

Estudio de la erosión de sedimentos en las cabeceras de las barrancas de Amalacaxco y Alzomoni (Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl Zoquiapan, México) mediante luminiscencia ópticamente estimulada

Study of sediment erosion at the headwaters of the Amalacaxco and Alzomoni gulches (Iztaccíhuatl-Popocatepetl Zoquiapan National Park, Mexico) by means of optically stimulated luminescence

Víctor Manuel Gómez Piña^{1,2,*}, Esperanza Muñoz-Salinas^{2,3}, Miguel Castillo^{2,3}, Osvaldo Franco-Ramos⁴

¹ Posgrado en Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, CDMX, México.

² Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía (LANGEM), Instituto de Geología, UNAM, México.

³ Estación Regional del Noroeste (ERNO), Instituto de Geología, UNAM, 83250, Hermosillo, Sonora, México.

⁴ Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510, CDMX, México.

* Autor para correspondencia: (V.M. Gómez-Piña) vmgp.mg@gmail.com

Cómo citar este artículo:

Gómez Piña, V. M., Muñoz-Salinas, E., Castillo, M., Franco-Ramos, O., 2023, Estudio de la erosión de sedimentos en las cabeceras de las barrancas de Amalacaxco y Alzomoni (Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl Zoquiapan, México) mediante luminiscencia ópticamente estimulada: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 75 (1), A140922. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2023v75n1a140922>

Manuscrito recibido: 27 de Mayo de 2022
Manuscrito corregido: 27 de Julio de 2022
Manuscrito aceptado: 9 de Septiembre de 2022

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

RESUMEN

El estudio del transporte de sedimentos es importante para comprender cómo operan los procesos erosivos sobre la superficie terrestre y tratar de manejar los recursos naturales de una manera óptima. En este trabajo se estudian los mecanismos de transporte superficial de sedimentos en dos cabeceras de alta montaña que tienen características topográficas y litológicas similares y que se localizan en un ecosistema de alto valor ecológico caracterizado por el zacatonal alpino. Estas cabeceras se distinguen en que una se encuentra en estado natural, localizada en la barranca de Alzomoni y, la otra, tiene implementadas prácticas de manejo consistentes en la construcción de zanjas de infiltración y aforestación, en la barranca de Amalacaxco. Ambas cabeceras se localizan dentro del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl Zoquiapan (centro de México). En el estudio se analizaron las señales de luminiscencia con la técnica de luminiscencia ópticamente estimulada (LOE) con la finalidad de comprender el grado de erosión que existe. Se estimó la luminiscencia de los dos depósitos que conforman la superficie de las dos cabeceras y se analizaron las señales de LOE en muestras tomadas en superficie en perfiles longitudinales a lo largo de la pendiente en tres periodos distintos de un año, ello para considerar la variabilidad asociada a los cambios estacionales. Los resultados indican que la mayoría de los materiales que se movilizan ladera abajo provienen del depósito superficial. Sin embargo, durante los meses que concentran la mayor pluviosidad y radiación solar, llegan a movilizarse puntualmente los materiales subsuperficiales, de más de 80 cm de profundidad, pero solo en la barranca de Amalacaxco. Esto indica que la erosión es mayor en la barranca donde se implementaron las técnicas de manejo, lo cual contrasta con lo que se observa en la barranca en estado natural. Se concluye que las técnicas de manejo aplicadas modifican la dinámica superficial y favorecen los procesos incisivos del zacatonal alpino. El uso del método utilizado es apropiado para estudiar los procesos erosivos en zonas de alta montaña.

Palabras clave: transporte de sedimento, luminiscencia ópticamente estimulada, erosión, Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl Zoquiapan, México.

ABSTRACT

The study of sediment transport is important to understand how erosive processes operate on the earth's surface and to try to manage natural resources in an optimal way. This paper studies the mechanisms of surface transport of sediments in two high mountain headwaters that have similar topographic and lithological characteristics with an ecosystem of high ecological value characterized by the alpine grassland. These headwaters are distinguished in that one is in a natural state, located in the Alzomoni gorge, and the other has implemented management practices consisting of the construction of infiltration trenches and afforestation, in the Amalacaxco gorge. Both headwaters are located within the Iztaccíhuatl-Popocatepetl Zoquiapan National Park (central Mexico). In the study, the luminescence signals were analyzed with the optically stimulated luminescence (LOE) technique to understand the degree of erosion that exists. The luminescence of the two deposits that make up the surface of the two headwaters was estimated and the LOE signals were analyzed in samples taken on the surface in longitudinal profiles along the slope in three different periods of one year, this to consider the variability associated with seasonal changes. The results indicate that most of the materials that are mobilized downhill come from the surface deposit. However, during the months that concentrate the greatest rainfall and solar radiation, the subsurface materials, more than 80 cm deep, but only in the Amalacaxco gorge, are mobilized punctually. This indicates that erosion is greater in the gorge where the management techniques were implemented, which contrasts with what is observed in the gorge in its natural state. It is concluded that the management techniques applied modify the surface dynamics and favor the incisive processes of the alpine grassland. The use of the method used is appropriate to study erosive processes in high mountain areas.

Keywords: sediment transport, optically stimulated luminescence, erosion, Iztaccíhuatl-Popocatepetl Zoquiapan National Park, Mexico.

1. Introducción

El transporte de sedimentos en las zonas de montaña es un fenómeno que implica arrastre de materiales (suelo y rocas) por diversos agentes como son el agua, el hielo, el viento y la gravedad (Alatorre y Beguería, 2009; Hassan *et al.*, 2018; Pähtz *et al.*, 2020). Los mecanismos de transporte son complejos, ya que pueden deberse a distintos procesos como son los flujos de escorrentía, los hiperconcentrados y los de derrubios, movimientos gravitacionales y erosión glacial (Smith y Lowe, 1991; Wan y Wang, 1994; Dikau *et al.*, 1996; Bennett y Glasser, 2009; Salas, 2016; Keaton, 2019; Brenna *et al.*, 2020). La efectividad de dichos procesos depende también del tamaño de los granos que componen el suelo, composición litológica, pendientes del terreno y condiciones climáticas que predominan en las cuencas. El transporte y acumulación de los sedimentos a través del sistema fluvial tiene distintas escalas espaciales y temporales, donde la dinámica de transporte condiciona los mecanismos de desplazamiento (Calsamiglia *et al.*, 2017; Llena *et al.*, 2019; Najafi *et al.*, 2021). El transporte de sedimentos es, por lo general, elevado en regiones de alta montaña debido a las fuertes pendientes. Conocer la dinámica erosiva en estas zonas es de vital importancia para los estudios en geología y ecología, ya que las áreas de montaña aportan sedimentos a las planicies y permiten la circulación de nutrientes aguas abajo. Además, la dinámica superficial en regiones de alta montaña es frágil y puede modificarse por factores internos como son aquellos dados por cambios en la topografía de la cuenca asociada a procesos geomorfológicos y/o externos, como es el caso de la actividad antrópica que puede acelerar la erosión, alterar los ciclos biogeoquímicos, modificar la captación y retención de agua y afectar otros procesos vitales (Bracken y Croke, 2007; Cram *et al.*, 2008; Cavalli *et al.*, 2013; Bracken *et al.*, 2015; Cotler *et al.*, 2015).

La erosión del suelo se ha convertido en un problema a nivel mundial por la remoción de millones de toneladas por hectárea al año y su

posterior acumulación que altera los suelos en su estructura y fertilidad. En el caso de México, se calcula que se ha perdido *ca.* el 45% de los 190.8 millones de hectáreas que comprende la totalidad del territorio nacional (Ortíz *et al.*, 2003; Amhed *et al.*, 2015). Para estimar la erosión se han desarrollado métodos que diagnostican sus efectos a partir del movimiento del material, mediante el uso de evaluaciones directas como son la instalación de parcelas experimentales y las estaciones de aforo, otros métodos son indirectos, como los físicos, dendrogeomorfológicos (Franco-Ramos *et al.*, 2022), paramétricos y estadísticos; entre los que se encuentran los mapeos a partir de imágenes satelitales, la evaluación de fotografías aéreas y ortofotos (Brimoh y Vlek, 2008; Navarro *et al.*, 2012; Montanarella *et al.*, 2015). Estos últimos incluyen características morfológicas de canales y laderas así como el análisis de índices de conectividad estimados a partir del uso de modelos digitales de elevación (MDE) en sistemas de información geográfica (e.g., Borselli *et al.*, 2008; Beel *et al.*, 2011; Berger *et al.*, 2011; Cavalli *et al.*, 2013). Además, existen enfoques novedosos que utilizan marcadores naturales como la luminiscencia ópticamente estimulada (LOE) para determinar posibles alteraciones en la dinámica del transporte de sedimentos en sistemas fluviales (e.g., Muñoz-Salinas *et al.*, 2011; Muñoz-Salinas y Castillo, 2014; 2018). Entre los estudios que previamente han aplicado este enfoque destaca el de Muñoz-Salinas y Castillo, (2014), donde se evalúan los procesos de transporte de sedimentos en flujos de derrubios en varias cabeceras fluviales en España, donde se detectaron aspectos peculiares que implican blanqueo de granos minerales (i.e. liberación de electrones de trampas entre bandas energéticas) en función de la dinámica de transporte. Esto permitió proponer esta metodología para identificar mecanismos de transferencia de sedimentos en ambientes fluviales. En México, Muñoz-Salinas y Castillo (2018) evaluaron el transporte de sedimentos en la cabecera de Amalacaxco dentro el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl Zoquiapan, donde hacen la recomendación de

que la luminiscencia es eficaz para determinar la transferencia de sedimentos en barrancos, además de ser un procedimiento alternativo a los modelos de erosión de suelo e interpretación cartográfica. En la presente investigación, utilizamos el trabajo de Muñoz-Salinas y Castillo (2018) como piloto para aplicar la técnica de LOE en la evaluación de la erosión estacional en dos cabeceras fluviales que tienen un ecosistema de alta montaña de alto valor ecológico caracterizado por el pastizal alpino y que se encuentran dentro del polígono del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl Zoquiapan. Una de ellas fue la de Amalacaxco, utilizada en el caso de estudio de Muñoz-Salinas y Castillo (2018) y que se caracteriza por haber sido intervenida antrópicamente con la aplicación de estrategias de manejo. Estas tienen el propósito de reducir la evacuación de sedimentos hacia las laderas del volcán Iztaccíhuatl, las cuales canalizan en época de crecidas, flujos de escorrentía que inundan poblaciones como la de Amecameca de Juárez con 75,489 habitantes (INEGI, 2022). La otra cabecera se conoce como Altzomoni y se mantiene en estado natural. Cabe resaltar que el presente trabajo solo utilizó el artículo de Muñoz-Salinas y Castillo (2018) como precursor en el uso de la técnica de OSL para el análisis de procesos de transporte en zonas de alta montaña y que los resultados que aquí se presentan analizan muestras diferentes y parte de objetivos distintos. En el trabajo de Muñoz-Salinas y Castillo (2018) se realizó una toma de muestras aleatorias de Cs-137 en las laderas de la cabecera y un muestreo estratégico de OSL a lo largo de cauces en el año 2016. Por el contrario, las muestras que se analizan en el presente trabajo fueron recolectadas entre los años 2018 y 2019 siguiendo un muestreo a lo largo de perfiles transversales a las laderas de Amalacaxco y Altzomoni en tres fechas diferentes a lo largo de un año para ver la variabilidad estacional. Cabe resaltar que la cabecera de Altzomoni no se analizó en el trabajo publicado por Muñoz-Salinas y Castillo (2018). Adicionalmente, el presente trabajo tiene objetivos diferentes a los del publicado en 2018, ya que mientras en este último, la fina-

lidad de la investigación consistió en probar que el uso conjunto de las técnicas de Cs-137 y OSL aportan información relevante para el estudio de erosión superficial en zonas de alta montaña, en el artículo que aquí se presenta el objetivo es evaluar cómo los cambios estacionales afectan los procesos erosivos a lo largo de un año en dos cabeceras con clima, elevación y exposición solar similares, pero con la diferencia de que una está antropizada y la otra se encuentra en estado natural. Otra diferencia importante es que, en el presente trabajo la metodología está enteramente basada en el análisis de las señales de luminiscencia en depósitos superficiales, mientras que, en el estudio de Muñoz-Salinas y Castillo (2018) se dio más peso a los análisis de Cs-137 que a los de OSL.

2. Área de estudio

Las cabeceras de las barrancas Altzomoni y Amalacaxco se localizan entre las coordenadas geográficas 19°7'34"N/98°38'34"O y 19°1'42"N/98°39'20"O (Figura 1a y 1b). Estas se ubican dentro del límite administrativo del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl Zoquiapan, el cual es uno de los más antiguos de México que se fundó por decreto presidencial en el año 1935 (Figura 1b). En 2010, el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl Zoquiapan fue declarado Reserva de la Biósfera de Los Volcanes por las Naciones Unidas (Figura 1c). Ambas figuras reconocen el gran valor ecológico de las regiones de alta montaña a las que protegen, las cuales incluyen los ecosistemas de zacatonal alpino que caracterizan las cabeceras de las barrancas Altzomoni y Amalacaxco (Figura 2a y 2b).

Los volcanes Iztaccíhuatl, Popocatepetl y Tláloc se encuentran parcialmente dentro del Parque Nacional. Estas estructuras se encuentran en la porción central de la Faja Volcánica Trans-Mexicana, la cual es un arco volcánico que atraviesa la parte media de México y que tiene su génesis en un volcanismo atípico y oblicuo a la subducción de las placas de Cocos y Rivera por

debajo de la Norteamericana desde el Mioceno tardío (~7-5 M.a.). Los tres volcanes se originaron entre el Plioceno tardío (1.09 M.a.) y temprano (~1 M.a.) y son de composición dacítica-andesítica principalmente (Siebe *et al.*, 1996; Macías, 2005; Sosa-Ceballos *et al.*, 2015; Franco-Ramos *et al.*, 2017). Cabe resaltar que actualmente el volcán Popocatepetl se encuentra activo, exhala y aporta cenizas así como piroclastos en un radio que alcanza parte de las laderas del volcán Iztaccíhuatl. Además, en este complejo existieron lenguas glaciales que descendieron hasta los 3,000 m de altitud y que generaron morrenas laterales

en las zonas cumbresales. Hoy en día los glaciares han desaparecido en su totalidad y solo hay vestigios de nieve ocasional (Delgado-Granados, 1997; Vázquez y Heine, 2004; Delgado-Granados *et al.*, 2007; Muñoz-Salinas y Castillo, 2018; Valdepeña, 2019). Las cabeceras de Amalacaxco y Altzomoni, estudiadas en este trabajo, se localizan en el flanco SE del volcán Iztaccíhuatl a una altura de 3,800 a 4,000 m. Esta zona estuvo glaciada durante el Último Máximo Glacial así como en el periodo frío de la pequeña Edad de Hielo (Vázquez-Selem y Lachniet, 2017). Las dos cabeceras están manteladas por depósitos de materiales de caída

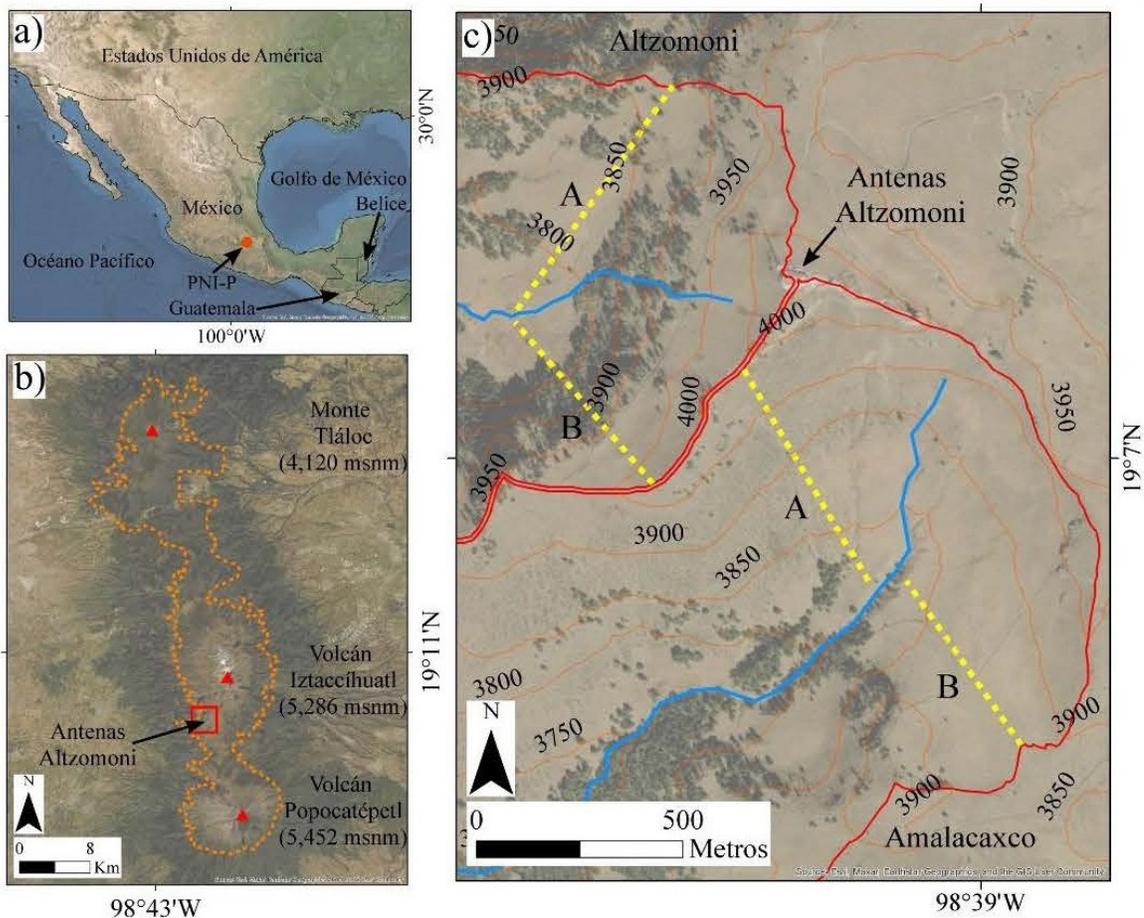


Figura 1 a) Localización del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl Zoquiapan (PNI-P) en el centro de México (punto naranja indicado con una flecha y mostrado en b). En b) Ubicación de los volcanes Popocatepetl, Iztaccíhuatl y Tláloc (triángulos rojos), así como la extensión del PNI-P (línea intermitente naranja). En el rectángulo rojo se muestra el área de estudio, señalando con una flecha las antenas Altzomoni. En c) Vista general de las cabeceras Amalacaxco y Altzomoni (líneas rojas). Laderas marcadas en solana (A) y umbría (B) y, transectos de muestreo para luminiscencia (líneas intermitentes amarillas). Estos transectos cruzan unidades de bosque y zacatonal naturales en Altzomoni, así como zacatonal natural y con prácticas de manejo y conservación en Amalacaxco. Los cauces principales se marcan con líneas azules. Las imágenes usadas fueron tomadas de Google Satellite® del 24 de octubre de 2021.

emitidos por el volcán Popocatepetl donde los dos estratos más superficiales son de interés para este trabajo. El primer depósito aflora en superficie y está compuesto por cenizas oscuras que presentan un espesor de 80-100 cm y tienen una edad <100 años (Franco, 2005). Esta unidad contiene un suelo poco desarrollado de tipo regosol. Bajo este depósito se encuentra otro de pómez de unos 50 cm de espesor, el cual es conocido como “Pómez Pink” por su coloración rosada y ha sido fechado con una edad de 1,100 años (Siebe *et al.*, 1996) (Figura 3). A mayor profundidad de estos dos depósitos se encuentran rocas volcánicas que afloran en algunos puntos. El relieve en ambas cabeceras es abrupto, con valles que superan los 500 m de profundidad y pendientes suaves (< 8°) localizadas al fondo de estos valles y empinadas (> 16°) en vertientes y escarpes (Figuras 2a y 2b).

En las dos cabeceras crece la pradera de alta montaña (con especies de *Festuca*, *Calamagrostis*, *Mhulembergia*, *Agrostis* y *Juniperus* entre otras) y bosques de pino (*Pinus hartwegii*). La pradera de alta montaña la conforman herbáceas cuyo ecosistema se conoce como pastizal o zacatonal alpino y que está presente en toda la superficie, mientras que los bosques se enclavan dentro de los valles de Amalacaxco y en Altzomoni en las vertientes y escarpes. El zacatonal alpino es un ecosistema importante que crece bajo condiciones especiales (como temperaturas bajo cero por periodos de tiempo considerables), constituye el hábitat de especies catalogadas en riesgo por autoridades ambientales entre otras. En estas altitudes los bosques se desarrollan hasta el límite forestal (comunidades arbóreas hasta los 3,850 m de altitud) y límite arbóreo (árboles aislados hasta los 4,000 m de altitud) (Torres, 2013; Almeida-Lenero *et al.*, 2015; Muñoz-Salinas y Castillo, 2018). Por su parte, la fauna que habita en estos parajes está conformada por diversas especies de aves, mamíferos, roedores, reptiles y anfibios. Entre ellos destaca el teporingo (*Romerolagus diazi*), especie endémica del altiplano mexicano catalogada en peligro de extinción, así como la musaraña (*Sorex vagrans*) como especie amenazada y la rata canguro

(*Dipodomys phillips*) como especie protegida (Fueyo *et al.*, 2013; Muñoz-Salinas y Castillo, 2018). Respecto a las condiciones climáticas imperantes en estas zonas de alta montaña en México predomina el clima alpino (tipo ET en la clasificación de Köeppen) con temperaturas que oscilan de 3 a 5° C y precipitaciones que van de los 600 a 800 mm anuales (Burquez *et al.*, 1998), donde los veranos son húmedos, cortos y frescos con inviernos fríos (Almeida-Lenero *et al.*, 2015) (Figura 4). Los suelos son de tipo andosol, fluvisol y regosol desarrollados en material volcánico acumulativo (Fueyo *et al.*, 2013; Miguel, 2013).

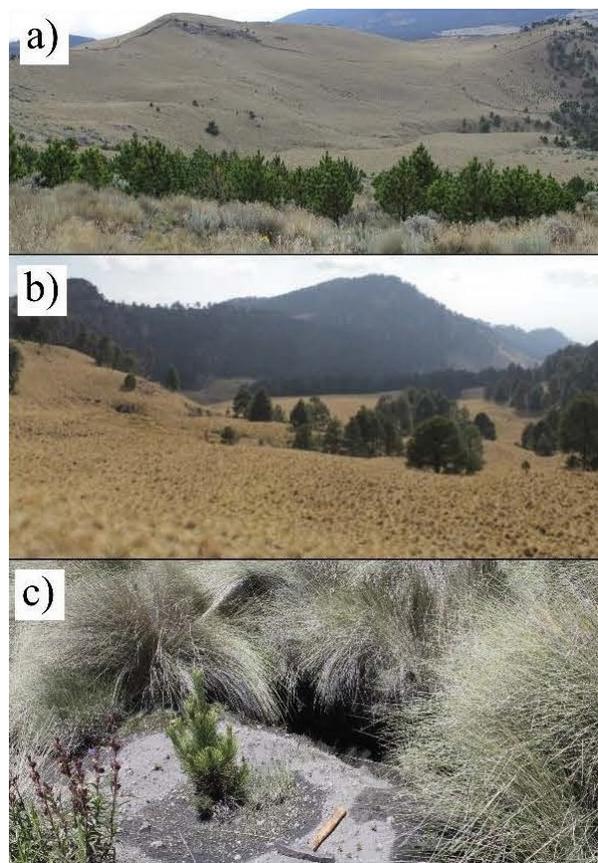


Figura 2 Imágenes del área de estudio. En a) vista general de la cabecera Amalacaxco donde se observa en la parte proximal aforestación con pino y en b) vista general de la cabecera Altzomoni con vegetación natural. En c) aforestación con tinajas en parte baja de ladera de umbría en cabecera Amalacaxco.

En la cabecera de Amalacaxco están implementadas estrategias de manejo y conservación en algunas secciones del zacatonal alpino. La finalidad es controlar la erosión, restaurar ecosistemas, recuperar la cubierta vegetal, manejar los escurrimientos y coleccionar agua pluvial (recarga de acuíferos). Estas prácticas se realizan en vertientes de solana y umbría desde las últimas décadas e implican aforestación con pino (*Pinus hartwegii*), donde son sembrados pinos por arriba de los límites forestales naturales y se realiza la excavación con zanjas de infiltración (conocidas también como tinas ciegas con dimensiones de 1-2 metros de anchura y hasta 1 metro de profundidad) (Figura 2c). Además se ha llevado a cabo la construcción de diques (dos metros de largo por medio metro de ancho y un metro de altura), gaviones en algunos cauces y brechas corta fuegos/caminos para control de incendios y senderismo (Cotler *et al.*, 2015; Muñoz-Salinas y Castillo, 2018).

3. Materiales y métodos

3.1. BASES METODOLÓGICAS DE LA LOE

La técnica de luminiscencia fue propuesta en la década de 1980 para datar diversos tipos de sedimentos (eólicos, fluviales y fluvio-glaciales), además de cerámica arqueológica (Huntley *et al.*, 1985; Sanderson *et al.*, 2007; Pope *et al.*, 2008; Rittenour, 2008; Mahan *et al.*, 2009; Sanderson y Murphy, 2010). Con innovaciones posteriores, esta técnica se ha utilizado para descifrar la transferencia de sedimentos a través de las laderas en sistemas fluviales para esclarecer los mecanismos que rigen estos procesos (Sanderson y Murphy, 2010; Muñoz-Salinas *et al.*, 2011; 2012; Muñoz-Salinas y Castillo, 2014). La luminiscencia tiene su origen en la estimulación y tránsito de electrones entre bandas estables y energéticas en granos minerales (cuarzos y feldspatos) en sedimentos, fenómeno

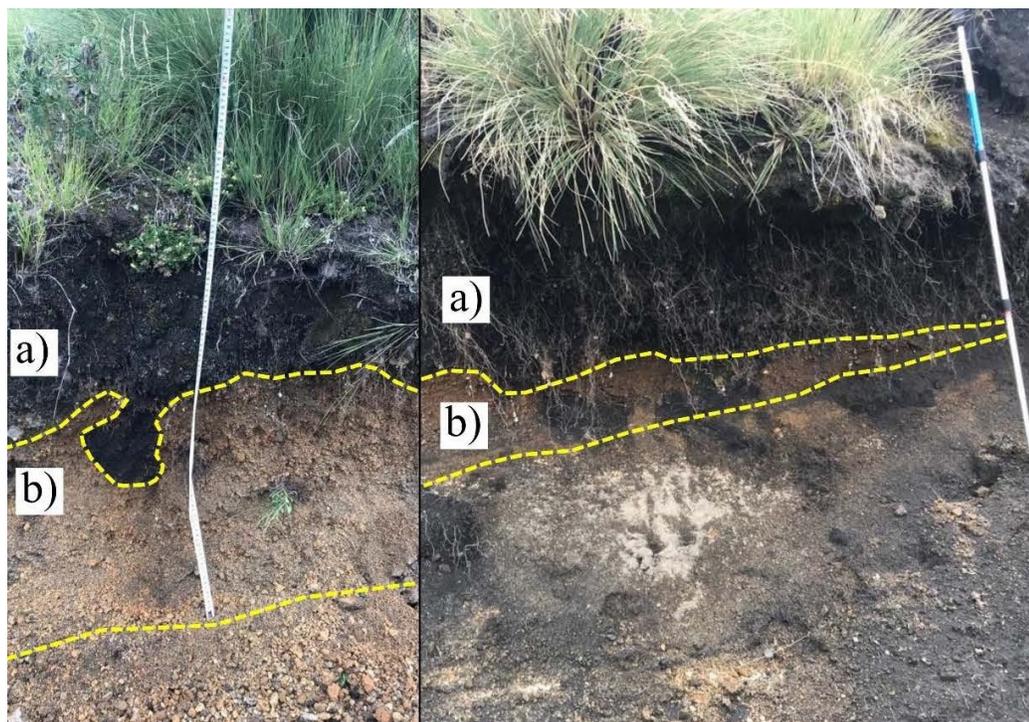


Figura 3 Perfiles en profundidad de los dos depósitos de caída que mantienen las cabeceras estudiadas. En a) en la parte superficial (<80 cm) se observa ceniza de color negro de eventos del siglo XX y XXI. En b) se muestran los materiales de cenizas y pómez que provienen de la erupción “Pómez Pink” (>80 cm) cuyo registro data de ~1,100 AP (Siebe *et al.*, 1996).

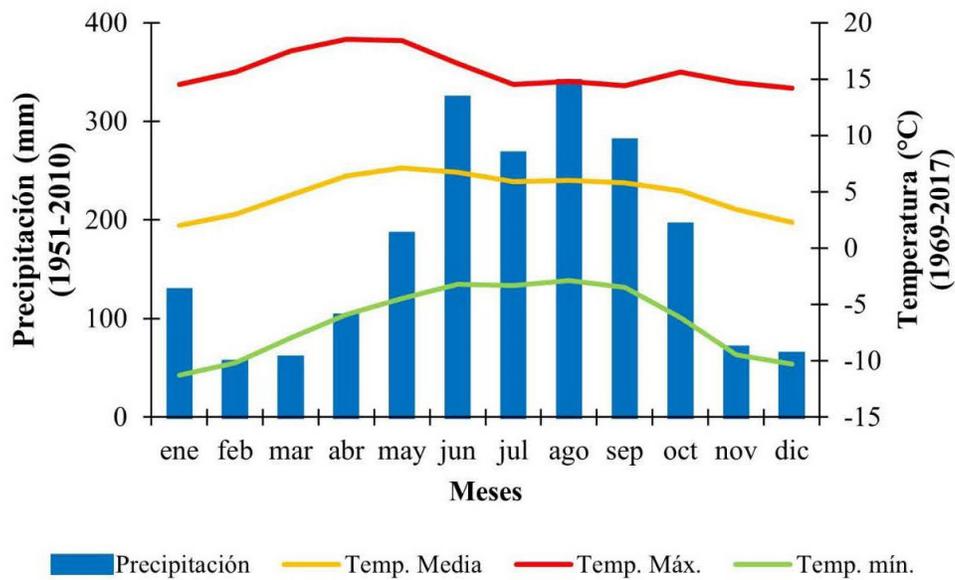


Figura 4 Climograma de la distribución media mensual de precipitación y temperatura para las barrancas en la zona de estudio. La precipitación registra un periodo de 59 años y fueron consultados de la estación climatológica número 15007 de la Comisión Nacional del Agua y del Servicio Meteorológico Nacional de México. La temperatura contempla 48 años y los valores que se muestran han sido recalculados según el gradiente altitudinal (ver texto para más información).

que es provocado por la radiación ionizante imperante en los suelos a partir de elementos radioactivos (U-238, U-235, Th-232 y K-40) que, al decaer, liberan radiación alfa, beta y gamma. También influyen, aunque en menor proporción, los rayos cósmicos los cuales son partículas subatómicas provenientes del espacio exterior y que ingresan en las capas superficiales del suelo. Esta radiación ionizante provoca que los electrones queden atrapados y almacenados en algunos huecos de las estructuras cristalinas de los minerales (conocidas como trampas energéticas) por el tiempo que los granos estén enterrados sin estar expuestos a la luz solar. Cuando los sedimentos son desenterrados y los granos vuelven a ser incididos por la luz solar, los electrones regresan a las bandas estables, lo que produce que las trampas se vacíen total o parcialmente (proceso conocido como blanqueo total o parcial). Ante este intercambio de mayor a menor energía se generan fotones que equilibran esta pérdida energética y que son las señales de luminiscencia que se estimulan con longitudes de onda en azul e infrarrojo con un lector de luminiscencia (Huntley *et al.*, 1985; Aitken, 1995;

Prescott y Hutton, 1994; Aitken, 1998; Molodkov, 2007; Muñoz-Salinas *et al.*, 2012; Muñoz-Salinas y Castillo, 2014).

En esta investigación se usaron las señales de luminiscencia de las muestras de material superficial colectado a lo largo de los perfiles longitudinales en dirección de las pendientes de solana y umbría en la zona cumbre de las barrancas Altzomoni y Amalacaxco para determinar los procesos de transporte y evacuación de sedimento en tres fechas separadas cada 4 meses entre los años 2018 y 2019. Las señales de luminiscencia que se obtuvieron se compararon con las reportadas en azul para los dos depósitos que cubren la superficie de las dos barrancas. El depósito más superficial de <100 años compuesto por cenizas de caída de coloración oscura contiene valores máximos que no superaron los 2,000 fotones totales mientras que, el depósito localizado debajo de éste, conocido como “Pómez Pink” y de 1,100 años, presentó valores superiores a los 2,000 fotones totales (valores reportados en Muñoz-Salinas *et al.*, 2020). La finalidad de usar como referencia el valor de corte de 2,000 fotones totales para los

resultados de las señales de luminiscencia en azul para las muestras de sedimento superficial analizadas en nuestros perfiles, se usó para determinar el grado de incisión de los procesos fluviales con base a la profundidad del material expuesto en cada fecha del año muestreado.

3.2. TRABAJO DE CAMPO

El muestreo se inició en la parte más elevada del relieve, en la zona del parteaguas del collado y se terminó en la parte más profunda del valle en la zona de incisión fluvial. Las muestras se extrajeron del sedimento que aflora en la superficie del relieve, por ser éste el material expuesto y susceptible a la erosión. La localización de puntos de control fijos para el muestreo a lo largo de los perfiles no fue viable debido a que la superficie cambia de forma continua debido a los procesos de reptación y, el único punto de muestreo fijo, se tomó al inicio de los perfiles en el parteaguas, esto para las tres campañas realizadas. De esta manera, los puntos de muestreo a lo largo de la ladera se localizaron por conteo de pasos, de 25 a 30 entre cada sitio de recolección de muestra y se siguió siempre la misma orientación hacia el fondo del valle. De esta manera, se garantizó el muestreo a través del mismo perfil durante las tres campañas realizadas cada 4 meses durante los años 2018 y 2019.

La extracción de cada muestra consistió en la misma estrategia con los siguientes pasos: (1) Se seleccionó el sitio para la extracción de las muestras, la superficie fue cubierta con un cobertor opaco, (2) se eliminaron los primeros 1-2 mm de suelo con una espátula ya que el sedimento/suelo está expuesto a la luz solar y puede encontrarse parcial o totalmente blanqueado, (3) se introdujo un tubo de PVC de 1.5 cm de diámetro y 2 cm de profundidad en el suelo, (4) el sedimento recuperado se envolvió con papel de aluminio para prevenir de este modo su exposición a la luz solar y se etiquetó.

El total de muestras extraídas para las tres campañas fue de 240. Estas campañas se realizaron entre las fechas de: (1) 16 a 18 de diciembre de 2018, por situarse al inicio del periodo seco y frío del

invierno, (2) 26 a 28 de abril de 2019, que coincide con el inicio del periodo húmedo del año y (3) 15 a 17 de agosto de 2019, por localizarse en la mitad del húmedo del verano.

3.3. ANÁLISIS DE MUESTRAS EN EL LABORATORIO

Los análisis de la luminiscencia se realizaron en el Laboratorio Geocron-Q el cual se localiza en la Estación Regional del Noroeste (Instituto de Geología, UNAM) y pertenece al Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía (LANGEM) de la UNAM. La preparación de las muestras se realizó bajo luz roja y consistió en verter el material de cada tubo en una caja Petri de 5 cm de diámetro y 2 cm de alto. Cada muestra se insertó en un equipo para la estimulación lumínica de los granos minerales el cual fue diseñado en el centro de investigaciones medioambientales de las universidades escocesas, en Reino Unido (Sanderson y Murphy, 2010). Con este equipo se estimularon cada una de las muestras, bajo el mismo protocolo, por 60 segundos con la longitud de onda del espectro electromagnético del infrarrojo y a continuación, por otros 60 segundos en la longitud del azul. Para cada muestra, se utilizó el conteo de fotones totales.

3.4. DATOS DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN EN LAS CABECERAS

Las señales de luminiscencia registradas fueron relacionadas con los datos de temperatura y precipitación en las cabeceras de las barrancas estudiadas. Los valores de temperatura y precipitación fueron recopilados de los registros diarios de la estación climatológica más cercana a las barrancas y localizada en la población de Amecameca de Juárez. Esta estación pertenece a la red de estaciones climáticas de la Comisión Nacional del Agua con la clave numérica 15007. Cabe mencionar que esta estación se encuentra ubicada a los 2,470 metros de altitud y, por lo tanto, a una altitud más baja que las cabeceras objeto de estudio, las cuales se encuentran a una elevación media de 3,877 m s.n.m. (por lo tanto, existe una diferencia de 1,407 m). Por ello, se aplicó un factor de corrección alti-

tudinal a los valores de temperatura de la estación 15007 que consistió en reducir 0.65° C por cada 100 metros de elevación ganada de acuerdo con el criterio propuesto por García, (1986). De esta manera, se restó a cada valor de temperatura en la estación 15007 el valor de 9.14° C (valor resultante de multiplicar los 0.65 por 14.07; este último correspondiente a dividir la diferencia de elevación entre la estación y la elevación media de las cabeceras entre 100) y se presentan en la figura 4.

3.5. RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar también se comparó con la luminiscencia para determinar la cantidad de luz que incidió sobre las cabeceras durante las etapas de muestreo, cuya unidad de medida es WH/m², donde W son vatios de luz solar, H tiempo de incidencia en horas y m² superficie incidida. Los valores de radiación solar fueron calculados en el software *Arc Gis* 10.5 con la herramienta “Radiación Solar” a partir de un modelo digital

de elevación de 30 m de la zona de estudio que se descargó de manera gratuita desde la página web del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (<https://www.inegi.org.mx/>) y extraída para las coordenadas geográficas de cada uno de los puntos de muestreo. La radiación solar fue calibrada para los días de cada una de las tres jornadas de muestreo. Después fue seleccionada la base de datos geográfica con el inventario de los puntos correspondientes a cada etapa de muestreo y finalmente, el procesamiento generó una capa vectorial y una tabla de atributos con los valores de radiación solar para cada punto de muestreo. Finalmente se utilizaron los valores medios de radiación solar para cada ladera y cabecera durante las tres campañas de campo realizadas y que se presentan en la Tabla 1.

4. Resultados y discusión

Las señales de luminiscencia en infrarrojo y en azul obtenidas para las 240 muestras analizadas

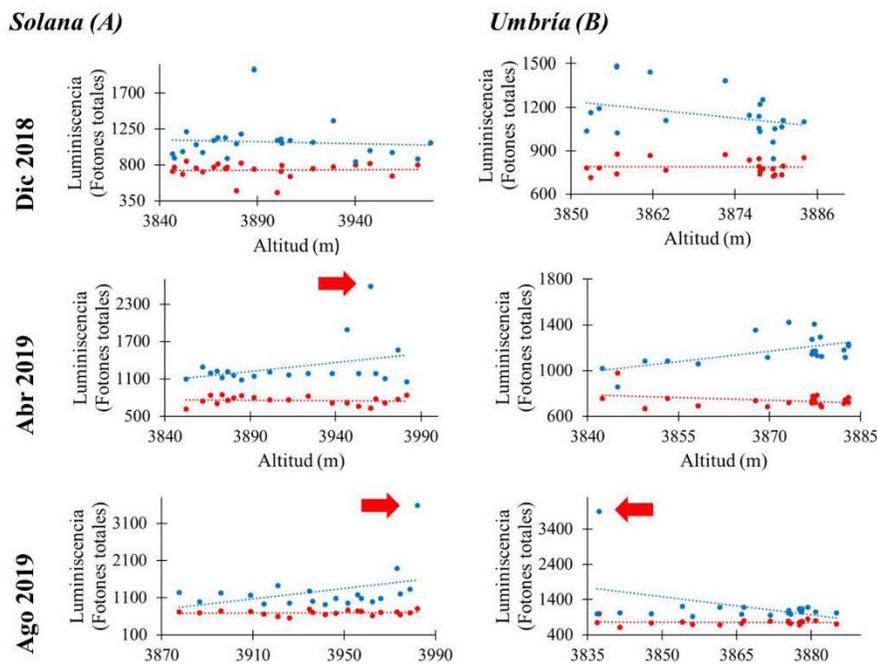


Figura 5 Valores de luminiscencia versus altitud en la cabecera de Amalacaxco. Los fotones totales en azul (puntos azules) e infrarrojo (puntos rojos) muestran la ubicación de valores a través de laderas en solana (A) y umbría (B). Además de la tendencia del conjunto de valores representado por líneas intermitentes del color correspondiente a las señales en cada uno de los gráficos. Las flechas rojas indican fotones totales que superan los 2,000 fotones totales en azul y que representan las localizaciones con erosión incisiva.

Tabla 1. Valores de las estadísticas básicas (máximos, mínimos y media) de luminiscencia y radiación solar.

Cabecera	Parámetro	Diciembre 2018		Abril 2019		Agosto 2019	
		Solana	Umbría	Solana	Umbría	Solana	Umbría
Amalacaxco	Luminiscencia azul máxima	1,995	1,484	2,584	1,424	3,584	3,894
	Luminiscencia azul mínima	839	845	1,050	858	923	921
	Media Luminiscencia azul	1,086.45	1,142.05	1,291.20	1,172.60	1,275.45	1,208.80
	Luminiscencia infrarroja máxima	844	878	845	977	802	1,000
	Luminiscencia infrarroja mínima	455	725	620	667	561	615
	Media Luminiscencia Infrarroja	733.33	788.35	755.50	740.40	697.45	759.60
	Media Radiación Solar	6,403.33	5,433.5	8,809.58	9,240.75	8,773.58	9,221.44
Altzomoni	Luminiscencia azul máxima	1,209	1,321	1,751	1,473	1,370	1,509
	Luminiscencia azul mínima	960	978	1,048	1,016	883	906
	Media Luminiscencia azul	1,057.95	1,158.90	1,278.20	1,163.90	1,102.24	1,078.40
	Luminiscencia infrarroja máxima	940	960	894	829	1,004	930
	Luminiscencia infrarroja mínima	659	718	688	605	607	662
	Media Luminiscencia Infrarroja	786.50	829	770.75	742	737.32	734.95
	Media Radiación Solar	6,093.99	4,451.91	9,121.33	8,786.92	9,040.67	8,738.1

a lo largo de los mismos 4 perfiles localizados en dos cabeceras y dos exposiciones (solana y umbría) varían a lo largo de las tres fechas analizadas (ver Figuras 5 y 6). Estos valores también cambian la tendencia a lo largo del perfil topográfico, como se observa para Amalacaxco (Figura 5) y para Altzomoni (Figura 6). Estas variaciones pueden interpretarse como un desplazamiento del sedimento a lo largo de la pendiente de las laderas durante las fechas analizadas, ya que las localizaciones donde el material tiene mayor y menor luminiscencia va cambiando de posición en elevación. Las muestras con mayor luminiscencia tienden a corresponder con zonas de aporte de material enterrado y las que contienen menor luminiscencia, con sedimento transportado y blanqueado. Por lo tanto, una primera observación de los datos

de luminiscencia, indica que existe un transporte del sedimento a lo largo del año analizado en las dos cabeceras.

Se observó que los valores de luminiscencia en las muestras analizadas presentan valores medios de luminiscencia en azul que oscilan entre los 1,057 y 1,291 fotones totales y en infrarrojo entre los 697 y 829 fotones totales (ver Tabla 1). Estos valores están muy próximos a los registros mínimos de detección del equipo, los cuales se sitúan en 1,000 fotones totales en el azul y en los 600 en el infrarrojo, e indican que los sedimentos han cargado poca luminiscencia desde su enterramiento y, por lo tanto, son jóvenes. Con base en la luminiscencia en azul reportada en el trabajo de Muñoz-Salinas *et al.*, (2020) para los depósitos que cubren gran parte del Parque Nacional

Iztaccíhuatl-Popocatepetl Zoquiapan, se aprecia que los valores de este estudio coinciden con los del depósito superficial de <100 años, ya que están por debajo de los 2,000 fotones totales. Sin embargo, existen unas pocas muestras que registraron valores por encima de los 2,000 fotones totales y que son similares a las reportadas para el depósito subsuperficial localizado a profundidades superiores a los 80-100 cm, el cual ha sido fechado en 1,100 años (Pómez “Pink”). En este estudio, los valores de luminiscencia en azul por encima de 2,000 fotones totales indican que aflora en superficie el depósito subsuperficial o material proveniente de éste y que, por lo tanto, en las localizaciones de donde se extrajo tuvo lugar un proceso incisivo ajeno a la erosión natural de al menos 80 cm de profundidad, el cual, corresponde únicamente con las excavaciones de los diques y zanjas de infiltración donde se remueve material de hasta 1 m de profundidad (ver Figura 8). La

incisión en estos sitios es, por lo tanto, superior a la que se registra en la mayor parte de la superficie de las cabeceras de las barrancas, donde las muestras reportan valores por debajo de 2,000 fotones totales. Para entender cuándo, dónde y por qué ocurre la incisión del relieve donde aflora el material subsuperficial, se analizaron las fechas en las que aparecen las señales por encima de los 2000 fotones totales, así como la orientación en las que tiene lugar y en la cabecera que predominan. Los datos también se relacionaron con el régimen de temperaturas y precipitaciones así como con la radiación solar.

Cabe destacar que, en las muestras donde las señales de luminiscencia en azul se incrementan por encima de los 2,000 fotones totales, no se observó un incremento substancial en las señales de infrarrojo (ver Tabla 1). Esto coincide con lo previamente apreciado en trabajos que analizaron la luminiscencia de sedimentos volcánicos en

Cabecera Altzomoni

Solana (A)

Umbría (B)

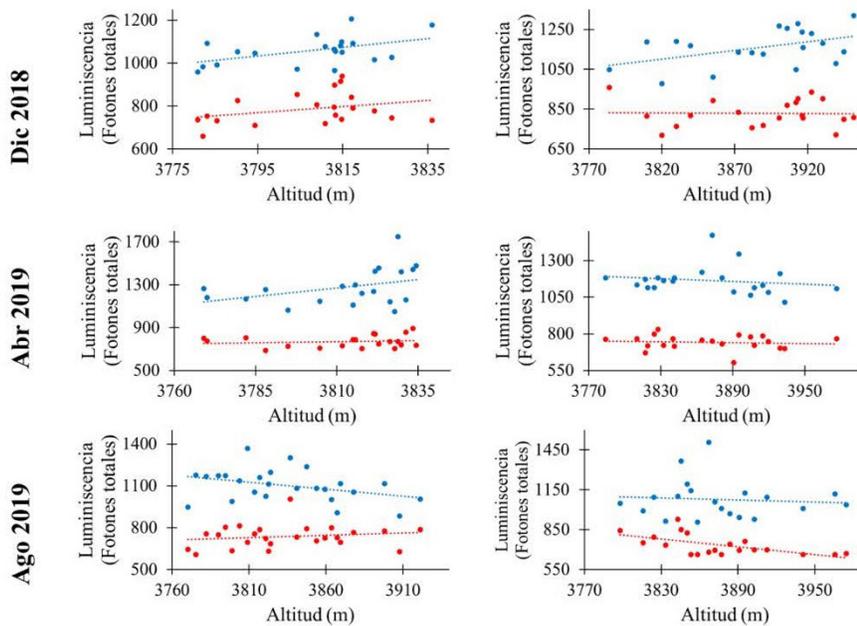


Figura 6 Valores de luminiscencia versus altitud en la cabecera de Altzomoni. Los fotones totales (puntos azules y rojos) muestran la ubicación de valores a través de laderas en solana (A) y umbría (B). La tendencia del conjunto de valores representado por líneas intermitentes del color correspondiente a las señales en cada uno de los gráficos. A diferencia de la cabecera Amalacaxco, en estas vertientes los valores se mantienen siempre por debajo de los 2,000 fotones totales para ambas marcas luminiscentes.

la zona centro de México (e.g. Muñoz-Salinas *et al.*, 2017; 2020) y encuentra su justificación en el hecho de que estas señales del infrarrojo provienen mayoritariamente de los granos minerales de feldespatos, los cuales tienden a perder luminiscencia a temperatura ambiente a causa de un fenómeno ampliamente conocido en los estudios de LOE como “desvanecimiento anómalo” (Wintley, 1973). Por este motivo, para analizar los procesos de incisión en las barrancas de este estudio se prefirió usar la luminiscencia en azul. Las señales de luminiscencia en azul por encima de los 2,000 fotones totales sólo se observaron en los muestreos de abril y agosto de 2019, pero únicamente para la cabecera de Amalacaxco. Estas señales se detectaron para un punto específico de la ladera de solana en abril de 2019 y en ambas laderas para agosto de 2019 (ver Figura 5).

Los valores de temperatura media recalculados para las cabeceras de las barrancas a partir de los datos de la estación 15007 indican que a lo largo de todo el año estos valores se mantienen en unos 5° C (Figura 4). Las temperaturas mínimas oscilan más, durante los meses de noviembre, diciembre y enero son frecuentes los valores por debajo de los -10° C. En el caso de la precipitación media se observa un régimen característico del centro de México marcado por las corrientes convectivas, donde destacan dos temporadas, una lluviosa entre los meses de mayo y octubre, con precipitaciones por encima de los 150 mm mensuales y otra relativamente seca, entre los meses de noviembre a abril, con precipitaciones por debajo de ese rango.

Con respecto a la media de radiación solar por perfil según ladera de exposición en cada cabecera y fecha de muestreo, los datos calculados a partir

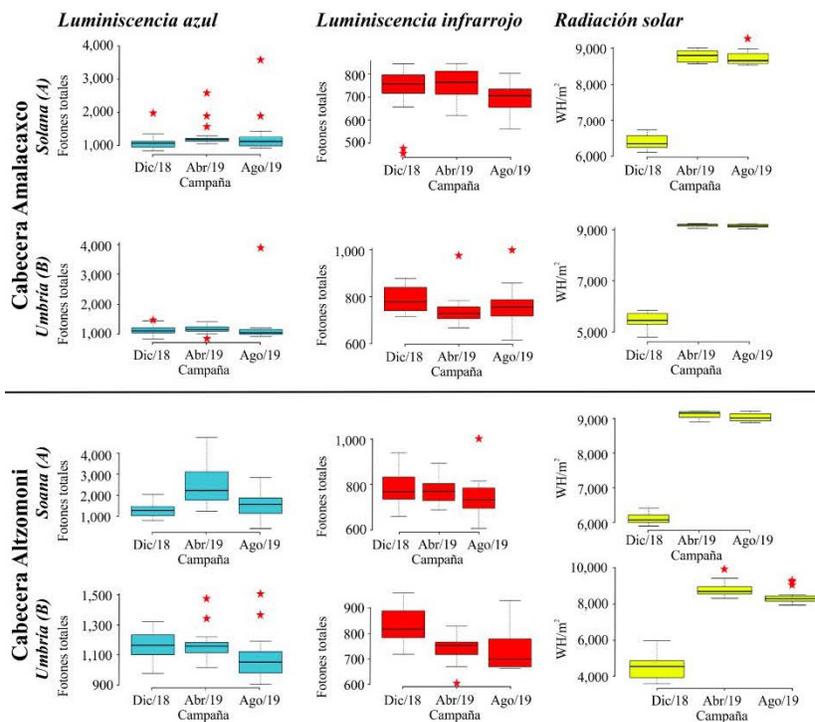


Figura 7 Diagrama de cajas donde se observan los valores de luminiscencia (azul/infrarrojo) y radiación solar. Los datos están organizados por cabecera y vertientes en solana (A) y umbría (B). Las campañas se refieren a los muestreos realizados después de lluvias (diciembre de 2018), antes de periodo húmedo (abril de 2019) y durante lluvias (agosto de 2019). Las estrellas rojas indican los valores fuera de la dispersión, indicando anomalías en cada uno de los parámetros.

del módulo de “Radiación solar” de *Arc Gis* 10.5 registraron que el muestreo de diciembre de 2018 contiene los valores más bajos entre los 4,400 y 6,400 WH/m² (Tabla 1 y Figura 7). Las fechas de muestreo de abril y agosto de 2019, contienen valores más altos, en ambos casos similares y que oscilan entre 8,800 y 9,200 WH/m². Es interesante señalar que sólo se encontró una diferencia notoria entre la radiación calculada para la ladera de solana y umbría para la fecha de diciembre de 2018 y donde la umbría recibe menos radiación que la de solana (Tabla 1 y Figura 7).

Con base en los datos obtenidos se propone que, el hecho de que en el periodo invernal de diciembre de 2018 no aparezcan señales de luminiscencia altas relacionadas con la incisión, altamente sugiere que el periodo invernal, donde las temperaturas bajas y la reducida radiación solar, favorecen el suelo helado y cohesionado (como se pudo constatar durante trabajo de campo) y, aunado a las bajas precipitaciones, inhiben el proceso de erosión superficial sobre las laderas. Por el contrario, durante el inicio de lluvias de primavera (muestreo de abril de 2019) y el periodo de lluvias de verano (agosto de 2019), la escorrentía superficial tiene la capacidad de transportar el sedimento superficial y, en algunos puntos incluso, llega a incidir sobre la superficie, como lo indican los altos valores de luminiscencia en el azul. Esto ocurre cuando la precipitación favorece la escorrentía en las cabeceras y cuando las altas temperaturas y radiación solar mantiene seco el suelo. A pesar de que en Alzomoni, las señales de luminiscencia oscilan en los tres periodos estudiados, sólo en Amalacaxco, que es la barranca donde se construyeron zanjas de infiltración y se implementó la aforestación, aparecen los valores del depósito subsuperficial. Resalta que los valores por encima de los 2,000 fotones totales de luminiscencia en el azul en Amalacaxco, se encuentran en la parte más alta del relieve (cerca del parteaguas) en la ladera de solana y en la parte basal (próxima al canal del fondo del valle) (ver Figura 5). Durante el trabajo de campo, se apreció el efecto de la incisión en toda la parte alta de la ladera de solana en Amalacaxco (Figura 8, obsérvese que los mate-

riales de la “Pómez Pink” son donde se construyeron las tinas ciegas), lo que soporta la idea de que son las acciones antrópicas implementadas las que favorecen una incisión de los materiales. Esto sugiere que las acciones de manejo modifican de forma negativa la dinámica natural de los procesos superficiales del ecosistema de alta montaña, ya que, en las dos cabeceras adjuntas, que comparten el mismo régimen climático, radiación solar, cobertura vegetal, geología y vegetación, pero donde una se mantiene en estado natural y en otra se construyeron zanjas de infiltración y aforestación, tienen un comportamiento distinto en términos de transporte de sedimentos. En la natural, aunque se observan cambios en los valores de luminiscencia a lo largo de los perfiles para las dos laderas y las tres fechas analizadas, no existe evidencia de que la estacionalidad potencie los



Figura 8 Fotografía tomada en campo en la que se aprecia la erosión incisiva en la parte alta de solana de la cabecera de Amalacaxco en secciones con aforestación como parte de estrategias de manejo. Al fondo de la imagen se observan las antenas Alzomoni, las cuales se representan en la Figura 1 para su localización.

procesos incisivos. Por el contrario, en la cabecera dominada por acciones antrópicas, las señales de luminiscencia muestran un claro comportamiento controlado por la estacionalidad, donde los meses lluviosos están caracterizados por un incremento de los procesos erosivos y que favorecen la incisión sobre los materiales.

El reconocimiento de la importancia de la estacionalidad en los procesos de erosión en la barranca de Amalacaxco en esta investigación constituye una aportación adicional al artículo de Muñoz-Salinas y Castillo (2018); previamente mencionado como precursor de este trabajo al probar por primera vez el uso de las señales de luminiscencia en zonas de alta montaña con un caso de estudio en la misma cabecera de Amalacaxco. En el estudio de Muñoz-Salinas y Castillo (2018) quedó constancia que, los altos valores de luminiscencia procedentes del subsuelo y, especialmente, los bajos valores de Cs-137 en las laderas más perturbadas por las acciones antrópicas en la barranca de Amalacaxco, permitían la interpretación de que las medidas implementadas para frenar el transporte de material en las laderas, estaba teniendo un efecto negativo en el ecosistema del pastizal de montaña al potenciar la erosión incisiva y, con ello, la pérdida del suelo y del hábitat de especies en peligro de extinción como el teporingo. En el presente trabajo, los resultados de luminiscencia obtenidos en una mayor cantidad de muestras y con una amplia distribución sobre la cabecera de Amalacaxco, no solo constata las conclusiones del estudio de Muñoz-Salinas y Castillo (2018), sino que permite aportar más información, al identificar que el factor que agrava la erosión incisiva en las laderas perturbadas por las acciones antrópicas es la pluviosidad de los meses de verano, por encima de la radiación solar o de las temperaturas. El presente estudio también demuestra que las altas precipitaciones por sí solas no producen incisión erosiva, ya que en la cabecera de Altzomoni, la cual tiene características pluviométricas, de altitud, exposición y temperatura totalmente similares a Amalacaxco, no contienen erosión incisiva. Por lo tanto, los resultados

obtenidos en el presente trabajo y en el publicado por Muñoz-Salinas y Castillo (2018) dejan en evidencia que la erosión incisiva es iniciada por las acciones antrópicas implementadas en el zacatonal alpino en la cabecera de Amalacaxco y, por ello, se recomienda la revisión de las prácticas de manejo utilizadas hasta el momento.

5. Conclusiones

Las señales de luminiscencia de 240 muestras de sedimento superficial a lo largo de las laderas de solana y umbría de dos cabeceras de barrancas adyacentes con características similares en términos de litología, topografía y clima, indican que los procesos de transporte superficial durante las 3 fechas estudiadas durante un año son muy diferentes en la que se encuentra en estado natural con respecto a la antropizada. En el caso de la cabecera natural de Altzomoni, las señales de luminiscencia en el azul coinciden con una erosión poco intensa, mientras que en la de Amalacaxco, indican que existe material de profundidades superiores a los 80 cm, lo que confirma que existe una mayor erosión en las laderas con prácticas de manejo para la prevención de pérdida de suelo. Las señales de luminiscencia se detectaron para el periodo lluvioso del año y evidencian que la barranca antropizada es propensa a una incisión en los meses entre abril y octubre.

Los resultados de luminiscencia encontrados aquí indican que la construcción de zanjas de infiltración está altamente relacionada con los procesos de incisión en Amalacaxco. Estos procesos alteran la dinámica natural, la cual parece estar basada en un transporte poco intenso y paulatino de los materiales superficiales que mantienen las laderas de las cabeceras en la zona de exposición de solana y umbría. Para el caso de la barranca de Amalacaxco, las señales de luminiscencia indican que desde que comienza el periodo de lluvias, tiene lugar un proceso altamente erosivo que no sólo supone la pérdida del incipiente suelo desarrollado, sino que es un factor importante en degradación del zaca-

tonal alpino, el cual es la base de un ecosistema de alto valor ecológico, declarado como Reserva de la Biosfera en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl Zoquiapan. Esto indica que las prácticas empleadas en Amalacaxco, también usadas en otras partes del parque, requieren una revisión, pues su aplicación parece estar generando un efecto contrario al deseado.

Finalmente, la presente investigación evidencia que el análisis de las señales de luminiscencia que provienen de los sedimentos superficiales es altamente sensible a los procesos de transporte y a la estacionalidad. Por ello, se propone que la LOE puede utilizarse como una herramienta robusta que permite evaluar el estudio de los procesos erosivos, como es el caso de las zonas de alta montaña en el centro de México, a un nivel temporal de alta resolución como son los cambios estacionales.

Contribución de los autores

Investigación, trabajo de campo y de laboratorio, análisis e interpretación de los datos, así como escritura del manuscrito y figuras: Víctor Manuel Gómez Piña y Esperanza Muñoz-Salinas. Trabajo de campo, revisión de algunos análisis, así como del documento del manuscrito: Miguel Castillo y Osvaldo Franco Ramos.

Financiamiento

Este proyecto ha sido financiado por el proyecto de CONACYT-México CB-2015-01 (255098).

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo aportado en campo por Mtro. Alfredo Valoix Balderas, el Ing. Daniel Tapia Flores y el Mtro. Rainer Díaz Limonte.

Conflicto de intereses

Todos los autores declaran que no existe interés de ninguna índole que puedan influir y/o sesgar las aportaciones de este trabajo.

Referencias

- Aitken, M.J., 1995, Thermoluminescence dating: past progress and future trends: *Nuclear Tracks*, 10, 3-6. [https://doi.org/10.1016/0735-245X\(85\)90003-1](https://doi.org/10.1016/0735-245X(85)90003-1)
- Aitken, M.J., 1998, An introduction to optical dating, the dating of quaternary Sediments by the use of Photon-Stimulated Luminescence: New York, USA, Oxford University Press, 267 p.
- Alatorre, L.C., Beguería S., 2009, Los modelos de erosión: una revisión: *Revista Cuaternario y Geomorfología*, 23 (1-2), 29-48. <https://digital.csic.es/handle/10261/92858>
- Almeida-Lenero, L., Giménez de Azcárate, J., González Trápaga, M.A., Cleef, A.M., 2015, Vegetación alpina de los volcanes Popocatepetl, Iztaccíhuatl y Nevado de Toluca, *Vegetación Alpina*, en Luna, I., Morroney, J.J., Espinosa, D. (eds.), *Biodiversidad de la Faja Volcánica Transmexicana: México*, Las Prensas de Ciencias, 267-286.
- Amhed, C.L.I., Chipotle, I.M., García, C.M.A., García, Z.P.A., González, R.T., Hernández, C.E.R., Juárez, P.Y.E., Rodríguez, M.J., Solares, R.V.E., 2015, Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales, Indicadores Clave de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde: México Semarnat, 78 p.
- Beel, C.R., Orwin, J.F., Holland, P.G., 2011, Controls on slope-to-channel fine sediment connectivity in a largely ice-free valley, Hoophorn Stream, Southern Alps, New Zealand: *Earth Surface Processes and Landforms*, 36(7), 981-994. <https://doi.org/10.1002/esp.2154>
- Bennett, M, R., Glasser, N.F., 2009, *Glacial geology: Ice Sheets and Landforms*: United Kingdom, Wiley-Blackwell, 402 p.
- Berger, C., McArdell, B.W., Schlunegger, F., 2011, Sediment transfer patterns at the Illgraben catchment, Switzerland: implications for the time scales of debris flow activities:

- Geomorphology, 125, 421–432. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.10.019>
- Borselli, L., Cassi, P., Torri, D., 2008, Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment: *Catena*, 75, 268-277. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.006>
- Braimoh, A.K., Vlek, P.L.G., 2008, *Land use and Soil Resources*: New York, Springer, 269 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6778-5>
- Bracken, L.J., Croke, J., 2007, The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems: *Hydrological Processes*, 21, 1749-1763. <https://doi.org/10.1002/hyp.6313>
- Bracken, L.J., Tumbull, L., Wainwright, J., Bogaart, P., 2015, Sediment connectivity: a framework for understanding sediment transfer at multiple scales: *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(2), 177–188. <https://doi.org/10.1002/esp.3635>
- Brenna, A., Surian, N., Ghinassi, M., Marchi, L., 2020, Sediment–water flows in mountain streams: Recognition and classification based on field evidence: *Geomorphology*, 371, 107413. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107413>
- Burquez, A., Martínez-Yrzar, A., Miller, M., 1998, Mexican Grasslands and the Changing aridlands of Mexico: An overview and a case study in Northwestern Mexico, in Tallman, B., Finch, D.M., Edminster, C. (eds.), *The future of arid grasslands: identifying issues, seeking solutions*: Proceedings RMRS-P-3, USA, Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain, 21-32.
- Calsamiglia, A., Lucas-Borja, M.E., Fortesa, J., Garcia-Comendador, J., Estrany, J., 2017, Changes in soil quality and hydrological connectivity caused by the abandonment of terraces in a Mediterranean burned catchment: *Forests*, 8 (9), 333. <https://doi.org/10.3390/f8090333>
- Cavalli, M., Trevisani, S., Comiti, F., Marchi, L., 2013, Geomorphometric assesment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments: *Geomorphology*, 188, 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.05.007>
- Cotler, H., Cram, S., Martínez-Trinidad, S., 2015, Evaluación de prácticas de conservación del suelo forestales en México: caso de las zanjas trinchera. *Investigaciones geográficas: Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 88, 6-18. <https://doi.org/10.14350/rig.47378>
- Cram, S., Cotler, H., Morales, L.M., Sommer, I., Carmona, E., 2008, Identificación de los servicios ambientales potenciales de los suelos en el paisaje urbano del Distrito Federal: *Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 66, 81-104. <https://doi.org/10.14350/rig.17983>
- Delgado-Granados, H., 1997, Los glaciares del volcán Popocatepetl (México): cambios y causas: *Cuaternario Internacional*, 43, 1-8.
- Delgado-Granados, H., Miranda, P.J., Huggel, C., Del Valle, S.O. Ibarquengoitia, M.A., 2007, Crónica de una muerte anunciada: extinción de los glaciares tropicales de pequeño tamaño del volcán Popocatepetl (México): *Cambio Global y Planetario*, 56, 13-22.
- Dikau, R., Brunsden, D., Stchrott, R., Ibsen, M., 1996, *Landslide recognition: Identification, movement, and causes*: England, Wiley, 251p.
- Franco, R.O., 2005, *Geomorfología del volcán Popocatepetl: Ciudad de México, UNAM, Tesis licenciatura*, 156 p.
- Franco-Ramos, O., Vázquez-Selem, L., Zamorano-Orozco, J.J., Villanueva-Díaz, J., 2017, Edad, dinámica geomorfológica y tipología de barrancas en el sector norte del volcán Popocatepetl, México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 69(1), 1–19. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2017v69n1a1>
- Franco-Ramos, O., Ballesteros-Cánovas, J.A.,

- Terrazas, T. Stoffel, M., Vázquez-Selem, L., Cerano-Paredes, J., 2022, Reconstruction of gully erosion based on exposed tree roots in a recent landform of Paricutin Volcano, Mexico: *Earth Surface Processes and Landforms*, 47(3), 742-755. <https://doi.org/10.1002/esp.5269>
- Fueyo, M.D.L., Gutiérrez Carbonell, G., Ramírez Filippini, G., Rodríguez Trejo, M.A., López López, H.A., Gallardo Santiago, A.L., Cruz, Cruz, A., Carranza Sánchez, J., Esquivel Solís, R., Tagle Urrutia, A., Becerra Enríquez, M.G., Maldonado Pérez, C.R.O., Tapia Reyes, M., Matamoros Moreno, J.A., Ayala, García, M.P., Lomelín Molina, C., Mérida, Melo, P.J., Thomassiny Acosta, J.S., Rivero Vertiz, M.L., 2013, Programa de Manejo, Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl: México, SEMARNAT Y CONANP, 190 p. <https://simec.conanp.gob.mx/ficha.php?anp=87®=7>
- García de Miranda, E., 1986, Apuntes de climatología: México, UNAM, UAM, 81 p.
- Hassan, M.A., Ferrer-Boix, C., Cienciala, P., Chartrand, S., 2018, Sediment transport and channel morphology, in Radecki-Pawlik, A., Pagliara, S., Hradecky, J., Hendrickson, E. (eds.), *Open channel hydraulics, river hydraulic structure and fluvial geomorphology*: Florida, Taylor & Francis Group, 322-348. <https://doi.org/10.1201/9781315120584>
- Huntley, D.J., Godfrey-Smith, D.I., Thewalt, M.L.W., 1985, Optical dating of sediments: *Nature*, 213, 105-107. <https://doi.org/10.1038/313105a0>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2022, Tabulados de la encuesta intercensal 2015: México, INEGI. <https://www.inegi.org.mx/programas/intercensal/2015/>
- Keaton, J.R., 2019, Review of contemporary terminology for damaging surficial processes—Streamflow, hyperconcentrated sediment flow, debris flow, mud flow, mud flood, mudslide, in 7th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Los Ángeles, GEOBRUGG, 1-10. <https://repository.mines.edu/handle/11124/173147>
- Llena, M., Vericat, D., Cavalli, M., Crema, S., and Smith, M.W., 2019, The effects of land use and topographic changes on sediment connectivity in mountain catchments: *Science of the Total Environment*, 660, 899-912. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.479>
- Macías, J.L., 2005, Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes de México, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen Conmemorativo del Centenario: Temas Selectos de la Geología Mexicana*, 57(3), 379-424. <https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n3a6>
- Mahan, S.A., Noe, D.C., McCalpin, J.P., 2009, Use of OSL dating to establish the stratigraphic framework of Quaternary eolian sediments, Anton scarp upper trench, northeastern Colorado High Plains: *Quaternary International*, 199, 91-103. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2008.09.006>
- Miguel, J.J.D., 2013, Cobertura vegetal, materia orgánica y pH en suelo y su relación con el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl: Ciudad de México, UNAM, Tesis licenciatura, 104 p.
- Molodkov, A., 2007, IR-OSL dating of uranium-rich deposits from the new late Pleistocene section at the Voka site, North-Eastern Estonia: *Quaternary Geochronology*, 2, 208-215. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2006.06.004>
- Montanarella, L., Badraoui, M., Chude, V., Dos Santos, B.C.I., Mamo, T., Yemefack, M., Singh, A.M., Yagi, K., Young, H.S., Vijarnsorn, P., Lin, Z.G., Arrouays, D., Black, H., Krasilnikov, P., Sobocá, J., Alegre, J., Henriquez, C.R., Mendonça-Santos, M.L., Taboada, M., Espinosa, V.D., Alshankiti, A., Alavi P.S.K., El Mustafa, E.S.E.A., Hempel,

- J., Pennock, D., Camps, A.M., McKenzie, N., 2015, Status of the World's Soil Resources, Main Report: Rome, Italy, Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils (ITPS), 650 p.
- Muñoz-Salinas, E., Bishop, P., Sanderson, D., Zamorano, J.J., 2011, Interpreting luminescence data from a portable OSL reader: three case studies in fluvial settings: *Earth Surface Processes and Landforms*, 36, 651-660. <https://doi-org/10.1002/esp.2084>
- Muñoz-Salinas, E., Bishop, P., Zamorano J.J., Sanderson, D., 2012, Sedimentological processes in lahars: Insights from optically stimulated luminescence analysis: *Geomorphology*, 136, 106-113. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.06.024>
- Muñoz-Salinas, E., Castillo, M., 2014, Luminiscencia Ópticamente Estimulada aplicada a sedimentos fluviales: Un enfoque basado en la interpretación de las señales luminosas: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66(2), 225-233. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2014v66n2a1>
- Muñoz-Salinas, E., Castillo, M., Caballero, L., Lacan, P., 2017, Understanding landscape dynamics of the Sierra de Juárez, southern Mexico: An exploratory approach using inherited luminescence: *Journal of South American Earth Sciences*, 76, 208-217. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2017.03.001>
- Muñoz-Salinas, E., Castillo, M., 2018, Assessing conservation practices in Amalacaxco Gorge (Izta-Popo National Park, Central Mexico) using fallout ¹³⁷Cs and Optically Stimulated Luminescence (OSL): *Journal of Mountain Science*, 15(3), 447-460. <https://doi.org/10.1007/s11629-017-4635-1>
- Muñoz-Salinas, E., Castillo, M., Franco, O., Arce, J.L., Sanderson, D., Cresswell, A., 2020, Assessing paraglacial processes at Nexpayantla Gorge (Popocatepetl volcano, Central Mexico) using OSL and ¹⁴C: *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(11), 2450-2462. <https://doi.org/10.1002/esp.4890>
- Najafi, S., Dragovich, D., Heckmann, T., Hamidreza, S.S., 2021, Sediment connectivity concepts and approaches: *Catena*, 196, 104880. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104880>
- Navarro Lozano, J.O., Nava Sánchez, E., Troyo Dieguez, E., Cadena Zamudio, J.L., 2012, Tasas de erosión e índices geomorfológicos en tres cuencas costeras al sur de la península de Baja California, México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64(2), 229-241. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2012v64n2a8>
- Ortíz, C., Segura-Castruita, M.A., Cruz-Cárdenas, G., Gutiérrez-Castorena, M.C., 2003, Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, 1:250,000: México, SEMARNAT, Colegio de Posgraduados, 70 p.
- Pähtz, T., Clark, A. H., Valyrakis, M., Durán, O., 2020, The physics of sediment transport initiation, cessation, and entrainment across aeolian and fluvial environments: *Reviews of Geophysics*, 58, e2019RG000679. <https://doi.org/10.1029/2019RG000679>
- Pope, R., Willinson, K., Skovrtsov, E., Triantonphyllov, M., Ferrier, G., 2008, Clarifying stages of alluvial fan evolution along the Sfakian piedmont, southern Crete: New evidence from analysis of postincisive soils and OSL dating: *Geomorphology*, 94(1-2), 206-225. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.05.007>
- Prescott, J.R., Hutton, J.T., 1994, Cosmic ray contributions to dose rates for luminescence and ESR dating: large depths and long-term time variations: *Radiation Measurements*, 23(2-3), 497-500. [https://doi.org/10.1016/1350-4487\(94\)90086-8](https://doi.org/10.1016/1350-4487(94)90086-8)
- Rittenour, T. M., 2008, Luminescence dating of fluvial deposits: applications to geomorphic, palaeoseismic and archaeological

- research: *Boreas*, 37, 613–635. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2008.00056.x>
- Salas, B.C., 2016, Estudio de procesos erosivos y de transporte de sedimentos en el sector medio de la barranca Nexpayantla (Popocatepetl, México): Ciudad de México, UNAM, Tesis licenciatura, 121 p.
- Sanderson, D.C.W., Bishop, P., Stark, P., Alexander, S., Penny, P., 2007, Luminescence dating of canal sediments from Angkor Borei, Mekong Delta, Southern Cambodia: *Quaternary Geochronology*, 2, 322-329. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2006.05.032>
- Sanderson, D.C.W., Murphy, S. (2010). Using simple portable OSL measurements and laboratory characterization to help understand complex and heterogeneous sediment sequences for luminescence dating: *Quaternary Geochronology*, 5, 299-305. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2009.02.001>
- Siebe, C., Abrams, M., Macías, J.L., 1996, Derrumbes gigantes, depósitos de avalancha de escombros y edad del actual cono del volcán Popocatepetl, en Volcán Popocatepetl, Estudios realizados durante la crisis de 1994-1995: Distrito Federal, Sistema Nacional de Protección Civil, Centro Nacional de Prevención de Desastres, UNAM, 195–220.
- Smith, G.A., Lowe, D.R., 1991, Lahars: Volcano-hydrologic events and deposition in the debris flow-hyperconcentrated flow continuum, in Fisher, R. V., Smith, G.A., (eds.) *Sedimentation in volcanic settings*: SEPM Society for Sedimentary Geology, Special Publication, 45, 59–69. <https://doi.org/10.2110/pec.91.45.0059>
- Sosa-Ceballos, G., Macías, J.L., García-Tenorio, F., Layer, P., Schaaf, P., Solís-Pichardo, G., Arce, J.L., 2015, El Ventorrillo, a paleostructure of Popocatepetl volcano: insights from geochronology and geochemistry: *Bulletin of Volcanology*, 77, 2–20. <https://doi.org/10.1007/s00445-015-0975-2>
- Torres, B.C., 2013, Análisis de los cambios en el límite superior del bosque en el volcán Iztaccíhuatl: Ciudad de México, UNAM, Tesis licenciatura, 123 p.
- Valdepeña, D., 2019, Se quedan sin glaciares el Iztaccíhuatl y Popocatepetl: *La Jornada*, 32.
- Vázquez-Selem, L., Heine, K., 2004, Late quaternary of Mexico, en Ehlers, J., Gibbard, P.L. (eds.), *Quaternary glaciations - Extent and chronology, part III: South America, Asia, Africa, Australia, Antarctica*: Amsterdam, Elsevier, 233-242. [https://doi.org/10.1016/S1571-0866\(04\)80129-5](https://doi.org/10.1016/S1571-0866(04)80129-5)
- Vázquez-Selem, L., Lachniet, M.S., 2017, The deglaciation of the mountains of Mexico and Central America: *Geographical Research Letters* 43, 553-570. <https://doi.org/10.18172/cig.3238>
- Wan, Z., Wang, Z., 1994, *Hyperconcentrated flow*: New York, Taylor & Francis, 300 p. <https://doi.org/10.1201/9781003077671>
- Wintle, A.G., 1973, Anomalous fading of thermo-luminescence in mineral samples: *Nature*, 245, 143-144. <https://doi.org/10.1038/245143a0>