocimiento empírico de las comunidades intrínseco a su uso; con lo que se promueve su conservación y los beneficios ambientales, culturales y económicos que ello implica.

Por otra parte, se reconoce la importancia del uso de la tecnología digital empleada de una forma creativa e innovadora para la solución de problemas sociales como el caso que se presentó en este trabajo de DS de espacios educativos para zonas desfavorecidas de Oaxaca. Fortaleciendo así las competencias que plantea la E4.0 en estudios a nivel posgrado.

Se concluye también que los sistemas convencionales (muro de ladrillo y losa de concreto) como valores de referencia, presentan un amortiguamiento de onda térmica bajo respecto al sistema de muro y techo alternativos propuestos en este estudio, y que estos resultan óptimos a razón de las evaluaciones aplicadas virtualmente con software especializado y como respuesta a las estrategias de diseño requeridas.

Agradecimientos

El autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT-México) por la beca de estudios para la maestría en Gestión de Proyectos para el Desarrollo Solidario en el IPN CIIDIR-Oaxaca. Los coautores agradecen a la Secretaría de investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional por el financiamiento de los proyectos: SIP 20211389 y SIP 20210968. A la COFAA del mismo Instituto por la beca de exclusividad, y a la Universidad Nacionalista México.

Referencias Bibliográficas

Bermúdez, G. M., & Ferrer, A. E. E. (2021). El reto de la educación 4.0: competencias laborales para el trabajo emergente por la covid-***19.*** *RICSH Revista Iberoamericana de las Ciencias Sociales y Humanísticas*, 10(19), 261-283.

CONAGUA (diciembre, 2020) Normales climatológicas por estado: Oaxaca. https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=oax

CONAGUA (mayo, 2021) Información climatológica. https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/mapas-de-climatologia-1981-2010.

Echeverría, B. y Martínez, P. (2018). Revolución 4.0, competencias, educación y orientación. *Revista Digital de Investigación en Docencia Universitaria*, 12(2), 4-34.

Edhirej, A., Sapuan, S.M., Jawaid, M. et al. (2017). Preparation and characterization of cassava bagasse reinforced thermoplastic cassava starch. *Fibers Polym 18*, 162–171.

Evans, J. M. (2007). *The comfort triangles: a new tool for bioclimatic design.*

Fuentes Freixanet, V. (2002). *Metodología de diseño bioclimático. El análisis climatico.* Universidad Autonoma Metropolitana, México.

Freixanet, V. A. F. (2014). Bioclimatic analysis tool: an alternative to facilitate and streamline preliminary studies. *Energy Procedia*, 57, 1374-1382.

Mukhopadhyay, R Fangueiro. (2009). Physical modification of natural fibers and thermoplastic films for composites—a review. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 22, 135-162.

OMM (2017). *Directrices de la Organización Meteorológica Mundial sobre el cálculo de las normales climáticas.* Ginebra, Suiza.

Pulido Gonzalez, H., Hernandez, E., Rabelero Velasco, M., Sanjuan Raygoza, R. J., & Jasso Gastinel, C. F. (2014). Mechanothermal performance evaluation of a biodegradable resin as coupling agent for hydrophobic polymer/cellulosic composites. *Maderas: Ciencia y Technologia*, 16(4), 463-486.

ISSN: 2594-0171
Contribución al Conocimiento Científico y Tecnológico en Oaxaca
Año 5, Vol. 5, No. 5, 27 de Septiembre, 2021

Artículo

Importancia de las mujeres indígenas en la seguridad alimentaria. Caso San Juan Tabaá, Oaxaca

Vicente Fabián, Rosalina [1]; Pérez Flores, María Eufemia [2]; Jurado Celis Silvia Nuria [3]
[1] Instituto Politécnico Nacional. CIIDIR-Unidad Oaxaca.
[2] Universidad para el Bienestar Benito Juárez sede en Tlacolula de Matamoros

*Autor de correspondencia: rvicentef2000@alumno.ipn.mx

Recibido: 31 de julio de 2021
Aceptado: 6 de septiembre de 2021
Publicado en línea: 27 de septiembre de 2021

Resumen

El objetivo del estudio es determinar el nivel de participación de la mujer indígena de San Juan Tabaá (SJT) en el trabajo para garantizar la seguridad alimentaria (SA) y su valoración, desde un enfoque ecofeminista. Se trató de un estudio transversal; para la recolección de datos se empleó una encueta de autoaplicación a 25 mujeres, compuesto con 43 preguntas cerradas y 4 abiertas, también se aplicó una matriz de uso de tiempo para conocer la participación de los integrantes de la familia en la provisión de la SA. El tamaño de la muestra se determinó con la técnica de Porcientos para poblaciones homogéneas y la selección fue según la técnica Bola de Nieve. Como resultado se encontró que en su totalidad las mujeres participan en las actividades propias del rol que implican la preparación de alimentos, además de involucrarse en las demás actividades de la producción, accesibilidad y consumo; con respecto a la valoración que tienen sobre su importancia en la provisión de la SA, el 76% dijeron que su trabajo si es valorado, mientras que el otro 24% reconocen que no es valorado, comparando su trabajo con los otros grupos etarios el 36% consideran que trabajan más que los demás . Se concluye que las mujeres indígenas de SJT participaban en los cuatros pilares de la SA que involucran actividades de respecto al ambiente, y que el trabajo que realizan para garantizar la SA, falta ser reconocido y valorado por la familia y por ellas mismas.

Palabras clave: alimentación, ecofeminismo, empoderamiento, reconocimiento, valoración.

Abstract

The objective of the study was to determine the level of participation of the indigenous women of San Juan Tabaá (SJT) in the work to guarantee food security (FS) and your assessment, from an ecofeminist approach. It was a cross-sectional study. For data collection, a self-administered questionnaire was used for 25 women, composed of 43 closed questions and 4 open ones. A time use matrix was applied to determine the participation of family members in the provision of SF, from the point of view of the women themselves. The sample size was determined with the percent technique for homogeneous populations. As a result, it was found that all women participate in the activities of the role that imply the preparation of food, in addition to being involved in other activities of food production from the

preparation of the land, to the storage and conservation, as well. as marketing activities; Regarding the assessment they have about it´s importance in the provision of SF, 50% they said that their work is valued, while the other 50% recognize that their work is not valued, they consider that they work more than the other groups old. It is concluded that the indigenous women of SJT participated in the four pillars of the SA, and that the work they do to guarantee the SA, needs to be recognized and valued by the family and by themselves.

Key words: Appreciation, assessment, ecofeminist, empowerment, feeding

Introducción

Como parte de los objetivos de la Agenda 2030 se encuentra el erradicar el hambre y la pobreza, terminar con las desigualdades sociales, generar empoderamiento en las mujeres y niñas entre otros (ONU, 2015;3), Sin embargo, estos objetivos no se han alcanzado especialmente el combate al hambre. La economía capitalista ha contribuido a no alcanzar este fin, ya sea a través de la modificación de la alimentación de las personas, o en sus formas de cultivo al emplear semillas mejoradas. En México la alimentación es un proceso biocultural, ya que no solo implica la preparación de los platillos, también de las técnicas para el aprovechamiento de la naturaleza, la producción, almacenamiento y manejo de los alimentos, depende de la cultura y la sociedad a la que se pertenece (Vargas, 2013). Los hogares mexicanos se han visto afectados por el aumento de los precios y el aumento de la cantidad de personas que presentan nutrición insuficiente (Farías, 2019).

Los primeros reportes que se tienen en cuanto a la seguridad alimentaria en el mundo fueron en los años 30’s durante la Liga de Naciones y después en 1974 en la Cumbre Mundial sobre la alimentación (Mariscal-Méndez et al., 2017). Para la FAO en el 2006 la seguridad alimentaria es “*la capacidad de que en todo momento las personas tengan el acceso físico y económico a los alimentos, estos deben encontrarse en buenas condiciones y de calidad nutricional, para poder satisfacer sus necesidades alimenticias y tener así una vida digna*” (p.2). Si bien los gobiernos de México han establecido estrategias y políticas públicas para combatir la pobreza sin embargo no es suficiente, una característica de estos proyectos es la inclusión de género y que en su mayoría van dirigidos a poblaciones más vulnerables como en este caso las mujeres indígenas (Benavente y Valdés, 2014 y Aguilar et al., 2018).

Se ha argumentado que las poblaciones indígenas son los espacios en donde se reflejan de manera más notoria las desigualdades de género, es posible observarlas en todos los espacios donde ellas interactúan, incluyendo a sus familias, en las comunidades indígenas algunas prácticas culturales han afianzado estas condiciones desiguales según Meentzen (2001), las mujeres son las primeras en reconocer que es necesario ser escuchadas en los lugares donde se desenvuelven y poder participar en la toma de decisiones con respecto a su familia y la sociedad, para que estas se reflejen en sus relaciones cotidianas y tengan una mayor autonomía. La mujer ha vivido condiciones de opresión y discriminación desde épocas antiguas, por ejemplo, al finalizar el periodo del feudalismo, empezó el desarrollo del capitalismo. Este sistema ha estado relacionado con la subordinación de la mujer al igual que la explotación y dominación de la naturaleza, esta afirmación es recogida por el ecofeminismo, en este sistema capitalista patriarcal el trabajo que realizan las mujeres para garantizar la SA y cuidados de la naturaleza no ha sido siempre reconocido (García, 2012 y

Herrero, 2016). Shiva (2004) se cuestiona sobre quien realmente alimenta al mundo, y la necesidad del reconocimiento a las labores que realiza la mujer en la garantía de la SA de su familia y también en la conservación de la diversidad genética de nuestros alimentos.

Figura 2 Mujeres de San Juan Tabaá preparando tortillas para la comida de una festividad

El ecofeminismo en América Latina es un movimiento reciente, sin embargo, ha enfrentado al capitalismo, como en la explotación de los recursos naturales y los medios de producción que generan pobreza y que afectan directamente a las mujeres. Sabemos que los modelos patriarcales son sumamente destructivos con el medio ambiente, sin embargo, es necesario definir las actividades de este modo y las que son solidarias con el medio ambiente, donde podremos observar que tanto los hombres como las mujeres se pueden desempeñar en estos ámbitos (Santana-Cova, 2006).

La dualidad femenino-naturaleza y masculino-cultura ha justificado que se lleve a cabo la explotación y apropiación de lo que se cree es femenino, desde el androcentrismo se ha despreciado e invisibilizado los trabajos domésticos que son realizados por las mujeres, en la división sexual del trabajo patriarcal, solo el trabajo que es remunerado se le reconoce como productivo (Soler y Pérez, 2015). La comunidad de San Juan Tabaá se encuentra localizada en la Sierra Norte de Oaxaca, la población es indígena, hablantes del zapoteco, variante dixha xhon. Las personas se dedican a la agricultura de subsistencia, la mujer en su totalidad se dedica en las labores del hogar, de acompañamiento en el campo y de jornales, en menor cantidad encontramos a las que se dedican al comercio y trabajos dentro de la comunidad. En los trabajos en los que se desempeñan las mujeres como los jornales, el salario que perciben es menor al recibido por los hombres, aunque se realice el mismo trabajo. Por ello es necesario que se reconozca el valor y la importancia del trabajo que realizan las mujeres para garantizar la SA, siendo necesario que se reconozcan los trabajos que ellas realizan en los hogares y en el campo, y con ello visibilizar la importancia de la mujer en la alimentación.

La propuesta del ecofeminismo es poner a la vida y la alimentación como la parte más importante de nuestro existir y que lo debemos resolver desde la perspectiva de ecodependencia e interdependecia para poder así alcanzar la equidad y el respeto mutuo (Soler y Pérez, 2015).

Materiales y métodos

San Juan Tabaá es un municipio que se localiza en la Sierra Norte del estado de Oaxaca a 1,360 msnm, entre los paralelos 17°17' y 17°21' de latitud norte; los meridianos 96°11' y 96°15' de longitud oeste; altitud entre 500 y 2108 m y cuenta con una superficie territorial de 26.79 km2 (INEGI, 2008).

Para dar alcance al objetivo de determinar el nivel de participación de la mujer de San Juan Tabaá en el trabajo para la SA y su valoración, bajo un enfoque ecofeminista, se planteó en primer lugar; identificar las actividades que realizan las mujeres, y la familia para garantizar este bien en su familia en una muestra de mujeres de la misma comunidad.

Para la determinación del tamaño de la muestra se siguió la técnica de porcientos para estudios con comunidades rurales de una población homogénea (refiriéndose a que se comparten la misma etnicidad, misma lengua, cultura y tradiciones). (Escalante y Miñano 1984), eligiéndose el 5% de la población de las mujeres. Según los datos obtenidos en recorrido de campo, la población de San Juan Tabaá cuenta con 556 hogares, aplicando la fórmula de los porcientos la encuesta se aplicó a 25 mujeres, los criterios de inclusión fueron; ser mujer, hablante de la lengua indígena zapoteco, ser originaria del lugar, vivir en la población y aceptar ser encuestada. La selección de la muestra fue realizada con la técnica Bola de Nieve (Hernández-Sampiere et al.,2014).

La encuesta fue de tipo auto aplicación (Hernández-Sampiere et al.,2014) debido a la dificultad por el problema sanitario actual. El cuestionario contenía los ejes temáticos: aspectos sociodemográficos, trabajo femenino en la provisión de la seguridad alimentaria de los pilares producción agrícola, de traspatio, aprovechando recursos naturales existentes; accesibilidad, en el trabajo asalariado como jornaleras; autoconsumo y consumo responsable; y un apartado de la importancia y valoración del trabajo en comparación con otros grupos etarios. Antes de esta aplicación se realizó una prueba piloto (Ghiglione y Matalón, 1989). El instrumento contó con 43 preguntas cerradas y 4 abiertas.

Se aplicó también una matriz de uso de tiempo (Geifius, 2002) de tipo autoaplicación donde el objetivo fue conocer quienes participan en todos los procesos que conllevan a tener un plato de comida en la mesa, esto abarca desde la planeación de las siembras, la producción agrícola como la preparación de la tierra, selección de semillas, siembra, abonado, limpia, cosecha, conservación y manejo de la cosecha y finalmente la preparación de alimentos. Para poder conocer el nivel de participación de los integrantes de la familia en estos procesos, se dividieron en cuatro grupos etarios (ancianas, ancianos, hombre, mujer, niñas y niños), donde se marcó con una x, si su participación fue pequeña y xx si la participación fue amplia.

Resultados y discusión

De las mujeres encuestadas el 60% tenían entre 21 y 50 años, seguido por el 32% por mujeres mayores de 50 años. La mayoría mencionó ser ama de casa (84%), hablar y comprender el zapoteco (96%).

La condición de la SA de la población estudiada, según los pilares identificados, fue la siguiente: a) producción, se producen en la comunidad 25 productos alimenticios provenientes de la agricultura, ganadería y el traspatio, mencionan el aprovechamiento de los materiales que les sobran de la cosecha para reutilizarlos como alimento para sus animales y para venta o como abono; b) consumo de alimentos, aceptan consumir los 25 alimentos que producen y si bien consumen alimentos que no se producen en la comunidad, tratan de controlar los alimentos industrializados y aprovechan al máximo los recipientes generados de dichos productos; y c) acceso de alimentos, además de la participación en la generación de los recursos económicos, realizan prácticas como la guelaguetza, la comercialización de productos dentro de la comunidad. El dinero de la venta de sus residuos agrícolas los utiliza para la compra de productos básicos que no producen. En la figura 2 se muestra cómo las mujeres se sienten con respecto a la valoración de su trabajo en la SA y en la Figura 3 su sentir respecto al trabajo que realizan en comparación con los demás integrantes de su familia.

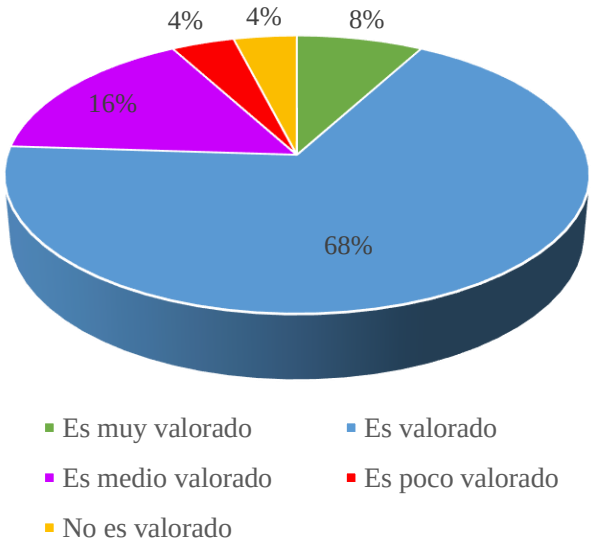


Figura 3. Sentir de las mujeres con respecto a la valoración de su trabajo

En la siguiente Figura 3 se puede observar con mucha claridad la importancia que tiene la mujer indígena de Tabaá en el trabajo para garantizar la SA de la familia esto en comparación con los otros grupos etarios, como las ancianas, ancianos, niñas y niños, su participación la podemos encontrar en los cuatro pilares de la SA; producción, accesibilidad, consumo y nutrición.

Figura 3. Sentir de las mujeres respecto al trabajo que realizan en comparación con los demás integrantes de su familia

La mujer se encuentra en todas las actividades seguido por los varones adultos y en menos cantidad los ancianos, ancianas y las niñas y niños. Con lo que respecta a las mujeres de la tercera edad observamos que ellas también se involucran en los procesos de obtención de alimentos, su trabajo se concentra en obtener los medios para la realización de las siembras y en la selección de los alimentos que se van a consumir, esto se asume que es debido a la experiencia que ellas han obtenido con el tiempo en la realización de estas prácticas. Respecto a los ancianos los podemos ver involucrados en trabajos de preparación de la tierra y de las semillas debido al amplio conocimiento respecto a los procesos y ciclos de siembra.

Las actividades que son de preparación de alimentos como la selección de lo que se van a consumir, preparación de las tortillas etc., ellas las realizan en su totalidad y lo que implique fuerza física, como la preparación de la tierra, abonados, siembra y cosechas son los hombres y ancianos quienes las llevan a cabo. (ver figura 4).

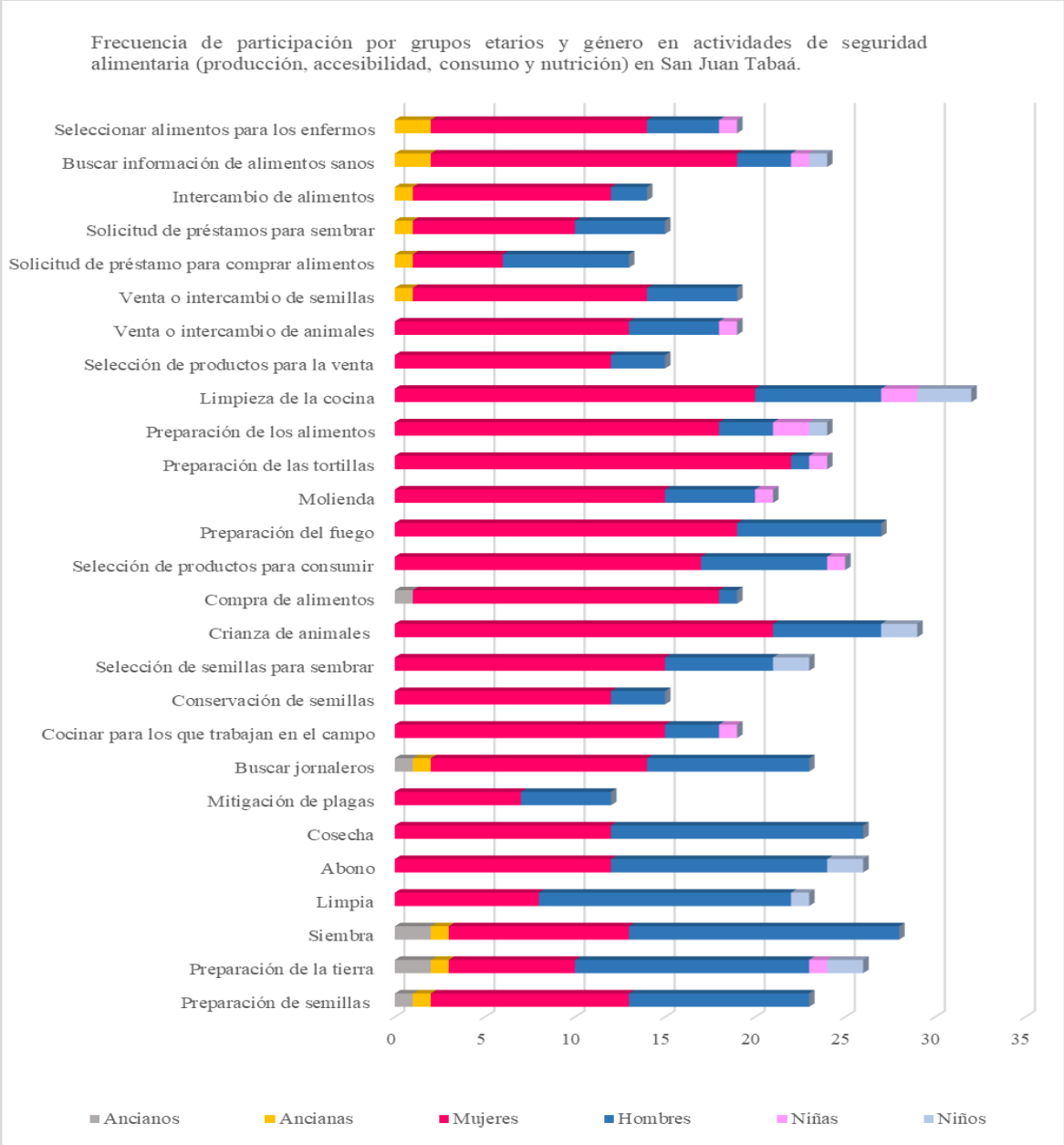
La mayoría de las mujeres de la comunidad a las que se les aplicó la encuesta, se encontraban en un seno familiar conformado por un varón, ella y los hijos. Ellas mencionaron que el trabajo que realizan para SA es valorado, en este caso sería poco más de la mitad de las 25 mujeres encuestadas. El resto de las mujeres mencionó que su trabajo para proveer alimentos era, medio, muy poco y no valorado. En general las mujeres de San Juan Tabaá están involucradas en todos los procesos de producción, consumo y la accesibilidad a ellos, sin embargo, se tiene la opinión que ellas trabajan más que los demás en un 35%, mientras que el 24% creen que trabaja justo lo que les corresponde.

Como menciona García y Soler (2011), a medida que se valore, visibilice el trabajo que realizan las mujeres para garantizar la SA de sus familias y de la comunidad se va a impulsar un proceso de empoderamiento, ya que al llevar el trabajo de las mujeres al ámbito público ellas podrán reconocer la importancia del trabajo.

Conclusión

Por lo anterior podemos concluir que las mujeres adultas y adultas mayores de San Juan Tabaá están involucradas en todos los pilares de la seguridad alimentaria, su trabajo para garantizarla es de suma importancia, ya que forman parte de un sistema de organización familiar complementario que busca asegurar su sustento.

Figura 4 Frecuencia de participación por grupos etarios y géneros en actividades de la seguridad alimentaria en San Juan Tabaá



No obstante que sus respuestas fueron que sí es valorado por su familia el trabajo que realizan, la mitad de las mujeres encuestadas perciben que la carga de trabajo se concentra

en ellas, o realizan más trabajo, y en menor cantidad están las que perciben que realizan la misma cantidad que sus parejas, por ello es muy importante que las mujeres como las de Tabaá reconozcan el valor y la importancia de su trabajo en la garantía de la seguridad alimentaria, como primer paso para planear programas que tengan como objetivo iniciar u proceso de empoderamiento de la mujer.

En otro sentido se requieren propuestas que consideren una reorganización, que considere la existencia de la ecodependencia y la interdependencia en los sistemas locales.

Referencias bibliográficas

Aguilar-Estrada, A., Caamal-Cahuicho, I., y Portillo-Vázquez, M. (2018). Políticas públicas para los municipios mas pobres de México. *Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, *51* (28) 1-34.

Benavente R, M., y Valdés V, A. (2014). Políticas públicas para la igualdad de género,un aporte para la autonomía de las mujeres.*Desarrollo Social.* CEPAL, Cooperación Española.130, 1-137.

Escalante Fortón, R. y Miñano G, M. H (1984). *Investigación, Organización y Desarrollo de la Comunidad.* Nueva Biblioteca Pedagógica.

Farías Ochoa, A. (2019). Comunicación, información y archivo para la seguridad alimentaria como derecho humano en mujeres indígenas de Cherán, Michoacán. *Boletín del Archivo General de la Nación*, *2*, 218-23.

García Forés, E. (2012). Ecofeminismos Rurales Mujeres por la Soberanía Alimentaria. Revista Mundubat. *Soberanía Alimentaria, Biodiversidad y Culturas*, 1-44.

Geilfus, F. (2002). *80 herramientas para el desarrollo participativo*. C.R.:IICA

Ghiglione, R., y Castillo, J. L. (1989). *Las encuestas sociológicas, teorías y práctica*. Trillas

Hernández-Sampieri, Fernández-Collado y Baptista-Lucio (2014). Metodología de la investigación 6ª. Edición. Ciudad de México: McGraw-Hill Interamericana.

Herrero, Y. (2016). Ecologismo una cuestión de límites. *Encrucijadas, Revista Crítica de Ciencias Sociales*, 11,1-22.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2008). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, San Juan Tabaá.* (Archivo PDF).

Mariscal-Méndez, A., Ramírez-Miranda, CA y Pérez- Sánchez, A. 2017. Soberanía y Seguridad Alimentaria: propuestas políticas al problema alimentario. *Textual: análisis del medio rural latinoamericano*, 69, 9-26.

Meentzen, A. (2001). *Estrategias de desarrollo culturalmente adecuadas para mujeres indígenas. Unidad de Pueblos Indígenas y Desarrollo Comunitario, BID*

Organización de la Naciones Unidas. 2015. Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Nueva York, Naciones Unidas, pp. 1-40

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura-Proyecto Estratégico de Seguridad Alimentaria.2005. (22 de abril del 2021). *Seguridad Alimentaria y Nutricional. Conceptos básicos.*

Organización para las Naciones Unidas para la mujeres. (15 de Octubre de 2020). El papel de las mujeres en el desarrollo rural, producción alimentaria y la erradicación de la pobreza.

Santana Cova, N. 2006. El Ecofeminismo Latinoamericano. Las mujeres y la naturaleza como símbolos. *Cifra Nueva*, 37-46

Shiva, Vandana (2004). La mirada del Ecofeminismo. *Polis Revista Latinoamericana*, *9*, 1-11.

Vargas, L.A. 2013. La alimentación en las Américas: un patrimonio más complejo de lo que se suele pensar. *Sociedad y Ambiente*, 1, (1) 61-76.

ISSN: 2594-0171
Contribución al Conocimiento Científico y Tecnológico en Oaxaca
Año 5, Vol. 5, No. 5, 27 de Septiembre, 2021

Artículo

Análisis bibliométrico de valoración económica de servicios ecosistémicos con método de transferencia de beneficios

Ramírez Cabrera, Christian[1]; Regino Maldonado, Juan[1]; Toledo López, Arcelia[1]
[1]Instituto Politécnico Nacional. CIIDIR-Unidad Oaxaca.

*Autor para correspondencia: christian.ram.cabrera@gmail.com

Recibido: 31 de julio de 2021
Aceptado: 6 de septiembre de 2021
Publicado en línea: 27 de septiembre de 2021

Resumen

Los ecosistemas proveen bienestar a las personas a través de los servicios ecosistémicos (SEs); los estudios de valoración económica de servicios ecosistémicos (VESEs), facilitan la toma de decisiones de políticas públicas ambientales de preservación, conservación, restauración y aprovechamiento sustentable de recursos naturales. La presente investigación realiza un análisis bibliométrico de estudios publicados sobre VESEs que utilizaron el método de transferencia de beneficios (MTB) de 2010 a 2020. Los resultados sugieren que en años recientes hay una tendencia creciente en el número de estudios de VESEs que utilizan el MTB combinado con otros métodos (directos e indirectos) de valoración económica. Estos estudios de valoración integran cada vez más herramientas tecnológicas como los sistemas de información geográfica (SIG) para la presentación de resultados. Los estudios más recientes valoran conjuntamente los servicios ecosistémicos de provisión, regulación, culturales y de soporte, principalmente en áreas naturales protegidas, cuyas unidades geográficas son de gestión gubernamental o uso público. Asimismo, el estudio evidencia una reducción de la brecha entre el número de estudios de VESEs con el MTB realizados en países que se consideran desarrollados y aquellos en desarrollo.

Palabras clave: economía ambiental, métodos de valoración económica, valoración económica de servicios ecosistémicos

Abstract

Ecosystems provide well-being to people through ecosystem services (ES), economic valuation of ecosystem services (EVES) studies, facilitate decision-making on environmental public policies for preservation, conservation, restoration and sustainable use of natural resources. This research performs a bibliometric-descriptive analysis of published EVES studies that used the benefit transfer method (BTM) from 2010 to 2020. The results suggest that in recent years there is a growing trend in the number of EVES studies that use MTB combined with other indirect methods of economic valuation. These valuation studies increasingly integrate technological tools such as geographic information systems (GIS) for the presentation of results. The most recent studies jointly value the provision, regulation, cultural and support ecosystem services, mainly in protected natural areas, whose geographic

units are government-managed or publicly used. Likewise, the study shows a reduction in the gap between the number of EVES studies with BTM carried out in countries that are considered developed and those in development.

Keywords: environmental economics, economic valuation methods, economic valuation of ecosystem services.

Introducción

El término servicios ecosistémicos (SEs) creció en popularidad a raíz de los trabajos publicados por Costanza et al. (1997) y Daily (1997), en el primero se entienden como los beneficios que la población humana obtiene directa o indirectamente de las funciones que estos realizan; mientras que, en el segundo estudio se definen como las condiciones y procesos a través de los cuales los ecosistemas naturales y las especies incluidas sustentan y satisfacen la vida humana. En concordancia con las anteriores definiciones, la Evaluación de Ecosistemas del Milenio (MEA, 2005), los definió como todos aquellos beneficios que los seres humanos recibimos de los ecosistemas; a partir de esta definición se generaron cuatro categorías de SEs: SEs de provisión (alimentos, aire, madera, combustibles, etc.); SEs de regulación (regulación climática, regulación de inundaciones, regulación de enfermedades, purificación de agua, etc.); SEs culturales (estéticos, espirituales, recreación, conocimiento, etc.); y SEs de soporte (formación de suelos, producción primaria, etc.) (Christie et al., 2012).

Desde la economía ambiental la creciente demanda de información sobre ecosistemas terrestres y acuáticos, sobre sus unidades, flujos, y valores monetarios en sus diferentes escalas espaciales y temporales, ha provocado un esfuerzo mayor de los economistas ambientales por realizar estudios de VESEs (Richardson et al., 2015). En este sentido, es importante realizar con precisión la valoración de los SEs de mercado (por ejemplo, SEs de provisión de alimentos), y no mercado (por ejemplo, SEs de soporte, como formación de suelos y algunos servicios culturales), esta información es útil para la toma de decisiones sobre el uso y manejo socialmente óptimo de los recursos naturales y de las externalidades (Taye et. al., 2021). Los estudios de VESEs pueden realizarse desde un enfoque monetario, no monetario, o con una combinación de métodos dependiendo del enfoque del estudio y de los recursos con que se cuente. Para realizar la VESEs de mercado desde el enfoque monetario se pueden utilizar métodos directos (por ejemplo, precios de mercado, costos evitados, costos de reemplazo, costo de daños y funciones de producción). Para la VESEs de no mercado, frecuentemente se utilizan métodos directos como valoración contingente, modelos de elección, etc., y métodos indirectos entre los que destacan costo del viaje, precios hedónicos, transferencia de beneficios, etc. Desde el enfoque no monetario, los métodos directos son cuestionarios, entrevistas, grupos de enfoque, entre otros; y los métodos indirectos más comunes son las revisiones sistemáticas (Christie et al., 2012). Ambos enfoques (monetario y no monetario) han seguido tendencias similares en cuanto a la frecuencia de utilización, pero desde el año 2014 han incrementado la realización de estudios con un enfoque no monetario (Acharya et al., 2019). En cualquiera que sea el caso, la realización de estudios de VESEs requiere de tiempo y dinero, lo que ha incrementado el interés por la utilización de métodos indirectos, que son menos costosos. Desde el enfoque monetario, uno de estos, es el método de tranferencias de valor o método transferencia de

beneficios (MTB), cuyo método utiliza información de fuentes secundarias para estimar tanto el valor monetario de los SEs de mercado como de no mercado (Khan et al., 2019).
El MTB que fue usado por Costanza et al. (1997), asume una unidad constante de valor por hectárea en cada tipo de ecosistema y lo multiplica por el área de cada tipo de uso de suelo, de esta forma obtiene los valores totales (Su et al., 2020). La forma simplificada que utiliza el MTB, asume homogeneidad espacial y transferibilidad del coeficiente de valor de uno o más sitios experimentales a otras áreas para que sean ecológica y socioeconómicamente comparables (Sannigrahi et al., 2019). Algunos estudios de VESEs de mercado y no mercado recientes han implementado el MTB conjuntamente con otros métodos de valoración directos e indirectos. Como resultado de lo anterior, algunos autores sostienen que de esta manera combinada los resultados parecen más confiables al momento de crear las funciones de transferencia de beneficios (por ejemplo, los trabajos de Londoño y Johnston, 2012; Rosenberger, 2015; Huber et al., 2018; Artell et al.,2019; Khan et al., 2019; Chen et al., 2019 y Sharma et al., 2019). Por su parte, Richardson et al. (2015), cuestionan la validez y fiabilidad de los resultados en estudios de valoración donde se utiliza el MTB. Su crítica radica en los supuestos que utiliza el método (como el valor constante por unidad de terreno y la homogeneidad territorial en cada tipo de ecosistema), pero no cuestiona su utilidad para generar aproximaciones de valor económico y la importancia de estas en la toma de decisiones.

La identificación de flujos ecológicos y la estimación adecuada de valores económicos, plasmados en planes y programas de preservación, conservación, restauración y aprovechamiento de recursos naturales de los países, resultan ser información confiable para los hacedores de políticas ambientales. (Richardson et al., 2015; Loomis et al., 2000).

Por lo anterior, en la presente investigación se realiza un análisis bibliométrico de estudios sobre VESEs con el MTB. Un objetivo complementario de este trabajo es que la información sobre las tendencias recientes de estudios de VESEs que utilizaron el MTB, orienten y simplifiquen futuras investigaciones de este tipo.

Materiales y métodos

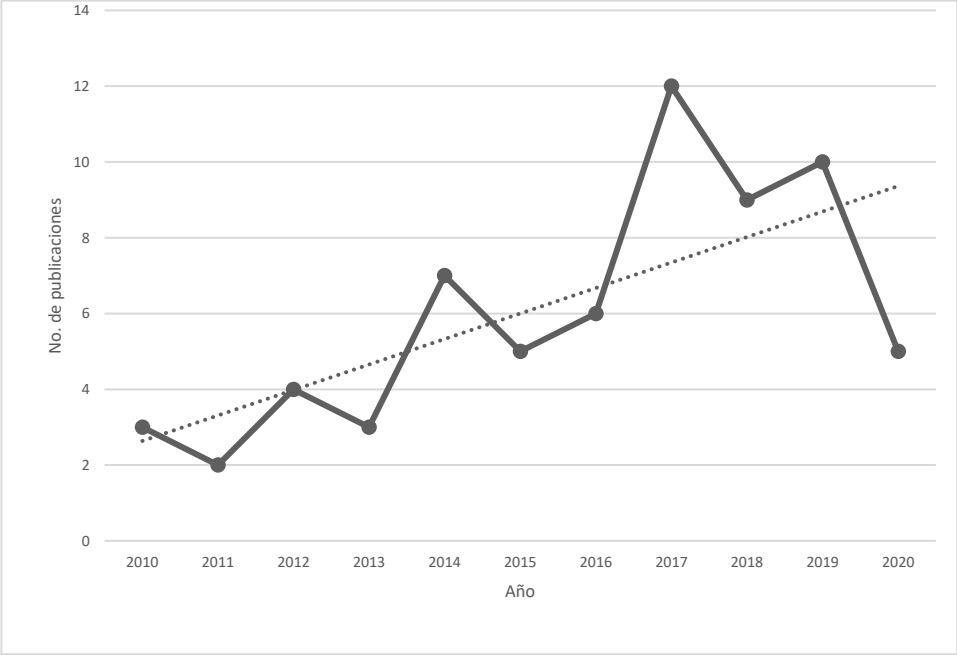
Se realizó un análisis bibliométrico descriptivo de artículos científicos que arrojó la página de *ScienceDirect* (uno de los principales repositorios de revistas científicas a nivel global), utilizando las palabras clave *"benefit transfer in ecosystem services valuation"* y seleccionando el periodo 2010-2020. Se considero como base el año 2010, debido a la tendencia creciente de publicaciones relacionadas con ejercicios de VESEs. Este aumento en el número de publicaciones implicó una mayor diversificación en los métodos de valoración utilizados para tal fin; sin embargo, el MTB abarcó una mayor proporción en el total de estudios de valoración analizados (Acharya et al., 2019). Se revisaron los títulos y resúmenes de 2337 artículos que arrojó el buscador, y se seleccionaron 66 articulos enfocados a estudios de casos prácticos sobre VESEs con el MTB. Posteriormente, se analizaron con base en los siguientes criterios: i) año y número de publicaciones, ii) herramientas metodológicas y tecnológicas empleadas en la valoración, iii) país de origen donde se realizaron los estudios, iv) SEs valorados con mayor frecuencia, v) unidades de análisis (cuencas, mares, humedales, áreas protegidas, etc.), y vi) regímenes de propiedad de las unidades de análisis (área natural protegida/terrenos públicos, propiedad privada, propiedad ejidal y comunal).

Resultados

Tendencia de estudios de VESEs utilizando el MTB

En la Gráfica 1, se observa que, la tendencia en cuanto a la publicación de artículos sobre VESEs con el MTB ha sido creciente, misma que reportó su punto máximo en 2017, año en el que, se encontraron 12 artículos que cumplieron los requisitos para ser considerados en el análisis, y su punto mínimo en 2011, año en que solo se encontraron 2 artículos.

Gráfica 1. Número de publicaciones anuales de estudios de VESEs utilizando el MTB



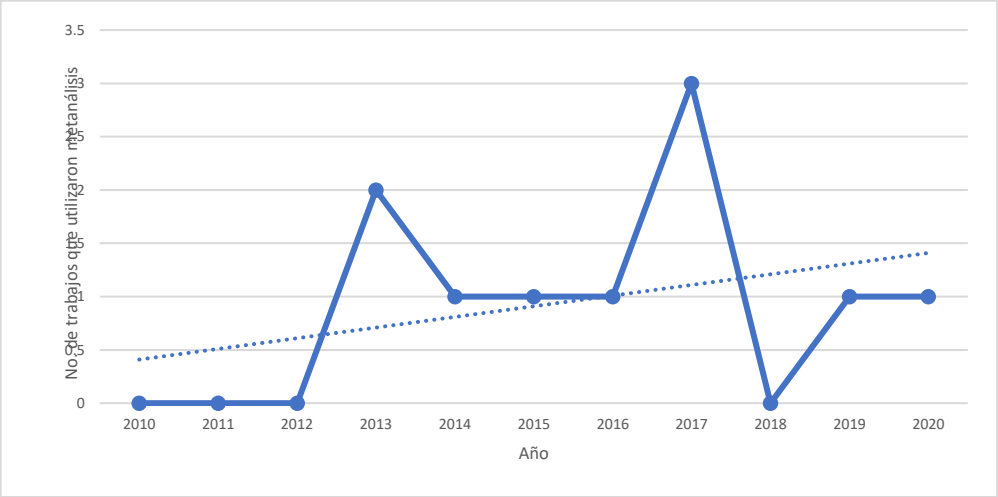
Herramientas metodológicas y tecnológicas empleadas en los estudios de VESEs con el MTB

Las herramientas metodológicas que se utilizan para generar y representar las funciones de transferencia de beneficios también han evolucionado. Estas se utilizan de manera complementaria unas con otras para obtener resultados más cercanos a la realidad. Dos recursos tecnológicos que facilitan esta tarea son los repositorios digitales de información relacionada con los estudios de valoración y los sistemas de información geográfica (SIG).

Los repositorios donde se almacenan de manera digital los datos de estudios de valoración realizados en diferentes años y lugares del planeta, facilitan el acceso a información para la realización de metanálisis, mismos que permiten generar aproximaciones a la VESEs, ya que obtener el valor mediante métodos directos sería muy costoso en términos de tiempo y dinero.

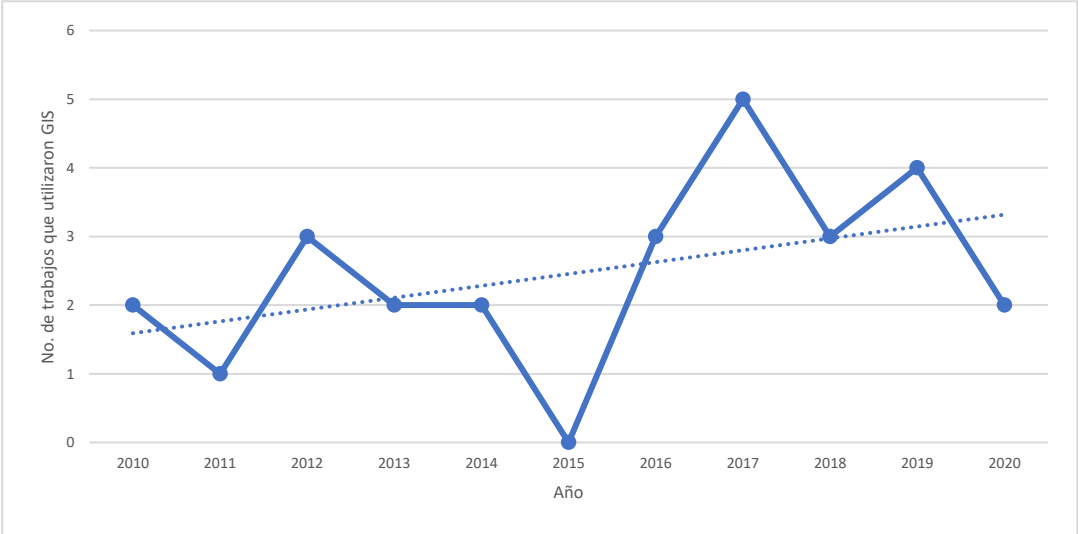
En la Gráfica 2, se observa que, el uso de metanálisis para la obtención de coeficientes que permiten construir una función de transferencia de beneficios también mostró una tendencia creciente durante el periodo analizado.

Gráfica 2. Uso de metanálisis en VESEs utilizando el MTB.



Los SIG permiten la representación de los valores en mapas, identificación de coberturas, estimación de distintos escenarios de transición del valor y su ubicación geográfica a lo largo del tiempo. La Gráfica 3, muestra una tendencia creciente en la utilización de SIG. Asimismo, en los artículos revisados, las herramientas más comunes para el análisis espacial de la VESEs fueron los programas *ArcGIS* e *InVEST Tool*.

Gráfica 3. Artículos que utilizaron SIG



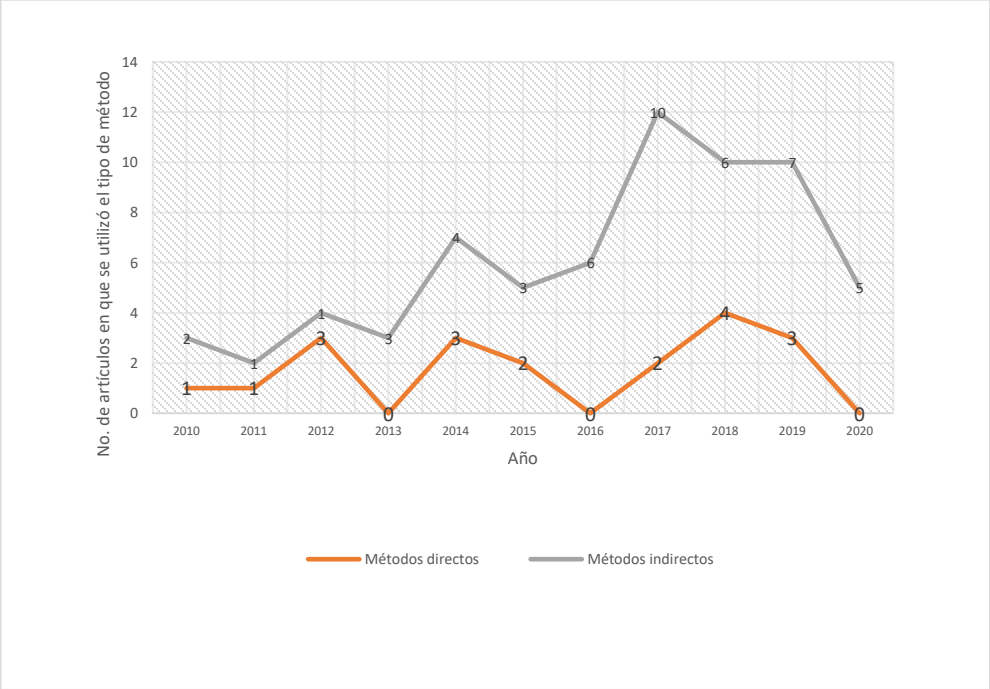
Respecto al tipo de métodos que se han utilizado para la obtención de los coeficientes de la función de transferencia de beneficios de SEs, estos han sido tanto directos (por ejemplo, experimentos de elección y valoración contingente), como indirectos (por ejemplo, precios hedónicos, metanálisis, etc.). En la Gráfica 4, se observa una tendencia a preferir la utilización de métodos indirectos para la obtención de los coeficientes de las funciones de transferencia de beneficios, ya que en todos los años que abarcó este análisis, siempre fue mayor el número de estudios que utilizaron estos métodos; la accesibilidad para el uso de la

información, ahorro de costos y tiempo que implica la utilización de estos métodos explica la preferencia de utilizarlos.

País de origen de los estudios

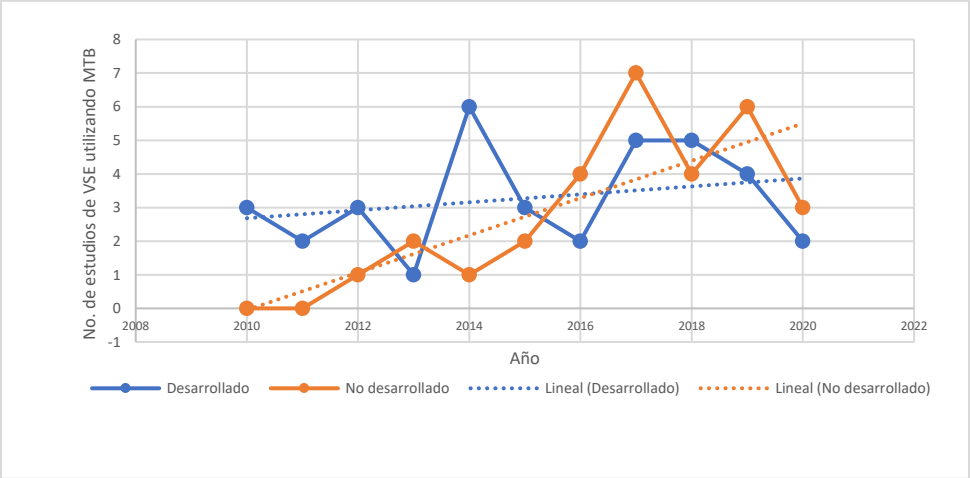
Hasta antes de 2016, la mayoría de los estudios que se habían realizado de VESEs utilizando el MTB fueron realizados en países considerados desarrollados, principalmente en Estados Unidos de América (en este país identificaron 15 estudios de VESEs utilizando MTB). En la Gráfica 5, se puede ver que, a partir de 2016, con excepción de 2018, la mayoría de los estudios se realizaron en países en vías de desarrollo. El país que más aportó a este aumento de estudios realizados fue China con 9 estudios concentrados en los años 2017, 2018, 2019 y 2020.

Gráfica 4. Métodos utilizados en VESEs para obtener los coeficientes de la función de TB *2010-2020*

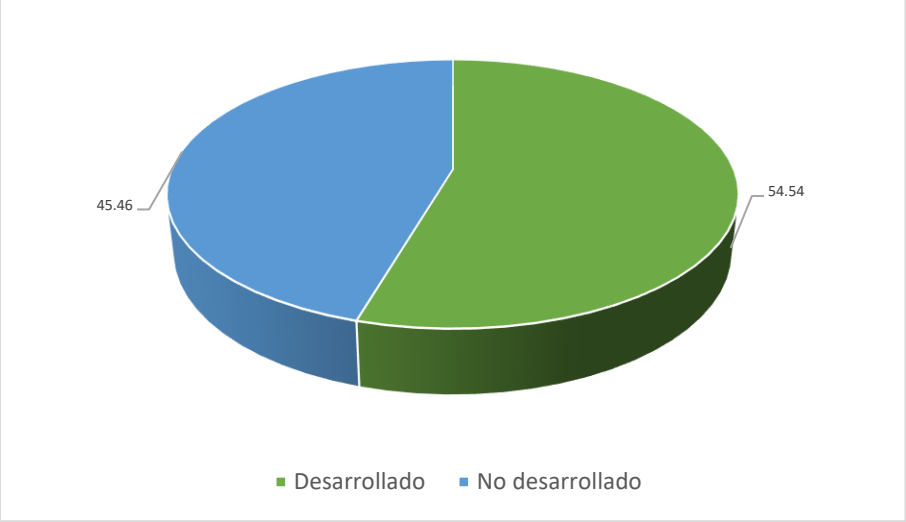


Respecto al concentrado total de estudios analizados, la disparidad entre el número de estudios encontrados no es tan significativa, como se muestra en la Gráfica 6, los países desarrollados concentraron 36 estudios (54.54%), mientras que en los países en vías de desarrollo se realizaron 30 investigaciones de este tipo (45.46%). La tendencia de los estudios analizados indica que en términos de herramientas e información disponible relacionada con la VESEs, en años recientes se ha reducido la brecha entre países.

Gráfica 5. Estudio de VESEs por países que utilizaron el MTB, 2010-2020

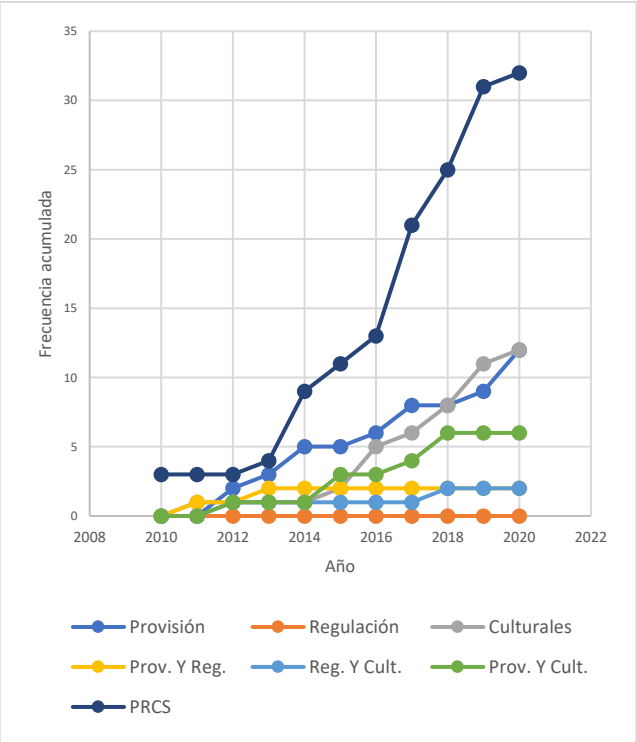


Gráfica 6. Total de artículos de VESEs utilizando MTB por país 2010-2020



SEs valorados con mayor frecuencia

De acuerdo con la Gráfica 7, la tendencia en los 32 estudios fue valorar en conjunto los cuatro tipos de SEs: Provisión (P), Regulación (R), Culturales (C) y Soporte (S), PRCS como se observa en la gráfica. Este tipo de valoraciones tuvo su mayor crecimiento en el periodo de 2016-2019, aunque se debe tomar en cuenta que, en el año 2020 la revisión se hizo hasta principios del mes de mayo.



Gráfica 7. SEs valorados 2010-2020

Los SEs de provisión y culturales se valoraron respectivamente, en 12 de las publicaciones revisadas, ambas categorías se ubicaron como las segundas en número de observaciones; y en el caso de los servicios de regulación, no fueron valorados individualmente en ninguno de los estudios analizados.

Unidad de análisis de la que se valoraron los SEs

De acuerdo con la Gráfica 8, los estudios de VESEs se realizaron en 12 diferentes unidades de análisis, que se presentan en la Gráfica 8. Las áreas naturales protegidas concentraron la mayor cantidad de estudios de VESEs utilizando el MTB, encontrándose 10 estudios de valoración a estas unidades.

Los ecosistemas costeros y las regiones agrícolas concentraron igual cantidad de estudios, siendo los segundos con más frecuencia, con 9 cada uno. El tercer lugar lo ocuparon los humedales, ya que estos concentraron 8 estudios en total. Estas cuatro unidades de análisis concentraron aproximadamente el 54% del total de los estudios de valoración que se analizaron durante el periodo.

En la Gráfica 9, se observa que la VESEs en áreas naturales protegidas tiene una presencia constante a partir del año 2013, se identificó que, a partir de ese año, se realizó por lo menos una publicación anual relacionada con esta unidad de análisis; en el caso de los ecosistemas costeros y de las regiones agrícolas, el periodo de mayor crecimiento se ubica en el periodo

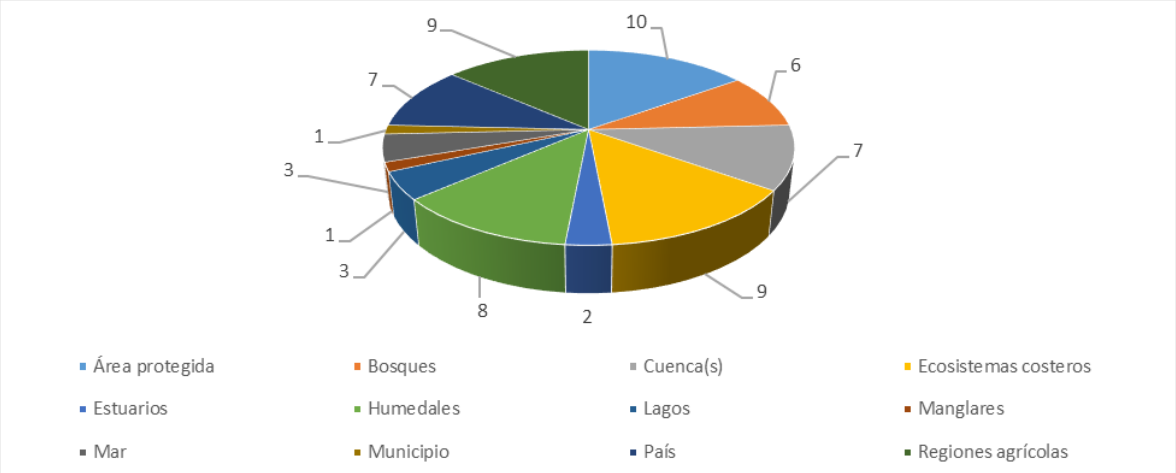
2015-2020. El resto de las unidades de análisis muestran un crecimiento relativamente uniforme desde el año 2016, que es cuando se empezó a observar el incremento en la frecuencia de publicaciones en que se utilizó el MTB.

Estudios sobre VESEs y los regímenes de propiedad de las unidades de análisis

La Gráfica 10, muestra que este tipo de estudios son más comunes en espacios geográficos que son gestionados por los gobiernos, ya que en estos se concentraron 57 de los 66 estudios de valoración analizados (aproximadamente 86%).

En espacios geográficos gestionados por privados se realizaron 8 estudios (aproximadamente 12% del total), y en territorios comunales solo 1 (aproximadamente 2% del total). Durante el periodo, el crecimiento de los estudios realizados en territorios gestionados por el gobierno presentó una tendencia marcadamente creciente a partir del año 2014. En el caso de los estudios realizados en territorios de propiedad privada, estos mostraron una tendencia de bajo crecimiento durante el periodo, mientras que los de propiedad comunal, casi nula.

Gráfica 8. Unidad de análisis para VESEs



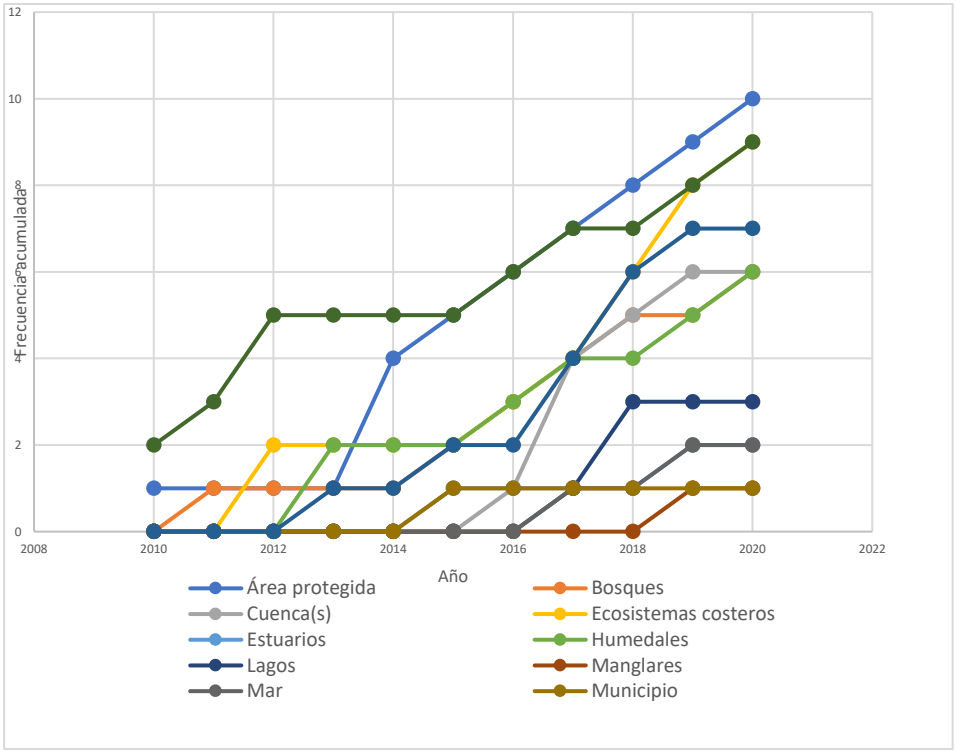
Conclusiones

Existe una tendencia creciente del número de publicaciones sobre VESEs que utilizan el MTB, por lo que se espera que en próximos años exista una mayor cantidad de resultados publicados en bases de datos. Estos ayudarán a reducir los problemas de validez y confiabilidad en la implementación de este método. Si sucede de esta manera, la brecha entre el número de estudios que combinan otros métodos indirectos con el MTB, se acrecentará con respecto al número de estudios que se apoyan en métodos directos.

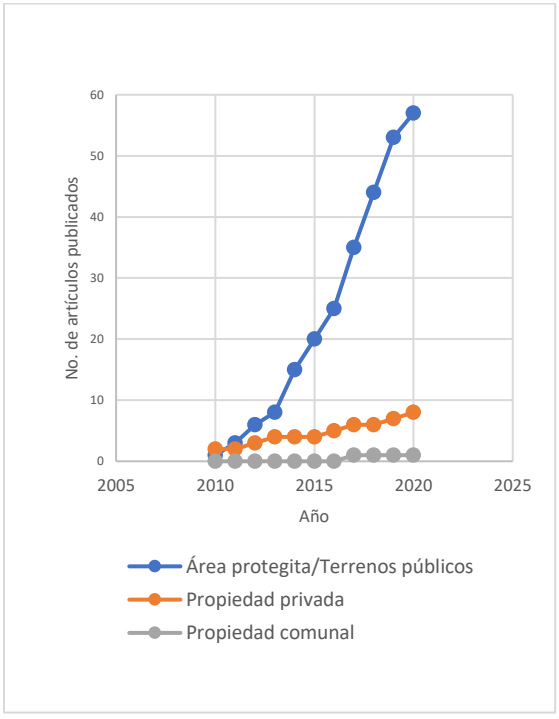
A la vez que se contará con mayor información para la realización de análisis a través de metanálisis más precisos que permitan construir funciones de transferencia de beneficios de mayor confiabilidad. El análisis espacial mediante el uso de SIG será más común, principalmente por las ventajas que estas herramientas brindan para analizar transiciones de coberturas, localización y VESEs en diferentes escenarios y momentos del tiempo.

ISSN: 2594-0171
Contribución al Conocimiento Científico y Tecnológico en Oaxaca
Año 5, Vol. 5, No. 5, 27 de Septiembre, 2021

Gráfica 9. Observaciones acumuladas de las unidades de análisis de VESEs con MTB 2010-2020



Gráfica 10. Observaciones acumuladas por regímenes de propiedad de las unidades de análisis de VESEs con MTB 2010-2020



Dado el incremento de información publicada para la aplicación de métodos indirectos, también existe una tendencia a la reducción de la brecha entre el número de estudios de VESEs realizados en países considerados desarrollados y aquellos que se consideran en vías de desarrollo. Esta correlación entre el incremento del uso de esta metodología y el aumento de estudios realizados en países no desarrollados respalda la afirmación de que el MTB es especialmente útil en escenarios de recursos limitados para la realización de este tipo de trabajos. Los estudios de VESEs enfocados al análisis de varios tipos de estos servicios son aquellos que han sido más recurrentemente realizados, ya que estos proveen información más completa respecto a la VESEs. En cuanto al tipo de unidad valorada, la mayor presencia la tuvieron las áreas protegidas, seguidas de los ecosistemas costeros y las regiones agrícolas, aunque la tendencia muestra que en años recientes se ha incrementado el número de estudios de VESEs usando MTB en las cuencas.

En torno a los regímenes de propiedad de las unidades analizadas en los estudios de VESEs, los resultados sugieren una tendencia evidente a incrementar la brecha entre los estudios realizados sobre áreas protegidas/terrenos públicos y aquellos de diferente régimen. Dado que las áreas protegidas y los terrenos públicos tienen características de bienes públicos, el interés de conocer los valores económicos de estos territorios es generalizado entre diversos grupos de interés, esta característica contribuye a explicar por qué este tipo de investigaciones se enfocan más en áreas con este tipo de régimen de propiedad.

Referencias bibliográficas

Acharya, R. P., Maraseni, T., & Cockfield, G. (2019). Global trend of forest ecosystem services valuation - An analysis of publications. *Ecosystem Services*. doi:https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.100979

Artell, J., Ahtiainen, H., & Pouta, E. (2019). Distance decay and regional statistics in international benefit transfer. *Ecological Economics*. doi:https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.106383

Chen, W., Chi, G., & Li, J. (2019). The spatial association of ecosystem services with land use and land cover change al the county level in China, 1995-2015. *Science of the Total Environment*, 459-470. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.03.139

Christie, M., Fazey, I., Cooper, R., Hyde, T., & Kenter, J. O. (2012). An evaluation of monetary and non-monetary techniques for assessing the importance of biodiversity and ecosystem services to people in countries with developing economies. *Ecological Economics*, 67-78. doi:10.1016/j.ecolecon.2012.08.012

Costanza, R., d'Agre, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., . . . van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 253-260. doi:10.1038/387253a0

Daily, G. C. (1997). *Nature´s Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems.* Washington, D. C.: Island Press. doi:10.12987/9780300188479-039

Huber, C., Meldrum, J., & Richardson, L. (2018). Improving confidence embracing uncertainty: A meta-analysis of U. S. hunting values for benefit transfer. *Ecosystem Services*, 225-236. doi:https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.07.001

Khan, S. U., Khan, I., Zhao, M., Khan, A. A., & Sufian Ali, M. A. (2019). Valuation of ecosystem services using choice experiment with preference heterogeneity: A benefit

transfer analysis across inland river basin. *Science of the Total Envirenment*, 126-135. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.049

Londoño, L. M., & Johnston, R. J. (2012). Enhancing the reliability of benefit transfer over heterogeneous sites: A meta-analysis of international coral reef values. *Ecological Economics*, 80-89. doi:https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.03.016

Loomis, J., Kent, P., Strange, L., Fausch, K., & Covich, A. (2000). Measuring the total economic value of restoring ecosystem services in an impaired river basin: results from a contingent valuation survey. *Ecological Economics*, 103-117. doi:10.1016/S0921-8009(99)00131-7

Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis.* Washington, DC: Island Press.

Richardson, L., Loomis, J., Kroeger, T., & Casey, F. (2015). The role of benefit transfer in ecosystem service valuation. *Ecological Economics*, 51-58. doi:https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.02.018

Rodríguez-espinasa, P., Sabarathinam, C., Ochoa-Guerrero, K., Martínez-Tavera, E., & Panda, B. (2021). Geochemical evolution and Boron sources of the groundwater affected by urban and volcanic activities of Ouebla Valley, south central Mexico. *Journal of Hidrology*, 124613.

Rosenberger, R. S. (2015). Benefit Transfer of Environmental and Resource Values, A Guide for Researchers and Practitioners. En *Benefit Transfer Validity and Reliability.* (págs. 307-326). doi:https://doi.org/10.1007/978-94-017-9930-0_14

Sannigrahi, S., Chakraborti, S., Banerjee, A., Rahmat, S., Bhatt, S., Jha, S., . . . Sen, S. (2019). Ecpsystem service valuation of a natural reserve region for sustainable management of natural resources. *Environmental and Sustainable Indicators*. doi:https://doi.org/10.1016/j.indic.2019.100014

Sharma, S. K., Baral, H., Laumonier, Y., Okarda, B., Komarudin, H., Purnomo, H., & Pacheco, P. (2019). Ecosystem services under future oil palm expansion scenarios in West Kalimantan, Indonesia. *Ecosystem Services*. doi:https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.100978

Su, K., Wei, D.-z., & Lin, W.-x. (2020). Evaluation of ecosystem services value and its implications for policy making in China - A case study of Fujian province. *Ecological Indicators*. doi:https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105752

Taye, F., Folkersen, M., Fleming, C., Buckwell, A., Mackey, B., Diwakar, K., . . . Ange, C. (2021). The economic values of global forest ecosystem services: A meta-analysis. *Ecological Economics*. doi:10.1016/j.ecolecon.2021.107145.

ISSN: 2594-0171
Contribución al Conocimiento Científico y Tecnológico en Oaxaca
Año 5, Vol. 5, No. 5, 27 de Septiembre, 2021

Artículo

Notas para la divulgación científica sobre el origen del socavón de santa María Zacatepec, puebla

Campos Enríquez, José Oscar[1]; Lermo Samaniego, J.F.[2]
[1]Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México
[2]Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México

*Autor de correspondencia: ocampos@geofisica.unam.mx

Recibido: 2 de julio de 2021
Aceptado: 6 de septiembre de 2021
Publicado en línea: 27 de septiembre de 2021

Resumen

El estudio del origen del socavón que se ha formado en Santa María Zacatepec (Puebla) es importante para estimar el riesgo geológico asociado. También lo es la divulgación para un público no académico de las causas que lo originaron, ya que permite fomentar una conciencia responsable del medio ambiente. Con este objetivo, se ilustra, para un público no académico, el contexto geológico regional de la zona del socavón. En este marco geológico se analizan los factores que dan origen a dicho socavón. Es decir, se adapta el modelo teórico conceptual a la realidad geológica, para lo cual se incluyen consideraciones basadas en datos geológicos y geofísicos de la zona de los valles de Puebla y de Tlaxcala. Se indica que el riesgo geológico no solamente se debe asociar a las condiciones geológicas, sino también a actividades del ser humano. De manera muy ilustrativa se pone de manifiesto el papel que la actividad pasada de los volcanes juega en nuestra vida actual. Pero también se hace notar que el entorno geológico es vivo y se modifica, y que en su dinámica participan las actividades del ser humano (extracción de agua del subsuelo). Todo este contexto geológico-antropogénico constituye un sistema, que comprende al riesgo geológico consustancial a las modificaciones del ambiente, el cuál debe ser analizado con un enfoque sistémico, que incluya las disciplinas de las ciencias físico matemáticas y del medio ambiente (ecología, cambio global), y a las ciencias sociales y políticas (la gestión sustentable de recursos naturales, la gobernanza).

Palabras claves: Divulgación, Socavón, Santa María Zacatepec, origen, contexto geológico

Abstract

The study of the origin of the sink-hole formed at Santa María Zacatepec (Puebla State) is important to assess the respective geologic risk. Also important is to divulgate, to a broad public, the causes of this sink-hole, to create a socially responsible conception of the ambient. For this purpose, an illustration is made of the regional and tectonic setting of the sink hole of Santa María Zacatepec, Puebla. The elements that play in the origin of this sink hole are illustrated in this geologic framework. In this way, the theoretical conceptual model for the origin of this kind of structures is adapted to the real geologic context. Considerations are

based on results of recent geologic and geophysical studies conducted in the valleys of the states of Puebla and Tlaxcala. It is enhanced that the geologic risk is not only associated with geologic conditions, but also to the anthropogenic activities. In an illustrative way, this analysis, puts into relieve the role that the past volcanic activity plays in our present live. This presentation also enables to let note that the geologic media is alive and suffers modifications, whose dynamics is influenced by anthropogenic activities (for example, massive extraction of ground water). It is noted that all the anthropogenic-geologic context constitutes a system, that comprises the geologic risk, which must be analyzed in a holistic manner including not only physics and mathematical sciences and ambient sciences (ecology, and global change), but political and social sciences (management of natural resources, government) as well.

Key words: Divulgation, Sink hole, Santa María Zacatepec, geologic origin.

Introducción

En el estado de Puebla se ha formado un socavón. Son numerosas las pláticas con respecto de su origen que se han impartido en varios foros. Los medios de comunicación han entrevistado a especialistas en esta materia. En las redes sociales se han presentado materiales (videos) para explicar su origen. En todos estos casos, las explicaciones dadas del origen del socavón se han basado en modelos conceptuales de carácter teórico.
En un uno de los videos difundidos en las redes sociales ya se proponen hipótesis fundamentadas en conceptos de la geotecnia. La CONAGUA también realizó un análisis y postuló la causa de este socavón basada en conceptos de la geohidrología. Actualmente el Instituto Politécnico Nacional realiza estudios (Rodríguez-Espinosa, 2021) enfocados a profundizar en las causas del origen de esta depresión. Es en este contexto que es necesario comunicar a la sociedad general un modelo que incorpore las características geológicas y tectónicas del entorno regional de la zona del socavón.

Generalidades

¿Qué procesos intervienen en la formación de un socavón? Este fenómeno se presenta frecuentemente en zonas urbanas. En cuyo caso, a partir de una fuga en la red de distribución de agua, se establece un flujo de agua subterránea, el cual erosiona los materiales rocosos que conforman el subsuelo, y lo transporta. Así se va formando un espacio alrededor del punto de fuga. En algún momento el suelo se colapsa al no poder ser sostenido.

Esta analogía nos indica que la formación de un socavón involucra una transferencia de agua y del material rocoso erosionado. La transferencia del material necesita de una alta permeabilidad en el subsuelo, que permita la redistribución del material erosionado hacia espacios prexistentes en el subsuelo.

Este proceso de transferencia de masa también opera en otros ambientes y a otras escalas. Por ejemplo, en la formación de dolinas, y cenotes en la península de Yucatán. En este particular caso el socavamiento se da mediante disolución de la roca, lo cual toma tiempos muy largos.

Así los elementos que se requieren son:
1.- Flujo de agua subterránea que erosiona el material rocoso alrededor de un volumen del subsuelo.
2.- Alta permeabilidad en el medio geológico que permita el flujo bifásico.
3.- Espacios hacia donde se pueda redistribuir el material rocoso socavado, y o colapsado.
Para ver qué forma revisten estos elementos debemos analizar el contexto geológico regional del poblado de Santa María Zacatepec.

Contexto Geológico y Tectónico

El socavón se ubica, a unos 20 km al noroeste de la ciudad de Puebla, en una zona de terrenos agrícolas, en el poblado de Santa María Zacatepec. Los labradíos agrícolas de esta zona se ubican en la parte sur de una planicie que comprende parte de los estados de Puebla y de Tlaxcala, el denominado valle de Puebla-Tlaxcala. Al oeste, este valle está limitado por el volcán Iztaccíhuatl, y al este por el volcán La Malinche. Más al suroeste se encuentra el volcán Popocatépetl. La cercana presencia de estos estratovolcanes ha influido mucho en los tipos de rocas que constituyen el subsuelo de este valle. Avalanchas de productos volcánicos y cenizas de erupciones de estos tres aparatos volcánicos, así como productos sedimentarios producto de la erosión y metamorfismo que sufren los productos volcánicos, se han depositado, a lo largo del tiempo geológico reciente, en el valle de Puebla y de Tlaxcala.

Estos productos de origen volcánico descansan sobre roca calcárea, la cual constituye el basamento de este valle, pero la profundidad a esta roca calcárea no es uniforme. Por ejemplo, en algunas partes de la ciudad de Puebla se encuentra en la superficie (por ejemplo, en la colonia La Calera), pero hacia el occidente, hacia el Valle de México, tiende a profundizar. En la parte central del valle Puebla-Tlaxcala, a lo largo de fallas, este basamento se fracturó y se profundizó en forma escalonada, centenas de metros, para formar una cuenca que se rellenó con los productos volcánicos (Vázquez-Domínguez, 2020). Este proceso se realizó paulatinamente en el pasado geológico durante miles de años.

La Figura 1 ilustra la delimitación de esta depresión por dos fallas al sur (en el estado de Puebla) y otras dos al norte (en el estado de Oaxaca). Estas fallas tienen una dirección aproximadamente este-oeste.

Al sur tenemos las fallas denominadas Tepeaca, y Huejotzingo (en el estado de Puebla), mientras que al norte tenemos las fallas Tlaxcala, y Zacatelco (ambas en el estado de Tlaxcala). Estudios geofísicos recientes enfocados en determinar la estructura de esta depresión, indican que existen otras fallas ocultas en el subsuelo por debajo de la cubierta constituida por los productos volcánicos. Dichas fallas son paralelas a las que se observan en superficie. Una de estas fallas encubiertas por los sedimentos y suelos pasa aproximadamente por debajo de la zona del socavón

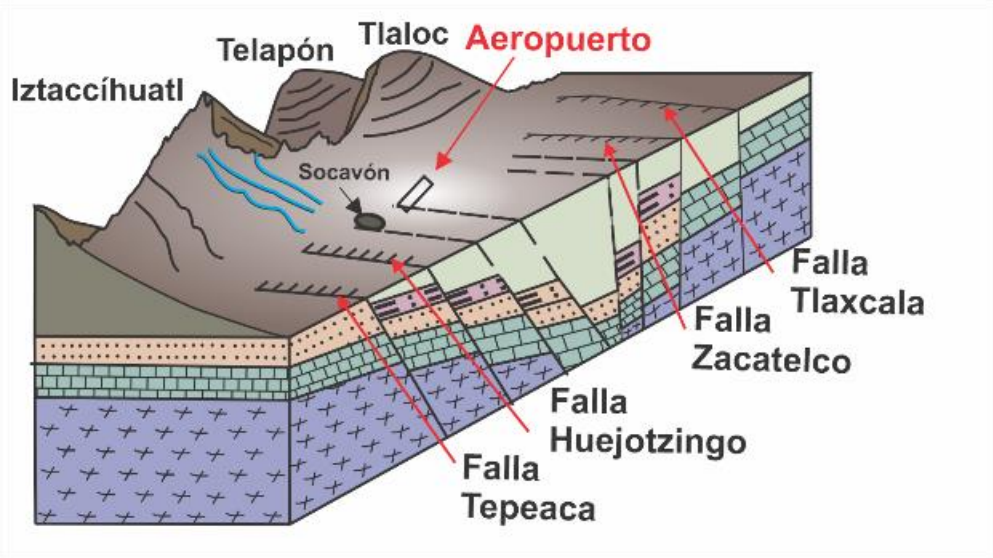


Figura 1.- Esquema del contexto geológico de la zona del socavón de Santa María Zacatepec, Puebla.

En las laderas del volcán Iztaccíhuatl, a lo largo de barrancos que han sido labrados por los escurrimientos de agua, a través del tiempo geológico, el agua de lluvia escurre hacia el valle de Puebla-Tlaxcala. En algunas partes forma cursos de agua, como por ejemplo al norte de Huejotzingo. Pero al oeste de Santa María Zacatepec, al llegar el agua a la planicie se infiltra por los depósitos de pie de monte y alimentan a los acuíferos superficiales y profundos. En lugares donde el nivel freático es muy somero, por ejemplo, al este del poblado de Santa María Zacatepec, el agua resurge en forma de arroyos que alimentan el río Atoyac, el cual continua su curso, a través de la ciudad de Puebla, hasta la presa de Valsequillo (al sur de la zona metropolitana).

A un nivel regional y no muy profundo, es así como fluye al agua subterránea por debajo del valle de Puebla-Tlaxcala. A niveles más profundos también fluye hacia el oriente. Es muy factible que también lo haga a lo largo de los planos de fallas ya mencionados que son zonas de alta permeabilidad. ¿A dónde ha sido transportado el material que existía en el socavón? Ha sido transportado hacia oquedades. ¿Oquedades en el subsuelo? Sí, esto es algo muy posible y su existencia está probada por el mismo socavón. ¿Dónde se ubican dichas oquedades con un volumen equivalente al del socavón?

Recordemos que el basamento está constituido por rocas calcáreas en cuyo seno se pueden formar, a lo largo del tiempo geológico, estas oquedades y dar origen a ríos subterráneos. Un ejemplo, muy palpable lo constituyen las grutas de Cacahuamilpa en el estado de Morelos. Análisis geoquímicos del agua de pozos del sistema acuífero de Puebla indican que los pozos al sur de la falla subterránea que pasa por debajo de la zona del socavón el agua es de naturaleza carbonatada. Pero al norte de la falla el agua subterránea ya tiene otra composición química (Rodríguez-Espinosa et al., 2020). Estudios geofísicos recientes indican que la profundidad al basamento calcáreo es de 30 metros aproximadamente al pie de la Malinche, y de 80 metros al norte de Atlixco.

Otra posibilidad la constituyen oquedades más someras, que se pueden formar dentro del paquete de productos volcánicos de la cubierta del valle. Por ejemplo, se pueden formar oquedades por encima o por debajo de una colada de lava, o de una nube ardiente (material consolidado) sobre puesta, o cubierta por cenizas volcánicas. Estos últimos materiales pueden ser lixiviados y transportados a otros lugares en el subsuelo.

Con estos elementos podemos formular una hipótesis de trabajo. Una de ellas es que el agua se infiltró a través de los planos de falla hasta una de estas cavidades, transportando hacia oquedades, o ríos subterráneos en las calizas, el material del socavón. Otra hipótesis es que el material erosionado se re-depositó en oquedades más someras.

¿Ha contribuido el ser humano al origen de este socavón? La respuesta es afirmativa. En el perímetro del aeropuerto internacional de Puebla, se ha observado que el suelo de los terrenos aledaños se hunde. En efecto, según estudios de interferometría satelital, el suelo en la zona de Santa María Zacatepec, ya en 2016, se estaba hundiendo a una taza de 4 centímetros por año (Francesca Cegna, comunicación Personal).

Un estudio muy reciente de interferometría satelital (Hermosillo-Camacho, 2021) indica la existencia de franjas con un mayor hundimiento del suelo alrededor del actual socavón. Estas franjas tienen una orientación aproximada este-oeste, es decir son paralelas a las fallas que afectan el valle de Puebla-Tlaxcala. En general, la subsidencia puede atribuirse a la compactación diferencial del terreno debido a que los estratos donde se aloja el acuífero se compactan al extraérseles el agua. La explotación del manto acuífero pudo haber modificado el régimen de flujo del agua subterránea, y así contribuido a la creación del socavón. Cabe mencionar que en estudios de riesgo sísmico en el estado de Tlaxcala se detectó actividad sísmica a lo largo de las fallas de Tlaxcala y de Zacatelco. También se detectaron sismos (Lermo et al., 2011) al este del aeropuerto internacional de Puebla (es decir a dos kilómetros aproximadamente al norte de la zona de socavón). Esta sismicidad indica que las fallas mencionadas tienen un grado de actividad. La subsidencia detectada, la actividad sísmica de las fallas y la creación misma del socavón indican que el contexto geológico del socavón se modifica con el tiempo. Este dinamismo que se da a diferentes escalas y órdenes de tiempo, indica que nuestro medio ambiente es un ente con vida.

Actividades humanas como la extracción agua del subsuelo para su uso en agricultura pueden acelerar el dinamismo de los cambios geológicos.

Conclusiones

En este análisis sistémico basado en datos reales y no solamente en un modelo conceptual teórico, se esboza el modelo geológico propio en que se originó el socavón de Santa María Zacatepec, Puebla. Este análisis permite ilustrar que el riesgo geológico no solamente se debe asociar a las condiciones geológicas, sino también a actividades del ser humano. De manera muy ilustrativa, este análisis, pone de manifiesto el papel que la actividad pasada de los volcanes juega en nuestra vida actual. Pero también que el entorno geológico es vivo y se modifica, en cuya dinámica participan las actividades del ser humano (extracción de agua del subsuelo). El riesgo geológico es consustancial a estos cambios y debe ser analizado no solamente por disciplinas de las ciencias físico matemáticas y ciencias del medio ambiente,

sino también por las ciencias sociales y políticas que incluyan la gestión sustentable de recursos naturales y la gobernanza.

Se presentó un análisis sistémico del origen del socavón. Origen que proporciona material idóneo para ayudar a formar una conciencia socialmente responsable del medio ambiente.

Recomendaciones

Dado que este caso ofrece una excelente oportunidad para crear conciencia del medio ambiente y su relación con la geología se recomienda elaborar material para presentaciones de divulgación del origen del socavón de Santa María Zacatepec, Puebla. El origen del socavón se presta para hacer conocer elementos geológicos propios de la región a un público no académico. Este material puede ser usado en programas de puertas abiertas, o en ferias organizadas por instituciones académicas.

Referencias bibliográficas

Hermosillo-Camacho, G.D. (2021). consultado en https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:6808904136432635904

Lermo, J., Esteva, L., Hernández, E.I., Cajica, J., Martínez, J., Angulo, J., Espitia, G., Vega D., Luis Espinoza, L. (2011). *Estudios sismológicos y de peligro sísmico para el desarrollo de las Norma Técnicas Complementarias para Diseño Sísmico del Estado de Tlaxcala*, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Segundo Informe, Proyecto Interno IdeI#0509, México.

Rodríguez-Espinosa, P.F. (2021*). Proyecto de Investigación Prospectiva de un Reciente Socavón en Santa María Zacatepec, Puebla, México*, Centro Interdisciplinario de Investigaciones Sobre Medio Ambiente y Desarrollo, Instituto Politécnico Nacional, 19 p.

Rodríguez-espinasa, P., Sabarathinam, C., Ochoa-Guerrero, K., Martínez-Tavera, E., & Panda, B. (2021). Geochemical evolution and Boron sources of the groundwater affected by urban and volcanic activities of Puebla Valley, south central Mexico. *Journal of Hidrology*, 124613.

Vázquez-Domínguez, C. (2020). *Estructura cortical somera de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (Parte Oriental)* [Tesis de Maestría, Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, 92 p.]

CIIDIR IPN UNIDAD OAXACA

Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca.

Hornos No. 1003, Col. Noche Buena, Municipio de Santa Cruz Xoxocotlán C.P. 71230.
Oaxaca. Teléfono: 951 517 06 10, ext. 82769
https://www.ciidiroaxaca.ipn.mx/