

Caracterización de la erosión y de la susceptibilidad al deslizamiento de ladera de jales mineros en Huautla, Morelos

Erosion characterization and Susceptibility to landslide movement of mining tailings in Huautla, Morelos

Roberto Márquez-Huitzil,* Lorenzo Vázquez Selem,** Cristina Martínez-Garza,*** Roberto Lindig-Cisneros,+ Marcela Osorio-Beristain++ y Eliane Ceccon+++

Recibido: 29/02/2024. Aceptado: 9/10/2024. Publicado: 30/11/2024.

Resumen. Los jales son rocas trituradas y molidas mezcladas con sustancias químicas, producto de la minería. En Huautla, Morelos, México, existen depósitos de jales sin contención y confinados (presas de jales). Las superficies de los depósitos quedan expuestas lo que los vuelve susceptibles al desplazamiento por agua y viento. Este estudio analizó el desplazamiento por erosión hídrica y por deslizamiento de cinco depósitos de jales, mediante cuatro métodos: a) el cálculo de la erosión con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por sus siglas en inglés) y la vulnerabilidad al deslizamiento de ladera mediante el método de Mora-Vahrson; b) la identificación de evidencias de erosión o del movimiento en masa; c) la medición de metales pesados en jales y en zonas de depósito y de inundación en el Arroyo Grande. El USLE presentó tasas de erosión mayores a 200 ton/ha⁻¹año⁻¹ en los depósitos de jales. La vulnerabilidad al

deslizamiento de ladera fue mayor en los taludes que en los bancos (zonas horizontales) de las presas de jales. Las evidencias de erosión fueron exhumación de raíces, formación de surcos y cárcavas, colapso del terreno, zonas expuestas sin vegetación y tubificación (*piping*). Tanto los jales como las zonas de depósito de inundación del Arroyo Grande, contiguo a los jales, presentaron concentraciones de metales pesados (Zn, Cd, Pb, Cu) por arriba de los límites máximos permisibles (LMP). La intensa erosión, la vulnerabilidad al deslizamiento y la concentración de metales pesados indican una alta movilización de materiales y sustancias tóxicas hacia los ecosistemas y las poblaciones humanas.

Palabras clave: relaves mineros, erosión hídrica, movimientos en masa, Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), metales pesados.

* Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Avenida Universidad 1001, Chamilpa, 62209, Cuernavaca, Morelos, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8947-5253>. Email: huitzil.r@gmail.com

** Instituto de Geografía, UNAM. Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, México, CDMX, México. ORCID: 0000-0001-7798-6187. Email: lselem@geografia.unam.mx

*** Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Universidad 1001, Chamilpa, 62209, Cuernavaca, Morelos, México. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9310-564X>. Email: cristina.martinez@uaem.mx

+ Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México. Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, Morelia, 58190, Michoacán, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2542-7038>. Email: rlindig@iies.unam.mx

++ Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Av. Universidad 1001, 62209, Cuernavaca, Morelos, México. ORCID: 0000-0001-7338-1260. Email: mosorio@uaem.mx

+++ Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias-UNAM. Av. Universidad Circuito II s/n, Chamilpa, 62210, Cuernavaca, Morelos, México. ORCID: 0000-0003-3219-0235. Email: eccecon61@gmail.com

Summary. Mining generates thousands of tons of tailings. Tailings are ground rock separated with chemicals from the minerals of interest during mining activity. When separated, the leftovers are deposited in tailings dams or unconfined deposits. Within the Sierra de Huautla Biosphere Reserve (REBIOSH), near the town of Huautla, mining generated five tailings deposits: three deposits confined by tailings dams (Los Molinos I and II and Las Presas) and two unconfined tailings deposits (Tlalchichilpa and Huautla). Exposure to rain and wind makes the tailings deposits prone to erosion and susceptible to landslides, a type of mass movement.

The objectives of this study were to quantify water erosion, describe the susceptibility to slope sliding by using Geographic Information Systems, verify these processes by reconnaissance of the area, and know the content of heavy metals in the tailings deposits and in the flooding zones of the river that flows into the streams surrounding these tailings deposits in Huautla, Morelos.

This study is divided into four methods: a) *Erosion* calculated using the Universal Soil Loss Equation (USLE) for four years: 1975 (2,125 mm) and 1973 (1,756 mm), years with maximum precipitation in the area; 2015 (407.7 mm), driest year; 1969 (1,131.5 mm), year of a tailings dam break; (b) *Susceptibility to slope sliding* described using the Mora-Vahrson method; (c) *Reconnaissance of the area* using remote sensing and field walks; (d) *Quantification of heavy metals in tailings deposits and in flood zones of Arroyo Grande* analyzed in laboratory.

The highest erosion ($>200 \text{ ton/ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) occurred in the tailings dams in the years with the highest precipitation. The maximum erosion ($>200 \text{ ton/ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) was concentrated on the steeper slopes (talus slopes) and in the area with slope close to 0 (banks) erosion was minimal (0 and $0\text{--}10 \text{ ton/ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$). In the Huautla deposit, erosion was high only in a central portion in that year ($50\text{--}200 \text{ ton/ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$). In 1969, the year of a dam break at Los Molinos (1969), the dam had the highest erosion concentrated on its slope ($50\text{--}200 \text{ ton/ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$). The oldest deposit, Tlalchichilpa, showed minimal erosion in all years ($0\text{--}10 \text{ ton/ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$).

INTRODUCCIÓN

La minería provoca diversos impactos ambientales. Entre los impactos ambientales que provoca, está la generación de miles de millones de toneladas de roca molida y contaminada con niveles significativos de toxinas como sustancias químicas y metales pesados (jales) que son desechados y vertidos en depósitos a cielo abierto (Oyarzun *et al.*, 2011). A nivel mundial se estima que existen 217 km^3 de jales (equivalente a 282.5 billones ton) creciendo anualmente 12.3 km^3 de jales (Le Pan, 2021). Uno de sus impactos ocurre en alrededor de $479\,200 \text{ km}$ de canales de ríos y $164\,000 \text{ km}^2$ de planicies de inundación afectadas por jales mine-

Susceptibility to slope sliding was Very High on the slopes and Very Low on the banks of the three tailings dams. The Tlalchichilpa tailings deposit presented High and Very High susceptibility to slope sliding in its southern portion, and the Huautla deposit presented Medium susceptibility in almost the entire tailings deposit, varying only in a small area of its central portion.

The reconnaissance of the zone by remote sensing reaffirmed the mass movement due to the breakage of the Los Molinos tailings dam in the aerial photograph (1969), an event corroborated by some residents and by the field trip. The field trips allowed to understand that a hillside landslide of the Huautla deposit is improbable given that they seem to be superficial remnants of the original deposit, no deeper than 1 m on a rocky sloping hillside. While touring the tailings deposits, root exhumation and sparse vegetation were observed in the tailings dams and the Huautla deposit, and subway erosion processes by formation of tubes (tubing) and tunnels (tunneling) in the tailings dams. In addition, there were large differences in size between large tailings dams and small unconfined deposits.

The tailings deposits showed concentrations of heavy metals (Zn, Cd, Pb, Cu, Hg and As) above the Maximum Permissible Limits (MPL) at different depths. Only Zn, Cd, Cu and As were found slightly above the MPL in the flood zones of Arroyo Grande.

Erosion and susceptibility to slope sliding seem to be mainly determined by the slopes of the tailings deposits, the intense rainfall and the lack of vegetation cover in all the deposits. Field surveys verify, complement and/or modify the results obtained in the initial analyses. Heavy metals have different persistence in the tailings deposits, which determines their presence at different depths in the tailings deposits or their mobility towards flood zones in Huautla, Morelos. The joint analysis of the movement of tailings allows a more complete interpretation of these processes.

Keywords: mine tailings, water erosion, mass movements, Universal Soil Loss Equation (USLE), heavy metals.

ros tóxicos, pasados y futuros, desechados por la minería metálica, afectando a cerca de 23 millones de personas que viven en sus cercanías a nivel mundial y (Macklin *et al.*, 2023). Los jales mineros amenazan socioambientalmente tanto en México como en el mundo.

Los jales son semejantes a suelos artificiales. Los jales mineros son depósitos de rocas trituradas y molidas con textura desde gruesa hasta muy fina sobrantes de la extracción mineral (Reyes, 2014). Durante el beneficio minero se adicionan compuestos químicos para separar los minerales de interés del material parental (ELAW, 2010). A pesar de su similitud con los suelos, los jales resultan tóxicos para el ambiente y la sociedad.

Los jales son propensos a la erosión y al movimiento en masa. La erosión consiste en el desprendimiento y arrastre graduales de partículas de suelo por acción de la escorrentía del agua de lluvia, que las moviliza y deposita (Morales, 2014; Castro *et al.*, 2017). La escorrentía forma surcos y cárcavas (Morgan, 2005. Cuando el subsuelo del terreno es inestable puede producir tubos (tubificación) o túneles (tunelamiento) (Scheffer y Schachtschabelm, 2016). La superficie del terreno erosionada expone elementos finos del suelo, raíces de las plantas y la roca madre (García-Rodríguez, 2015). El movimiento en masa de grandes volúmenes de materiales pendiente abajo se denomina deslizamiento de laderas (Paz *et al.*, 2017). Los jales mineros son sensibles a la erosión y al deslizamiento de ladera poniendo en peligro a los humanos y a los ecosistemas (Rana *et al.*, 2021).

Los jales dispersos en el ambiente tienen impactos negativos. La dispersión de jales provoca el azolve de ríos y presas, modifica la hidrología y contamina, amenazando a la biota y las poblaciones humanas (Musali, 2008; Arango y Olaya, 2012; Islas, 2013). Las presas construidas sobre los ríos atrapan los sedimentos contaminados con metales pesados; las zonas de inundación y los meandros llegan a ser sumideros permanentes para los sedimentos finos contaminados, cuando la inundación sobrepasa la profundidad del cauce (Vázquez-Tarrío *et al.*, 2024).

Las partículas tóxicas en los jales son arrastradas a través del paisaje. Las partículas tóxicas pueden presentarse en los lodos, suelos e incluso dispersarse por kilómetros desde los depósitos de jales (Valentin *et al.*, 2005; Rivera, 2009; Bao *et al.*, 2019). La dispersión de partículas tóxicas desde los jales es una seria amenaza (Esteller *et al.*, 2015).

Esta investigación analiza el movimiento de los jales en Huautla, Morelos (Figuras 1 y 2). Mediante el uso de SIG se calculó el movimiento por erosión utilizando la Ecuación Universal de Pérdida del Suelo (USLE) y estudió la Susceptibilidad al deslizamiento de ladera de los depósitos de jales. Un reconocimiento por percepción remota y en campo buscó evidencias de erosión y deslizamientos. Finalmente, los metales pesados en los jales y las zonas de inundación del arroyo contiguo se verificaron colectando y analizando muestras de suelo.

ZONA DE ESTUDIO

Huautla se ubica dentro de la Reserva de la Biósfera Sierra de Huautla (REBIOSH), al sur del estado de Morelos (Figura 1). La zona se encuentra entre los 900 y 1300 msnm (INEGI, 2015) (Figura 2). El clima es cálido subhúmedo con lluvias en verano Aw0''(w)(e)g (García, 2004). La temperatura media anual es 24.3°C y la precipitación total es 884.2 mm (Juárez, 2017). Los suelos son tipo feozem, limitados por roca continua o material calcáreo (POEREM, 2014). Predominante la vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia (INEGI, 2021) (Figura 2). La zona presenta pendientes abruptas (<45°) y sistemas montañosos, destacando la Sierra de Huautla, entre Morelos, Puebla y Guerrero (Barats *et al.*, 2020).

La minería de plata empezó en la zona de Huautla a mediados del siglo XVI concentrándose alrededor de la Hacienda Tlalchichilpa y, luego cerca del poblado de San Francisco de Huautla, fundado en 1570 (Sánchez, 2002). La actividad minera terminó a principios de los años 1990 (Juárez, 2017), dejando minas y depósitos de jales abandonados (Márquez *et al.*, 2022). Originalmente, en la zona se reportaron tres jales: Las Presas, Los Molinos y Tlalchichilpa (Esteves, 2018). Recientemente, se aclaró que en Los Molinos eran dos presas de jales, a lo que se añadió otro depósito antiguo dentro del poblado Huautla (Márquez *et al.*, 2022) (Figura 1 y 2).

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se dividió en cuatro partes: (a) erosión; (b) susceptibilidad al deslizamiento de ladera; (c) reconocimiento de la zona, d) cuantificación de metales pesados en los depósitos de jales y en zonas de inundación del Arroyo Grande.

El cálculo de la erosión y de la susceptibilidad al deslizamiento de ladera se realizaron mediante SIG. Los análisis utilizaron un mapa de pendientes a partir del Modelo Digital de Elevación (MDE) generado con curvas de nivel cada cinco m (POEREM, 2014) (Figura 3). Estos análisis se realizaron en ArcGIS ver.10.8 y se detallan a continuación.

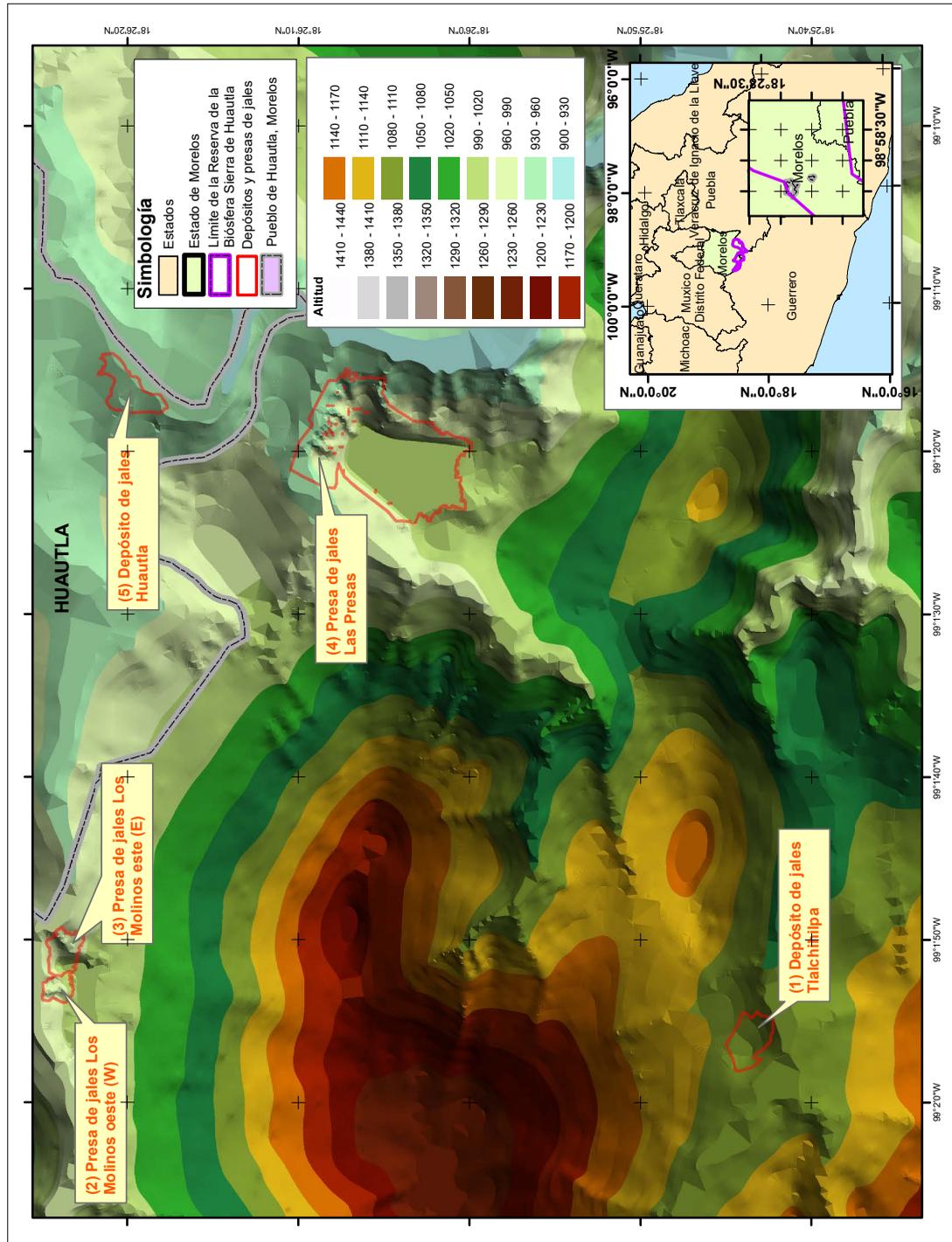


Figura 1. Localización de dos depósitos y tres presas de jales en Huautla dentro de la REBIOSH al sur del Estado de Morelos, centro de México. En figura siguiente se presentan imágenes más antiguas para cada uno de los depósitos y de las presas.

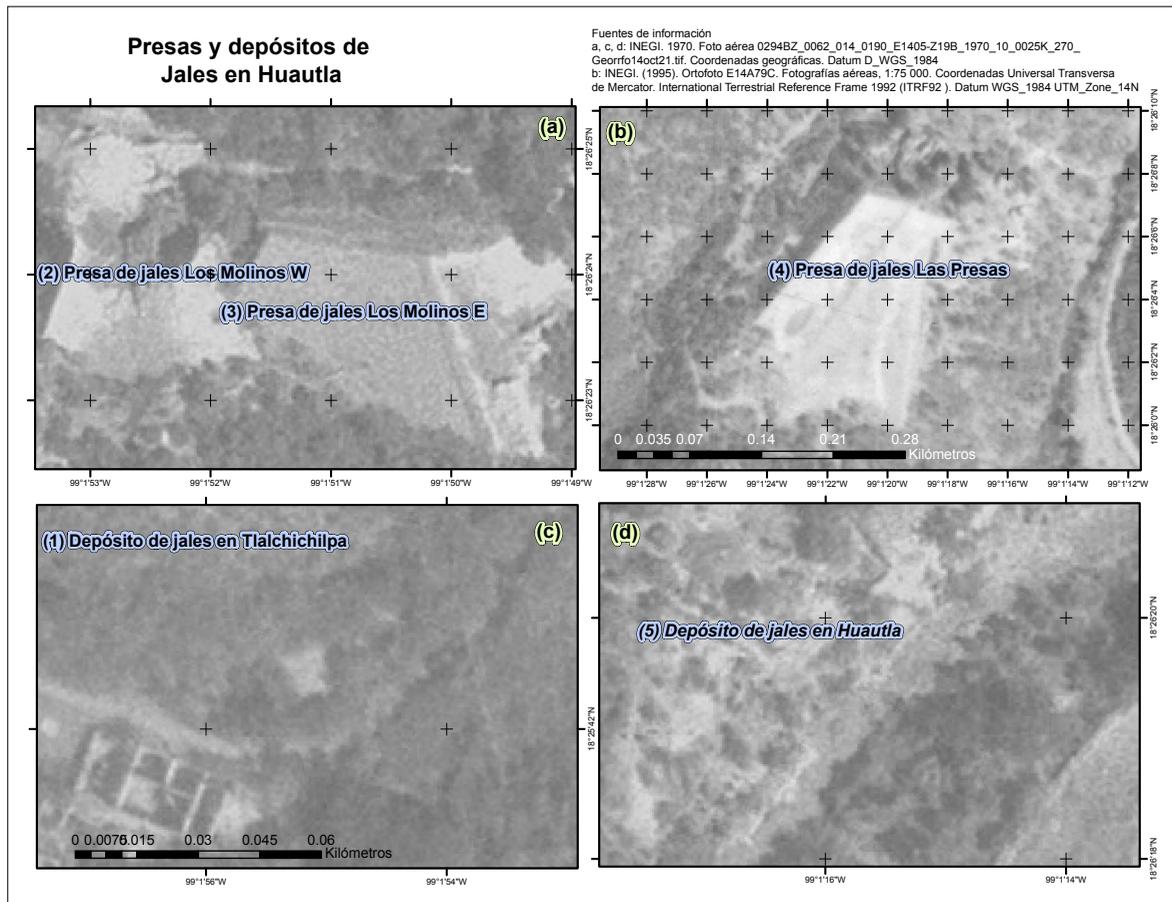


Figura 2. Imágenes de jales contenidos en presas (a y b) y depósitos sin contención (c y d). Las imágenes a, c y d comparten la misma escala, mientras que b tiene una diferente escala. Obsérvese que las presas tienen forma recta y angular; los depósitos sin contención presentan forma irregular.

(a) Erosión

La erosión se calculó con la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE, por sus siglas en inglés) por el método propuesto por Aguirre-Salado *et al.* (2017). El cálculo fue para cuatro años con distinta precipitación (CONAGUA, 2017): 1975 y 1973 (2125 mm y 1756 mm, respectivamente), años de mayor precipitación; 2015, año con mínima precipitación (407.7 mm); 1969, año del rompimiento de una presa de jales (1131.5 mm) (Márquez *et al.*, 2022).

La USLE utiliza la siguiente ecuación:

$$A = R * K * LS * C * P$$

donde A es la erosión de suelo ($\text{ton}/\text{ha}^{-1}\text{año}^{-1}$); R es el factor de erosividad por precipitación ($\text{MJ} \times \text{mm}/\text{h}^{-1}\text{ha}^{-1} \times \text{año}$); K es el factor de erosionabilidad del suelo ($\text{ton} \times \text{h} \times \text{MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$) estimado en 0.026 equivalente al suelo tipo regosol de textura gruesa (Loredo-Osti *et al.*, 2007); LS es el factor topográfico longitud-pendiente e inclinación, calculado para L conforme al método puntual de Griffin *et al.* (1988) y para S por el de Moore y Wilson (1992) (Hrabalíková y Janeček, 2017); C es el factor para el uso y cobertura del suelo (sin dimensiones), asignando valores conforme a la cobertura vegetal o su ausencia, en las distintas zonas del jal (Aguirre-Salado *et al.*, 2017); P es el factor de prácticas de conservación de suelos, tomando un

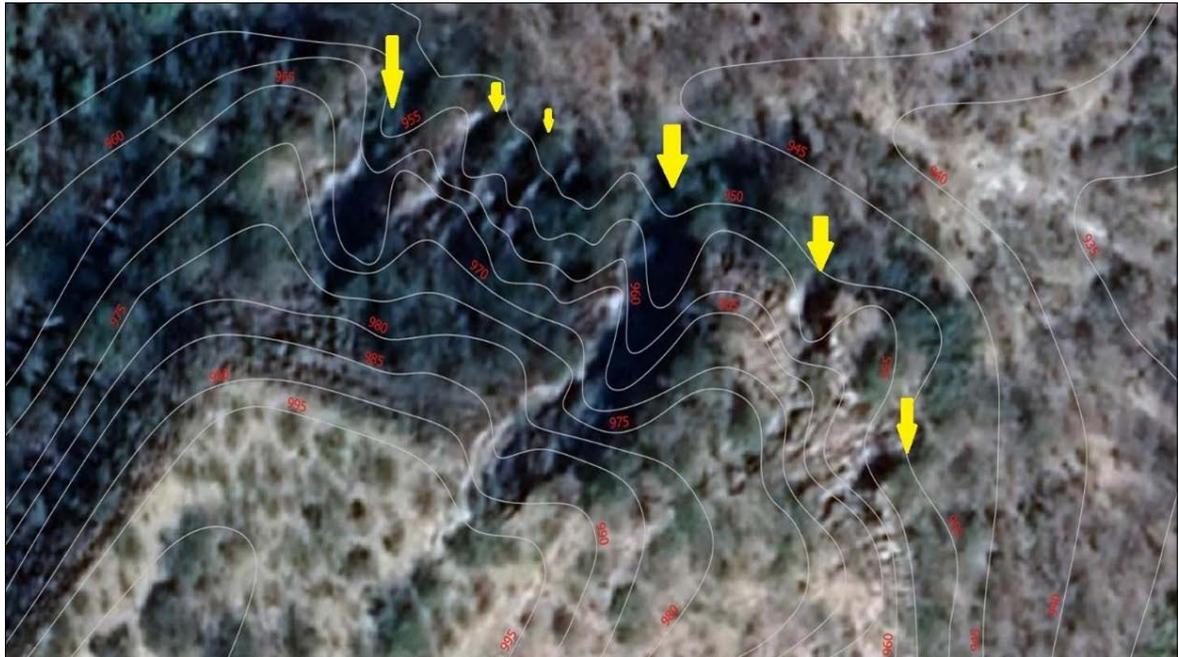


Figura 3. Cárcavas en Las Presas (flechas amarillas) con curvas de nivel (líneas color blanco). Fuentes: POEREM (2014), Google Earth (2024).

valor crítico (1), por carecer de estas. R se obtuvo con un estimador de R^2 (0.98) y un modelo de regresión del Mapa Nacional de Erosión Potencial para México para la zona de estudio (Región 8) (Loredo-Osti *et al.*, 2007):

$$Y = 1.99671x + 0.003270x^2$$

donde x = precipitación anual; $Y = EI_{30}$: EI = Índice de erosividad de la lluvia por evento (MJmm/ha hr) (Montes-León *et al.*, 2011). Los valores de precipitación utilizados corresponden a la estación meteorológica Huautla (CONAGUA, 2017). La erosión intensa observada en las cárcavas no pudo calcularse en este estudio.

(b) Susceptibilidad al deslizamiento de ladera

La susceptibilidad al deslizamiento de ladera se calcula utilizando factores fundamentales y factores desencadenantes de acuerdo con Mora *et al.* (2002) (Segura *et al.*, 2011; Lin *et al.* 2017), considerando los siguientes factores:

Factores explicativos del deslizamiento de ladera = Factores fundamentales + Factores desencadenantes = (Relieve Relativo + Litología + Humedad) + (Sismicidad + Precipitación)

Los factores de susceptibilidad fueron: Pendiente + Tipo de suelo + Humedad del sitio, enriqueciendo el método agregando los factores: + Litología + Uso de Suelo (Du). Los factores de Disparo fueron: Zonas de debilidad (Dd) + Precipitación (Dp) (Garduño, 2013).

El álgebra de mapas para calcular la susceptibilidad al deslizamiento de ladera se realizó en SIG. Las pendientes fueron reclasificadas, asignándoles variables categóricas ordinales (Mora *et al.*, 2002). La precipitación máxima alcanzada en un día fue de 106 mm en julio de 2006 (CONAGUA, 2017). Los meses con más lluvia para esta zona tropical rebasaron los 230 mm en un mes, correspondiendo al factor 2 (Mora *et al.*, 2002). La zona se caracteriza por presentar numerosas minas abandonadas e interconectadas subterráneamente; además, presenta

evidencias de erosión superficial e interna en los jales, por lo que fue considerada de alto riesgo ante fenómenos sísmicos ($T_s = 7$). El mayor riesgo fue en las presas de jales por tener alturas mayores a 20 m, los depósitos sin confinar fueron no mayores a 2 m. El resultado es la combinación de todos los factores y no se establece una escala única de valores del indicador, pues estos se ajustan a las condiciones de cada área estudiada (Barrantes *et al.*, 2011). El rango de valores obtenidos se divide en cinco clases a las que se les asignan calificativos que representan los diferentes niveles de susceptibilidad: Muy Baja, Baja, Media, Alta, Muy Alta.

(c) Reconocimiento de la zona

El reconocimiento se realizó por percepción remota y recorridos de campo. Los cambios a través del tiempo se describieron utilizando distintos productos de percepción remota: una fotografía aérea (1970), una ortofoto (1995) y visualizando distintas estaciones del año entre 2011 a 2023 en Google Earth. En el reconocimiento visual se analizaron los cambios estructurales, evidencias de desplazamiento y colonización vegetal en los depósitos (Figura 4a-d). En los recorridos de campo se identificaron evidencias de erosión y de deslizamientos de ladera.

(d) Cuantificación de metales pesados en los depósitos de jales y en zonas de inundación del Arroyo Grande

El contenido de metales pesados se determinó en muestras compuestas de sedimento (depósito de jal). El muestreo fue aleatorio, utilizando un nucleador. Las muestras se tomaron a cada 20 cm de profundidad hasta la máxima penetración posible. Las muestras se tomaron en los bancos de los jales y en las zonas de depósito del Arroyo Grande al que convergen los cauces cercanos a los depósitos (Figuras 4a-d): meandros (Sitio 1, 2, 3) y zonas de inundación (Sitios 4, 5) (Figura 20). En Los Molinos, por seguridad, solo se muestreó la presa de jales del este. Las concentraciones de zinc (Zn), cadmio (Cd), cobre (Cu), plomo (Pb), mercurio (Hg) y arsénico (As) se obtuvieron por el método de voltamperometría de redisolución anódica, Metrohm®, 797 VA Computrace. Los

resultados se compararon con los límites máximos permisibles (LMP) de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (Cd, Pb, Hg) (SEMARNAT, 2007) y la EPA (Cu, Zn) (U.S. EPA, 1994).

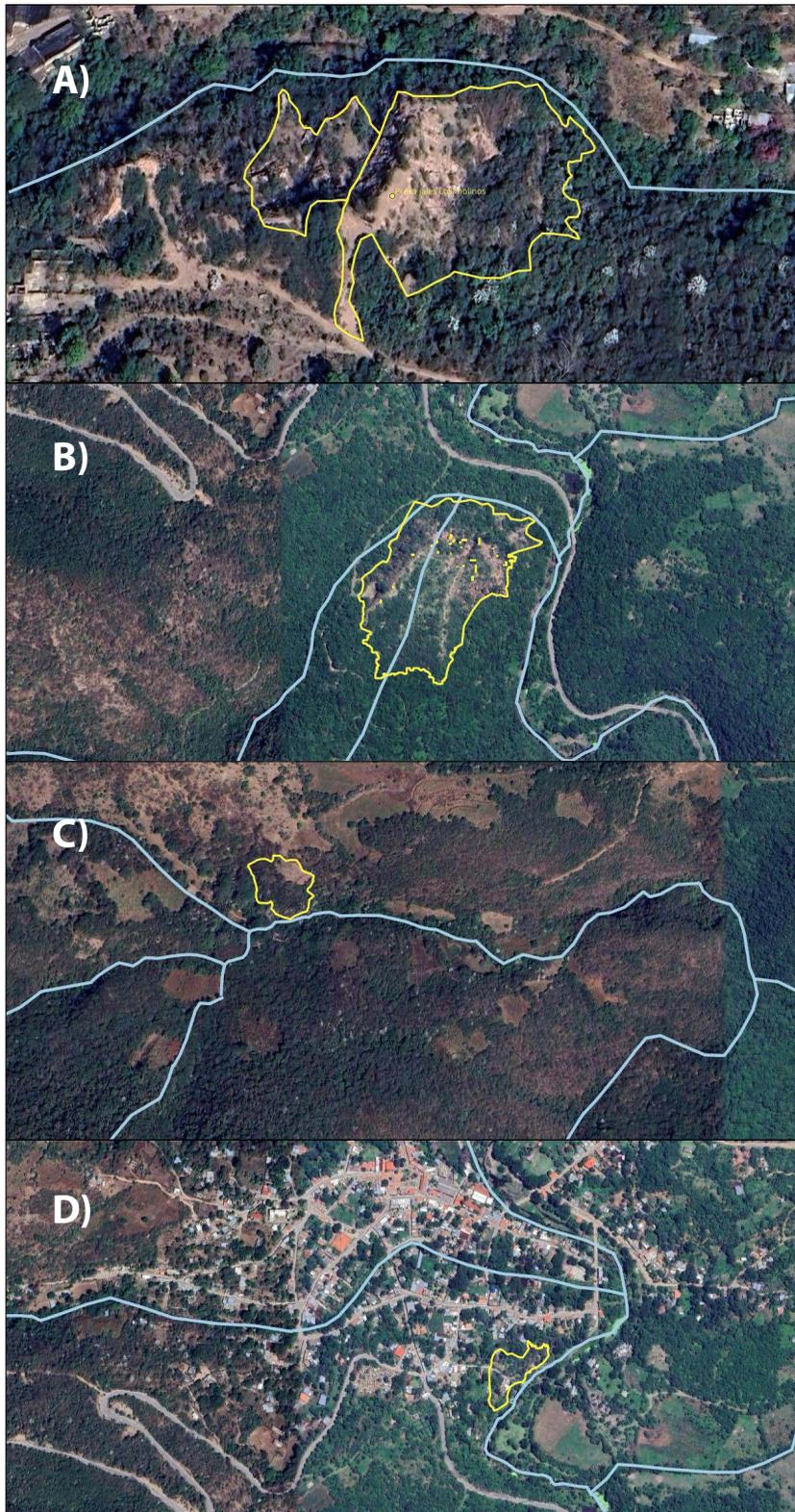
RESULTADOS

(a) Erosión

El comportamiento de la erosión de acuerdo con la USLE fue distinto entre las presas y los depósitos de jales. Los resultados de la USLE muestran que en el año con mayor precipitación (1975), en los depósitos de jales (Tlalchichilpa y Huautla) la erosión fue mínima (Figuras 5 y 8). Mientras que, en las presas de jales (Figuras 6 y 7) se presentó la máxima erosión ($> 200 \text{ ton/ha}^{-1}/\text{año}^{-1}$). En el año de 1973, el segundo año como mayor precipitación (1,756 mm), la erosión fue 0 y mínima ($10 \text{ ton/ha}^{-1}/\text{año}^{-1}$) en casi todo el depósito de Tlalchichilpa (Figura 5); en la presa de jales Los Molinos (Figura 6) se registró el segundo mayor intervalo de erosión en la zona entre las dos presas de jales presentes; en la presa de jales Las Presas (Figura 7), la erosión se concentró en los taludes ($50 \text{ a } > 200 \text{ toneladas/ha}^{-1}/\text{año}^{-1}$) y en el banco fue nula, mientras que, en Huautla (Figura 8), en general, la erosión fue $10\text{-}50$ y $50\text{-}200 \text{ ton/ha}^{-1}/\text{año}^{-1}$. En el año más seco (2015), los depósitos de Tlalchichilpa y Huautla tuvieron la erosión más reducida ($0\text{-}10 \text{ ton/ha}^{-1}/\text{año}^{-1}$) (Figura 5 y 8); en las presas de jales, la erosión máxima fue $10\text{-}50 \text{ ton/ha}^{-1}/\text{año}^{-1}$ (Figuras 6 y 7). En 1969, año de la rotura de la presa en Los Molinos, la erosión fue $50\text{-}200 \text{ ton/ha}^{-1}/\text{año}^{-1}$ en la zona de rompimiento de la presa (Figura 6); Las Presas, aún no eran construidas, pero hubieran tenido una alta erosión ($50\text{-}200 \text{ ton/ha}^{-1}/\text{año}^{-1}$) (Figura 7); en los depósitos de Tlalchichilpa y Huautla, la erosión fue mínima ($0\text{-}10 \text{ ton/ha}^{-1}/\text{año}^{-1}$) y baja ($10\text{-}50 \text{ ton/ha}^{-1}/\text{año}^{-1}$), respectivamente (Figuras 5 y 8).

(b) Susceptibilidad al deslizamiento de ladera

La Susceptibilidad al deslizamiento de ladera fue variable en los depósitos de jales. En los bancos fue Muy Baja y Muy Alta en los taludes de las presas



Figuras 4. Imágenes de los jales. A) Los Molinos; B) Las Presas; C) Tlalchichilpa; D) Huautla. Delimitación de los depósitos de jales (línea amarilla); cauces (línea azul). Nota: la carta de INEGI está desfazada del cauce en la imagen. Fuentes: QGIS (2021). Escena de Mapa satelital; SIATL (2023). Región hidrológica RH18fa.

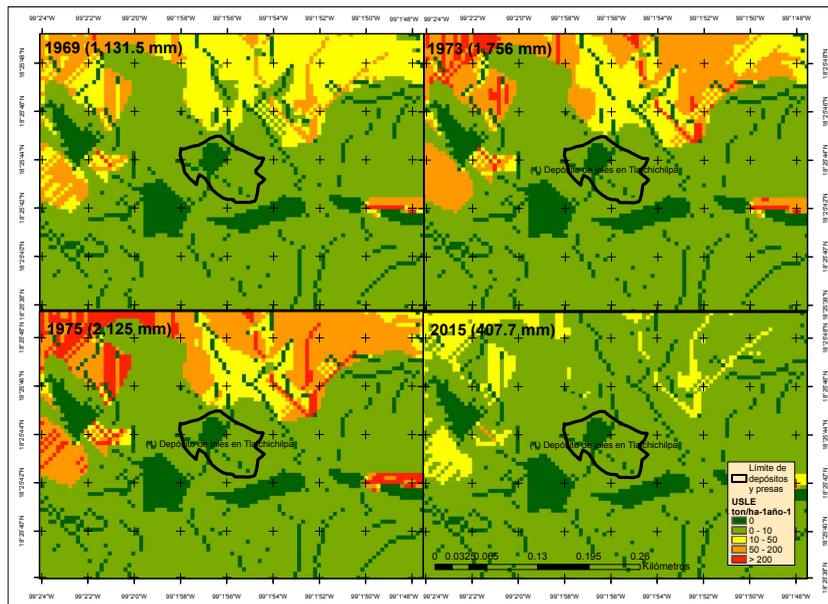


Figura 5. Estimación de la erosión de suelo de los jales basándose en el modelo USLE en el depósito de jales Tlalchichilpa. Este depósito es el más antiguo y no presentó cambios en los distintos años. En este caso, la erosión se mantuvo entre 0-10 ton/ha⁻¹/año⁻¹ y fue 0 ton/ha⁻¹/año⁻¹ en la parte central del depósito.

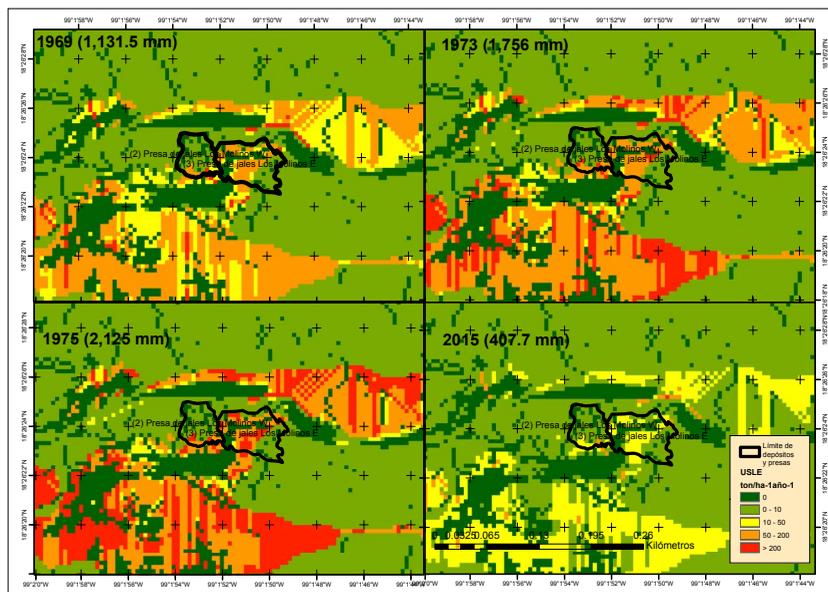


Figura 6. Estimación de la erosión de suelo basándose en el modelo USLE en las presas de jales Los Molinos (E y W). Obsérvese que, en 1975, año con mayor precipitación, la erosión se intensificó en la presa oeste (W) siendo > 200 ton/ha⁻¹/año⁻¹ en distintas porciones del jal. En los años 1973 y 1969 descendió la erosión a 50-200 ton/ha⁻¹/año⁻¹ en la mayor parte de los jales. En el año más seco (2015) la erosión tuvo un valor muy bajo (10-50 ton/ha⁻¹/año⁻¹) en la mayor parte del jal.

de jales Los Molinos y Las Presas (Figura 10). En Tlalchichilpa, la Susceptibilidad fue Muy Alta y Alta en la porción sur del depósito, Media, Baja y Nula en la parte norte. Huautla presentó susceptibilidad Media en casi todo el depósito y Baja en la parte central.

(c) Reconocimiento de la zona

En 1970 se comprueba un deslizamiento de ladera y dispersión por el arroyo (Figura 11a-d). Los materiales llegaron hasta el Arroyo Grande demostrando el movimiento en masa de los materiales. La imagen muestra el arrastre de los materiales sobre el arroyo hasta llegar el Arroyo Grande cambiando la tonalidad.

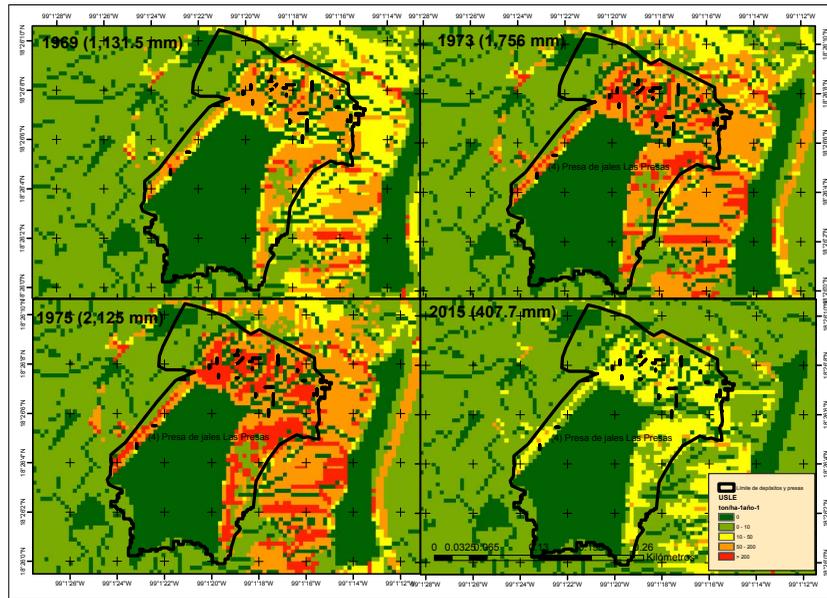


Figura 7. Estimación de la erosión de suelo de los jales basándose en el modelo USLE en la presa de jales Las Presas. En esta presa la erosión se concentra todo el tiempo en los taludes de la presa. En 1975 tuvo la mayor precipitación y la erosión sería >200 toneladas/ha-año-1, conforme descendiende la precipitación en 1973 y 1969, también la erosión disminuiría en casi todo el talud a 50-200 toneladas/ha-año-1. En 2015, el año más seco, la erosión máxima fue 10-50 ton/ha-1/año-1.

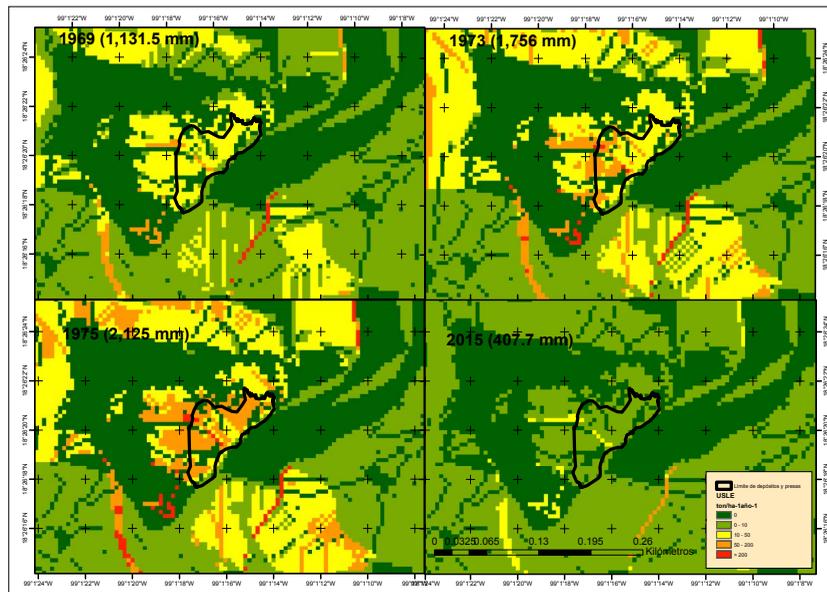


Figura 8. Estimación de la erosión de suelo de los jales basándose en el modelo USLE en el depósito de jales Huautla. En este jal la erosión descendió en los años, 1975 > 1973 > 1969 > 2015, conforme disminuyó la precipitación. La mayor erosión fue de 50-200 ton/ha-año-1 en casi todo el depósito en el año con mayor precipitación (1975) y la menor 0-10 ton/ha-año-1 en casi todo el jal en el año más seco (2015).

El análisis de las imágenes fotográficas muestra que los jales y las áreas de depósito de materiales erosionados de ellos son aledaños a los cauces (Figura 4a-d). El rompimiento fue provocado por un mal fraguado, posiblemente ocasionado por un año lluvioso. El trayecto de las escorrentías naturales cruza o es adyacente a los depósitos de jales en laderas que alimentan los jales hacia el Arroyo

Grande. Por ello, los materiales se arrastraron directamente a los cauces (Figura 11).

(d) Cuantificación de metales pesados en los depósitos de jales y en zonas de inundación del Arroyo Grande

En algunos sitios, los metales pesados presentaron valores por encima del Límite Máximo Permissible



Figura 9. Vistas oblicuas de dos presas de jales. A) Las Presas; B) Los Molinos. Los bancos son zonas superficiales y planas (flecha amarilla), el talud presenta pendientes en las presas de jales (flecha roja). Fotos: R. Márquez-Huitzil (2022, 2017).

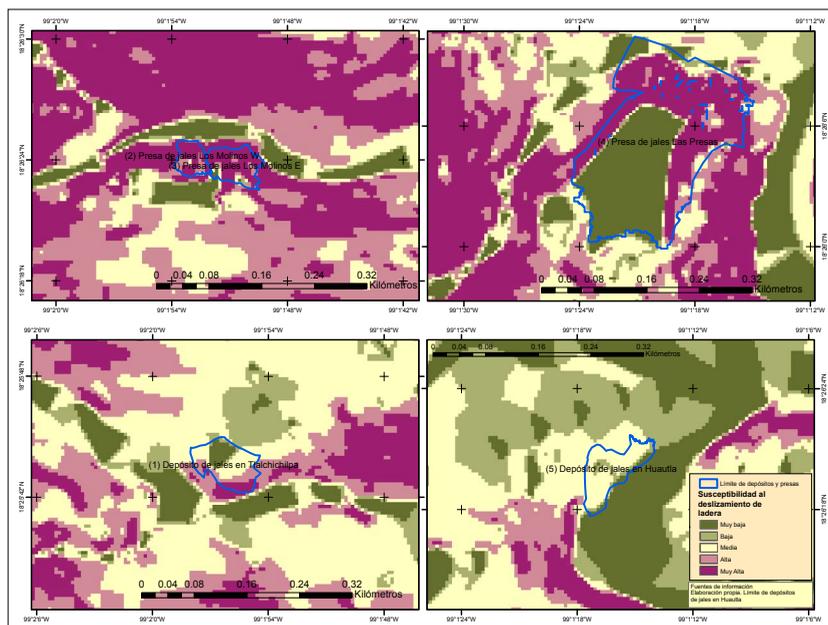


Figura 10. Susceptibilidad al deslizamiento de ladera en los cuatro depósitos de jales basándose en el método de Mora-Vahrson (Mora *et al.*, 1992). Obsérvese que en (a) Los Molinos casi toda la superficie presentó Muy Alta susceptibilidad; (b) Las Presas tuvo susceptibilidad Muy Alta en los taludes y Muy Baja en el banco; (c) Tlalchichilpa presentó susceptibilidad Muy Alta en la porción sur del depósito; (d) Huautla tuvo susceptibilidad Media en casi todo el depósito y Baja en su porción central.

(LMP): a) el zinc se presentó por arriba del LMP a diferentes profundidades en los depósitos de jales y ligeramente por arriba en las zonas de depósito del Arroyo Grande 4 y 6 (zonas de inundación) (Figura 12 y 13a); b) el cadmio se encontró por arriba del LMP en las zonas de depósito del Arroyo Grande 1 a 3 en el meandro (Figuras 12 y 13b); c)

el plomo se presentó por arriba del LMP en todos los depósitos de jales y en el cauce de Las Presas (Figuras 12 y 13c); d) el cobre presentó un comportamiento similar al plomo, pero también en las zonas de depósito del río 4 y 5 (Figuras 12 y 13d); e) el mercurio solamente se encontró por arriba del LMP en los depósitos de Tlalchichilpa y Huautla

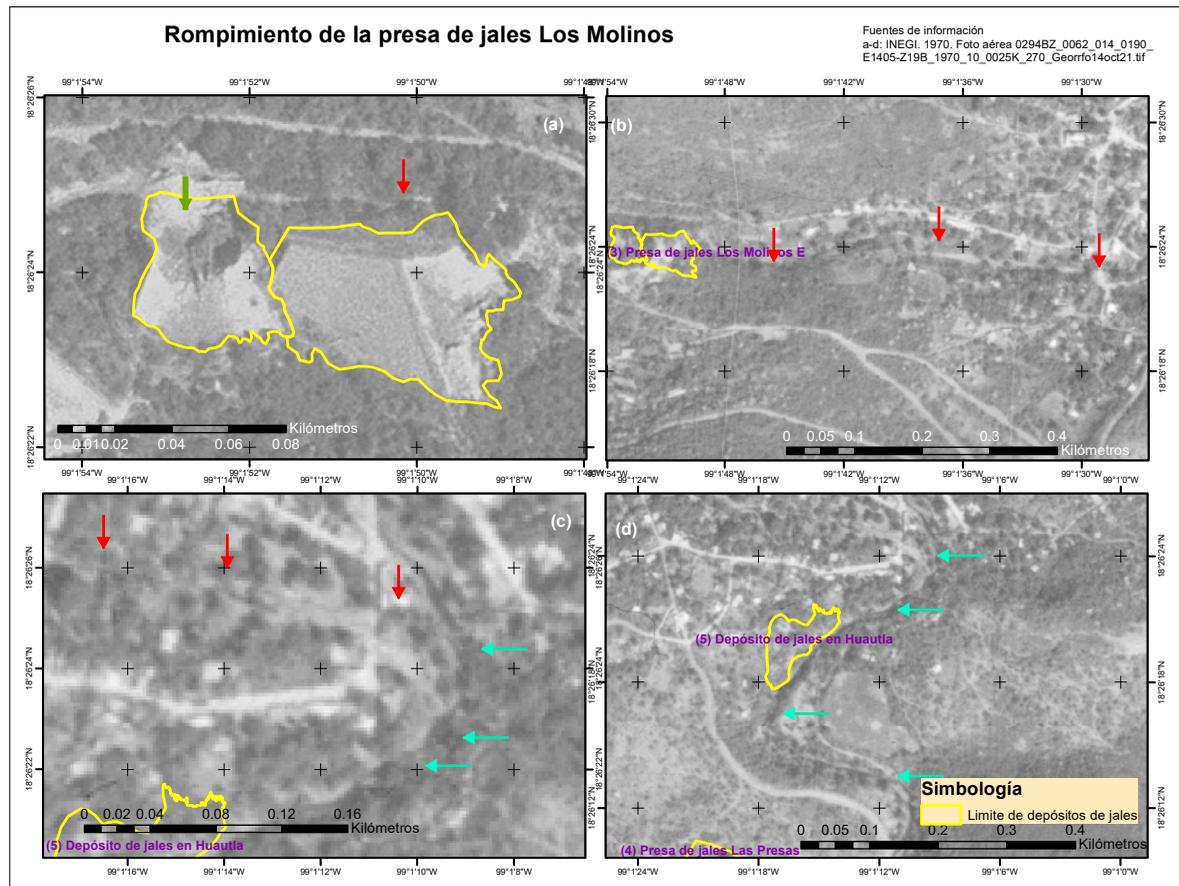


Figura 11. Rompimiento de la presa de jales en Los Molinos. (a) Rompimiento de la presa en colores claros (flecha verde); (a-c) materiales dispersos sobre el arroyo de color claro (flechas rojas); (c-d) Llegada hasta el Arroyo Grande en color obscuro (flechas cian). Foto aérea: INEGI (1970).

(Figuras 12 y 13e); f) el arsénico se presentó por arriba del LMP en todos los depósitos de jales y en la zona de depósito 4 a 6 (zona de inundación) (Figuras 12 y 13f).

DISCUSIÓN

En México, como en el mundo, la presencia de jales o relaves mineros representa un riesgo creciente para el ambiente y la sociedad. Uno de los factores que influye en la composición química de los relaves se relaciona con el grado de erosión durante el almacenamiento en la presa de jales (Kossoff *et al.*, 2014). Desde el inicio del siglo XX, la frecuencia de

falla en las presas de jales fue creciente en México y el mundo (Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach, 2006; Lin *et al.*, 2022). Por tanto, el conocimiento de los factores vinculados a la dinámica de los depósitos de jales resulta de gran importancia para el diseño de estrategias de contención.

(a) Erosión

En todos los sitios donde se depositaron los jales se combinan con los factores físicos que propician su desplazamiento. La morfología de las presas y la falta de cubierta vegetal contribuyen a las altas tasas de erosión en estos sitios. En los bancos con una pendiente ligera ($< 4^\circ$) la erosión es cercana a 0, mientras que en los taludes inclinados ($> 25^\circ$) y

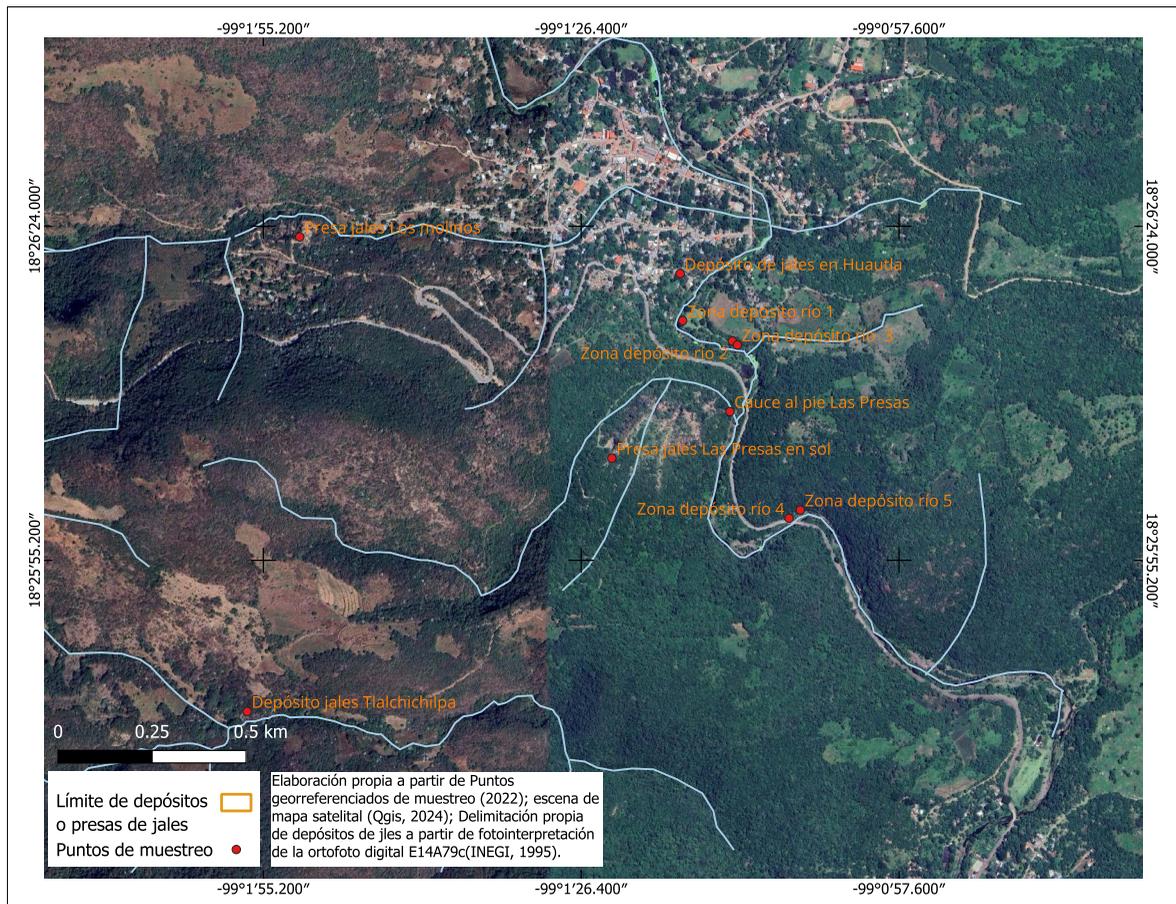
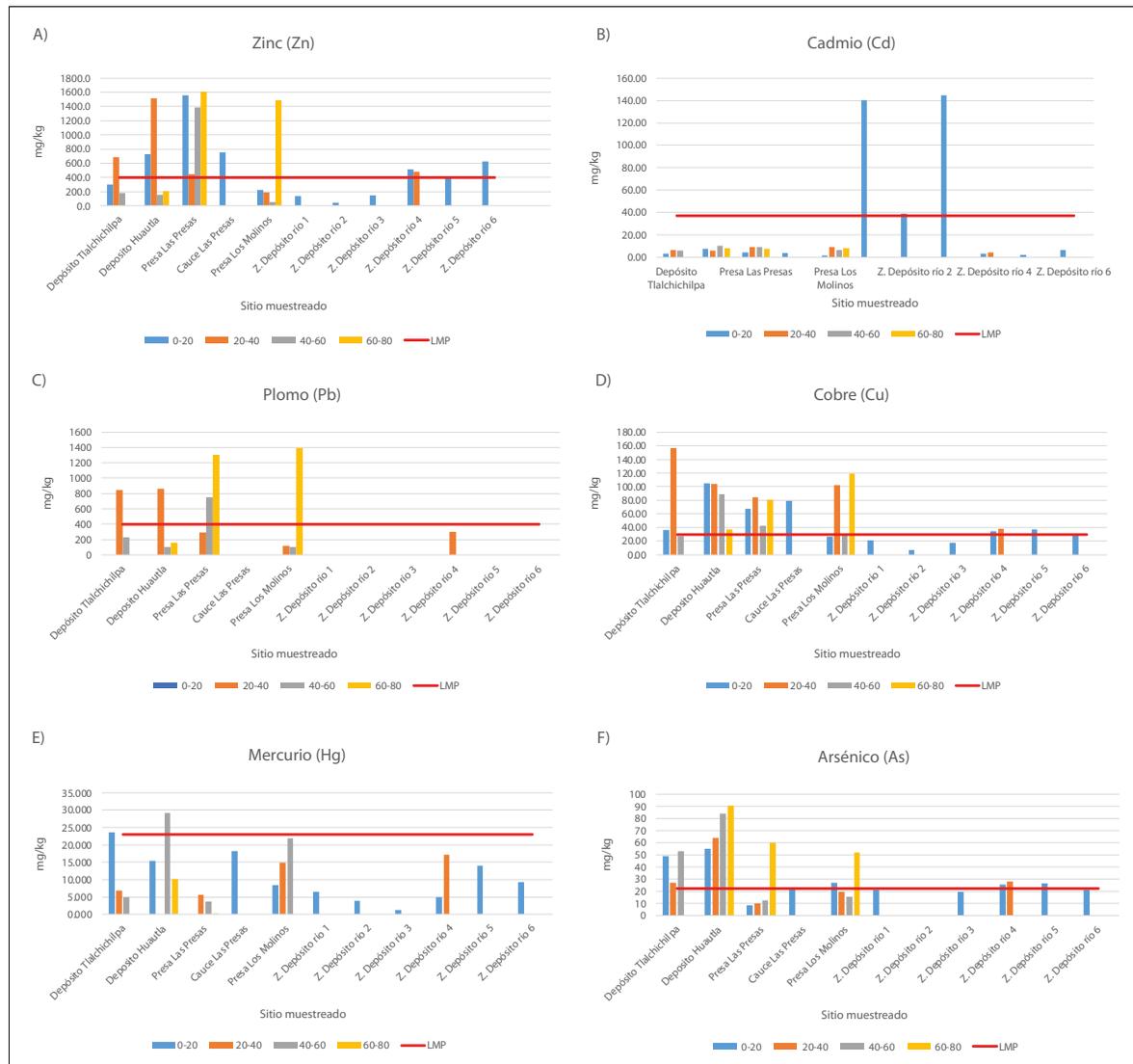


Figura 12. Zonas de depósito en el Arroyo Grande (color magenta) en Las Presas y el depósito de Huautla (color naranja). Las zonas de depósito 1, 2 y 3 corresponden a la zona de depósito de los meandros y, la 4 y 5 corresponden a la zona de inundación del Arroyo Grande. Obsérvese que todos los depósitos de jales tienen un cauce aledaño perenne o estacional que converge al Arroyo Grande, donde se encuentran las zonas de depósito muestreadas

de gran longitud ($> 15\text{m}$) con vegetación muy dispersa propiciando una erosión $> 200\text{ ton/ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ (Márquez *et al.*, 2022). Esto provocó que la erosión se concentrara en los taludes de las presas de jales. La mayor erosión fue en los depósitos de Huautla relacionado con una pendiente de $4\text{-}15^\circ$ en diversos puntos del depósito Huautla, además de la pendiente del propio sitio ($> 20^\circ$), pero que presentan $< 2\text{m}$ de altura en algunos puntos y escasos árboles dispersos sin arbustos ni hierbas con asentamientos humanos cercanos donde se cría ganado porcino que pastoreo libremente en el sitio; mientras que, en Tlalchichilpa, la pendiente es ligera (4 y 10°) con una cubierta vegetal casi total de árboles, arbustos y

hierbas. lo que favorecen influyen directamente en que la erosión sea prácticamente nula en este sitio. La morfología de los depósitos y presas de jales, la cobertura vegetal, el tiempo de abandono, la morfología del sitio de depósito, el escurrimiento y las actividades antropogénicas influyen claramente en la erosión.

En otros estudios sobre jales se han calculado cantidades máximas de erosión, similares a las encontradas en este trabajo ($> 200\text{ ton/ha-1año-1}$). En zonas semiáridas del noroeste de México se calculó la erosión en tres jales: en uno se calcularon $346 \pm 9\text{ ton/ha}^{-1}\text{año}^{-1}$; en otro, $493\text{ ton/ha}^{-1}\text{año}^{-1}$; $232\text{ ton/ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ para otro jal (Peña-Ortega *et*



Figuras 13a-f. Concentraciones de metales pesados (mg/kg) en las muestras de los depósitos de jales a distintas profundidades. Obsérvese que los metales pesados presentan un comportamiento distinto respecto al LMP en los depósitos de jales y en las zonas de depósito del Arroyo Grande.

al., 2019). Al sureste de España, en San Cristóbal-Perules se calcularon $150 \text{ ton/ha}^{-1}\text{año}^{-1}$, valores que están de acuerdo con los calculados para otras áreas mineras (Martín *et al.*, 2015). La erosión es uno de los principales problemas que se presentan en los depósitos de jales (Amponsah-Dacosta, 2015).

(b) Susceptibilidad al deslizamiento de ladera
La antigüedad de los depósitos y las presas de jales influye en las diferencias en susceptibilidad al deslizamiento de ladera. Los depósitos de jales sin contención, entre 100 años para Huautla y 300 años para Tlalchichilpa, pueden corresponder a los últimos vestigios de presas de jales. Estos depósitos

podieron haber sido construidos con los mismos criterios que las presas de jales actuales, pero con el paso del tiempo pudieron haber sufrido procesos de erosión y movimientos en masa como las presas actuales, siendo arrastrados los materiales directamente hacia los cauces de los ríos aledaños en lluvias. Existe multitud de presas hidráulicas en el mundo conocidas como “presas de terraplén”, es decir, fabricadas con materiales sueltos que pueden ser finos, como las presas en Huautla, a muy gruesos (escollera) (Direction Sites et Territoires, 2022). Los jales se manejan inicialmente como lodos que, al secarse se vuelven sumamente sólidos y con ellos construyen las presas. Sin embargo, el intemperismo por el agua la inclinación de los taludes, los terremotos y el sobrellenado provocan la degradación de las presas (Rivera, 2009), como demostraron las grandes cárcavas, exhumación de raíces y tubificación en las presas de jales de Los Molinos y de Las Presas. Como mostró este estudio, las presas de jales pierden decenas a cientos de toneladas de jales en años lluviosos que, mediante movimientos en masa y erosión, en cientos de años estos desplazamientos pudieron producir los pequeños depósitos de jales encontrados.

Considerando la erosión y la susceptibilidad al deslizamiento de ladera, tanto la morfología y estructura de los jales, como las características del medio físico en el que se depositan y la vegetación que se establece sobre los jales influyen en estos aspectos. Al parecer la pendiente, la estructura de la presa de jales y la del terreno son los factores que intervienen tanto en la erosión como en la susceptibilidad al deslizamiento de ladera.

(c) Reconocimiento de la zona

En Huautla, las presas de jales y los depósitos sin confinamiento fueron depositados en barrancas sobre laderas con pendientes pronunciadas. Los jales depositados en estos sitios interrumpen la escorrentía, aumentando considerablemente la erosión, la susceptibilidad al deslizamiento de ladera, así como el lixiviado de las sustancias tóxicas contenidas en estos (Hungu et al., 2013; Iverson et al., 2015; Bao et al., 2019; Peña-Ortega et al., 2019; Copaja y Muñoz, 2022). Las presas de jales de Huautla presentaban una estructura con taludes

de pendientes pronunciadas y de gran longitud confinando los jales y soportando el banco. Estos interactúan con las características físicas de los sitios donde se depositaron, aumentando su susceptibilidad al deslizamiento de ladera (Valentin et al., 2005; Garduño, 2013). En los últimos años, la mayoría de las fallas en presas o en depósitos de jales se ha incrementado por las intensas lluvias o terremotos (Lin et al., 2022). Las presas de jales en Huautla están muy deterioradas, ya que fueron construidas con los mismos jales y a que la textura de los jales cambió de un contenido de arenas de 20-45% de arenas y 27-49 % de arcillas (Velasco et al., 2004) a 60.4-92.4 % de arenas y 1.24-15.24% de arcillas en 2023. La pérdida de las partículas de tamaño arcillas, en los primeros años de erosión. Esas partículas permitían la cohesión de los agregados, favoreciendo la erosión e inestabilidad de los jales (Martín-Crespo et al., 2020) La Muy Alta susceptibilidad al deslizamiento de ladera en los taludes de las presas y la erosión subterránea incrementan el riesgo de movimientos en masa. Una evidencia de la intensa erosión y susceptibilidad de las presas y los depósitos de jales fue el rompimiento de una presa de jales en Los Molinos (Márquez et al., 2022).

(d) Cuantificación de metales pesados en los depósitos de jales y en zonas de inundación del Arroyo Grande

La concentración de metales pesados en los jales y zonas de inundación se relaciona con las propiedades del metal y su dinámica en el ambiente (Wang et al., 2019). La composición química de los relaves depende de la mineralogía del yacimiento, la naturaleza de los fluidos de procesamiento utilizados para extraer los metales, la eficiencia del proceso de extracción y el grado de erosión durante el almacenamiento en el embalse represado (Direction Sites et Territoires, 2022). El zinc presentó mayor estabilidad en los jales con valores por arriba del LMP, una pequeña porción pudo lixiviarse hacia dos zonas de inundación, representando un riesgo sobre todo para los niños (Barcelos et al., 2020). Las diferencias en la concentración de cadmio por arriba del LMP en las zonas de inundación del Arroyo Grande podría explicarse por una mayor profundidad de

materiales y sedimentos acumulados en esas zonas podrían provenir de procesos de removilización en el río (Ciszewski y Grygar, 2016), l y podrían provenir de las minas que se encuentran aguas arriba en el Arroyo Grande (Márquez, 2022). Los valores del arsénico por arriba del LMP en los depósitos y presas de jales indican una relativa estabilidad de este metaloide en esos sitios, mientras que, en las zonas de inundación presentaron valores ligeramente arriba del LMP, indicando una relativa estabilidad de este metaloide en los jales, movilizándose un pequeño porcentaje hacia las zonas de inundación del Arroyo Grande. La concentración del mercurio por arriba de los LMP en los depósitos de jales de Huautla y Tlalchichilpa podría provenir de su uso histórico para el beneficio de algunos minerales ya que esos depósitos de jales tienen más de 100 años (Valle, 1991; Sánchez, 2002).

Los metales pesados como zinc, plomo, cobre, cadmio y arsénico con mayor concentración en los jales y zonas de depósito indican una alta persistencia después de más de tres décadas de haber finalizado la actividad minera y, en los depósitos de jales, más de 100 años de abandono. En zonas de depósito del río, los metales indican que se lixivian, transportan y acumulan diferencialmente en las zonas de inundación del Arroyo Grande.

El medio físico interactúa con los depósitos y las presas de jales provocando su erosión y el lixiviado de las sustancias tóxicas que contienen. Algunos estudios han mencionado los riesgos en cuanto a la estabilidad de los jales y su toxicidad (Martín *et al.*, 2015). Los jales erosionados también pueden afectar a las represas construidas a lo largo del río al azolarlas con mayor rapidez (Rivera, 2009; Bao *et al.*, 2019). En los ríos, el movimiento de los materiales y de sustancias tóxicas pueden modificar la morfología de los cauces y la profundidad y, provocar el desbordamiento del río en época de lluvias, así como el depósito de contaminantes en su vecindad (Sánchez *et al.*, 2022).

CONCLUSIONES

La erosión y la Susceptibilidad al deslizamiento de ladera de los depósitos de jales se relaciona estrecha-

mente con las características de los jales y de la zona en Huautla, Morelos. La morfología de las presas de jales provoca que la mayor erosión se presente en las presas de jales y en el depósito Huautla. El depósito de Tlalchichilpa tiene una erosión mínima que puede relacionarse con su tamaño pequeño y un alto recubrimiento vegetal en casi todo el jal.

Los factores con mayor peso en la susceptibilidad al deslizamiento de ladera son la morfología y la vegetación. La Muy Alta susceptibilidad al deslizamiento en los taludes y Muy Baja en los bancos de las presas de jales prueba su relación con la morfología. En los depósitos sin confinamiento la susceptibilidad es Media a Muy Baja porque son viejos remanentes de jales mayores a 100 años. Los depósitos sin confinamiento pueden ser remanentes de depósitos mucho mayores erosionados por más de un siglo.

El contenido de metales pesados por arriba del límite máximo permisible muestra su persistencia en los depósitos de jales y su movilidad hacia las zonas de inundación en los ríos. Los metales Zn, Cd, Pb, Cu, Hg y As presentan alta persistencia en los jales a diferentes profundidades. Mientras que, el Zn, Pb, Cu, Hg y As se movilizan y acumulan en cantidades ligeramente por arriba del límite máximo permisible en las zonas de inundación. En conjunto, los resultados de este estudio resaltan la importancia de proponer e implementar estrategias de rehabilitación y remediación de los depósitos de jales y compensar la pérdida del ecosistema provocada por su depósito.

AGRADECIMIENTOS

RMH agradece al CONACyT por la beca de doctorado número 778992. Por el apoyo al proyecto de Ciencia de Frontera 191975 del Consejo Nacional de Ciencias Humanidades y Tecnología para realizar los análisis de metales pesados en muestras de suelo. A las biólogas Karina Matías Ocampo e Ilna Villarreal Carrión por su apoyo en la toma de muestras en campo. A la Dra. Jaqueline García Hernández y a la Técnica Daniela Aguilera Márquez del Laboratorio de Ciencias Ambientales del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, Unidad Guaymas, Sonora, por realizar los análisis

de suelos. Al Doctorado en Ciencias Naturales de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM) y a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por facilitar gran parte de la literatura para este trabajo.

REFERENCIAS

- Aguirre-Salado, C. A., Miranda-Aragón, L., Pompa-García, M., Reyes-Hernández, H., Soubervielle-Montalvo, C., Flores-Cano, J. A. y Méndez-Cortés, H. (2017). Improving Identification of Areas for Ecological Restoration for Conservation by Integrating USLE and MCDA in a GIS-Environment: A Pilot Study in a Priority Region Northern Mexico. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(262), 1-17. <https://doi.org/10.3390/ijgi6090262>
- Amponsah-Dacosta, F. (2015). A Field-Scale Performance Evaluation of Erosion Control Measures for Slopes of Mine Tailings Dams. 10th ICAARDIMWA2015. *10th International Conference on Acid Rock Drainage & IMWA Annual Conference*. http://www.imwa.de/docs/imwa_2015/IMWA2015_Dacosta_262.pdf
- Arango Aramburo, M. y Olaya, Y. (2012). Problemática de los pasivos ambientales. *Gestión y Ambiente*, 15(3), 125-133. <https://www.redalyc.org/pdf/1694/169424893009.pdf>
- Bao, Y., Sun, X., Chen, J., Zhang, W., Han, X. y Zhan, J. (2019). Stability assessment and dynamic analysis of a large iron mine waste dump in Panzhihua, Sichuan, China. *Environmental Earth Sciences*, 78(48), 17. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8043-4>
- Barats, A., Renac, C., Orani, A.M., Durrieu, G., Saint Martin, H., Esteller, M.V. y Garrido Hoyos, S.E. (2020). Tracing source and mobility of arsenic and trace elements in a hydrosystem impacted by past mining activities (Morelos state, Mexico). *Science of The Total Environment*, (712), 135565. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135565>
- Barcelos, D.A., Pontes, F.V.M., da Silva, F.A.N.G., Castro, D.C., dos Anjos, N.O.A. y Castilhos, Z. C. (2020). Gold mining tailing: Environmental availability of metals and human health risk assessment. *Journal of Hazardous Materials*, (397), 122721. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122721>
- Barrantes Castillo, G., Barrantes Sotela, O. y Núñez Roman, O. 2011. Efectividad de la metodología Mora-Vahrson modificada en el caso de los deslizamientos provocados por el terremoto de Cinchona, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 2(47), 141-162. <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/3970>
- Castro Quintero, A.F, L. A. Lince Salazar y O. Riaño Melo. (2017). Determinación del riesgo a la erosión potencial hídrica en la zona cafetera del Quindío, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(1), 17-26. <https://doi.org/10.22490/21456453.1828>
- Ciszewski, D. y Grygar, T. M. (2016). A Review of Flood-Related Storage and Remobilization of Heavy Metal Pollutants in River Systems. *Water, Air & Soil Pollution*, 227(239). <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-016-2934-8>
- CONAGUA. (2017). *Red de estaciones climatológicas*. Estación Huautla, Morelos, México: Servicio Meteorológico Nacional. Comisión Nacional del Agua. México. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacionclimatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Copaja, S.V. y Muñoz, F. (2022). Ecological risk assessment of trace elements in the tailings from Andacollo City, Northern Chile. *Journal of Chilean Chemistry Society*, 67(4), 5674-5681. <https://jccchems.com/index.php/JCCHEMS/article/view/2128>
- Direction Sites et Territoires. 2022. Mine tailings dam failures: review and assessment of the phenomenon. Christian, F. (Editor). French National Institute for Industrial Environment and Risks, Verneuil-en-Halatte: Ineris – 204910 - v1.0, 25/01/2022. <https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/Ineris-204910-2727405-mine%20tailings%20dam%20failures.pdf>
- ELAW. (2010). Guía Para Evaluar EIA's de Proyectos Mineros. Alianza Mundial de Derecho Ambiental (ELAW), Eugene Oregon, EUA. <https://elaw.org/es/resource/guidebook-evaluating-mining-project-eias>
- Esteller, M. V., Domínguez-Mariani, E., Garrido, S. E. y Avilés, M. (2015). Groundwater pollution by arsenic and other toxic elements in an abandoned silver mine, Mexico. *Environmental Earth Science*, 74(4), 2893-2906. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4315-9>
- Esteves Aguilar, J. (2018). Evaluación del daño genético y la inestabilidad en el desarrollo del cráneo en la especie centinela *Peromyscus melanophrys* que habita en zonas mineras. [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma del Estado de Morelos]. <http://riaa.uaem.mx/xmlui/handle/20.500.12055/564>
- FAO. (2019). *Soil erosion: the greatest challenge to sustainable soil management*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma, Italia. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/a268e967-a373-4a56-adac-ae1d7ab3567f/content>
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Quinta edición. Comisión Nacional para el Estudio de la Biodiversidad.

- <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/83/82/251-1>
- García-Rodríguez, M. (2015). Erosión y exhumación de bloques graníticos en La Pedriza del Manzanares (España). Evolución histórica a partir de dataciones relativas. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 32(3), 492-500. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1026-87742015000300492&script=sci_abstract
- Garduño Sanabria, A. E. (2013). Susceptibilidad ante los movimientos de ladera en el pueblo Santa Cruz Ayotuxco, Municipio de Huixquilucan, Estado de México. [Tesis de Licenciatura en Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México]. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/21778>
- Google Earth. (2024). Google Earth versión 9.176.0.1. Mountain View, USA. Recuperado el 15 de enero de 2024 de <https://earth.google.com/web/search/Huautla,+Morelos,+Morelos/@18.43600193,-99.02224671,973.35284868a,494.2521082d,35y,-90.02465741h,44.98902875t,-0r/data=CigiJgokCVsjHFYtozNAEVYjHFYtozPAGctrLb9amjJAIXHwDjsDjl-TA>
- Griffin M.L., Beasley, D. B., Fletcher, J. J. y Foster, G. R. 1988. Estimating soil loss on topographically non-uniform field and farm units. *Journal of Soil and Water Conservation* (43), 326-331. <https://www.jswconline.org/content/43/4/326>
- Hrabalíková, M. y Janeček, M. 2017. Comparison of Different Approaches to LS Factor Calculations Based on a Measured Soil Loss under Simulated Rainfall. *Soil & Water Research*, 12(2), 69-77. DOI: 10.17221/222/2015-SWR
- Hung, O., Leroueil, S. y Picarelli, L. (2013). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, (11), 167-194. DOI: 10.1007/s10346-013-0436-y
- INEGI. (1970). Fotografía aérea 014_0190 de la línea de vuelo 62. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI. (1995). Ortofoto E14A79C. Fotografías aéreas, 1:75 000. Recuperado en <https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/ortoimagenes/#Descargas>
- INEGI. (2015). Conjunto de datos vectoriales de información topográfica E14A79 Tilzapotla, Serie IV, 1:50 000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Recuperado en <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/>
- INEGI. (2021). Carta de Uso del suelo y vegetación. Serie VII. Escala 1:250,000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México. Recuperado en <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/>
- Islas Vargas, M. 2013. Extractivismo de enclave y minería a cielo abierto: impactos y consecuencias socio-ambientales. [Tesis de Licenciatura en Sociología, Universidad Nacional Autónoma de México]. https://repositorio.unam.mx/contenidos/extractivismo-de-enclave-y-mineria-a-cielo-abierto-impactos-y-consecuencias-socio-ambientales-139652?c=pjKXnn&d=false&q=*&i=1&v=0&t=search_0&cas=0
- Iverson, R. M., George, D. L. y Allstadt, K. (2015). Landslide mobility and hazards: implications of the 2014 Oso disaster. *Earth and Planet Science Letters*, 412(15), 197-208. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2014.12.020>
- Juárez Mondragón, A. (2017). Prácticas de aprovechamiento en Unidades de Manejo para la Conservación de la Vida Silvestre (UMA) del sur de Morelos. [Tesis de Doctorado en Ciencias de la Producción y de la Salud Animal, Universidad Nacional Autónoma de México]. 348 p. <https://libros.crim.unam.mx/index.php/lc/catalog/book/36>
- Kossoff, D., Dubbin, W. E., Alfredsson, M., Edwards, S. J., Macklin, M. G. y Hudson-Edwards, K. A. (2014). Mine tailings dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*, (51), 229-245. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.09.010>
- Le Pan, N. (2021, 15 de mayo). Visualizing the size of the world's mine tailings. Elements Newsletter. <https://elements.visualcapitalist.com/visualizing-the-size-of-mine-tailings/>
- Lin, L., Lin, Q. y Wang, Y. (2017). Landslide susceptibility mapping on a global scale using the method of logistic regression. *Natural Hazards Earth System Science*, (17), 1411-1424. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-1411-2017>
- Lin, S.-Q., Wang, G.-J., Liu, W.-L., Zhao, B., Shen, Y.-M., Wang, M.-L. y Li, X.-S. (2022). Regional Distribution and Causes of Global Mine Tailings Dam Failures. *Metals*, 12(6), 905. <https://doi.org/10.3390/met12060905>
- Loredo-Osti, C., Beltrán López, S., Moreno Sánchez, F. y Casiano Domínguez, M. (2007). *Riesgo a la Erosión Hídrica y Proyección de acciones de manejo y conservación del suelo en 32 microcuencas de San Luis Potosí*. Libro Técnico 3. INIFAP-CIRNE-Campo Experimental San Luis. San Luis Potosí, México. <https://www.iec.cat/mapasols/DocuInteres/PDF/Llibre31.pdf>
- Macklin, M. G., Thomas, C. J., Mudbhathkal, A., Brewer, P. A., Hudson-Edwards, K. A., Lewin, J., Scussolini, P., Eilander, D., Lechner, A., Owen, J., Bird, G., Kemp, D. y Mangalaa, K. R. (2023). Impacts of metal mining on river systems: a global assessment. *Science*, 381(6664), 1345-1350. <https://doi.org/10.1126/science.adg6704>
- Madebwe, V., Munodawafa, A., Mugabe, F. y Madebwe, C. (2015). Predicting toxic heavy metal movements

- in upper sanyati catchment in the midlands province in Zimbabwe. *Ethiopian Journal of Environmental Studies & Management*, 8(5), 556-569. DOI: [10.4314/ejasm.v8i5.9](https://doi.org/10.4314/ejasm.v8i5.9)
- Márquez Huitzil, R., Martínez-Garza, C., Hinojosa-Espinoza, S. I. y Sorani, V. (2022). Identificación de minas y jales en Huautla, Morelos, México. *Investigaciones Geográficas*, (109), 1-23. <https://doi.org/10.14350/ig.60633>
- Martín Duque, J.F., Zapico, I., Oyarzun, R., López García, J.A. y Cubas, P. (2015). A descriptive and quantitative approach regarding erosion and development of landforms on abandoned mine tailings: New insights and environmental implications from SE Spain. *Geomorphology*, (239), 1-16. https://digital.csic.es/bitstream/10261/113396/1/G_2015_239_1_pp.pdf
- Martín-Crespo, T., Gómez-Ortiz, D., Martín-Velázquez, S., Martínez-Pagán, P., de Ignacio-San José, C., Lillo, J., y Faz, A. (2020). Abandoned Mine Tailings Affecting Riverbed Sediments in the Cartagena-La Union District, Mediterranean Coastal Area (Spain). *Remote Sensing*, (12), 2042. DOI:10.3390/rs12122042. <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/12/2042>
- Montes-León, M.A.L., Uribe-Alcántara, E.M. y García-Celis, E. (2011). Mapa Nacional de Erosión Potencial. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2(1), 5-17. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v2n1/v2n1a1.pdf>
- Moore, I.D. y Wilson, J.P. 1992. Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation. *Journal of Soil and Water Conservation*, (47), 423-428. Recuperado: <https://www.jswconline.org/content/47/5/423>
- Mora, R., Vahrson, W. y Mora, S. (1992). Mapa de Amenaza de Deslizamientos, Valle Central, Costa Rica. Ciudad de Guatemala, Guatemala: CEPREDENAC.
- Mora, R., Chaves, J. y Vázquez, M. (2002). Zonificación de la Susceptibilidad al deslizamiento: Resultados obtenidos para la Península de Papagayo mediante la modificación del método Mora-Vahrson (Mora, R. et al., 1992). *III Curso Internacional sobre Microzonificación y su aplicación en la mitigación de desastres*, 38-43. <https://www.eird.org/deslizamientos/pdf/spal/doc15359/doc15359-a.pdf>
- Morales Ascarrunz, M. C. (2014). *Estimación de la erosión laminar y sedimentación con modelos hidrológicos para la selección de prácticas de conservación de suelos y cambios de cobertura en la Unidad Hidrográfica de Aquin/Saint-Louis Du Sud- Haití*. [Tesis de Magister Scientiae en Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza]. Repositorio Institucional - Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Morgan, R. P. C. (2005). *Soil Erosion and Conservation*. Blackwell Publishing. 3a Ed. Massachusetts, EUA. <https://es.everand.com/book/144404237/Soil-Erosion-and-Conservation>
- Musali Galante, P. (2008). Estudio sobre la inducción de daño al ADN en sangre periférica de individuos expuestos a metales en el agua de bebida en la población de Huautla, Morelos [Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Institucional- Universidad Nacional Autónoma de México.
- Oyarzun, R., Higuera, P. y Lillo, J. (2011). *Minería Ambiental. Una introducción a los Impactos y su Remediación*. Ediciones GEMM.
- Paz Tenorio, J. A., González Herrera, R., Gómez Ramírez, M. y Velasco Herrera, J. A. (2017). Metodología para elaborar mapas de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, análisis del caso ladera sur de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Investigaciones Geográficas*, (92), 1-16. <https://doi.org/10.14350/ig.52822>
- Peña-Ortega, M., Del Rio-Salas, R., Valencia-Sauceda, J., Mendivil-Quijada, H., Minjarez-Osorio, C., Molina-Freaner, F., De la O-Villanueva, M. y Moreno-Rodríguez, V. 2019. Environmental assessment and historic erosion calculation of abandoned mine tailings from a semi-arid zone of northwestern Mexico: Insights from geochemistry and unmanned aerial vehicles. *Environmental Science and Pollution Research*, (26), 26203-26215. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05849-w>
- POEREM. (2014). Sistema Estatal de Información Ambiental y de Recursos Naturales. Documentación Ordenamiento Ecológico. Programa de Ordenamiento Ecológico regional del estado de Morelos. Curvas de nivel (altimetría) 5 m (Esc. 1:5000). Tlaquitenango. http://obum.zmcuernavaca.morelos.gob.mx/metadatos/morelos/POEREM/Metadatos_Morelos_OET.htm
- Qgis. (2021). Escena del mapa Satelital. Quick Map Services. Quantum Gis. Software libre. <https://qgis.org/es/site/>
- Ramos-Arroyo, Y. R. y Siebe-Grabach, C. D. (2006). Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 23(1), 54-74. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742006000100004
- Rana, N. M., Ghahramani, N., Evans, S. G., McDougall, S., Small, A. y Take, W. A. (2021). Catastrophic mass flows resulting from tailings impoundment failures. *Engineering Geology*, (292), 106262. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106262>
- Reyes Mariano, J. M. (2014). *Propiedades mecánicas de jales para diseño de presas* [Tesis de Maestría en Ingeniería (Geotecnia), Benemérita Universidad

- Autónoma de Puebla]. Repositorio Institucional - Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Rivera Castelo, J.A. (2009). *Diseño geotécnico para estabilización del depósito de jales mineros (Presa I), en Nacozari de García, Sonora, México* [Tesis de Maestría en Ciencias- Geología, Universidad de Sonora]. Repositorio Institucional - Universidad de Sonora.
- Sánchez Santiró, E. (2002). Plata y privilegios: el real de minas de Huautla, 1709-1821. *Estudios de Historia Novohispana*, (26), 85-123. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/31245>
- Sánchez, L. E., Barbosa, F. A. R., Brito, M. C. W., May, P., Maroun, C., Renshaw, J. y Kakabadse, Y. (2022). The environmental impacts of a major mine tailings spill on coastal and marine environments. Lessons and recommendations for ex post impact assessment. Rio Doce Panel Thematic Report NO. 5. IUCN, International Union for Conservation of Nature and Natural Resources. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2022.11.en>
- Scheffer, F. y Schachtschabelm, P. (2016). *Soil Science*. Springer-Verlag.
- Segura, G., Badilla, E. y Obando, L. 2011. Susceptibilidad al deslizamiento en el corredor Siquirres-Turrialba. *Revista Geológica de América Central*, (45), 101-121. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i45.1908>
- SEMARNAT. (2007). NORMA Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Diario Oficial de la Federación*, México. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4964569&fecha=02/03/2007#gsc.tab=0
- SIATL. (2023). Simulador de Flujos de Agua de Cuenca Hidrográficas. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/
- U.S. EPA. (1994). "Method 200.7: Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry," Revision 4.4. Cincinnati, OH, Estados Unidos de América. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/epa-200.7.pdf>
- Valentin, C., Poesen, J. y Li, Y. (2005). Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena*, (63), 132-153. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816205000883>
- Valle Mejía, C. R. M. (1991). Repercusiones en el Espacio Geográfico de la Actividad Minera en Huautla, Morelos, en el Decenio 1980-1989. [Tesis de Licenciatura en Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://ru.dgb.unam.mx/handle/20.500.14330/TES01000168332>
- Vázquez-Tarrío, D., Ruiz-Villanueva, V., Garrote, J., Benito, G., Calle, M., Lucía, A. y Díez-Herrero, A. (2024). Effects of sediment transport on flood hazards: Lessons learned and remaining challenges. *Geomorphology*, (446), 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108976>
- Velasco Trejo, J. A., de la Rosa Pérez, D. A., Solórzano Ochoa, G. y Volke Sepúlveda, T. L. (2004). Primer Informe del Proyecto: Evaluación de tecnologías de remediación para suelos contaminados con metales. Dirección General del Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental. Dirección de Investigación en Residuos y Proyectos Regionales. INE, SEMARNAT.
- Wang, P., Sun, Z., Hu, Y. y Cheng, H. (2019). Leaching of heavy metals from abandoned mine tailings brought by precipitation and the associated environmental impact. *Science of the Total Environment*, (695), 133893. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133893>