

El lago Coatetelco (estado de Morelos), testigo de cambio ambiental y perturbación antropogénica¹

Priyadarsi D. Roy,² Oscar Agesandro García-Arriola,^{2,3}
María Patricia Girón García,² José Luis Sánchez-Zavala²

Resumen. Esta investigación aporta información para la mitigación de los efectos de variabilidad climática y perturbación antropogénica, o alteración humana, en el lago Coatetelco (Morelos) y sus alrededores. Los recursos hídricos se estudiaron considerando la estacionalidad y la calidad para el consumo y riego. El uso y la cobertura de suelo mostraron

una alteración humana y erosión debido al aumento de urbanización en las últimas cuatro décadas. Finalmente, los sedimentos lacustres mostraron ser testigos de los impactos del cambio climático global en los últimos 18 000 años, y se identificaron intervalos de variaciones hidrológicas previas a los asentamientos humanos en la región.

Palabras clave. Calidad de agua, cambio climático, perturbación humana, geología, cambio del uso de suelo, geoarqueología

El lago Coatetelco es un cuerpo de agua poco profundo y perenne en el estado de Morelos. Representa un importante recurso hidrológico para las actividades agrícolas y domésticas de la región. Este lago se encuentra a unos 70 km al sur de

¹ Proyecto PAPIIT IN101121: “Estudio geoquímico del Lago Coatetelco (Morelos) y reconstrucción de las respuestas de variabilidad climática durante el Pleistoceno Tardío y el Holoceno en el suroeste de México”

² Instituto de Geología. roy@geologia.unam.mx, pgiron@geologia.unam.mx, jlsz@unam.mx

³ SECIHTI. agess301290@hotmail.com



la Ciudad de México (ver figura 1). Tiene una superficie de 2.3 km², una profundidad media inferior a 0.5 m y una profundidad máxima de unos 3 m. Las tierras agrícolas circundantes se utilizan para el cultivo de limones, papayas, aguacates, mangos, guayabas, plátanos, maíz y caña de azúcar. La estación meteorológica cercana, en el pueblo de Miacatlán, registra una precipitación media anual aproximada de 1081 mm y una evaporación media anual casi doble (1906 mm). Tanto en verano (junio a agosto: 643 mm) como en otoño (septiembre a noviembre: 327 mm) se registran más precipitaciones debido al *sistema convectivo profundo* (un fenómeno meteorológico que se refiere a la formación de nubes de gran desarrollo vertical que pueden extenderse desde niveles bajos de la atmósfera hasta la alta troposfera) y a la formación de tormentas tropicales en el océano Pacífico, en comparación con el invierno (diciembre a febrero: 25 mm) y la primavera (marzo a mayo: 79 mm). La evaporación sigue siendo más alta en primavera (676 mm) y más baja en otoño (348 mm). Entre todas las estaciones, la primavera es la más seca, con pocas precipitaciones y la mayor evaporación, así como las temperaturas medias (25-27.1 °C) y máximas (33-35.6 °C) más altas. Tanto el verano como el otoño son las estaciones más húmedas, con más precipitaciones y una evaporación relativamente menor.

Durante los años en los que se produce el fenómeno de El Niño, los vientos alisios más fuertes y el desplazamiento de la zona de convergencia intertropical hacia latitudes más meridionales reducen las precipitaciones totales. Dependiendo de la estación, el agua del lago tiene un pH entre 5.9 y 8.5, una conductividad eléctrica entre 294 y 683 µS/cm y un contenido total de sólidos disueltos de entre 147 y 341 mg/L. Las aguas subterráneas de los alrededores del lago pertenecen al acuífero Zacatepec, poco profundo y no confinado, con una transmisividad hidráulica variable ($4.82\text{-}12.10 \times 10^{-3}$ m²/s) y una conductividad hidráulica ($0.005\text{-}0.140 \times 10^{-3}$ m²/s) con una recarga anual mayor (85.3 hm³) en comparación con la extracción (56.4 hm³). El pH general de las aguas subterráneas varía entre 6.3 y 8.1, la conductividad eléctrica entre 550 y 1296 µS/cm y los sólidos totales disueltos oscilan entre 274 y 649 mg/L.

El lago Coatetelco también tiene una gran importancia arqueológica, ya que se encuentra a 8 km del importante centro religioso-político de la cultura Xochicalco, que surgió como una confederación de pueblos al sur de la cordillera volcánica Chichinautzin durante el periodo Clásico tardío (~650-900 d. C.) tras la caída de Teotihuacán. El yacimiento arqueológico de la cultura Coatetelco se encuentra en las inmediaciones del lago homónimo, el cual se convirtió en

un importante centro regional hasta su conquista por los mexicas alrededor del 1430 d. C.

Se recogieron muestras de agua del lago y de los pozos cercanos durante las cuatro estaciones del año 2020. Sin embargo, la evaluación de la calidad del agua se realizó con las muestras recogidas inmediatamente después de la temporada de lluvias de 2020, ya que el objetivo era evaluar las características fisicoquímicas de los recursos hídricos en su estado diluido para determinar su calidad para consumo y riego, así como para evaluar los posibles riesgos para la salud por el consumo de nitratos y fluoruros. Este estudio también incluyó los cambios espaciales y temporales en el uso y la cobertura del suelo en un área circular de 76.5 km², alrededor del lago Coatetelco, incluyendo la presa El Rodeo, situada a unos 2 km al noreste del lago, y los tres principales asentamientos de Coatetelco, Miacatlán y Mazatepec, con una población combinada de unos 36 500 habitantes. Además, los sedimentos recogidos del lago mediante un equipo de perforación con una profundidad de 750 cm se utilizaron como muestras para reconstruir los cambios ambientales e hidrológicos desde hace 18 000 años hasta las primeras ocupaciones humanas en esta región. El análisis de tres factores en el lago Coatetelco y su entorno, mediante herramientas de las ciencias de la Tierra, proporcionó información nueva sobre los impactos de la alteración humana y la variabilidad climática a corto y largo plazo, con el fin de contribuir con información para reducir estos efectos. Los resultados de estos trabajos están publicados como artículos científicos en cuatro diferentes revistas de investigación.

Mediante las composiciones químicas e isotópicas de las muestras de agua estacional del lago y los pozos cercanos, publicadas en la revista *Environmental Research*, los autores Roy, García-Arriola y Selvam (2024)⁴ documentaron los cambios hidroquímicos de las aguas superficiales y subterráneas en relación con las condiciones ambientales y las fuentes de humedad. Las composiciones isotópicas estables mostraron la influencia de una mayor evaporación sobre el agua del lago en la primavera, con más salinidad (Na-HCO₃-Cl) debido a las mayores concentraciones iónicas por evaporación. La afluencia o flujo hacia el lago se mantuvo principalmente superficial en las estaciones secas y pasó a ser predominantemente subterránea en las estaciones húmedas. Sin importar las condiciones de afluencia, la química del agua estaba controlada principalmente por el intercambio iónico entre el agua y las rocas volcánicas. Las aguas subte-

⁴ Priyadarsi D. Roy, Oscar Agesandro García-Arriola y Sekar Selvam, "Seasonality of Hydrogeochemical Evolutions and Isotopic Variabilities ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ and d-excess) in the Surface Water as Well as Groundwater from Tropical Central-South Mexico", *Environmental Research* 250 (2024): 118529.

rráneas mostraron composiciones químicas heterogéneas (Ca-Mg-HCO₃, Na-HCO₃-Cl y Na-HCO₃) debido a las interacciones con los minerales calcáreos y las rocas volcánicas que forman las capas del acuífero. Las composiciones de los isótopos estables de oxígeno e hidrógeno comparadas entre las muestras de agua subterránea y el agua del lago en otoño mostraron una mayor interacción entre la masa de agua superficial y los acuíferos en las estaciones húmedas (verano y otoño). Sin embargo, el agua superficial y el agua subterránea en la estación otoñal estuvieron influenciadas por las lluvias asociadas a las tormentas tropicales. Algunas aguas subterráneas también mostraron influencia terrestre del reciclaje de la humedad, como la precipitación neta y la evapotranspiración terrestre. En la estación seca, las aguas mostraron mayor saturación con respecto a los minerales carbonatados, lo que sugiere que sus depósitos en los archivos sedimentarios pueden utilizarse como un indicador importante para reconstruir las fases secas en la investigación paleoclimática, lo que contribuye a ampliar el registro ambiental más allá de los registros instrumentales hasta varios miles de años en el pasado geológico.



Figura 1. Una vista del lago Coatepec (estado de Morelos), situado a 70 km al sur de la Ciudad de México, tomada con una cámara de dron en febrero de 2024.

Otro aspecto de esta investigación fue la evaluación de la calidad del agua para el consumo, cuyos resultados fueron publicados en la revista *Environmental Science and Pollution Research*, ya que actualmente unas 200 millones de personas en más de 25 países están expuestas a riesgos de problemas de salud como fluorosis dental y esquelética, fracturas óseas, cálculos renales, baja tasa de natalidad, baja función tiroidea, tolerancia a la glucosa y bajos niveles de coeficiente intelectual por beber agua con un contenido de flúor superior a 1,5 mg/L. Del

mismo modo, la exposición a niveles extremadamente altos ($> 50 \text{ mg/L}$) de nitrato durante un período prolongado conlleva otro tipo de riesgos para la salud, como metahemoglobinemia, cáncer de tiroides, hipertensión, diabetes, abortos espontáneos, infecciones del tracto respiratorio y alteraciones del sistema inmunitario. La interacción de las litologías o rocas de los acuíferos con minerales ricos en fluoruro, así como la meteorización química de las rocas volcánicas, provocan el enriquecimiento de fluoruro en los cuerpos acuáticos.

Por otra parte, los niveles elevados de nitrato son una consecuencia directa de los fertilizantes, ya que alrededor del 60 % de las masas de agua con niveles elevados de nitrato se encuentran cerca de las tierras de cultivo. En el mismo artículo, Roy y colaboradores (2023a)⁵ también hicieron una evaluación de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas para el riego, así como una demarcación de los pozos con diferentes calidades para el riego, con el objetivo de proporcionar datos de referencia para compararlos con otras zonas de México y supervisar la calidad del agua a corto y largo plazo. El mayor contenido de fluoruro en la mitad de las muestras de este estudio podría deberse a la meteorización de minerales que contienen fluoruro en la roca caliza, así como a los depósitos volcánicos a través de la interacción entre la roca y el agua. En el agua del lago, el contenido de nitratos se mantuvo por debajo del límite permitido por la OMS (50 mg/L) y las normas mexicanas (42 mg/L) en todas las muestras, y el fluoruro superó los 1.5 mg/L en una muestra.

En las muestras de agua subterránea, la concentración de nitratos se mantuvo por debajo del límite permitido por la OMS y las normas mexicanas, pero mostró la influencia de los fertilizantes nitrogenados sintéticos en los pozos cercanos a los campos agrícolas. Se observó un enriquecimiento de cloruro en algunas muestras de agua subterránea utilizadas para riego. La estimación de los riesgos no cancerígenos derivados de la ingestión de nitratos y fluoruro para hombres adultos (con un peso medio de 74 kg), mujeres adultas (con un peso medio de 68 kg) y niños (con un peso medio de 20 kg) se calculó mediante los cocientes de salud e indicó la ausencia de cualquier riesgo derivado del nitrato. El fluoruro por encima del límite recomendado por la OMS mostró el posible riesgo de fluorosis, mayormente en niños que en mujeres y hombres adultos. Tanto los

⁵ Priyadarsi D. Roy, Oscar Agesandro García-Arriola, Sekar Selvam, Irma Gabriela Vargas-Martínez y José Luis Sánchez-Zavala, "Evaluation of Water from Lake Coatetelco in Central-South Mexico and Surrounding Groundwater Wells for Drinking and Irrigation, and the Possible Health Risks", *Environmental Science and Pollution Research* 30 (2023): 115430–115447.

adultos como los niños podrían estar expuestos a un riesgo no cancerígeno por el consumo de aproximadamente el 33 % de las muestras de agua del lago y el 53 % de las muestras de agua subterránea. Entre los diferentes índices de evaluación de la calidad para el riego, el diagrama USSL clasificó el 71 % de los pozos de agua subterránea como de riesgo bajo y medio de salinidad (riego sin medidas especiales) y el 29 % de los pozos como de alto riesgo de salinidad (aptos solo para plantas tolerantes a la sal).

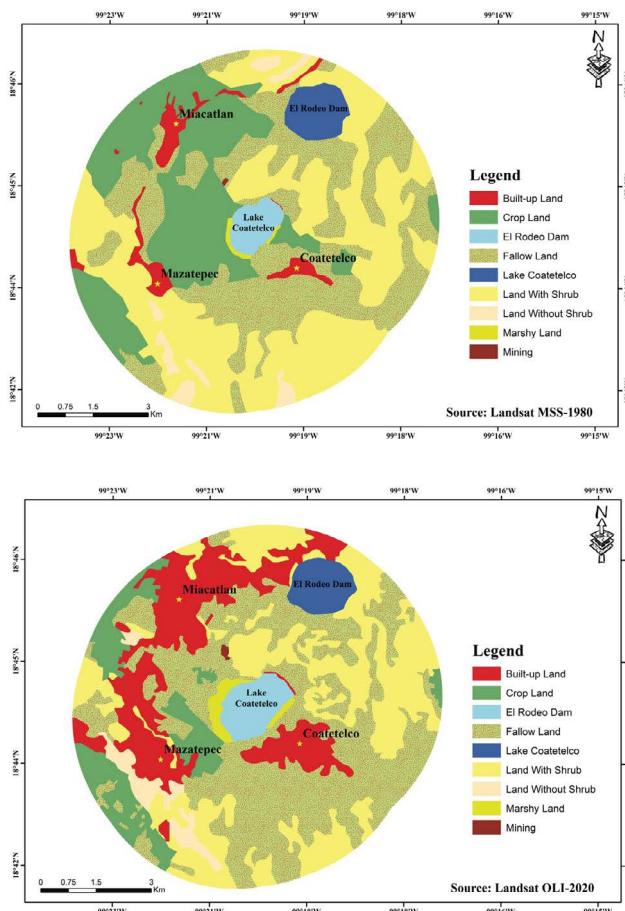


Figura 2. Mapas mostrando los cambios espaciales y temporales en el uso y la cobertura del suelo en un área circular de 76.5 km² alrededor del lago Coatetelco, incluyendo los tres principales asentamientos con las imágenes de satélite para los años 1980 y 2020.

Los mapas de uso y cobertura del suelo creados a partir de las imágenes del satélite Landsat en este proyecto están reportados en la revista *Journal of South American Earth Sciences*. En este trabajo, los autores Roy et al. (2023b)⁶ determinaron los cambios espaciales y temporales en la cuenca hidrográfica del lago, así como en los asentamientos circundantes, durante las últimas cuatro décadas (1980-2020). En la imagen satelital del año 1980, las tierras de cultivo (17.2 km²) y las tierras en barbecho (23 km²), utilizadas para las actividades agrícolas, así como las tierras con matorrales (28 km²) resultaron ser las categorías dominantes (figura 2). Las tierras urbanizadas (2.5 km²) mostraron una cobertura mínima en las últimas cuatro décadas. El lago cubría alrededor de 1.5 km², las tierras sin matorrales abarcaban alrededor de 1.7 km² y las tierras pantanosas representaban solo 0.2 km².

Durante las cuatro décadas siguientes, la expansión de las tierras urbanizadas y una reducción casi equivalente de las tierras de cultivo reflejaron el impacto de las actividades antropogénicas. El terreno urbanizado ganó principalmente de terreno cultivado (3.4 km²), terreno en barbecho (4.5 km²) y terreno con arbustos (2.4 km²). La tendencia al incremento de la superficie urbana reflejó una creciente urbanización, con un aumento significativo de los asentamientos, que pasaron de 7.9 km² a 13 km² después del año 2010. Sin embargo, las estadísticas demográficas indicaron una reducción de la población total en la región durante la última década. Por ejemplo, los censos de población y vivienda indicaron que el número de habitantes de Miacatlán disminuyó de 24 990 en 2010 a 15 802 en 2020, a pesar de que la urbanización en esta zona aumentó en aproximadamente un 29 %. Esta correspondencia inversa entre el número de habitantes y el progreso de la urbanización sugiere posiblemente una migración desde esta zona rural y, posiblemente, desde el sector agrícola. Otros impactos antropogénicos se reflejan en la reducción de la superficie del lago en la imagen del año 1990, tras una década de mayores precipitaciones entre 1980-1989. Las precipitaciones anuales fueron dos veces superiores a la media de las últimas cuatro décadas, con 2313 mm y 2090 mm de precipitación anual total durante los dos años consecutivos (es decir, 1988 y 1989) inmediatamente anteriores a la imagen Landsat de 1990. La disminución de la superficie del lago durante un periodo de mayor

⁶ Priyadarsi D. Roy, Logesh Natarajan, Oscar Agesandro García-Arriola, Lakshumanan Chokkalingam, “Anthropogenic Impact in and around Lake Coatepec (South-Central Mexico) from Land Use and Landcover Analysis between 1980 and 2020 CE”, *Journal of South American Earth Sciences* 129 (2023): 104495.

precipitación fue posiblemente un reflejo de un incremento de la profundidad del lago causado por el dragado de los sedimentos del fondo.

Del mismo modo, el aumento de la superficie del lago después de 1990, a medida que la precipitación decenal disminuyó progresivamente, reflejó nuevamente los cambios en los usos de suelo con las actividades relacionadas con la urbanización. Los asentamientos casi se multiplicaron por cuatro (de 3.5 km² a 13 km²), desde 1990 en los alrededores del lago. Las actividades de construcción asociadas, junto con la expansión de la cobertura de tierras de barbecho y la reducción de la cobertura de tierras con matorrales durante las últimas tres décadas, posiblemente provocaron una mayor erosión en la cuenca hidrográfica y una consecuente expansión del área del lago a expensas de una menor profundidad del mismo.

El archivo sedimentario permitió ampliar la información sobre el cambio medioambiental de los últimos 18 000 años mediante la reconstrucción de las respuestas de precipitación y temperatura bajo diferente insolación estacional y forzamientos, como la posición de la zona de convergencia intertropical y la actividad del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (García-Arriola et al. 2022).⁷ Las condiciones fueron secas durante el estadio (frío) Heinrich 1, ocurrido hace 18 000-15 500 años. Durante el intervalo cálido conocido como Bølling-Allerød hace 14 600 y 13 000 años fueron de mayor precipitación y humedad, y nuevamente secas entre 13 000 y 11 700 años, en un periodo conocido como Younger Dryas. En los datos publicados en la revista *Frontiers in Ecology and Evolution*, los autores García-Arriola y colaboradores (2022) sugieren el predominio de plantas acuáticas durante un intervalo mayoritariamente perenne entre 11 700 y 6000 años. Sin embargo, un evento abrupto con condición efímera y predominio de pastos reflejó condiciones áridas hace unos 10 000 años. Las condiciones se mantuvieron estables entre 4200 y 2100 años, con una mayor aridez que provocó la expansión de la vegetación con fotosíntesis de tipo C₄, mientras que el lago siguió siendo efímero. Esta sequía a escala milenaria se caracterizó por el bajo grado de meteorización química de los sedimentos, así como por el depósito de mineral calcita, y ocurrió mucho antes de la sequía que se produjo

⁷ Oscar Agesandro García-Arriola, Priyadarsi D. Roy, Irma Gabriela Vargas-Martínez, Ma. Patricia Giron-García, Jason H. Curtis, Isabel Israde-Alcantara y Jesús David Quiroz-Jiménez, “Environmental and Hydrological Changes of Lake Coatetelco in Central Mesoamerica (Southwest Mexico) over the Holocene and Comparison with Climatic Forcing”, *Frontiers in Ecology and Evolution* 10 (2022): 809949.

durante el abandono de la cultura Xochicalco. La insolación del verano (baja) y la del otoño (alta), junto con episodios de temperaturas más frías de la superficie del mar en el océano Atlántico, podrían haber provocado esta sequía que ocurrió durante el Holoceno Medio. Las condiciones fluctuantes entre 4200 y 2100 años representaron una inestabilidad hidrológica que continuó hasta los primeros asentamientos olmecas en el sitio de Coapexco. Es posible que un incremento en la actividad del fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur promoviera las tormentas de corta duración en un periodo generalmente árido.