



CHICOMOZTOC
ISSN 2992-7188

Revista Chicomoztoc, Vol. 7. No. 13, Enero – Junio 2025

Controles geológicos en el depósito de travertinos y sal prehispánica del graben de Ixtapan de la Sal, Estado de México: Implicaciones paleoambientales

Edgar Ángeles - Moreno¹
Héctor Víctor Cabadas - Baez²
Patricia Flores - Olvera³
Antonio Cruz - Alberto⁴
Gabriel Vázquez - Castro⁵

¹ Profesor-investigador de tiempo completo del Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Minería de la División de Ingenierías de la Universidad de Guanajuato. México. ExHacienda de San Matías S/N Col. San Javier C. P. 36020. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores de CONAHCYT en nivel de candidato. Doctor y maestro en Ciencias de la Tierra por la Universidad Nacional Autónoma de México. Ha impartido cátedra en la Facultad de Ingeniería de la UNAM y de la Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México. Ha sido responsable de proyectos de investigación relacionados a Geología estructural aplicada. Las líneas de investigación que trabaja son de Geología estructural, Ingeniería geológica y Geología aplicada a yacimientos minerales, Geología ambiental, Geotecnia, Hidrogeología y Arqueología. Correo de contacto: e.angeles@ugto.mx.

² Adscrito a la Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía "Manuel del Castillo Negrete" INAH, además, es Profesor-investigador de tiempo completo definitivo en la Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México donde imparte las asignaturas de Mineralogía, Mineralogía óptica y Petrología. Doctor y maestro de Ciencias de la Tierra por la UNAM, con Postdoctorado en la Universitat de Wurzburg en el Instituto de Geografía y Geología (2011-2012). Sus líneas de investigación se centran en génesis y clasificación de suelos en el centro de México y la Península de Yucatán, con uso de herramientas mineralógicas, micromorfológicas y geoquímicas para la interpretación de evolución edáfica; evaluación del índice de intemperismo como motor del desarrollo del suelo, e intemperismo de bienes culturales y sus aplicaciones geoarqueológicas. Correo de contacto: hvcabadasb@uamex.mx.

³ Tiene una formación en licenciatura en Geografía por la Universidad Autónoma del Estado de México en 1995, maestra en Geografía (2001) y doctora en Ciencias de la Tierra (2012) por la Universidad Nacional Autónoma de México. Profesora de Tiempo Completo (PTC) de 2012 a la fecha en la Facultad de Geografía de UAEMex, colaborando con actividades de docencia, investigación y procesos de titulación en las licenciaturas de Geografía, Geoinformática y Geología Ambiental y Recursos Hídricos, así como a nivel posgrado en la Maestría de Análisis Espacial y Geoinformática y Doctorado en Geografía y Desarrollo Geotecnológico. Líneas de investigación en Geomorfología aplicada, análisis de peligros geomorfológicos (deslizamientos) y SIG. Capacitación en cursos sobre docencia y software de SIG. Ha formado parte hasta 2023 del Programa de Desarrollo Profesional Docente (PRODEP). Correo de contacto: patyflores2002@yahoo.com.mx.

⁴ Licenciado en Geología ambiental y recursos hídricos, consultor independiente. Ha desarrollado trabajos privados e independientes en el área de riesgos naturales y geológicos. Presentación de estudio de Registro Geológico-Ambiental de algunas manifestaciones Geotérmicas en el Estado de México en Convención Geológica Nacional 2019. Participado en algunos proyectos de investigación relacionados a recursos geotérmicos y manifestaciones hidrotermales en el Estado de México. Correo de contacto: antoniocrzalbert@gmail.com.

⁵ Doctor en Ciencias de la Tierra e investigador SNI I de CONAHCYT. Profesor-investigador de la Escuela Nacional de Estudios Superiores de la UNAM Campus Morelia. Coordinador de varios eventos organizados por los

Isidro Loza-Aguirre⁶
Raúl Miranda-Avilés⁷

Resumen

Desde tiempos prehispánicos las regiones de Ixtapan de la Sal y Tonatico, Estado de México, han sido conocidas por la presencia de travertinos, manantiales de aguas termales y la producción de sal. El lugar conocido como Los Salitres en Tonatico contiene vestigios arqueológicos de un centro de producción de sal importante. El objetivo de este trabajo es mostrar las interrelaciones entre las características geológicas, los depósitos de travertinos y las particularidades de los vestigios arqueológicos, aunado a problemáticas del deterioro de las reliquias arqueológicas. Las metodologías empleadas en este trabajo comprendieron levantamientos geológicos de campo, incluyendo cartografía, estratigrafía y cierta aproximación etnográfica. Los resultados muestran que los depósitos de travertinos y de sal fueron derivados de manantiales de aguas termales controlados por fracturas en un sistema hidrotermal de larga vida dentro del semigraben de Ixtapan de la Sal determinado por fallas del Sistema de Fallas Taxco-San Miguel de Allende.

Palabras clave: arqueológicos, sal, Tonatico, Geología, travertino, prehispánico

Abstract

Since pre-Hispanic times, the regions of Ixtapan de la Sal and Tonatico, State of Mexico, have been known for the presence of travertines, hot springs and salt production. The site known as Los Salitres in Tonatico contains archaeological remains of an important salt production center. The objective of this work is to show

Investigadores del Cuaternario y el Antropoceno, A. C. (INCUA, A. C.). Con líneas de investigación en paleoclimas y paleoambientes del Cuaternario en secuencias lacustres y paleosuelos del occidente de México; cambio climático; magnetismo de rocas; Geoquímica, Geoarqueología y Estratigrafía. Publicaciones en revistas y libros relacionadas a magnetismo ambiental, cambio climático y estudios paleoclimáticos del Holoceno. Algunos cursos impartidos en posgrado y licenciatura: paleoambientes del Cuaternario y suelos; Geomorfología y vegetación; Geología del Cuaternario; Geoarqueología y proxis paleoambientales; paleoambientes del Cuaternario, y principios de estratigrafía y procesos sedimentarios. Correo de contacto: gvazquez@enesmorelia.unam.mx.

⁶ Profesor-investigador en el Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología de la Universidad de Guanajuato, en el Campus Guanajuato. Investigador SNI I del CONAHCYT. Imparte materias como Geología de campo, Geología estructural y Sistemas de Información Geográfica, entre otras. Ingeniero en Geociencias por el Tecnológico Nacional de México y doctor en Ciencias de la Tierra por la Universidad Nacional Autónoma de México, con especialidad en Geología Estructural y Tectónica de Placas. Se desempeña actualmente entre sus intereses y líneas de investigación: Cartografía geológico-estructural; Historia de la deformación; caracterización geométrica y Cinemática de estructuras de deformación; relación entre estructuras frágiles y dinámica del agua subterránea; relación entre estructuras frágiles y yacimientos minerales. Su investigación la ha realizado principalmente en la Sierra Madre Occidental y la Mesa Central. Ha participado en 16 publicaciones en revistas indexadas y ha dirigido tesis de maestría y licenciatura. Correo de contacto: isidro.loza@ugto.mx

⁷ Profesor-investigador Titular A del Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología de la Universidad de Guanajuato, en el Campus Guanajuato. Geólogo egresado de la UABCS (1989), con especialidad en Ingeniería geológica por la Escuela de Minas de París (1994), con doctorado en Geología por la Université de Bordeaux 1 (2002). Investigador SNI I del CONAHCYT. Desarrolla investigación en geociencias, utilizando técnicas como Petrografía, difracción de Rayos X, Microscopía electrónica de barrido y análisis químicos de materiales geológicos aplicados a la construcción, al medio ambiente y la Hidrogeología. Responsable del Cuerpo Académico Consolidado de Geología (UGTO-CA-101) y también responsable del Laboratorio de Investigación y Caracterización Minerales y Materiales (LICAMM) de la Universidad de Guanajuato. Correo de contacto: rmiranda@ugto.mx.



Revista
CHICOMOZTOC
ISSN 2992-7188

Revista Chicomoztoc, Vol. 7. No. 13, Enero – Junio 2025

the interrelations between geological characteristics, travertine deposits, and individualities of archaeological remains, in addition to problems of deterioration of archaeological relics. The methodologies used in this work included geological field surveys, including cartography, stratigraphy and some ethnographic approximation. The results show that the travertine and salt deposits were derived from hot springs controlled by fractures in a long-lived hydrothermal system within the Ixtapan de la Sal half graben determined by faults of the Taxco-San Miguel de Allende Fault System.

Key words: archaeological, salt, Tonicico, Geology, travertine, prehispanic.

Introducción

En México, la producción de sal ha existido desde tiempos prehispánicos, estos lugares de producción de sal se ubican en las costas y al interior del territorio continental (Zarate, 1917; Castellón-Huerta, 2017). Estos sitios salineros se localizan en distintos ambientes geológicos (Zarate, 1917) como son costas, lagunas, lagos, sistemas fluviales-lacustres, agua subterránea, sistemas volcánicos y manantiales termales. La sal también aparece en depósitos litificados de sal en roca que son conocidos como evaporitas, por ejemplo, en domos salinos asociados a la presencia de petróleo (Gómez-Cabrera y Jackson, 2009). Los establecimientos de sal se asocian, en ocasiones, con depósitos de travertinos que contienen carbonatos, sulfatos y cloruros (como en el caso de Tonicico, Estado de México). La sal es de importancia universal y en México la sal es utilizada en la agricultura, ganadería, alimentación y, particularmente, en la minería en el proceso de la separación de la plata. En Tonicico se localizan salitres que contienen vestigios de un centro de producción de sal que es parte de un sistema de aguas termales de larga vida en la región. El objetivo de este trabajo es mostrar las características geológico-estructurales y paleoambiente de los depósitos de travertinos en la región de Ixtapan de la Sal y Tonicico, estableciendo una relación con las aguas termales y en cómo estos rasgos se vinculan espacialmente con los depósitos de sal en Los Salitres. Al final se describen algunas problemáticas ambientales y de deterioro de estos vestigios arqueológicos en la zona Los Salitres.

Antecedentes

Contexto geológico de la presencia de las aguas termales

La zona de los salitres en Tonicato se encuentra en la parte sur del estratovolcán Nevado de Toluca y dentro del semigraben Ixtapan (Figura 1). Tonicato se ubica regionalmente a lo largo del sistema de fallas Taxco San Miguel de Allende que tienen una dirección N-S a NW-SE (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2002).

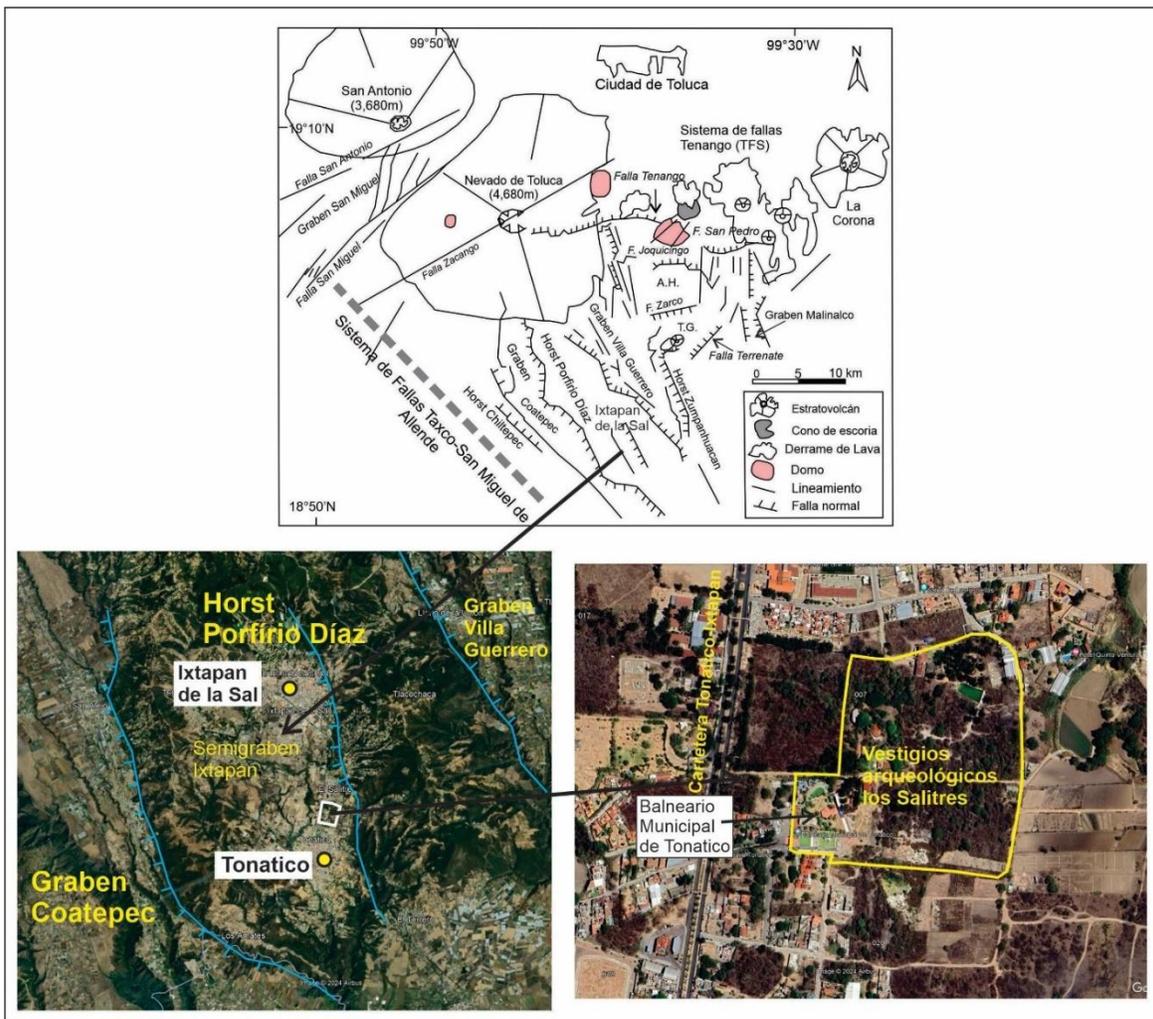


Figura 1. Ubicación de la zona los salitres en Tonicato en el sur del estratovolcán Nevado de Toluca y en el semigraben de Ixtapan de la Sal (figura modificada de García-Palomo *et al.*, 2000; imágenes de Google Earth)

La región muestra una estratigrafía constituida de rocas metamórficas mesozoicas, además de rocas volcánicas y sedimentarias del Cenozoico. Las rocas metamórficas están compuestas de



Revista
CHICOMOZTOC
ISSN 2992-7188

Revista Chicomoztoc, Vol. 7. No. 13, Enero – Junio 2025

rocas volcanosedimentarias y volcánicas del Jurásico superior-Cretácico inferior (Campa *et al.*, 1974); estas rocas se encuentran en ocasiones sobreyacidas discordantemente, y a veces, en contacto estructural con varias alineaciones sedimentarias como la Formación Xochicalco (calizas), Formación Morelos (calizas y dolomias) y Formación Mexcala (lutitas, areniscas y calizas). Las Formaciones Xochicalco y Morelos tienen edades de Albiano-Cenomaniano y la Formación Mexcala del Coniaciano a Campaniano. Estas formaciones son sobreyacidas por rocas volcánicas andesíticas, dacíticas y riolíticas, así como unidades sedimentarias del Cenozoico que abarcan desde la época del Eoceno hasta el Holoceno (García-Palomo *et al.*, 2000).

Los depósitos de travertinos del Cuaternario se han reconocido dentro del semigraben de Ixtapan de la Sal (Gómez-Luna, 2013; Cruz-Alberto, 2019). En el trabajo de Cruz-Alberto (2019), dichos depósitos fueron descritos y relacionados a un sistema geotermal más antiguo y, por ello, se sugiere que la región posee un sistema geotermal antiguo de larga vida.

Los salitres de Tonicaco se encuentran contruidos sobre los travertinos que a su vez están dentro de una región con presencia de pilares estructurales (Horst) y depresiones estructurales (graben) que tienen direcciones NW-SE. En específico, la región de Ixtapan de la Sal y Tonicaco se localizan en un semigraben que se desarrolló dentro del pilar estructural Porfirio Díaz (Figura 1) (García-Palomo *et al.*, 2000). La presencia de rocas volcánicas emplazadas en épocas recientes durante el vulcanismo de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) ha determinado la fuente de calor que calienta el agua subterránea dentro del semigraben; se ha sugerido que algunas de las fallas funcionan como canales de transporte del agua termal (Cruz-Alberto, 2019; Martínez-Florentino *et al.*, 2019).

Los estudios de hidrogeoquímica del agua termal

La presencia de sal en la zona Los salitres obedeció a concentraciones altas de cloruro de sodio (NaCl) y esto ha sido demostrado en estudios hidrogeoquímicos que se han realizado del agua que brota de manantiales. En el área de Ixtapan de la Sal y Tonicaco se han identificado en general dos

tipos de aguas en los manantiales, aguas termales y aguas no termales (Martínez-Florentino, 2015; Martínez-Florentino *et al.*, 2019).

De acuerdo con los estudios hidrogeoquímicos de Juan-Pérez (1994) y Martínez-Florentino (2015) las aguas de los manantiales termales son de tipo clorurada sódico-cálcica y bicarbonatada-clorurada sódica-cálcica. En las aguas de manantiales no termales son aguas bicarbonatadas cálcicas (Martínez-Florentino, 2015). La temperatura de las aguas termales se ubica entre 25.7 a 37.2 °C con pH de 5.90 a 6.88 y muestran saturación en carbonatos (Martínez-Florentino *et al.*, 2019). Son aguas ácidas, ricas en cloro y sodio, con alto contenido de ácido carbónico, calcio, boro y litio; estas características sugieren temperaturas elevadas a profundidad (Juan-Pérez, 1994; Martínez-Florentino *et al.*, 2019). Las mezclas de aguas subterráneas termales y no termales con agua de la lluvia originan aguas de salinidad baja, presentándose aguas bicarbonatadas cálcicas y bicarbonatada cálcico-magnésica (Martínez-Florentino, 2019). La abundancia de los carbonatos de calcio en el agua subterránea se ha interpretado como resultado de la interacción con rocas carbonatadas del Mesozoico (Juan-Pérez, 1994; Martínez-Florentino *et al.*, 2019).

La evolución histórica en la producción de sal en la región

En México se han documentado numerosas salinas prehispánicas, así como salinas asociadas a vestigios arqueológicos estableciéndose que la sal tuvo una influencia importante en la distribución geográfica de los grupos indígenas y sus regímenes alimenticios (Mendizábal, 1928, 1946). La sal tuvo también importancia religiosa, ya que se ha documentado en códigos pictográficos y en vestigios arqueológicos la presencia de la diosa de sal, Huixtocihuatl (Figura 2), que se ha encontrado en zonas arqueológicas productoras de sal por ejemplo en San José Ixtapan en Tejupilco (Osorio-Garrido, 2019) y en Veracruz (Ceja-Acosta, 2009). Los topónimos donde se producía sal en Mesoamérica tienen asociado el nombre de Ixtapan. Ixtapan con el radical Izta que viene de iztatl de sal y pan que significa en, entonces la palabra Ixtapan tiene un significado como lugar de sal (Zarate, 1917; Reyes-Garza, 2009a). El código Mendocino hace referencia a Tonatico por su producción de sal (Ewald, 1997); autores como Osorio-Ogarrio (2019) mencionan que el área de Tonatico era disputada por tarascos y mexicas durante el Posclásico, esto porque Ixtapan-Tonatico era una frontera entre estos dos grupos. Una vez que los mexicas sometieron a la provincia de Ocuilan que abarcaba a Tonatico, a los pobladores de Ixtapan y Tonatico se les empezó a exigir un



Revista

CHICOMOZTOC

ISSN 2992-7188

Revista Chicomoztoc, Vol. 7. No. 13, Enero – Junio 2025

tributo de sal (Osorio-Ogarrío, 2019). En la Matrícula de tributos también aparecen panes de sal y en el códice Mendocino como evidencia pictográfica (Figura 2) (Reyes-Garza, 2009a).

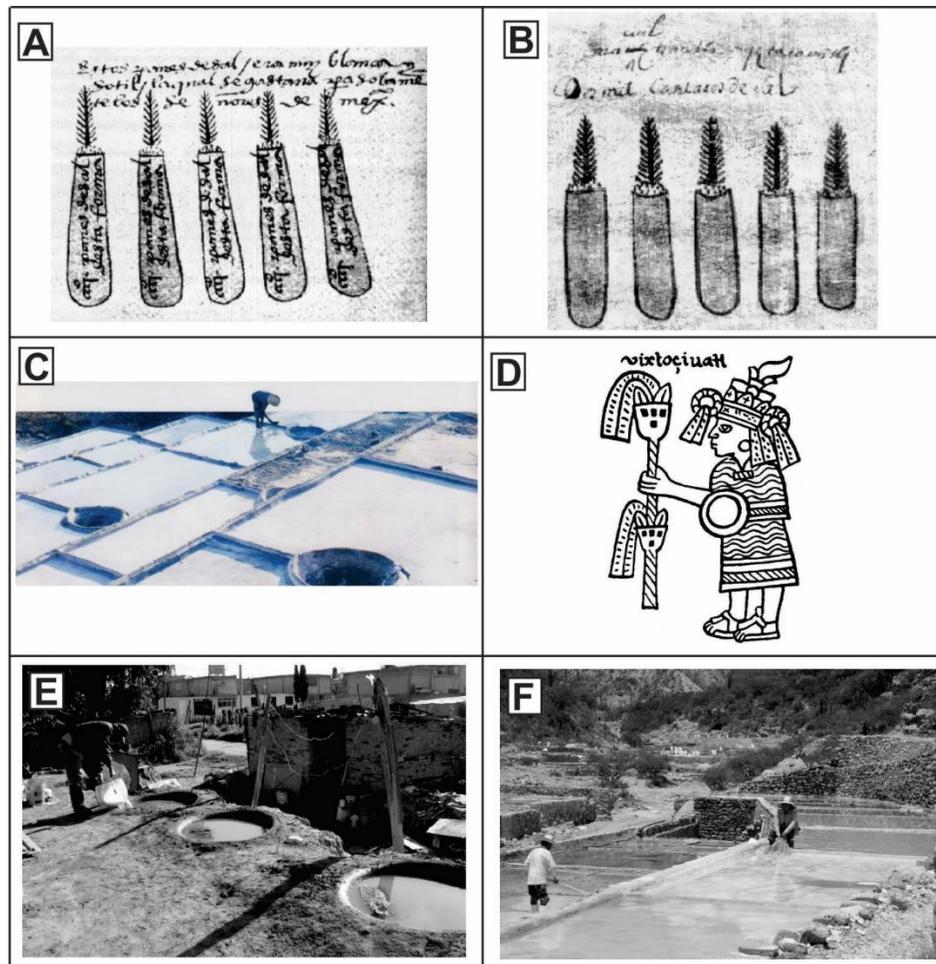


Figura 2. Elementos prehispánicos que aluden a la producción de sal en Tonatico y algunas analogías de las técnicas empleadas de otros lugares salineros. A. Tributo de sal de Tonatico (Reyes-Garza, 2009a). B. Sal tributada por el pueblo de Tonatico en Matrícula de tributos (Reyes-Garza, 2009a). C. Terrazas de evaporación y cuexcomates para concentrar la salmuera en Santa María Silacayoapan (Flores-Granados, 2019). D. Uixtociuatl la diosa de la sal del códice Matritense del palacio Real (Reyes-Garza, 2009). E. Producción de sal en Nexquipayac, Estado de México (Castellón-Huerta, 2017). F. Lavado de Salmueras en salinas de Zapotitlán, Puebla (Castellón-Huerta, 2017)

De acuerdo con Reyes-Garza (2009b), alrededor de 1550 se mejoró el método de amalgamación en el beneficio de la plata, agregando sal a la torta de mineral molido, lo que generó

una demanda de la sal, pero sin regulación hasta que se emitió la Ordenanza sobre la sal de 1580. Esto concuerda con lo dicho por Castellón-Huerta (2019): en el siglo XVI, con la introducción de ganado y el trabajo de minería de plata, se aumentó la producción de sal, además de su importancia comercial.

Durante la época colonial, conforme con Zarate (1916), las salinas de Ixtapan de la Sal se ubicaban como un importante productor de sal para uso en la minería de Sultepec y Zacualpan, así como para necesidades domésticas, alfarería y conservación de la carne y pieles; sin embargo, Ursula Ewald (1997) alude que la sal de Tonatico no era muy apreciada para la refinación de la plata por su alto contenido de carbonatos y sulfatos. En la región del sur del actual Estado de México también se daba la sal en San José Ixtapan en Tejupilco, se sugiere que podrían haberse unido ambas industrias para satisfacer la demanda del uso de la sal en la región, aunque se desconoce el papel de Tonatico en esta parte.

Las técnicas y maneras de la obtención de sal en Tonatico son descritas a detalle en el trabajo de Ursula Ewald (1997). La sal se generaba de dos maneras: una sal cocida o sal de beneficio y una sal de cuajo o sal solar.

Según Ursula Ewald (1997), la combinación de estas dos maneras de producción de sal consistía en que por medio de canales (apantles) se realizaba la conducción del agua a milpas salineras (salitres o Ixtamiles) que tenían melgas interiores para concentrar la sal y así se diera una salmuera. Se hacían cajetes a lo largo de los canales para almacenar agua y luego esparcirla en los ixtamiles. Se araba la sal en las melgas y se cosechaba la sal de las milpas. Las costras de sal se levantaban con garrochas y se echaban en chiquihuites que se vaciaban en temascales situados cerca de los ixtamiles. En temascales de forma de plato sopero de uno a dos metros de diámetro con orificio al centro se concentraba en mayor grado la salmuera que después era disuelta y con la que se llenaban tinajas y jarros.

Las técnicas descritas en Tonatico tienen semejanzas en algunos aspectos con algunas en la producción de sal empleadas en Santa María Silacayoapan en Oaxaca, Zapotitlán Salinas en Puebla y Nexquipayac en el Estado de México (Figura 2) (Castellón-Huerta, 2017; Flores-Granados, 2019).

En los inicios del siglo XX la elaboración de la sal se realizaba dentro de instalaciones de haciendas, ya que las salineras eran propiedad de hacendados; a los que trabajaban la sal se les



Revista
CHICOMOZTOC
ISSN 2992-7188

Revista Chicomoztoc, Vol. 7. No. 13, Enero – Junio 2025

cobraba una cuota (Ewald, 1997). De acuerdo con Ursula Ewald (1997), en 1940 había 28 salineros y la sal era vendida en mercados de los estados de México, Morelos y Guerrero; esta movilización de sal parece que continuó hasta los años sesenta.

Metodología

Las metodologías empleadas para lograr el objetivo del trabajo comprendieron levantamiento geológico de campo, incluyendo cartografía, estratigrafía y geología estructural, aunado a cierta aproximación etnográfica. La cartografía geológica y geología de campo se realizaron reconociendo y registrando datos de los afloramientos de travertinos y otros tipos de rocas. La estratigrafía se integró a partir de los resultados de la cartografía geológica y determinando las características texturales, facies y estructuras en los travertinos, así como de las unidades de roca. Además, en la parte de geología estructural, se reconocieron algunas fracturas y fallas geológicas en los alrededores de Ixtapan de la Sal y Tonatico. En la zona de los salitres se realizaron descripciones básicas desde el punto de vista geológico de los vestigios arqueológicos en cuanto a su geometría, rasgos físicos y la interpretación de su posible función en relación con lo conocido en las técnicas del trabajo y manejo de sal que se han conservado desde tiempos prehispánicos en algunas de las regiones salineras de México.

Resultados

Características geológico-estructurales de Ixtapan de la Sal y Tonatico

Unidades geológicas

El trabajo geológico realizado permitió definir cinco unidades geológicas informales en el área; de éstas, tres corresponden a rocas metamórficas mesozoicas, una a rocas volcánicas del Cenozoico, así como el conglomerado Tonatico y el travertino Ixtapan de Sal (Figura 3 y 4). Los detalles del travertino Ixtapan de la Sal se relatan mejor en el siguiente apartado.

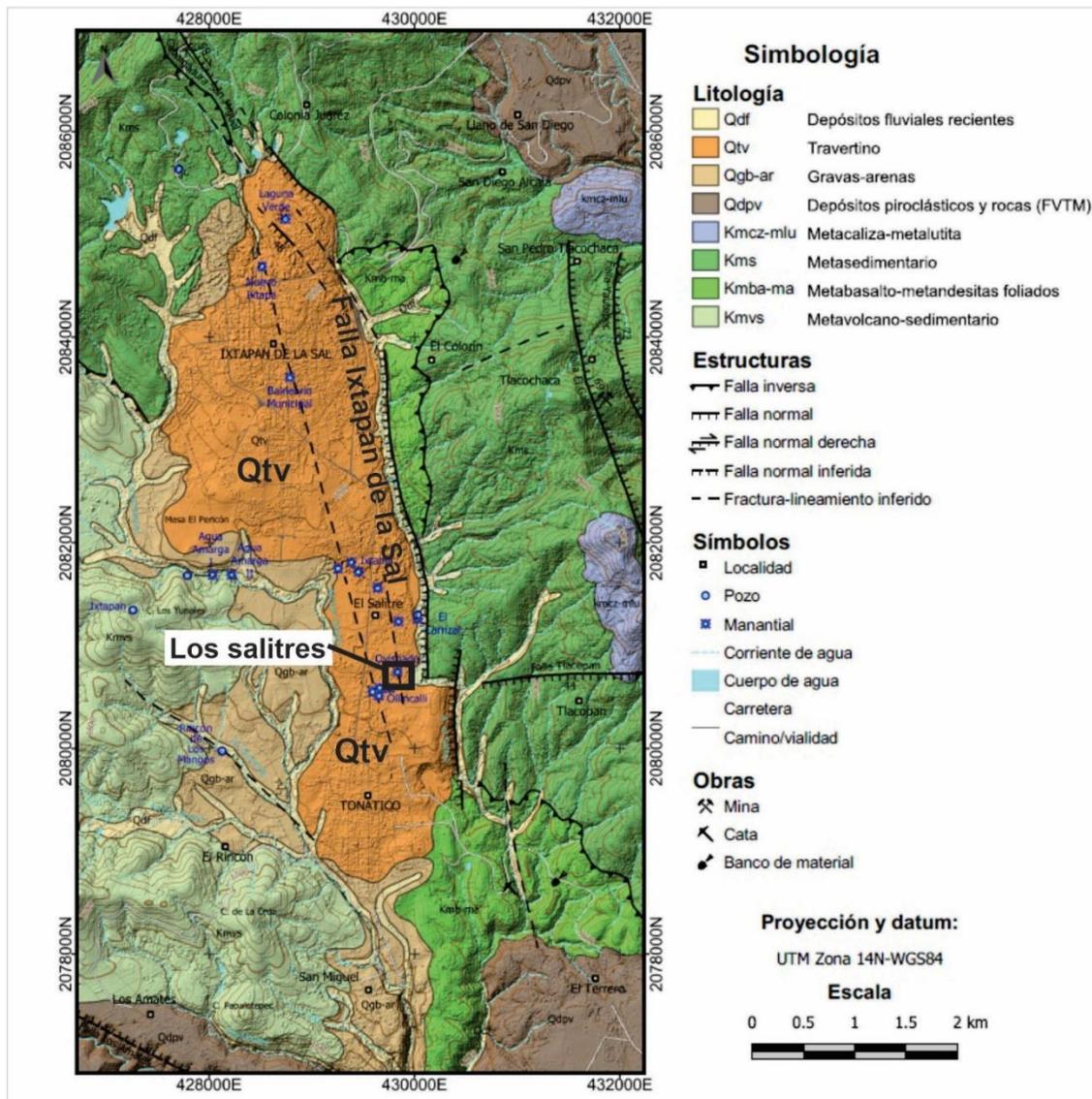


Figura 3. Mapa geológico de las unidades geológicas en el semigraben de Ixtapan de la Sal y la ubicación de los Salitres en Tónico (integración de datos geológicos de campo y de cartografía geológico-minera de Rosales-Díaz y Ramírez-Ramírez, 2013; ubicación de manantiales de Martínez-Florentino, 2015)

La unidad metavolcánica aflora en la parte oriente y sur del graben de Ixtapan de la Sal (Figuras 3 y 4). Las rocas están compuestas de metabasaltos y metandesitas que se presentan foliados y minerales de metamorfismo en facies de esquisto verde como clorita, albita y epidota. Estas rocas metavolcánicas se encuentran subyaciendo estructuralmente a la unidad metasedimentaria y a veces intercaladas entre fallas inversas.

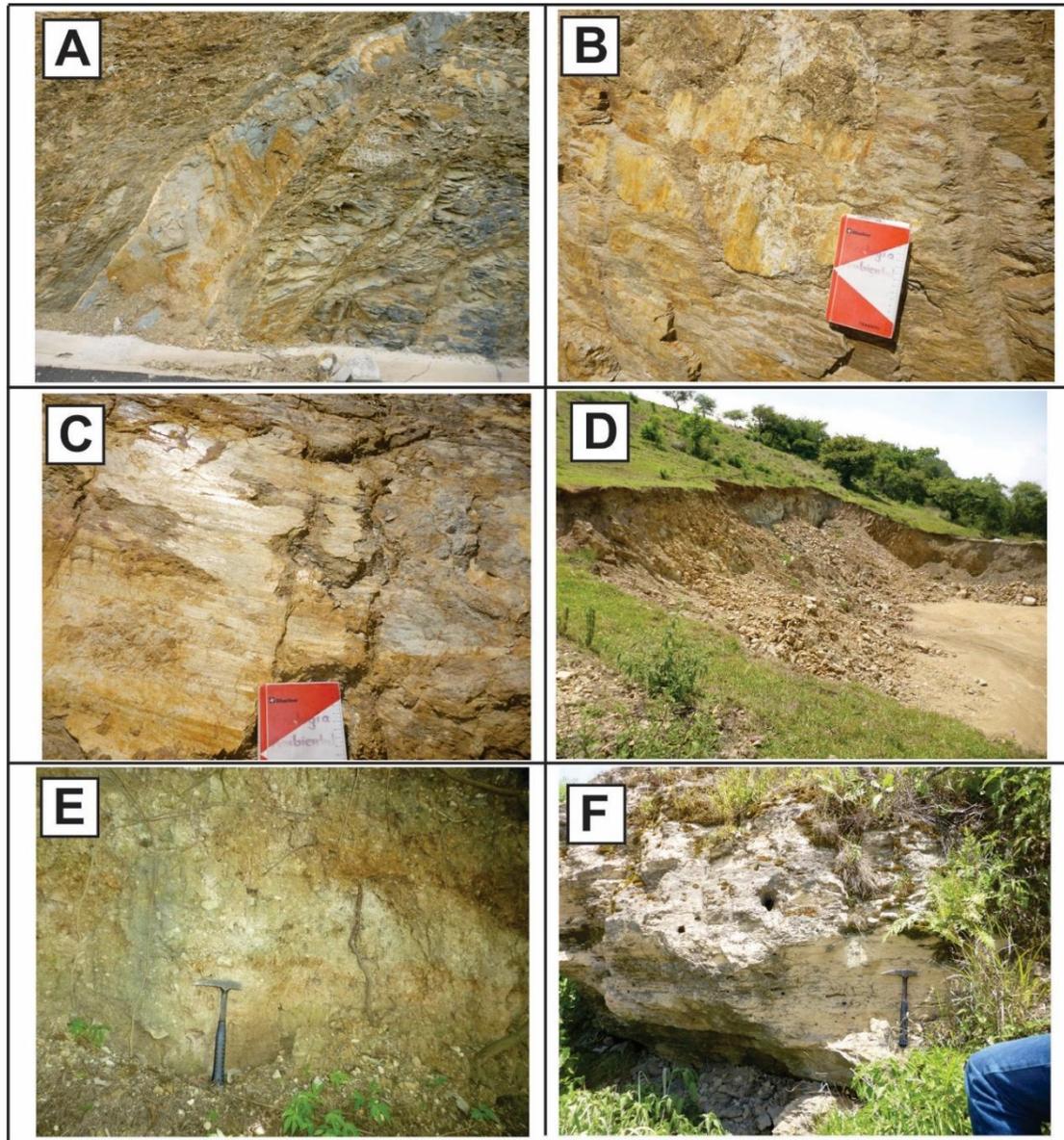


Figura 4. Unidades geológicas, fracturas y fallas en el semigraben de Ixtapan de la Sal. A. Unidad metasedimentaria cortada por dique andesítico. B. Unidad metasedimentaria afectada por falla con movimiento de tipo normal. C. unidad metasedimentaria afectada por falla lateral. D. Banco de préstamo de roca metabasáltica de la unidad metavolcánica. E. Conglomerado de Tonatico con gravas y arenas poco consolidadas. F. Travertino de Ixtapan de la Sal compuesto de carbonatos y arcillas carbonatadas

La unidad metasedimentaria aflora en la parte oriente y norte del graben de Ixtapan de la Sal (Figura 3). Las rocas que la constituyen son esquistos y filitas con clorita, mica blanca y cuarzo (Figura 4); en algunas partes se pueden distinguir metareniscas. Esta unidad también presenta intercalaciones de metacalizas y metalutitas. Una parte de rocas metavolcanosedimentarias se hallan al poniente del semigraben de Ixtapan de la Sal y comprende rocas metavolcanoclásticas, filitas y esquistos de clorita, mica blanca y cuarzo. Este componente remonta a la unidad metavolcánica.

Los bloques identificados como metamórficos incluyen litologías semejantes a las que se localizan en el subterreno Teloloapan (Campa *et al.*, 1974; Salinas-Prieto *et al.*, 2000). Éstas se pueden correlacionar por sus características litológicas y rango de edad con la Formación Villa de Ayala, Formación Acapetlahuaya y las calizas Amatepec-Teloloapan. La edad de estas unidades abarca del Jurásico tardío al Cretácico temprano (Campa *et al.*, 1974).

Las rocas volcánicas del Cenozoico afloran en los alrededores al horst Porfirio Díaz, están compuestas de depósitos de lahares, flujos piroclásticos de composiciones andesíticas y otras rocas volcánicas que varían en composiciones de basáltica, andesítica a dacítica (Figuras 3 y 4). Estos depósitos volcánicos se observan encajonados en los valles de grandes barrancas. Algunos de estos depósitos volcánicos fueron derivados de erupciones del Nevado de Toluca que tienen un rango de edades entre el Pleistoceno y Holoceno (García-Palomo *et al.*, 2000).

El conglomerado Tonatico aflora en algunas partes del poniente y sur del graben de Ixtapa de la Sal (Figuras 3 y 4). Esta unidad está compuesta de arenas, gravas, limos y arcillas. Presenta un color blanco o pardo claro en afloramientos. Se observa estratificación y laminación cruzada. En algunos lugares presenta estructura lenticular con los lentes conformados de gravas y arenas. Los clastos que ostentan las gravas y boleos son de caliza y rocas metamórficas.

El conglomerado Tonatico subyace al travertino Ixtapa de la Sal y sobreyace a las unidades metamórficas metavolcánica y metasedimentaria. Su edad se infiere en el Cuaternario con base en su posición estratigráfica.

El travertino Ixtapa de la Sal aflora dentro del semigraben Ixtapan y su extensión cubre parte de los municipios de Ixtapan de la Sal y Tonatico. El depósito del travertino queda comprendido dentro del semigraben Ixtapan de la Sal y a su vez dentro del pilar estructural Porfirio Díaz (García-Palomo *et al.*, 2000). En gran parte de las poblaciones de Ixtapa de la Sal y Tonatico



Revista
CHICOMOZTOC
ISSN 2992-7188

Revista Chicomoztoc, Vol. 7. No. 13, Enero – Junio 2025

se puede ver los surgimientos del travertino, ya que se distribuye subyaciendo a construcciones y a la infraestructura de los poblados (Figuras 3 y 4).

Las estructuras de deformación que se presentan son fallas inversas, fallas de cabalgaduras, fallas extensionales y algunas fallas laterales. Las rocas mesozoicas presentan deformación y metamorfismo con estructuras de foliación, pliegues y fallas inversas. Las fallas inversas tienen sentidos de desplazamiento al nor-orientado y orientado. Las unidades metavolcánica, metasedimentaria y metavolcanosedimentaria están limitadas por estas fallas inversas o de cabalgadura (Figura 3). La edad de la deformación puede ser entre el Cretácico tardío a Paleoceno, esto por la correlación de tipos de estructuras con la parte de rocas metamórficas de Teloloapan (Salinas-Prieto *et al.*, 2000).

Las estructuras cenozoicas que se presentan son fallas normales y fallas oblicuas con orientaciones Norte-Sur a NNW-SSE (Figura 4). Las orientaciones de estas estructuras son NNW-SSE que son similares a las mayores estructuras de pilares y grabenes en la parte Sur del volcán Nevado de Toluca, como el pilar estructural de Porfirio Díaz. Las características estructurales en la región de Ixtapan y Tonicaco permiten definir que el semigraben de Ixtapan de la Sal es definido por una falla normal en su parte orientado.

Geología y paleoambiente de los depósitos de travertinos

Los depósitos de travertinos en Ixtapan de la Sal y Tonicaco están distribuidos a lo largo del semigraben de Ixtapan de la Sal y muchos afloramientos están cubiertos por la zona urbana. El travertino presenta un color pardo claro a oscuro con una textura kárstica y de apariencia oquerosa, esto en parte por la disolución de carbonatos por la acción de aguas de lluvias y escurrimientos de agua. La matriz del travertino está dispuesta de micrita con una composición principalmente de calcita, pero también se ha reconocido en campo la existencia de minerales arcillosos, aragonito e hidróxidos de hierro de color anaranjado.

Los depósitos de travertino se presentan estratificados con capas que varían de espesor de 30 cm, 50 cm hasta 1.20 metros. La estratificación es de paralela a ondulada y con laminación interna paralela. En algunos niveles exhiben laminaciones onduladas de baja amplitud con bandas de crecimiento radial de cristales de calcita.

Las facies en los travertinos son reconocidas con base en sus características físicas y texturales (Figura 5). Las texturas son capas de oncoides/esferulitas en travertinos granulares, estructuras verticales filiformes (posible crecimiento orgánico o ebullición), textura esponjosa y variación de textura masiva a laminada (Figura 5). En algunos afloramientos se pudieron observar abundantes fragmentos de antiguos restos de tallos de plantas (Figura 5) que representaría una tuffa con algunas capas que posiblemente representaron depósitos microbiales laminados. En algunos niveles se observan huecos esféricos correspondientes a burbujas envueltas con aragonito fibroso y micrita. En unos brotes se conservan capas de micrita caracterizada por crecimientos verticales filiformes, chimeneas verticales que pueden representar filamentos de algas o estructuras de desgasificación en una charca (Figura 5). Es común ver también algunos recubrimientos de vacíos elongados de posibles carpetas de burbujas laminadas alineadas (Figura 5).



Revista

CHICOMOZTOC

ISSN 2992-7188

Revista Chicomoztoc, Vol. 7. No. 13, Enero – Junio 2025

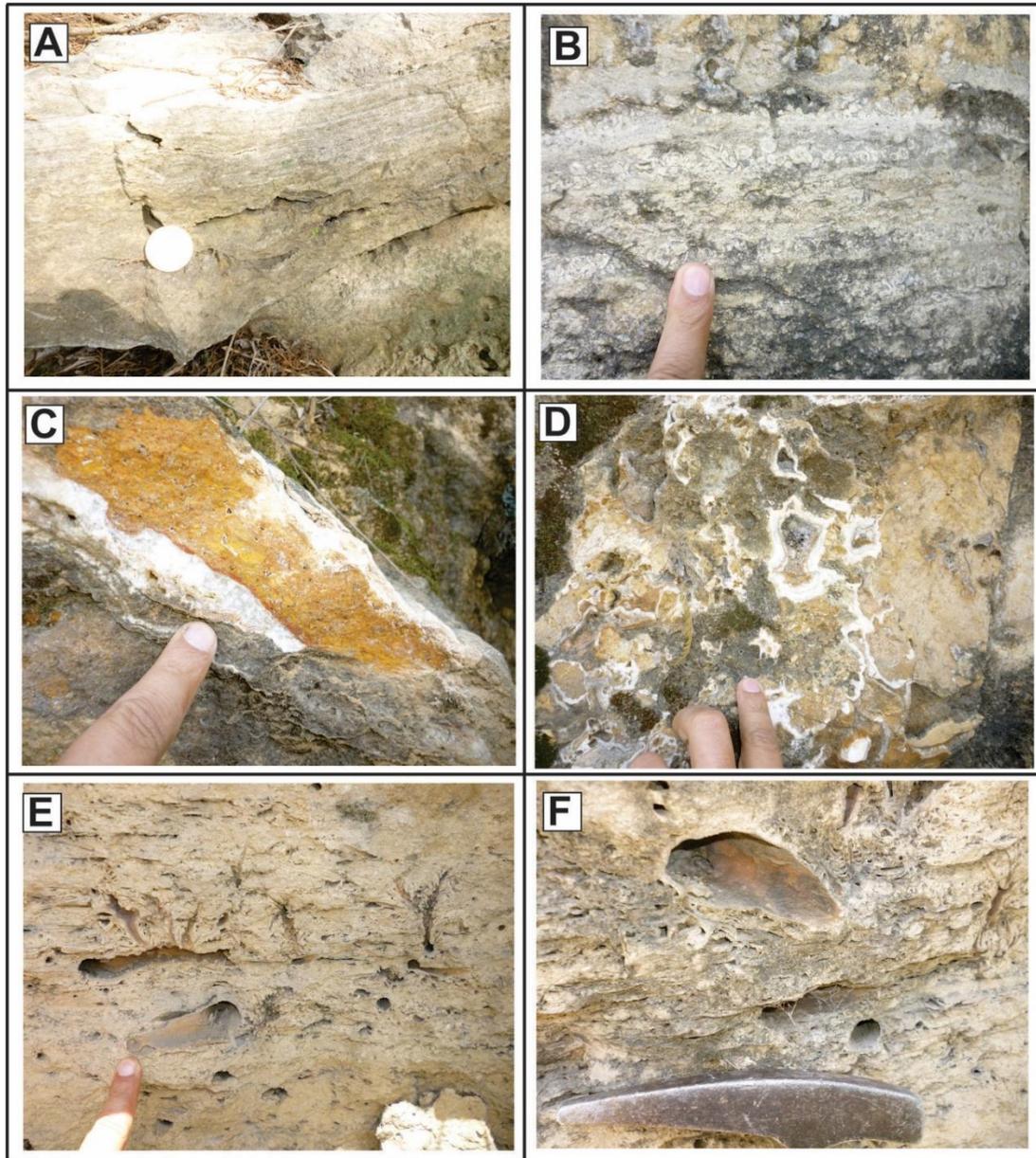
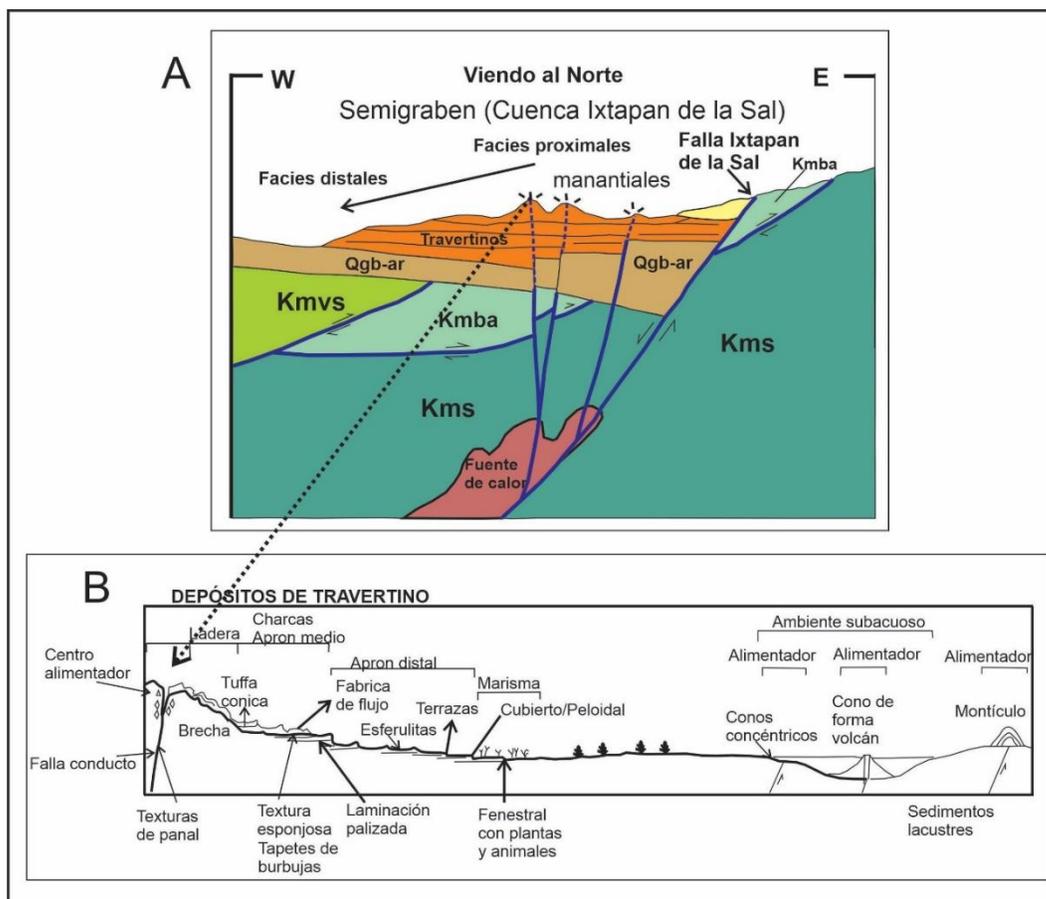


Figura 5. Estructuras, texturas y facies de la unidad travertino Ixtapan de la Sal. A. Estrato de travertino con laminaciones paralelas y onduladas. B. Travertinos granulares con oncoides y esferulitas. C. Fractura con texturas brechadas con oxi/hidróxidos de Fe y otras limonitas. D. Texturas de recristalización acompañadas de disolución en zonas de vetas de calcita. E. Laminación ondulada, textura esponjosa y textura de filiformes. F. Textura esponjosa, estructuras orgánicas y restos de plantas

Las facies descritas en los travertinos de Ixtapan de la Sal-Tonatico reflejan un antiguo paleoambiente lacustre y fluvial con manantiales termales (Figura 6). Estos tipos de ambientes se presentan fosilizados en ambientes geotermales antiguos (Brogi *et al.*, 2017; Guido y Campbell, 2011) pero también hay sistemas geotermales activos en las zonas de geiseres. De acuerdo con el modelo de Guido y Campbell (2011), las facies texturales en Ixtapan de la Sal y Tonatico representaron zonas proximales, aprones distales y marismas (Figura 6). Las facies esponjosas y carpetas de burbujas representan facies proximales; las facies de oncoides/esferulitas, facies de aprones distales, y las facies de tuffa con abundantes restos de plantas y crecimientos filiformes, facies lacustres de baja energía y marismas (Figura 6). El estudio de actividad biológica en los travertinos requiere una investigación a detalle debido a su relación con la deposición de los carbonatos (Porta *et al.*, 2022).

6.



Figura

Interpretación del paleoambiente del depósito de travertinos Ixtapan de la Sal con facies de los travertinos en relación con la distancia de centros alimentadores (manantiales termales) y con las características geológicas en el semigraben de Ixtapan de la Sal (A). (Figura B modificada de Guido y Campbell, 2011)



Revista
CHICOMOZTOC
ISSN 2992-7188

Revista Chicomoztoc, Vol. 7. No. 13, Enero – Junio 2025

En la región norte de Ixtapan de la Sal los travertinos muestran texturas de recristalización, texturas brechadas y “diques” de carbonatos (Figura 5). Algunas texturas brechadas y de recristalización van acompañadas de la precipitación de oxi/hidróxidos de Fe y otras limonitas; estas texturas revelan asociación a fallas y fracturas que provocan recristalización de los carbonatos del travertino (Figura 6). En algunas partes del travertino también se observan texturas laminadas y brechas bandeadas que sugieren antiguas resurgencias de aguas termales a lo largo de fracturas, cortando a los depósitos de travertinos más antiguos. En comunicación personal con pobladores han mencionado que parece existir una conexión entre manantiales termales de la parte norte con las surgidas en la parte del centro de Ixtapa, si es esto cierto implicaría una vínculo del agua termal del norte al sur a lo largo de una fractura u otro medio natural.

En este trabajo se interpreta el origen del travertino de origen hidrotermal y cómo se depositó en una depresión fluvial-lacustre.

Características de los vestigios arqueológicos de la producción de sal

Los salitres se encuentran entre Ixtapan de la Sal y Tonicato, específicamente entre la colonia El Salitre y posteriores al balneario municipal de Tonicato (Figura 1). En este estudio se reconocieron varias de las características arqueológicas descritas por Ursula Ewald (1997) y se añade la delineación de peculiaridades geológicas observadas. El área que se pudo reconocer con vestigios arqueológicos relacionados a la producción de sal es de 400 metros por 400 metros, que comprende cerca de 16 hectáreas.

En los baños del obispado se encuentra un manantial termal, en la salida del agua termal hacia un represamiento y en la región periférica de propiedad privada se observan estructuras y texturas características de un centro alimentador con el desarrollo de un montículo y columnas con texturas de escurrimiento que forman terrazas y zonas de cristalización con morfologías de estalactitas y estalagmitas a pequeña escala, abundantes fragmentos de plantas que dan una

aparición de textura palizada envueltos en carbonato de calcio (Figura 7). En la parte inferior se crean terrazas amplias con texturas de flujo y algunas son cortadas por canales de flujo, evidenciadas por la cristalización del carbonato de calcio mezclado con arcillas (Figura 8). Algunas de estas terrazas corresponden a antiguas milpas salineras (Ixtamiles) y tienen alturas variables de 1.0 a 2.0 m.

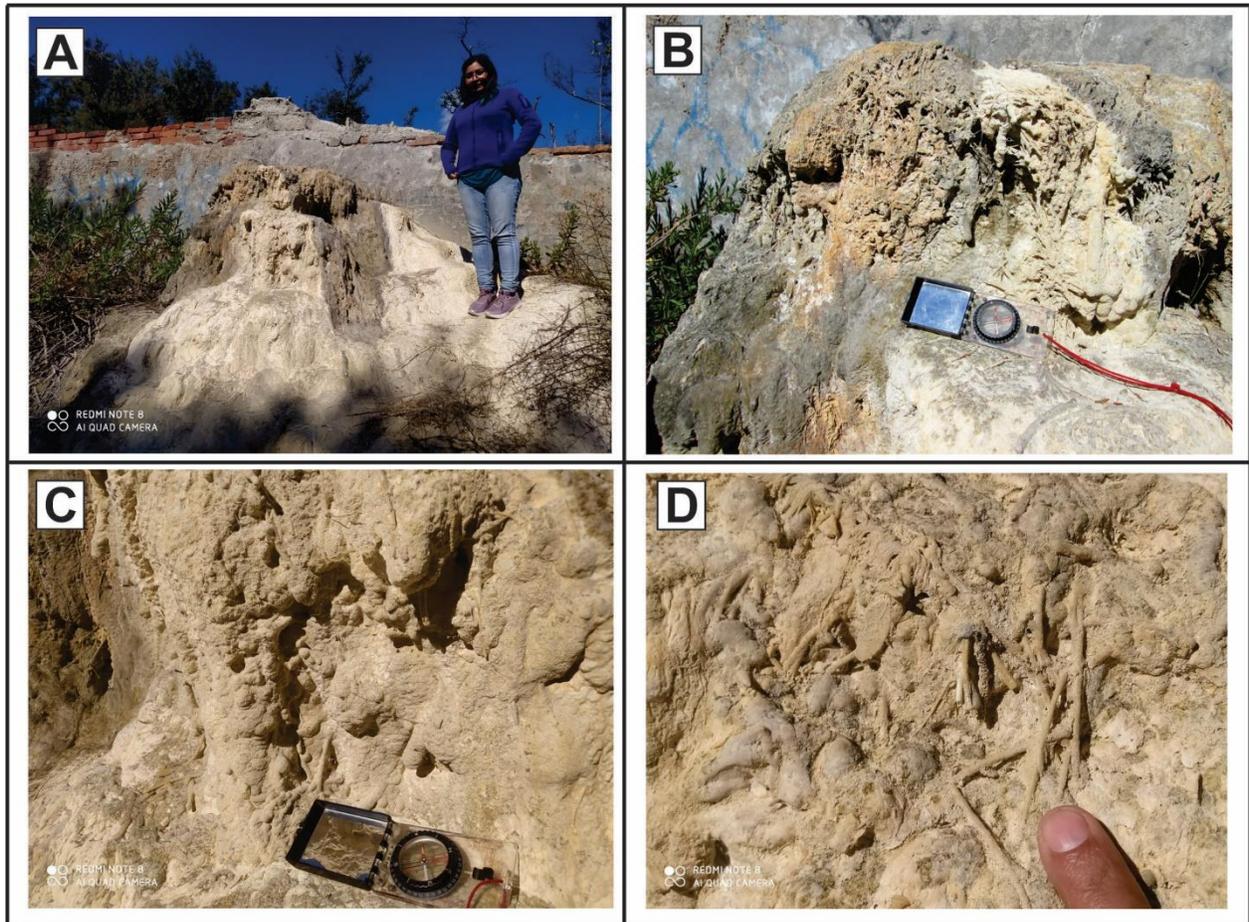


Figura 7. Estructuras y texturas de cristalización de carbonatos en salidas de agua termal cercana a manantiales. A. Estructura monticular con desarrollo de columnas de precipitados de carbonato y sedimento arcilloso. B. Estructuras de escurrimiento sobre el montículo. C. Estructuras lobuladas, estalactitas y estalagmitas de precipitación de carbonatos. D. Abundantes fragmentos de restos de plantas cubiertos por carbonatos con arcillas.

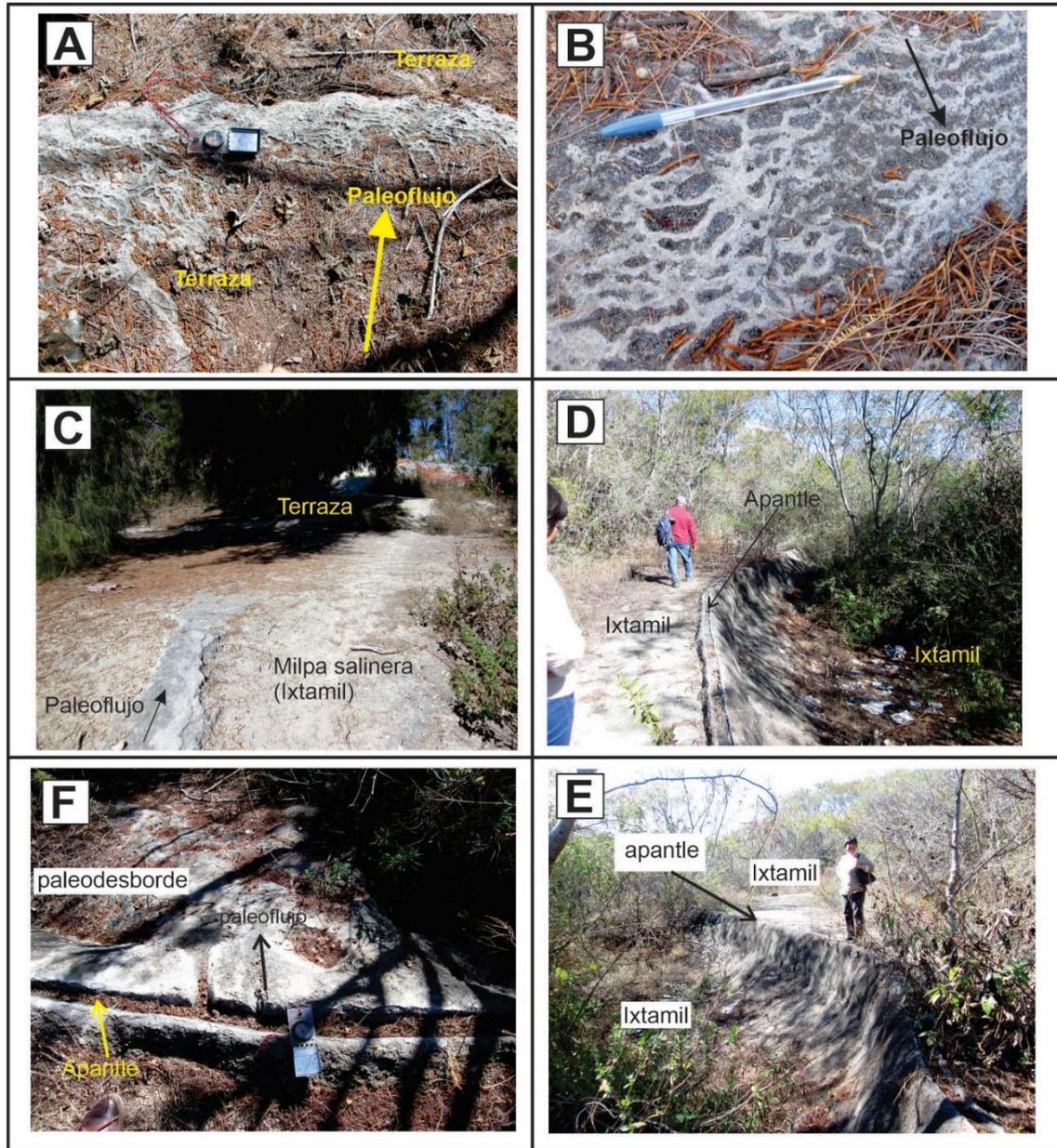


Figura 8. Diferentes vestigios arqueológicos y evidencias en la producción de sal. A. Terrazas apiladas de carbonato de calcio desarrolladas sobre ixtamiles con microterrazas. B. Microterrazas en el frente de una terraza de mayor tamaño con rizaduras que indican paleoflujo. C. Terraza con milpa salinera y antiguas corrientes fosilizadas que indican cómo se controlaba el flujo de agua. D. Desnivel de terrazas o ixtamiles limitadas por canal (apantle). E. apantle en el límite de ixtamiles con pequeños canales de desborde que forman una cascada de agua que pasa al Ixtamil a bajo nivel topográfico. F. Bordo con apantle que limita a dos ixtamiles

Las terrazas están limitadas por canales (apantles) de 10 a 12 cm de ancho que servían para dirigir el flujo de agua (Figuras 8 y 9). Estos canales están sobre bordos elevados que limitan a las terrazas salineras. En algunos se pueden apreciar otras pequeñas conducciones transversales a manera de desbordes para conducir el agua hacia otras terrazas (Figura 8F), conservando morfologías de abanico con canales y texturas de flujo en el carbonato de calcio. En los canales se identificaron también pequeñas depresiones circulares de entre 15 a 20 cm de diámetro que podían usarse como desviadores del agua o para marcar algún tipo de lindero en la terraza de milpa salinera (Figura 9A). Muchos canales aparecen como bordos limitando las parcelas en terrazas de milpas salineras y otros se presentan dentro de las terrazas salineras siguiendo formas onduladas de acuerdo al flujo del agua carbonatada a lo largo de la pendiente topográfica hacia el sur (Figuras 8 y 9). Algunos de estos conductos interiores a las terrazas de milpas salineras se construyeron con un corto margen elevado de 10 a 15 cm de altura para canalizar el agua dentro de la terraza. En los flancos de los bordos mayores de los canales se pudieron apreciar texturas de escurrimiento con desarrollo de pequeñas cascadas y columnas de carbonato de calcio cristalizado (Figura 9), esto debido en parte a desbordamiento del agua en los flancos de las orillas con canales.



Figura 9. Vestigios arqueológicos del trabajo de la sal y evidencias de paleoflujos de agua que sugieren la actividad de control de flujo de agua salada. A. Cuenco pequeño a lo largo de los apantles, se desconoce su función. B. Bordo con apantle, limita a dos Ixtamiles. C. Ixtamil con cuexcomate. D. Cuexcomate de tamaño mayor a 1.80 m de diámetro. E. Rampa para subir a Ixtamil y bordo como apantle; en la pared de éste último se ven marcas de escurrimiento por desbordes de agua en el apantle

En otros bordos se aprecian rampas construidas con baja pendiente que se interpreta servían para ascender y descender a los distintos niveles de terrazas (Figura 9E). Se observó un corte que muestra la estructura interna de un bordo y se aprecia en el núcleo el apilamiento de piedras y el crecimiento laminar de las capas cristalizadas de lodo con carbonato de calcio formando morfologías triangulares en cada flanco (Figura 9F). El núcleo de piedras aparentemente era estructurado en un inicio para construir el bordo de una terraza. Las texturas de lodos con carbonato de calcio muestran texturas esponjosas y numerosos espacios abiertos que sugieren que el vapor de agua y la evaporación era constante (Figura 9F).

En algunas terrazas de milpa salinera los bordes son construcciones de levantamientos de piedra acomodada de altura de 80 cm a 1.20 metros. Muchas de estas piedras son roca extraídas de las capas de travertino más antiguo y que es el basamento de las terrazas.

En las cercanías con las construcciones urbanas se puede apreciar cómo éstas fueron construidas sobre las antiguas terrazas de milpas salineras y canales (Figura 10). En ciertos lugares se perciben canales chicos activos con agua caliente fluyendo, que son canalizados hacia el interior de las obras para uso privado.

En unas terrazas de milpas salineras aparecen pequeños cuencos con formas de plato sopero (temascales) que miden de 1 a 2.50 m de diámetro y que presentan bordos erigidos amalgamados con lodo y carbonato de calcio. Estos se utilizaban para concentrar el agua salada y, de acuerdo con Ursula Ewald (1997), podían ser para depositar las costras de sal cosechada de las terrazas de milpas salineras. En las salinas prehispánicas de Santa María Silacayoapan en los Valles Centrales de Oaxaca, los salineros usan pequeños cuencos muy parecidos a los de Ixtapan de la Sal y, en esta región, se denominan cuexcomates, ubicados en los bordes de las terrazas de evaporación, éstos se emplean para almacenar y concentrar la salmuera (Flores-Granados, 2019).

Discusión

Relación de la producción de sal y las características geológicas de la cuenca de Ixtapan de la Sal

La obtención de sal en la región de Ixtapan de la Sal y Tonicato debió poseer un lugar relevante en el contexto histórico, sin embargo, poco es conocido y documentado de la etapa de producción



Revista
CHICOMOZTOC
ISSN 2992-7188

Revista Chicomoztoc, Vol. 7. No. 13, Enero – Junio 2025

prehispánica y la época colonial. En este contexto, la geología ayuda a aportar información que puede ser de utilidad para futuros trabajos arqueológicos o geoarqueológicos.

La presencia de sal en los manantiales termales del semigraben de Ixtapan de la Sal estuvo determinada por la confluencia de condiciones geológicas, hidrogeológicas e hidrogeoquímicas como se ha visto en esta investigación. Las aguas tienen concentraciones importantes de carbonatos, cloruros, sulfatos y otros elementos químicos (Juan-Pérez, 1994; Martínez-Florentino, 2015; Martínez-Florentino *et al.*, 2019). Estas características hidrogeoquímicas comprobaron las condiciones favorables para que el agua termal tuviera el cloruro de sodio necesario para que se pudiera aprovechar en la producción de sal en los salitres de Tonicato.

La cuenca sedimentaria de Ixtapan de la Sal-Tonicato funcionó como un área para el depósito de travertinos y continúa haciéndolo como un reservorio de precipitaciones de carbonatos y salitres alrededor de algunos manantiales, aunque en la actualidad se encuentran impactados por la urbanización (Figura 10). Esta cuenca es un semigraben determinado por la formación de fallas tectónicas del Sistema de Fallas Taxco-San Miguel de Allende (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2002) que se originaron por lo menos durante el Oligoceno con direcciones NW-SE; estas fallas regionales probablemente se hayan reactivado durante el Mioceno y durante el emplazamiento del magmatismo de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) durante el Plioceno y Cuaternario (García-Palomo *et al.*, 2000). El emplazamiento de las rocas ígneas de los volcanes en los alrededores y a profundidad del semigraben generó el calor suficiente para generar el agua termal.

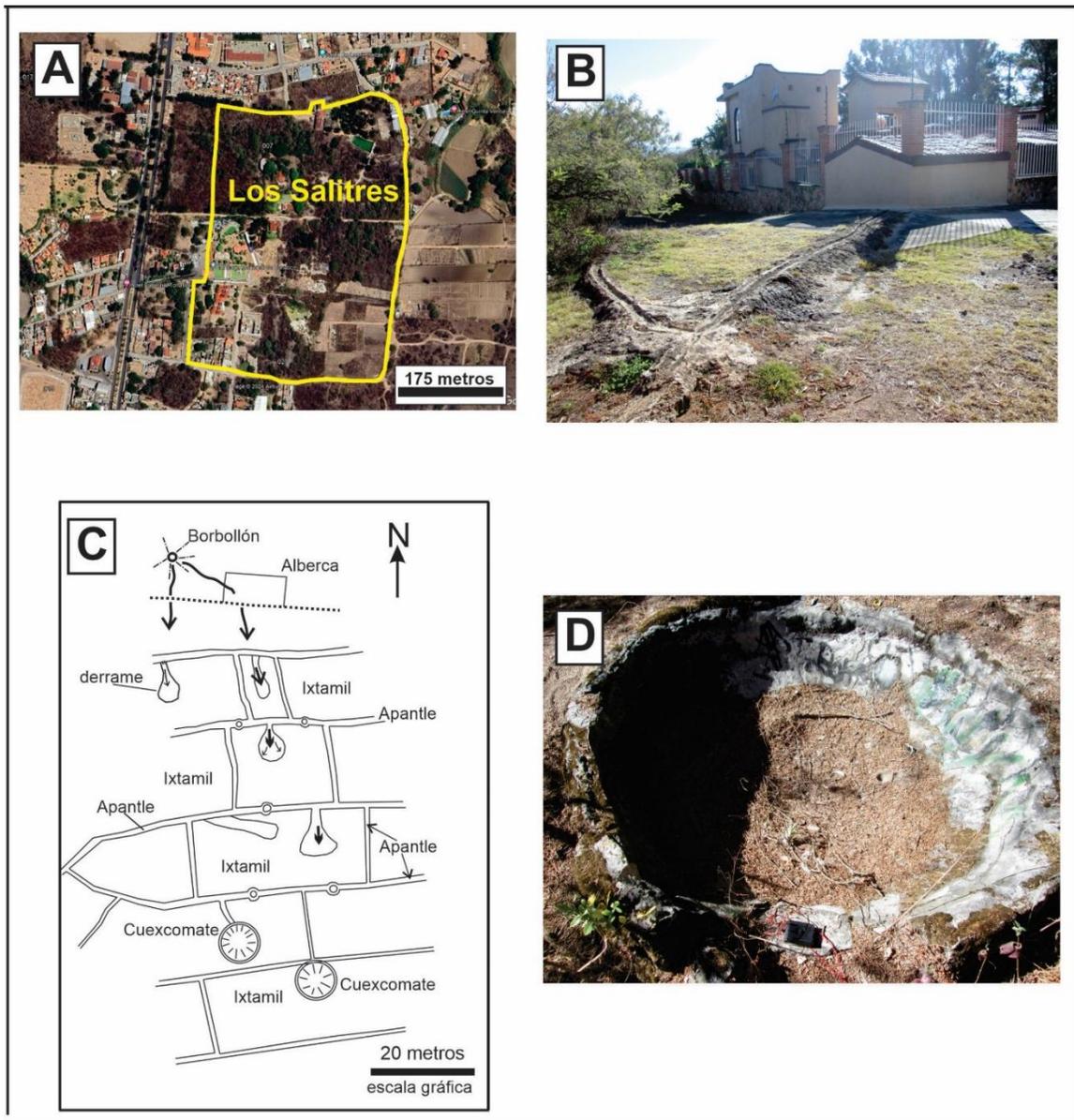


Figura 10. Urbanización en la zona los Salitres de Totonaco y evidencias de deterioro de los vestigios arqueológicos. A. Área de Los salitres con presencia de vestigios arqueológicos de producción de sal. B. Construcción de casas y nuevos fraccionamientos sobre los vestigios arqueológicos. C. Esquema de posible configuración de las milpas salineras y apantles en los salitres. D. Cuexcomate deteriorado y vandalizado

Las fracturas dentro del semigraben de Ixtapan de la Sal se han estado desempeñando como canales por donde el agua subterránea hidrotermal asciende a la superficie y, de esta manera, se ha formado un ambiente lacustre y fluvial-lacustre que ha quedado registrado en las características



Revista
CHICOMOZTOC
ISSN 2992-7188

Revista Chicomoztoc, Vol. 7. No. 13, Enero – Junio 2025

litológicas y facies texturales de las unidades geológicas formadas dentro del semigraben como los travertinos. En varios sistemas geotermales se ha encontrado que las fallas geológicas funcionan como conductos para los fluidos hidrotermales y controles en la distribución espacial de precipitados de carbonatos o sílice (Brogi y Capezzuoli, 2009; Olvera-García *et al.*, 2020).

La zona Los salitres presenta vestigios arqueológicos que evidencian que existió una interacción constante entre los manantiales hidrotermales, el flujo de agua hidrotermal en superficie y las técnicas del aprovechamiento de esta agua para producir sal. Las características texturales y estructuras fosilizadas de los depósitos de carbonatos con cloruros y sulfatos en las zonas de obtención de sal muestran zonas de surgencia del agua hidrotermal, direcciones de flujo de agua, elementos constructivos para el manejo, canalización y almacenamiento del agua hidrotermal y las geometrías de la gestión de los ixtamiles o terrazas con milpas salineras. La semejanza de texturas y estructuras sedimentarias en la unidad de travertinos de Ixtapan de la Sal con los depósitos y marcas fosilizadas de paleoflujos en los vestigios arqueológicos de Los salitres permite inferir que durante la producción de sal se presentaba un flujo calmado del agua a lo largo de una pendiente suave y con desarrollo de terrazas y que el agua era termal con presencia de vaporización.

Deterioro y preservación de vestigios arqueológicos de los salitres

Las diferentes construcciones y elementos arqueológicos hablan de un centro importante de producción de sal en Tonatico, hoy día está siendo modificado y alterado a velocidades muy rápidas por el crecimiento urbano y diferentes actividades turísticas que se desarrollan en la región asociadas con balnearios, hoteles, centros de relajación y lugares de descanso (Figura 10).

Existe un valor cultural muy importante para las comunidades locales y luego nacionales al conocer sobre las diferentes maneras y técnicas empleadas en la obtención de sal en la época prehispánica y colonial. Las raíces prehispánicas de Tonatico e Ixtapan de la Sal se encuentran en los vestigios arqueológicos de Los salitres, aún hoy desconocidos, sin que haya estudios arqueológicos más profundos que se desarrollen en éstos; por ejemplo, que diferencien los

elementos constructivos prehispánicos de los coloniales. Ursula Ewald (1997) menciona que a los temazcales de Tonicaco se les construyó un arco clásico español por encima del arco falso de la época prehispánica. Estos aspectos de conocimiento arqueológico, como el que describe Ursula Ewald, hacen falta en Los salitres, y esto no se podrá realizar si son destruidas las instalaciones arqueológicas productoras de sal.

El conocimiento geológico del origen de la sal en la región de Ixtapan de la Sal y Tonicaco establece la existencia de manantiales o borbollones que ya no se perciben en su ambiente natural: han sido privatizados o modificados por las actuales construcciones urbanas. Gracias a este trabajo se sabe que estos manantiales termales han estado por lo menos desde el inicio del Cuaternario.

Conclusiones

Las particularidades texturales y sedimentarias de los depósitos de travertinos y de sal demuestran que éstos fueron derivados en un paleoambiente que estaba formado de manantiales de aguas termales controlados por fracturas, además de pertenecer a un sistema hidrotermal de larga vida y ser depositados en una cuenca fluvial-lacustre (semigraben de Ixtapan de la Sal); esta cuenca fue a su vez también dominada por fallas regionales a lo largo del Sistema de Fallas Taxco-San Miguel de Allende con dirección NW-SE y NNW-SSE.

Los vestigios arqueológicos de los salitres en Tonicaco muestran elementos constructivos de un importante centro de producción de sal primero durante la época prehispánica, luego en la etapa colonial y por último en parte del siglo XX. La obtención de sal estuvo condicionada por las características geológicas e hidrogeoquímicas de los manantiales termales dentro de un ambiente paleolacustre y fluvio-lacustre.

La conservación de los vestigios arqueológicos de Los salitres es muy importante, se trata de raíces culturales de trascendencia para las comunidades de Ixtapan de la Sal y Tonicaco. La preservación y la difusión de las técnicas en la producción de sal pueden incorporarse a las actividades turísticas y, así pueden tener un autofinanciamiento para su protección y divulgación cultural entre los visitantes.

Agradecimientos

Mis respetos a la familia Serrano-Cruz por el acompañamiento en algunas observaciones durante el trabajo de campo; al apoyo en la cartografía digital a Néstor Salas Vallejo; a los habitantes de la comunidad El Salitre por el soporte durante el registro; a Investigadores del Cuaternario y Antropoceno (INCUA) por la invitación al V Encuentro INCUA 2024, la tierra, la historia y el hombre.

Referencias

Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, A. F., Orozco-Esquivel, M. T., Vasallo-Morales, L. F., y Xu, S. S. (2002). “El sistema de Fallas Taxco-San Miguel de Allende: implicaciones en la deformación post-Eocénica del centro de México”. En *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Vol. 55, No. 1, pp. 12-29.

Brogi, A., Enrico Capezzuoli, E., Kele, S., Baykara, M.O. & Shen, C. (2017). “Key travertine tectofacies for neotectonics and palaeoseismicity reconstruction: effects of hydrothermal overpressured fluid injection”. *Journal of the Geological Society*. Volume 174, Number 4. p.679-699. <https://doi.org/10.1144/jgs2016-124>

Brogi, A., y Capezzuoli, E. (2009). “Travertine deposition and faulting: the fault-related travertine fissure-ridge at Terme S. Giovanni, Rapolano Terme (Italy)”. *International Journal Earth Sciences*. 98, 931–947.

Campa, M.F., Campos, M., Flores, R., y Oviedo, R. (1974). “La secuencia mesozoica volcanosedimentaria metamorfizada de Ixtapan de la Sal, Mex.-Teloloapan, Gro”. *Boletín Sociedad Geológica Mexicana*. 31, 149–172.

Castellón-Huerta, B. (2019). “La sal, el sabor de los dioses”. *Revista Arqueología Mexicana*. Vol. XXVII, No. 158, p. 32-41.

Revista Chicomoztoc, Vol. 7. No. 13 | Enero - Junio 2025. Controles geológicos en el depósito de travertinos y sal prehispánica del graben de Ixtapan de la Sal, Estado de México: Implicaciones paleoambientales. Pp. 175 -204.

Castellón-Huerta, R. B. (2017). “Aportaciones recientes en el estudio de las tecnologías salinas tradicionales en México y Centroamérica”. *De Re Metallica (Madrid): revista de la Sociedad Española para la Defensa del Patrimonio Geológico y Minero*, 28, pp.85-96.

Ceja-Acosta, J.A. (2009). “La Huixtocihuatl, diosa de la sal o la problemática de las identidades salineras en la región sureste veracruzana en el posclásico”. *Revista digital El Alfolí*, Número 6, P. 30-39.

Cruz-Alberto, A. (2019). *Registro de algunas manifestaciones geotérmicas en el estado de México y sus características geológico-ambientales*. Tesis de licenciatura, UAEMex. Estado de México, 107 p.

Ewald, U. (1997). *La industria salinera de México 1560-1994*. Fondo de Cultura Económica, Primera edición en español. 467 p.

Flores-Granados (2019). “Salinas Prehispánicas de los Valles Centrales de Oaxaca”. *Revista Arqueología Mexicana*. Vol. XXVII, No. 158, p. 42-45.

García-Palomo, A., Macías, J., & Garduño, V. (2000). “Miocene to Recent structural evolution of the Nevado de Toluca volcano region, Central Mexico”. *Tectonophysics*, 281-302.

Gómez-Cabrera, P. T., and Jackson, M.P. A. (2009). “Regional Neogene salt tectonics in the offshore Salina del Istmo Basin, southeastern Mexico”, in C. Bartolini and J. R. Roma (Eds.), *Petroleum systems in the southern Gulf of Mexico*, AAPG Memoir 90, p. 1–28.

Gómez-Luna, V.M. (2013). *Inventario Físico de Recursos Mineros de la Carta Ixtapan de la Sal E14-A57*. Servicio Geológico Mexicano. 153 p.

Guido, D.M. and Campbell, K.A. (2011). “Diverse subaerial and sublacustrine hot spring settings of the Cerro Negro epithermal system (Jurassic, Deseado Massif), Patagonia, Argentina”. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 203: 35–47.

Martínez-Florentino, A.K., Esteller, M.V., Domínguez-Mariani, E., Expósito, J.L., and Paredes, J. (2019). “Hydrogeochemistry, isotopes and geothermometry of Ixtapan de la Sal–Tonatico hot springs”. Mexico. *Environmental Earth Sciences*. 78, 600.



Revista
CHICOMOZTOC
ISSN 2992-7188

Revista Chicomoztoc, Vol. 7. No. 13, Enero – Junio 2025

Martínez-Florentino, T.A.K. (2015). *Caracterización Hidrogeoquímica del Sistema de Manantiales Termales de Ixtapan de la Sal-Tonatico, estado de México*. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, CIRA, Universidad Autónoma del estado de México. 130 p.

Mendizábal, Othón de. M., (1928). *Influencia de la sal en la distribución de los grupos indígenas de México*. Imprenta del Museo Nacional de Arqueología, Historia y Etnografía.

Mendizábal, Othón de. M., (1946). *Influencia de la sal en la distribución de los grupos indígenas de México*. Obras completas, tomo segundo. Derechos de Carmen H. Vda. de Mendizábal. 340 p.

Olvera-García, E., Garduño-Monroy, V.H., Ostrooumov, M., Gaspar-Patarroyo, T.L. and Nájera-Blas, S.M. (2020). “Structural control on hydrothermal upwelling in the Ixtlán de los Hervores geothermal area, Mexico”. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 399, 106888, p. 1-11.

Osorio-Ogarrio, V.A. (2019). “Una posible diosa prehispánica de la Sal en San Miguel Ixtapan, Tejupilco”. *Revista Arqueología Mexicana*. Vol. XXVII, No. 158, p. 46-51.

Porta, G.D., Hoppert, M., Hallmann, C., Schneider, D., and Reitner, J., (2022). “The influence of microbial mats on travertine precipitation in active hydrothermal systems (Central Italy)”. *The depositional Record*, 8, 165-209.

Reyes-Garza, J. C. (2009a). “La sal en los códices pictográficos”. *Estudios de Cultura Náhuatl*, 31(031). Recuperado a partir de <https://www.revistas.unam.mx/index.php/ecn/article/view/9236>

Reyes-Garza, J.C. (2009b). “Ordenanza sobre la sal de 1580”. *Revista digital El Alfolí*, Número 6, P. 40-41.

Rosales-Díaz, U. y Ramírez-Ramírez, A. (2013). *Cartografía geológico-minera Ixtapan de la Sal E14A57*. Estado de México y Guerrero. Servicio Geológico Mexicano.

Revista Chicomoztoc, Vol. 7. No. 13 | Enero - Junio 2025. Controles geológicos en el depósito de travertinos y sal prehispánica del graben de Ixtapan de la Sal, Estado de México: Implicaciones paleoambientales. Pp. 175 -204.

Salinas-Prieto, J.C., Monod, O. and Faure, M. (2000). “Ductile deformations of opposite vergence in the eastern part of the Guerrero Terrane (SW Mexico)”. *Journal of South American Earth Sciences*, 13, p. 389-402.

Zárate, C. J. (1917). “Las salinas de México y la industria de la sal común”. *Anales del Instituto Geológico de México*, Instituto Geológico de México, número 2, 71p.