

Reconstrucción dendrogeomorfológica de procesos de remoción en masa y lahares en las Barrancas Seca y Ojo Salado, Pico de Orizaba, México

Dendrogeomorphic reconstruction of mass movements and lahars in Barrancas Seca and Ojo Salado, Pico de Orizaba, Mexico

Mireya Vázquez-Ríos* y Osvaldo Franco-Ramos**

Recibido: 09/09/2021. Aprobado: 02/03/2022. Publicado: 31/03/2022.

Resumen. El análisis de los anillos de crecimiento de árboles se ha usado para reconstruir espacial y temporalmente procesos geomorfológicos del pasado reciente en diferentes ambientes. Los árboles, han demostrado ser una fuente confiable de información en sitios de difícil acceso donde los datos son escasos o nulos, como en el caso de varias barrancas volcánicas del centro de México. Esta investigación se realizó en las barrancas Seca y Ojo Salado localizadas al noreste del volcán Pico de Orizaba, donde se analizaron procesos de remoción en masa (deslizamientos y caída de rocas) y lahares a partir de muestras de tres coníferas: *Pinus hartwegii*, *Pinus patula* y *Abies religiosa*. El número de disturbios en los árboles por procesos de remoción en masa fue 29 y los más comunes fueron: cicatrices de impacto (45%) y Filas Tangenciales de Ductos de Resina Traumáticos o TRD (21%). En el caso de los lahares, el total de disturbios fue 70, y los más frecuentes fueron: TRD (61%) y cicatrices de impacto (20%). La reconstrucción de procesos geomorfológicos se realizó de 1983 al 2018 en los sectores A y B. En el sector A se dataron 11 eventos por caída de rocas y en el sector B se identificaron 6 procesos de remoción en masa y 11 lahares. Los datos históricos de huracanes y tormentas tropicales, permitieron identificar los posibles detonadores de los procesos geomorfológicos estudiados. Los resultados obtenidos en esta investigación, aportan información que puede ser relevante para la gestión del Parque Nacional el Pico de Orizaba.

Palabras claves: dendrogeomorfología, caída de rocas, deslizamientos, lahares, Pico de Orizaba.

Abstract. Tree growth ring analysis has been used to spatially and temporally reconstruct geomorphological processes of the recent past in different geomorphic settings. In areas where there is forest, it is common for trees to be damaged by geomorphological processes, and these trees respond by disturbing the growth rings. The analysis of these disturbances provides information on the year of occurrence, dynamics, frequency and distribution of these processes. In such a way that trees are important natural archives and a reliable source of information, especially in places of difficult access where data is scarce or null, as in the case of several volcanic ravines in central Mexico. This research was carried out in the Seca and Ojo Salado ravines located northeast of the Pico de Orizaba volcano, where dendrogeomorphological methods were applied to analyze mass removal processes (landslides, rock falls) and lahars, using *Pinus hartwegii*, *Pinus patula* trees and *religious Abies*. On the other hand, photogrammetric surveys were made in two sectors of the ravine with which high-resolution DEMs were built, which allowed the precise location of the sampled trees and a geomorphological interpretation of the study sites.

* Posgrado en Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México, CU, Coyoacán, 04510 Ciudad de México, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9833-2526>. Email: ayerimvr@gmail.com

** Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México, CU, Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9261-5755>. Email: ayerimvr@gmail.com. Autor de correspondencia

Regarding the results of the work, we identified that the number of disturbances in the trees due to mass removal processes was 29 and the most common were: impact scars (45%) and Tangential Rows of Traumatic Resin Ducts or TRD (21 %). In the case of lahars, the total number of disturbances was 70, and the most frequent were: TRD (61%) and impact scars (20%). The reconstruction of geomorphological processes was carried out from 1983 to 2018. In sector A, located at -2800 masl, a landslide and the frequency of rock falls were analyzed. In sector B, located between 3,410-3,460 masl, slope processes were also studied, although special emphasis was placed on the reconstruction of lahars. In this altitudinal sector, lahars were also analyzed in the Ojo Salado ravine, which is a tributary of the main ravine. In sector A, 11 rockfall events were dated in the years: 1987, 1995, 2002, 2004-2007, 2011, 2014-2016. In sector B, six mass removal processes (1983, 2000-2001, 2003, 2015 and 2017) and 11 lahars (1983, 1988, 1991, 2000-2001, 2003, 2006, 2012, 2014-2015 and 2017) were identified.). All the mass removal events in sector B coincide with the lahars in that same sector. In contrast, only three geomorphological processes coincided between sectors A and B in the years: 2006, 2014 and 2015. In addition, some lahars dated in the Barranca Seca (1983, 1991, 2000 and 2012) were also identified in its tributary the Barranca Salty eye. The results obtained confirmed the potential of *Pinus hartwegii* and *Abies religiosa* to carry out dendrogeomorphological analyses, and for the first time

INTRODUCCIÓN

Los relieves montañosos son áreas de mucha inestabilidad geomorfológica por las pendientes abruptas de sus laderas y, en algunos casos, la escasa vegetación y el fracturamiento de las rocas, lo cual favorece la ocurrencia de procesos de remoción en masa (Ritter *et al.*, 1995; van Beek *et al.*, 2008; García-Ruiz *et al.*, 2017). Dichos procesos consisten en el movimiento del material que forma las laderas bajo la influencia de la gravedad (Brunsden, 1979; Morelli *et al.*, 2019; Brain y Rosser, 2022) y son desencadenados por factores geológicos, climáticos y antrópicos (Selby, 1993; Capra *et al.*, 2003; Juliev *et al.*, 2017). Cuando los grandes volúmenes de sedimentos movilizados de las laderas están conectados a las redes de canales fluviales es común que sean evacuados por procesos hidrogeomorfológicos, como inundaciones y flujos de escombros (lahares en ambientes volcánicos) y finalmente, son depositados en zonas bajas y planas (Wilford *et al.*, 2009; Savi *et al.*, 2013; Quesada-Román *et al.*, 2019).

the potential of *Pinus patula* to study geomorphological processes was tested with satisfactory results, despite the growth problems it presented, since several fake rings. On the other hand, the events dated in this research coincide with the occurrence of other geomorphological processes dated in other volcanoes in central Mexico, which suggests that some of them could be triggered by regional factors such as hydrometeorological phenomena. For example, hurricanes and tropical storms that entered the Mexican territory along the Atlantic Ocean coast were identified as the possible triggers of five events (2005, 2011, 2014, 2012, 2017). In this way we conclude that dendrogeomorphology is a useful method to analyze geomorphological processes in forested areas, which represent a danger for human settlements, since in many cases they are exposed to phenomena controlled by climatic and/or geological forcing. Knowledge about the dynamics of the ravines and the frequency with which the analyzed geomorphological processes occur can contribute to the construction of natural hazard prevention plans in the area, taking into account that some communities such as Cuiyachapa and Cuiyachapa are located a few kilometers away. Tetelzingo. Also, this research can support the management of the Pico de Orizaba National Park and the next updates of the Management Program.

Keywords: dendrogeomorphology, rock falls, landslides, lahars, Pico de Orizaba.

En montañas cubiertas de bosque, existe una constante interacción entre los procesos geomorfológicos y los árboles, estos últimos ejercen una función protectora al frenar el movimiento del material, aunque, al mismo tiempo son afectados (Perret *et al.*, 2006; Clague, 2010; Quesada-Román *et al.*, 2020, 2022). El análisis de los anillos de árboles dañados o muertos por estos procesos aporta información relevante para determinar su origen, dinámica, frecuencia y alcance espacial (Stoffel y Bollschweiler, 2009). De esa manera, los árboles se convierten en importantes archivos naturales que registran las condiciones ambientales en sitios de difícil acceso donde no existen testigos oculares.

Las anomalías de los anillos de crecimiento de árboles se han usado desde los años 1970 (Alestalo, 1971) para la reconstrucción espacial y temporal de procesos geomorfológicos. Posteriormente, la introducción del concepto *proceso-evento-respuesta* por Shroder (1978) sentó las bases del método, donde el *proceso* se refiere a cualquier fenómeno geomorfológico (lahares, procesos de remoción en masa, avalanchas de nieve, etc.), el *evento* tiene

que ver con la afectación que recibe el árbol (impactos, inclinación, sepultamiento, decapitación, etc.) y, por último, la *respuesta* está representada por los disturbios en los patrones de crecimiento de los anillos de árboles, por ejemplo: supresión en crecimiento, realce de crecimiento, madera de compresión, anillos excéntricos, tejidos callosos y filas tangenciales de ductos de resina traumáticos (TRD, por sus siglas en inglés). A partir de tales disturbios, es posible determinar la ocurrencia de un proceso geomorfológico con una precisión anual y a veces estacional (Stoffel y Bollschweiler, 2009).

En distintas partes del mundo, el estudio de los deslizamientos y caída de rocas bajo un enfoque dendrogeomorfológico se ha centrado en el análisis de los disturbios en los anillos de crecimiento de distintas especies de árboles, por ejemplo, Favillier *et al.* (2017), Mainieri *et al.*, (2019), Šilhán, (2021) y Chalupová *et al.*, (2021), los cuales han permitido estudiar la dinámica, frecuencia, distribución y evaluación del peligro. También existe un importante número de publicaciones que estudian los flujos de escombros y lahares utilizando las señales en los anillos de crecimiento de árboles, como en los Estados Unidos de Norteamérica (Pringle *et al.*, 2010; Wilkerson y Schmid 2010), Europa (Bollschweiler *et al.*, 2007; Stoffel *et al.*, 2010a; Tichavský *et al.*, 2017) y Asia (Winchester *et al.*, 2014; Salaorni *et al.*, 2017; Malik *et al.*, 2017).

En México, las investigaciones dendrogeomorfológicas han tomado importancia desde hace una década, y los resultados han demostrado el potencial de diferentes coníferas mexicanas para hacer reconstrucciones de procesos geomorfológicos, como en el norte de Coahuila, México (Sánchez-Asunción *et al.*, 2020). Sin embargo, la mayor parte de los trabajos se han concentrado en ambientes volcánicos del centro del país, en los cuales se ha analizado la actividad lahárica en barrancas de volcanes como el Popocatepetl (Bollschweiler *et al.*, 2010 y Franco Ramos *et al.*, 2016a), el volcán de Colima (Franco-Ramos *et al.*, 2013), el volcán La Malinche (Franco-Ramos *et al.*, 2016b y Franco-Ramos *et al.*, 2019) y el Pico de Orizaba (Franco-Ramos *et al.*, 2020). Además, se ha reconstruido la frecuencia de caída de rocas al norte del volcán Iztaccíhuatl (Stoffel *et al.*, 2011)

y al noroeste del volcán Cofre de Perote (Franco-Ramos *et al.*, 2017b).

Esta investigación también se desarrolló en un ambiente volcánico, en Barranca Seca y en su afluente, la Barranca Ojo Salado, localizadas en la vertiente noreste del volcán Pico de Orizaba. En esta área, el relieve abrupto y el material no consolidado, ha favorecido la ocurrencia de varios procesos geomorfológicos. Así, los objetivos de este trabajo son: i) reconstruir temporal y espacialmente procesos de remoción en masa, en específico deslizamientos y caída de rocas en la Barranca Seca, ii) reconstruir la distribución y frecuencia de lahares en las barrancas Seca y Ojo Salado, y iii) relacionar los procesos geomorfológicos datados, con sus principales detonantes.

ÁREA DE ESTUDIO

Origen y evolución del volcán Pico de Orizaba
El volcán Pico de Orizaba o Citlaltépetl se localiza en el extremo oriental del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM) entre los estados de Puebla y Veracruz (97° 16' O y 19° 02' N) (Rossotti, 2005) (Figura 1). Es un estratovolcán construido sobre rocas calizas y lutitas de edad Cretácica (Yáñez-García y García-Durán, 1982; Carrasco-Núñez *et al.*, 2021). El material que ha emitido es de composición calci-alcalino, desde basaltos a riolitas y cubre un área de ~1,000 km² (Carrasco-Núñez y Gómez-Tuena, 1997; Carrasco-Núñez, 2000). La evolución del Pico de Orizaba, igual que la de otros estratovolcanes, incluye repetidas fases de construcción y destrucción del edificio volcánico principal (Carrasco-Núñez y Gómez-Tuena, 1997) y se pueden distinguir tres periodos eruptivos (Carrasco-Núñez, 2000).

El primer periodo empezó con la construcción del paleo-volcán Torrecillas durante el Pleistoceno medio, cuya actividad estuvo dominada por erupciones efusivas. Este periodo finalizó con el colapso del edificio Torrecillas alrededor de 0.25 Ma. y la formación de una avalancha de escombros en el flanco noreste, denominada Jamapa (Carrasco-Núñez y Rose, 1995). La siguiente etapa inició alrededor de 0.2 Ma. con la formación del paleo-

volcán Espolón de Oro, que estuvo conformado por diferentes secuencias de lava y concluyó hace 16 500 años A.P. con el colapso del volcán, lo que provocó una avalancha de escombros nombrada Tetelzingo (Carrasco-Núñez *et al.*, 2006). Por último, el cono actual, denominado Citlaltépetl, se construyó sobre restos de los volcanes ancestrales hace 16 500 años A.P. Durante la formación de este cono también ocurrieron las tres erupciones explosivas más relevantes del volcán (Carrasco-Núñez y Gómez-Tuena, 1997). La primera, fechada hace aproximadamente 13 000 años A.P. consistió en una secuencia de ignimbritas de composición riolítica (Carrasco-Núñez, 1993; Carrasco-Núñez y Rose, 1995). La siguiente, ocurrida entre 9000 y 8500 años A.P., es el evento explosivo más importante del volcán durante el Holoceno y se conoce como Ignimbrita Citlaltépetl (Carrasco-Núñez y Rose, 1995). Por último, en el año 4100 A.P., la destrucción de un domo central generó una serie de flujos piroclásticos (De-la Cruz Reyna y Carrasco-Núñez, 2002).

En el Holoceno tardío y en la época prehispánica, el Pico de Orizaba presentó erupciones efusivas de lavas dacíticas, formando un cono que fue ganando altura e inclinación con el tiempo (Carrasco-Núñez, 2000; Alcalá-Reygosa *et al.*, 2020). La compleja evolución del Pico de Orizaba ahora le confiere una clara asimetría alcanzando las mayores alturas en su sector oriental (4000 m - 4500 m), mientras que en el occidental no se superan los 3000 m desde su base (Parrilla y Zamorano, 1996).

Lahares en el Pico de Orizaba

La actividad lahárica ha sido recurrente en área del Pico de Orizaba desde el Cuaternario. El colapso del paleo-volcán Torrecillas, hace 0.25 Ma, formó una avalancha de escombros llamada Jamapa que se transformó en un lahar denominado Excola (Hubbard *et al.*, 2007), el cual llegó hasta la costa del Golfo de México como un flujo hiperconcentrado (Carrasco-Núñez *et al.*, 2006). Posteriormente, el derrumbe del paleo-volcán Espolón de Oro también causó una avalancha que rápidamente se transformó en un lahar llamado Tetelzingo, cuyos materiales llegaron a la costa (Carrasco-Núñez *et al.*, 2006).

Asimismo, en el valle Metlac al sureste del volcán Pico de Orizaba, se identificó una pequeña terraza del lahar Fortín, cerca de la ciudad suburbana Fortín de las Flores (Hubbard *et al.*, 2007). Este lahar se formó a partir del depósito de una avalancha de escombros que aún no se ha fechado, sin embargo, las evidencias de erosión indican que se trata de un depósito relativamente antiguo (Carrasco-Núñez *et al.*, 2006).

Recientemente, en la Barranca Jamapa, ubicada al norte del edificio volcánico principal, Figueroa-García *et al.* (2021) llevaron a cabo una reconstrucción espacial y temporal de lahares, a partir de disturbios en los anillos de árboles, los lahares que identificó ocurrieron en 1931, 1960, 1968, 1975, 1999, 2012, 2014 y 2016. Además, con ayuda del software RAMMS (Rapid Mass Movement Simulation), se realizó el modelado de los flujos que impactaron los árboles y se calibraron los volúmenes obtenidos con paleo-indicadores *PSI* (altura de la cicatriz de impacto).

Condiciones bio-físicas de la Barranca Seca

La Barranca Seca se localiza al noreste del Pico de Orizaba, y nace en el cono del volcán a ~5000 msnm (Figura 1). Se desarrolló en los productos volcánicos del Cuaternario correspondientes a los tres periodos eruptivos del volcán. Bordea al sur el Complejo de domos Chichimecos, por lo que su ladera norte está compuesta por la estructura de estos domos y sus flujos de lava. La ladera sur de la barranca está formada por una secuencia de flujos de lava pertenecientes al Torrecillas, al Espolón de Oro y al Citlaltépetl. En el sector de menor altitud de la barranca, aflora el basamento de rocas calizas y lutitas cretácicas en el fondo y en las laderas de la barranca (Carrasco-Núñez, 2000; Macías, 2005).

La presencia de materiales no consolidados en el flanco norte del volcán, como depósitos morrénicos y depósitos piroclásticos, sumado a la fuerte inclinación de las laderas y a las lluvias torrenciales que se presentan en la zona, sobre todo en la temporada de huracanes, ha favorecido la ocurrencia de lahares y procesos de remoción en masa a lo largo de la Barranca Seca y su afluente, la Barranca Ojo Salado. En la zona es posible reconocer formas del relieve asociadas a estos procesos geomorfológicos,

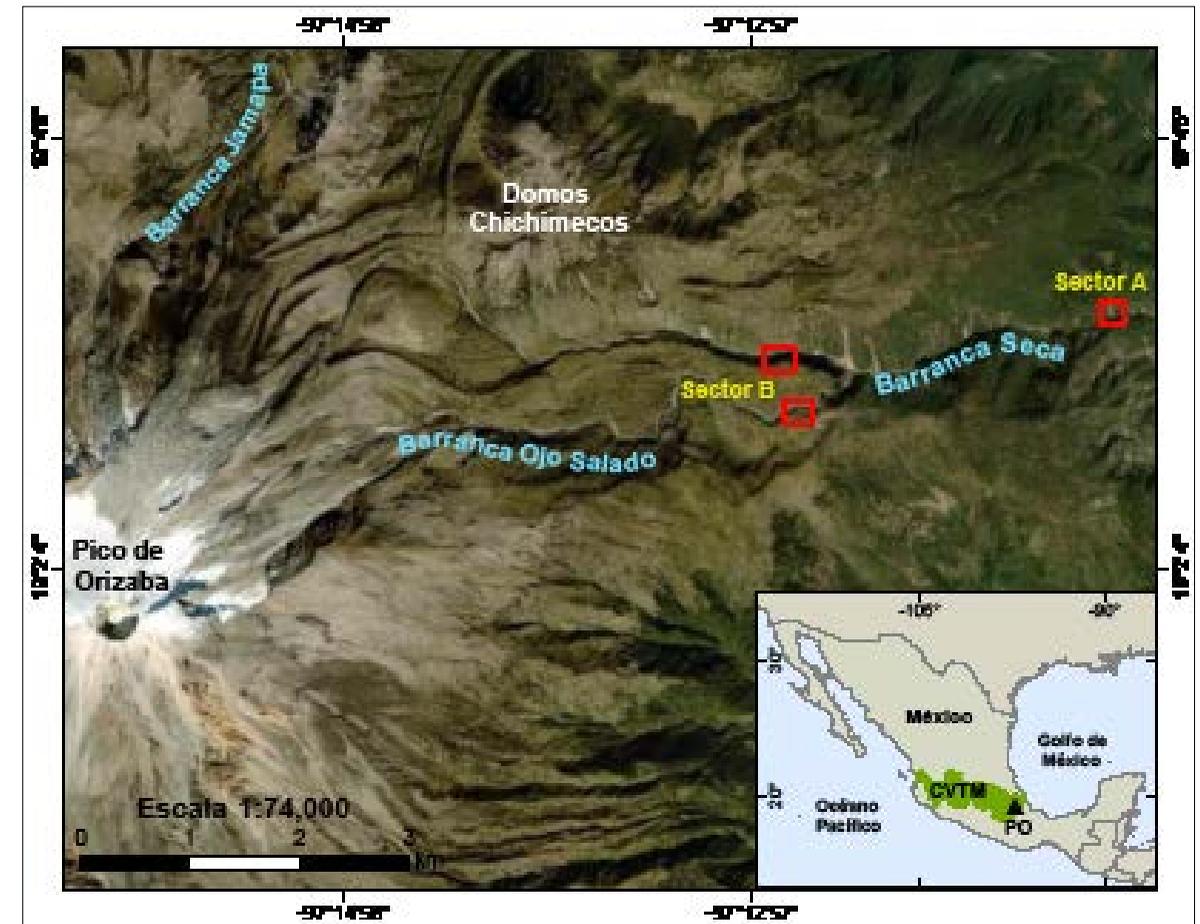


Figura 1. El volcán Pico de Orizaba (PO) forma parte del CVTM y se localiza en la porción oriental. La Barranca Seca y su afluente, la Barranca Ojo Salado se ubican al noreste del Pico de Orizaba. Los recuadros en rojo indican los sitios de estudio, en dos sectores altitudinales de la barranca.

cos, como terrazas, coronas de desprendimiento y lóbulos (Figura 2). Con frecuencia el paso de dichos procesos ha dejado diferentes daños en el bosque.

La distribución de la vegetación en la Barranca Seca depende principalmente de la altitud. En la zona, se desarrollan bosques de *Abies* sp., *Pinus* sp., *Quercus* sp., *Alnus* sp. y *Juniperus* sp. (Cisneros, 1981; Ávila y López-Mata, 2001; Rzedowski, 2006). Estas comunidades se presentan como masas mixtas y se extienden entre 2000 y 4000 msnm. Algunas especies han demostrado tener potencial para hacer reconstrucciones dendrogeomorfológicas en anteriores investigaciones como *Pinus hartwegii* (Bollschweiler *et al.*, 2010; Franco-Ramos *et al.*,

2017b; Figueroa-García *et al.*, 2021), *Abies religiosa* (Franco-Ramos *et al.*, 2016a y b; Franco-Ramos *et al.*, 2019) y *Pinus ayacahuite* (Bollschweiler *et al.*, 2010).

En la vertiente oriental del Pico de Orizaba, sector en el que se ubica la zona de estudio, el clima varía de templado subhúmedo a semifrío en función del gradiente altitudinal (SEMARNAT, 2015). Las precipitaciones se presentan en verano, aunque se pueden extender hasta otoño, dependiendo de los ciclones tropicales. En la estación climatológica Coscomatepec, que es la más cercana a la Barranca Seca, en esos meses se reportan de 318 mm (agosto) a 371 mm (junio) de lluvia promedio mensual, esos valores son muy similares a los que



Figura 2. A) Barranca Seca en el sector B, donde es posible observar procesos de remoción en masa y en el fondo del canal, material movilizado por lahares. B) Barranca Ojo Salado, en la foto se aprecian dos terrazas laháricas, una a cada lado del canal.

registran las estaciones Huatusco e Ixhuatlán del Café (CONAGUA-SMN, 2021a). En muchos casos, las lluvias torrenciales se relacionan con huracanes que se desarrollan en el golfo de México y que aportan mucha humedad a la zona de estudio (SEMARNAT, 2015).

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio de procesos geomorfológicos se realizó en dos sectores de la Barranca Seca. En el sector A, ubicado a ~2800 msnm, se analizó un deslizamiento y la frecuencia de caída de rocas. En el sector B, localizado entre 3410-3460 msnm, también se estudiaron procesos de ladera, aunque se puso especial énfasis en la reconstrucción de lahares. En este sector altitudinal también se analizaron lahares en la Barranca Ojo Salado.

Trabajo de campo

El trabajo de campo se realizó en dos salidas, una en abril y la segunda en diciembre de 2018. Consistió en la colecta de muestras (núcleos de extracción, cuñas y rodajas) con ayuda de barrenos de extracción tipo Pressler de 5 mm de diámetro y una motosierra. Se tomaron muestras de árboles

con señales de afectación por procesos geomorfológicos (cicatrices de impacto, inclinación del tronco y sepultamiento) y de árboles sin disturbios aparentes para la elaboración de una cronología de referencia local, todo esto, siguiendo los protocolos de Stoffel y Bollschweiler (2008) y Stoffel *et al.* (2010b).

El número de árboles muestreados fue 61, de tres especies de coníferas. Para analizar procesos de remoción en masa se tomaron muestras de 10 árboles de *Pinus patula*, 2 de *Pinus hartwegii* y 4 de *Abies religiosa*. En el caso de los lahares se muestrearon 13 árboles de *Pinus hartwegii* y 3 de *Abies religiosa*. Para realizar las cronologías de referencia se utilizaron 6 árboles de *Pinus patula*, 8 de *Pinus hartwegii* y 15 de *Abies religiosa* (Tabla 1).

Durante el trabajo en campo, también se hicieron dos levantamientos fotogramétricos sobre los sitios de muestreo con un dron Mavic Pro Platinum y con la aplicación Pix4DCapture. En el sector A (~2800 msnm), el vuelo se realizó sobre un deslizamiento, con una altura de 80 m y las imágenes se tomaron de manera oblicua. En el sector B (3410-3460 msnm), el vuelo se realizó sobre el frente de un flujo de lava, con una altura de 100 m y la toma de las imágenes fue cenital.

Tabla 1. Colecta de muestras en campo.

	Especie	No. árboles	Núcleos	Cuñas	Secciones transversales
Deslizamientos y caída de rocas	<i>Pinus patula</i>	10	20	2	3
	<i>Pinus hartwegii</i>	2	-	-	5
	<i>Abies religiosa</i>	4	8	-	-
Lahares	<i>Pinus hartwegii</i>	13	11	8	-
	<i>Abies religiosa</i>	3	5	1	-
Cronología de referencia	<i>Pinus patula</i>	6	11	1	3
	<i>Pinus hartwegii</i>	8	15	-	-
	<i>Abies religiosa</i>	15	24	-	-

Análisis de laboratorio

En el laboratorio, la preparación de las muestras y el análisis se realizó de acuerdo con las técnicas propuestas por Bräker (2002), Stoffel y Bollschweiler (2008). Los pasos incluyeron el lijado de las muestras para resaltar los anillos de crecimiento, el pre-fechado a partir de Skeleton plot, y posteriormente, la medición del ancho de los anillos con un sistema de medición Velmex (Robinson y Evans, 1980) y un micrómetro de precisión 0.001 mm, conectado a una platina deslizante y a una computadora con el programa TSAP-Win (Rinn, 2003) instalado. Para la validación del fechado del conjunto de muestras se utilizó el programa COFECHA (Holmes, 1983), el cual permite conocer la intercorrelación estadística entre las series de ancho total de anillo y con ello validar que el fechado haya sido correcto; el valor de intercorrelación mínimo que se utiliza como parámetro de referencia es 0.32 ($P < 0,01$).

Después se identificaron las anomalías de crecimiento de los individuos afectados por procesos geomorfológicos y se elaboró a manera de inventario una tabla de eventos dendrogeomorfológicos, donde se consideró el tipo de disturbio, la intensidad y el año de evento por cada muestra. La intensidad de los disturbios se definió en cinco niveles de acuerdo con los criterios de Stoffel y Corona (2014). La tabla de eventos dendrogeomorfológicos se exportó a un Sistema de Información Geográfica (ArcMap 10.1), para caracterizar la distribución espacial y temporal de los eventos geomorfológicos reconstruidos. Por

último, para validar las reconstrucciones de los eventos geomorfológicos anuales o sub-anuales, se compararon con datos de precipitación de tres estaciones climatológicas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (Coscomatepec, Huatusco e Ixhuatlán del Café) y con la base de datos de huracanes de la CONAGUA.

Por otra parte, el procesamiento de las imágenes obtenidas de los levantamientos fotogramétricos se realizó en el software Agisoft PhotoScan Profesional, con el que se generó un Modelo Digital de Elevación (MDE) y un ortomosaico de cada vuelo. La resolución del MDE que corresponde al sector A fue de 4.85 cm/píxel, mientras que el MDE del sector B tuvo una resolución de 8.61 cm/píxel. Estos materiales, permitieron identificar las formas de relieve asociadas a procesos geomorfológicos, así como ubicar de manera precisa los árboles muestreados.

RESULTADOS

Dendrocronología

A partir de las coníferas analizadas se elaboraron tres cronologías de referencia, correspondientes a cada una de las especies y cuya validación del fechado se realizó con el software COFECHA. La cronología de *Pinus patula* abarcó de 1976 a 2017, se construyó con 15 series y se obtuvo una correlación de 0.452 ($P < 0,01$). En el caso de *Pinus hartwegii* la cronología cubrió de 1951 a 2018, y también se usaron 15 series que tuvieron una

correlación de 0.509 ($P < 0,01$). Por último, la cronología de *Abies religiosa* abarcó de 1956 a 2018, se construyó a partir de 24 series que obtuvieron una correlación de 0.626 ($P < 0,01$). Los valores de intercorrelación del mínimo de significancia que establece COFECHA es 0.32 ($P < 0,01$), de modo que el fechado de las tres cronologías es correcto.

Posteriormente, las series de crecimiento de las tres coníferas se trataron con ayuda del programa ARSTAN para eliminar las tendencias de la edad (anillos internos anchos y anillos externos estrechos) y maximizar la señal climática. El resultado de este proceso fue la obtención de gráficas del Índice de Ancho de Anillo (IAA) para cada especie (Figura 3). Los años por arriba de la media (valor 1) se asocian a periodos húmedos, mientras que aquellos por debajo de la media pueden representar temporadas de sequía. Así, los periodos húmedos son: 1957-1960, 1981-1986 y 2015-2018, mientras que los periodos secos abarcan 1955-1958, 1970-1977, 1998-2004 y 2013-2015. Estas series estandarizadas también fueron de utilidad como curvas de referencia para descartar las variaciones en el ancho de los anillos provocados por anomalías climáticas y con ello determinar los disturbios por procesos geomorfológicos.

En general, el comportamiento de las tres curvas del IAA sigue un patrón similar. Esto sugiere que los árboles de una región responden a las condiciones ambientales de manera semejante aun cuando no son de la misma especie. No obstante, es preciso indicar que las curvas de *Pinus hartwegii* y *Abies religiosa*, que tuvieron los valores más altos de

correlación en COFECHA (0.509 y 0.626, respectivamente), son las que presentan un patrón mejor definido. Es posible que la diferencia con el IAA de *Pinus patula* se deba a los problemas de crecimiento de esta conífera, ya que presentó un importante número de anillos falsos y a que algunas muestras tenían disturbios asociados a caída de rocas.

Dendrogeomorfología

El registro de los disturbios o señales en los anillos de crecimiento empezó en 1956, no obstante, debido a que su intensidad era baja y a que no había suficiente evidencia para asociarlos a algún proceso geomorfológico, la reconstrucción de los procesos geomorfológicos se realizó desde 1983 hasta el 2018.

El número total de disturbios asociados a procesos de remoción en masa y a lahares en las barrancas Seca y Ojo salado fueron 99, de los cuales los TRD y las cicatrices de impacto tuvieron mayor presencia. Los disturbios asociados a procesos de remoción en masa fueron 29 y los principales fueron cicatrices de impacto (45%) y TRD (21%). En el caso de los lahares, el número total de disturbios fue 70, y los más frecuentes fueron: TRD (61%) y cicatrices de impacto (20%) (Tabla 2).

Distribución y frecuencia de procesos de remoción en masa

La fuerte inclinación de las laderas ($>45^\circ$) en la Barranca Seca ha favorecido la ocurrencia de procesos de remoción en masa en esta zona. En los dos sectores altitudinales que se estudiaron existe

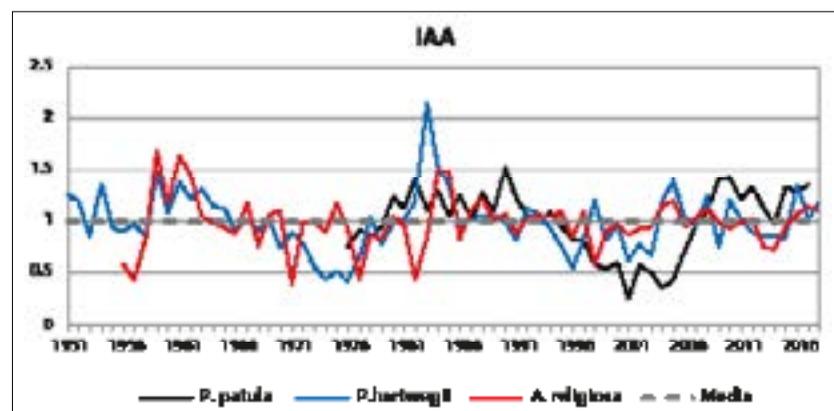


Figura 3. Comparación del Índice de Ancho de Anillo o IAA de las tres especies de coníferas utilizadas para hacer referencias dendrocronológicas y/o reconstrucciones dendroclimáticas.

Tabla 2. Disturbios en los anillos de árboles asociados a procesos de remoción en masa y a lahares.

	Procesos de Remoción en Masa		Lahares		Total	
	Número	Porcentaje	Número	Porcentaje	Número	Porcentaje
Cicatrices de impacto	13	45	14	20	27	27.3
TRD	6	21	43	61	49	49.5
Crecimiento excéntrico	3	10			3	3.0
Madera de compresión	3	10			3	3.0
Crecimiento suprimido	2	7	4	6	6	6.1
Realce de crecimiento	1	3	9	13	10	10.1
Tejido calloso	1	3			1	1.0
Total	29	100	70	100	99	100

evidencia geomorfológica y daños visibles en los árboles asociados a estos procesos geomorfológicos. En sector A (~2,800 msnm) se analizó un deslizamiento rotacional ubicado en la ladera norte de la barranca. La edad de los árboles que crecieron sobre el depósito después del evento permitió definir una edad mínima para el deslizamiento. Con el fin de obtener un dato más preciso sobre la edad de los árboles, y como consecuencia del relieve, se calibraron los árboles localizados sobre este depósito para corregir los anillos faltantes en las muestras. Así, el árbol más longevo tiene una edad de 57 años (1960 el anillo más interno), de modo que la edad mínima para este deslizamiento se estima durante esos años y se asume que el material del depósito alcanzó un periodo de estabilidad a partir 1960, lo que permitió el crecimiento de la vegetación (Figura 4).

Además, los árboles localizados en este depósito registraron disturbios por caídas de rocas debido al retroceso de la corona del deslizamiento. El sector más activo del depósito es el oriental (Figura 4). Los árboles ubicados en esa porción registran el mayor número de eventos por caída de roca y en algunos casos coinciden con los eventos que se presentan en árboles de otros sectores del depósito. Los eventos que destacan por el número de árboles que los registran y el número de disturbios que presentan son 1995, 2002, 2011 y 2014.

Por otro lado, en el sector B (3410-3460 msnm) se localizaron árboles afectados por procesos de

remoción en masa en la ladera sur de la Barranca Seca (Figura 5). En la porción occidental del mapa se ubican dos árboles que presentaban tejidos callosos y TRD en sus anillos de crecimiento, tales disturbios generalmente se asocian a impactos y, en este caso, el contexto geomorfológico en el que se encontraban los árboles indica que dichos impactos fueron causados por la caída de rocas. Los disturbios en los anillos indican que estos procesos ocurrieron en 1983, 2000, 2001 y 2015.

En la porción oriental del mapa (Figura 5) se identificó un deslizamiento traslacional, que presenta una morfología bien definida y escasa vegetación arbórea, por lo que se sugiere que se trata de un proceso reciente; esta suposición se confirma con la edad de los árboles muestreados sobre el depósito, que va de 6 a 31 años. El material del depósito permanece inestable, lo que ha favorecido posteriores movimientos de menor dimensión que impactaron, sepultaron e inclinaron pequeños renuevos de *Pinus hartwegii* que crecieron sobre el depósito del deslizamiento. Los disturbios en los anillos de árboles indican que el movimiento de material del depósito ocurrió en 2000, 2001, 2003, y el más reciente en el 2017.

Distribución y frecuencia de lahares

En el segundo sector B (3410-3460 msnm) se colectaron muestras de árboles con disturbios localizados cerca de cauce de la Barranca Seca y de la

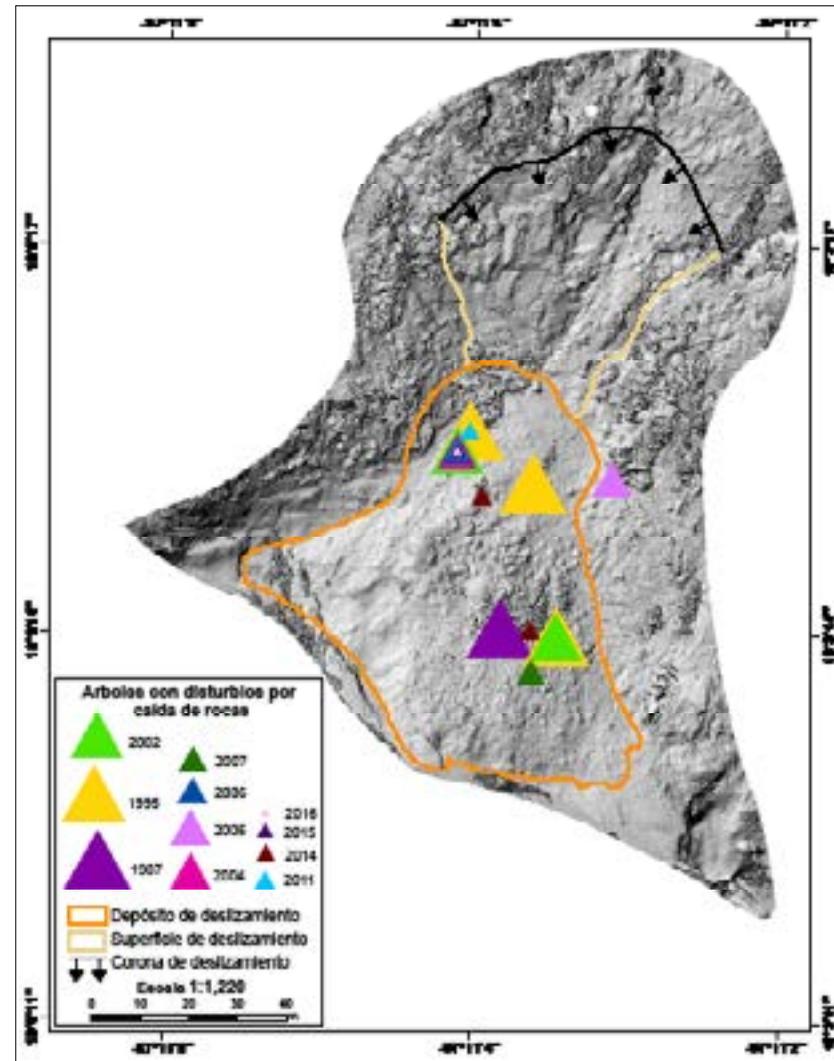


Figura 4. Distribución y frecuencia de la caída de rocas en el depósito de un deslizamiento localizado a ~2,800 msnm en la Barranca Seca. Los triángulos indican la ubicación de los árboles afectados, y el tamaño de las figuras está en función de la antigüedad de los eventos, mientras más antiguo más grande. La obtención de las fotos con el dron fue oblicua, por lo que las coordenadas del modelo sombreado son aproximadas.

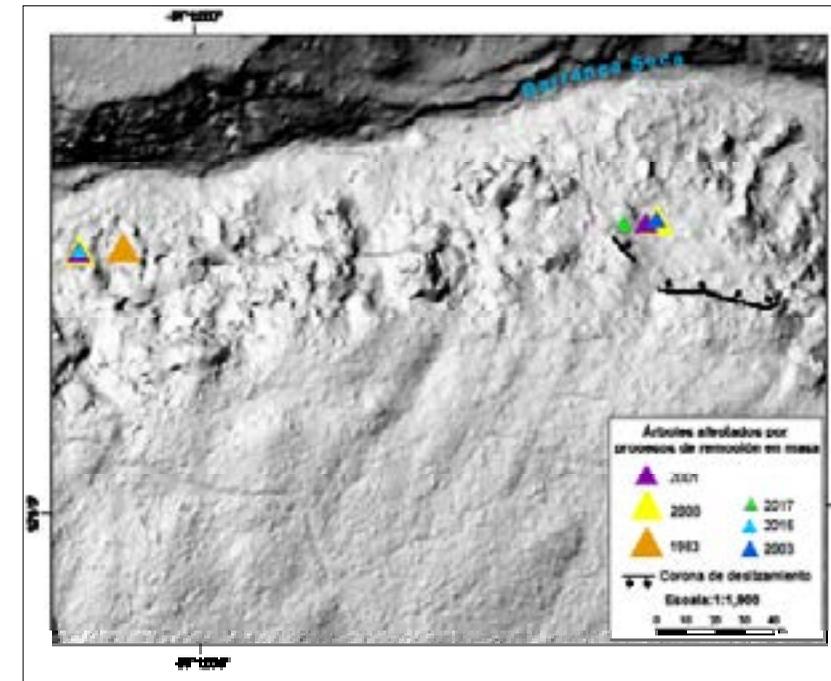


Figura 5. Distribución y frecuencia de procesos de ladera, en el sector B de la Barranca Seca. En la porción occidental, se encuentran árboles afectados por caída de rocas. En porción oriental, se identificaron árboles sobre el depósito de un deslizamiento que fueron afectados por posteriores movimientos del material del depósito.

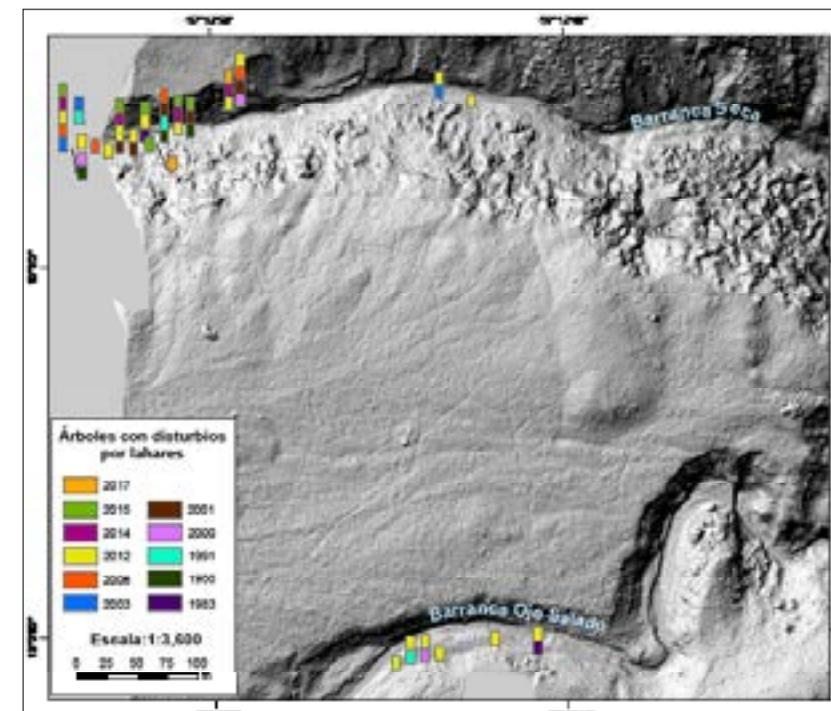


Figura 6. Distribución de árboles afectados por lahares en las barrancas Seca y Ojo Salado entre 3,410-3,460 msnm. Las barras indican la ubicación de los árboles afectados por estos procesos.

Barranca Ojo Salado con la finalidad de reconstruir lahares (Figura 6). Los eventos más importantes asociados a lahares por su distribución espacial son 1983, 1991, 2000, 2012. Estos eventos se identificaron en árboles de ambas barrancas. Otros eventos importantes por el número de árboles que los registraron y por el número de disturbios que generaron en los anillos de crecimiento son 2001, 2003, 2012, 2014 y 2015. El 2012 es el que más destaca, tanto por su distribución espacial como por el número de disturbios que generó (28), los principales asociados a este evento fueron cicatrices de impacto y reales de crecimiento.

En ambas barrancas se observa que los árboles afectados por lahares se restringen a ciertos sectores. Esto se debe a que hay zonas en donde los árboles no están cerca de los cauces y, por tanto, no están al alcance de los flujos. Sin embargo, eso no significa que los lahares no hayan tenido mayor distribución espacial.

Por otro lado, se hizo una comparación entre la ocurrencia de procesos de remoción en masa y lahares para analizar la conexión temporal que existe entre estos procesos y se encontró que los años que tienen mayor coincidencia son: 1983, 2000, 2001, 2003, 2006, 2014, 2015, 2017. Es

importante resaltar que, si bien es posible observar cierta relación entre las tres reconstrucciones, es evidente que existe mayor vínculo entre los eventos

asociados a lahares y procesos de remoción en masa que se localizan en la misma posición altitudinal (sector B) de la barranca (Figura 7).

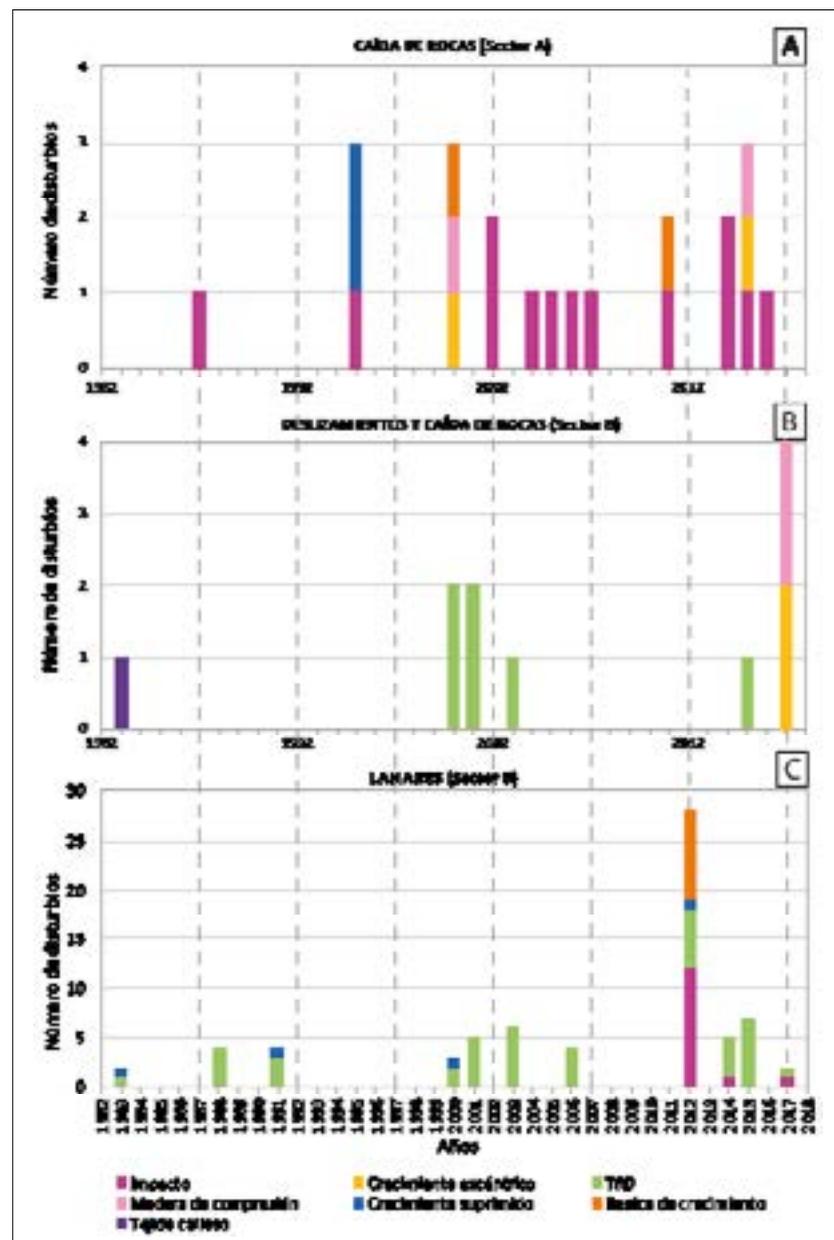


Figura 7. Reconstrucción temporal de procesos geomorfológicos en las barrancas Seca y Ojo Salado en dos niveles altitudinales.

potencial de *Pinus patula* para este fin. Los resultados obtenidos en esta investigación muestran que esta especie también es útil para analizar procesos geomorfológicos.

La anatomía propia de cada especie condiciona el crecimiento de los anillos de árboles, sin embargo, la comparación del IAA de las tres coníferas permitió identificar un patrón general entre las series. Eso fue importante, porque proporcionó una cronología de referencia de cada especie que ayudó a fechar las muestras de árboles con disturbios y también fue una base de la reconstrucción de procesos geomorfológicos, ya que permite asociar los disturbios causados por estos procesos en los anillos de árboles, con años de mayor precipitación, que puede ser un desencadenante.

Por otra parte, las actividades antrópicas, como la tala clandestina de árboles o los incendios en la zona de estudio, pudieron haber eliminado a los árboles longevos, por lo que las cronologías de las tres especies son cortas, la más extensa es la de *Pinus hartwegii* que abarca 68 años, desde 1951 hasta el 2018. Esta situación representó una limitante para esta investigación, porque se descartaron árboles que pudieron contener información ambiental valiosa de la zona.

Relación entre los procesos geomorfológicos, fenómenos hidro-meteorológicos y disturbios en los anillos de crecimiento

A partir del análisis dendrogeomorfológico se determinó que las cicatrices de impacto fueron los disturbios más comunes asociados a procesos de remoción en masa, principalmente caída de rocas, con 45%. En trabajos previos en los Alpes franceses, también se encontró que la respuesta más frecuente por caída de rocas son las cicatrices de impacto (Favillier et al., 2017; Mainieri et al., 2019). Respecto a los deslizamientos, investigaciones del centro de Europa (Šilhán, 2021; Chalupová et al., 2021) demostraron que los anillos excéntricos y la madera de reacción son las respuestas más evidentes en los anillos de árboles. En este trabajo, algunas muestras ubicadas en el sector B, presentaron esos disturbios al ser inclinados por el peso del material movilizado ladera abajo. En cuanto a los lahares, Salaorni et al. (2017) encontraron que el disturbio

más común en *Larix cajanderi*, fueron los TRD (37%). Valores similares reportaron Bollschweiler et al. (2007) con flujos de escombros, donde la anomalía más frecuente en *Larix decidua* Mill. y *Picea abies* (L.) Karst, fueron los TRD (36%). En esta investigación, también destaca la presencia de TRD, pero únicamente en los árboles de *Abies religiosa*, con 61% del total.

Los procesos geomorfológicos estudiados pueden tener diferentes detonantes, dependiendo del contexto físico en donde ocurran, no obstante, destacan las lluvias torrenciales como una de las principales causas, como lo demuestra Tichavský et al. (2017) y Chalupová et al. (2021). Sin embargo, otro factor detonante de los lahares suele ser el aporte súbito de agua por el derretimiento de glaciares (Salaorni et al., 2017), o los sismos en el caso de deslizamientos y caída de rocas (Stoffel et al., 2019).

El conocimiento de que los anillos de crecimiento de algunas coníferas del centro de México se pueden formar en dos etapas, de manera aproximada la madera temprana se forma de marzo-mayo y la madera tardía de junio-octubre (Franco-Ramos et al., 2016a), hace posible que las reconstrucciones dendrogeomorfológicas tengan una resolución subanual y con ello identificar los posibles detonantes de los procesos geomorfológicos. En este trabajo, el 52.6% de los disturbios se identificaron en la madera temprana, mientras que el 47.4%, se encontraron en la madera tardía.

Algunos de los eventos registrados en los anillos de los árboles (2005, 2011, 2014, 2012, 2017), coinciden con huracanes y tormentas tropicales que llegaron al territorio mexicano por la costa del océano Atlántico. Los eventos reconstruidos se pudieron comparar con los datos de precipitación de las estaciones climatológicas más cercanas al sitio de estudio (Coscomatepec, Huatusco e Ixhuatlán del Café),

En el 2005, la tormenta tropical “José” arribó a Veracruz entre el 22 y el 23 de agosto. La estación Coscomatepec registró un aumento en la precipitación en esos días, con 116 mm acumulados en 3 días. Poco después, el huracán “Katrina” pasó cerca del territorio veracruzano provocando precipitaciones que se registraron en la misma estación, con un

DISCUSIÓN

Series dendrocronológicas y IAA

Las cronologías de referencia corroboran el potencial dendrocronológico de las tres coníferas analizadas a pesar de los problemas de crecimiento que presentaron, como anillos perdidos en el caso de *Pinus hartwegii* y anillos falsos en *Pinus patula*;

la especie con menos anomalías de crecimiento fue *Abies religiosa*. En trabajos previos se habían utilizado muestras de *Pinus hartwegii* (Bollschweiler et al., 2010; Franco-Ramos et al., 2017b; Figueroa-García et al., 2021) y *Abies religiosa* (Franco-Ramos et al., 2016a y b; Franco-Ramos et al., 2019) en reconstrucciones dendrogeomorfológicas con buenos resultados, pero, no se había probado el

total 101 mm del 29 al 31 de agosto (CONAGUA-SMN, 2021a y b). Las muestras que registran el evento del 2005 presentan el disturbio en la madera tardía, por tanto, es posible que dichos fenómenos hidrometeorológicos causaran este evento.

En el 2011, dos tormentas tropicales que llegaron al territorio de México por el Atlántico generaron importantes precipitaciones en el área de estudio. La primera, llamada “Arlene”, se formó los últimos días de junio. Durante la inestabilidad, aumentó notablemente la precipitación con registros de 160 mm en 1 día, en la estación Huatusco y 115 mm en Ixhuatlán del Café. La segunda tormenta, llamada “Harvey” se desarrolló del 18 al 22 de agosto y causó fuertes precipitaciones, en la estación Ixhuatlán del Café se reportaron 108 mm acumulados en 2 días (CONAGUA-SMN, 2021a y b). La posición del disturbio en el anillo del 2011 también coincide con la temporada de huracanes.

El huracán “Ernesto” llegó a territorio mexicano con categoría I en agosto del 2012 provocando fuertes lluvias en el centro y sur del país (CONAGUA-SMN, 2021b). La estación climatológica Ixhuatlán del Café registró precipitaciones de 132 mm el día 9 de ese mes y en la estación Huatusco 133 mm el mismo día (CONAGUA-SMN, 2021a). Se identificaron 12 muestras que registraron este evento y presentan cicatrices de impacto en la madera tardía (Figura 8). Por lo tanto, es muy probable que el lahar del 2012 lo causaran las in-

tensas lluvias que trajo el huracán Ernesto ocurrido del 1 al 10 de agosto. Sin embargo, no se descarta que el agua generada por la fusión parcial de la base del glaciar de Jamapa y el aporte de material morrénico, haya favorecido la ocurrencia de este evento (Sieron *et al.*, 2021).

La tormenta tropical “Hanna” comenzó a formarse en la frontera sur de Veracruz el 19 de octubre del 2014, lo que causó fuertes precipitaciones en esa zona. La estación Huatusco registró un total de 114 mm en 2 días durante la inestabilidad (CONAGUA-SMN, 2021a y b). Se identificaron 4 muestras que presentaron disturbios en la madera tardía del 2014 (Figura 9).

La posición de los disturbios en el anillo del 2017 de las muestras coincide con la temporada de huracanes de ese año (Figura 9). En agosto del 2017 el arribo del huracán “Franklin”, de categoría I, incrementó la precipitación en la región y en la estación Ixhuatlán del Café se registraron 54 mm en 1 día. Posteriormente, en septiembre del mismo año entró a Tecolutla, Veracruz el huracán “Katia” de categoría II, que generó precipitaciones de 96 mm en 3 días en la estación Ixhuatlán del Café (CONAGUA-SMN, 2021a y b).

Los eventos reconstruidos en la Barranca Seca (1983, 1987, 1991, 1995, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2011, 2012, 2014, 2016 y 2017) asociados a procesos de remoción en masa y lahares, coincide con los resultados obteni-

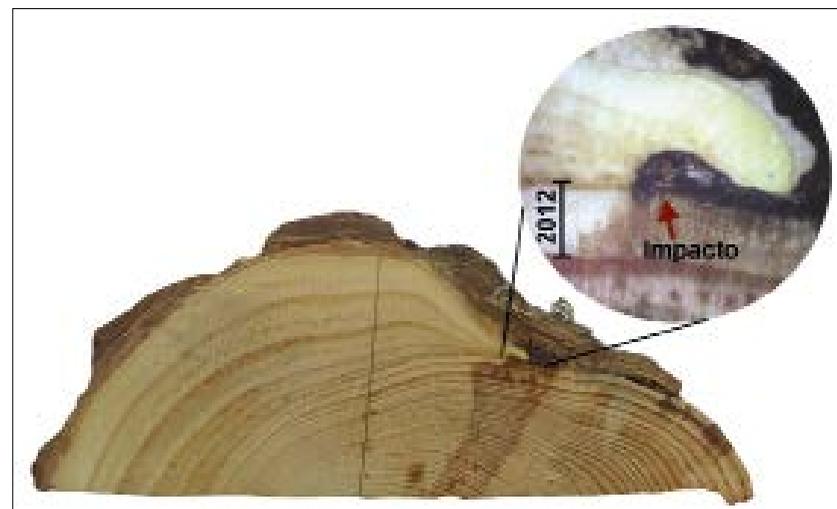


Figura 8. Muestra de Pinus hartwegii en la Barranca Seca con una cicatriz de impacto por el lahar de 2012. Nótese que el disturbio se encuentra en la madera tardía de ese año.



Figura 9. Muestras de árboles que registraron los eventos del 2014 y 2017. (A) Cuña de Pinus hartwegii con impacto por lahar en la madera tardía del 2014 y 2017. (B) Sección transversal de un árbol de Pinus hartwegii que presenta una cicatriz de impacto por un deslizamiento en la madera tardía del 2017. El material que impactó el árbol también lo inclinó, por lo que el año siguiente se generó un anillo excéntrico y madera de compresión.

dos en otros volcanes del centro-este del CVTM (Tabla 3).

Los eventos reconstruidos en la Barranca Seca que más se repite en otros volcanes son: 2000, 2001, 2005 y 2012. Los tres primeros se reportaron en las barrancas del volcán La Malinche (Franco-

Ramos *et al.*, 2019 y Franco-Ramos *et al.*, 2016b), en el Rodadero (Stoffel *et al.*, 2011) y en la Barranca Nexpayantla (Franco Ramos *et al.*, 2016a). Al evento del 2001 se suma la Barranca Huiloac (Franco-Ramos *et al.*, 2017a) y al 2005 el valle La Teta (Franco-Ramos *et al.*, 2017b). Asimismo, el

Tabla 3. Relación entre eventos reconstruidos en la Barranca Seca y Ojo Salado del Pico de Orizaba versus los reportados en otros volcanes del centro de México con base en métodos dendrogeomorfológicos.

	1987	1988	1991	1995	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2011	2012	2014	2015	2016	2017
Iztaccíhuatl (El Rodadero) Stoffel et al. (2011)	*	*	*	*	*	*	*			*								
Popocatepetl (Nexpayantla) Franco Ramos et al. (2016a)	*	*		*	*	*		*		*				*				
La Malinche (Axaltzintle) Franco-Ramos et al. (2016b)					*	*		*		*			*					
Popocatepetl (Huiloac) Franco-Ramos et al. (2017a)	*					*												
Cofre de Perote (La Teta) Franco-Ramos, et al. (2017b)				*	*					*			*					
Iztaccíhuatl (Alcalican) Prado-Lallande (2017)															*			

Tabla 3. Continúa.

	1987	1988	1991	1995	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2011	2012	2014	2015	2016	2017
La Malinche (Axal)	*	*		*	*	*		*		*		*		*		*		
Franco-Ramos et al. (2019)																		
Pico de Orizaba (Jamapa)														*	*		*	
Figueroa-García et al. (2021)																		
Barranca Seca (Este estudio)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Barranca Ojo Salado (Este estudio)	*		*		*									*				

evento del 2012 se registra en cuatro barrancas, Alcalican (Prado-Lallande, 2017), Nexpayantla, Axal y Jamapa (Figueroa-García et al., 2021). Otros eventos importantes, son 1983, 1988, 1995 y 2003, estos eventos se reportan en tres barrancas, aunque no necesariamente en las mismas. Los únicos eventos de la Barranca Seca que no coinciden con ningún otro son el 2004 y el 2006.

El análisis de la frecuencia de procesos de remoción en masa y lahares en diferentes volcanes del centro de México sugiere que los procesos geomorfológicos no sólo fueron detonados por factores locales, sino por factores de alcance regional como lluvias torrenciales causadas por fenómenos hidrometeorológicos (huracanes y tormentas tropicales).

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos se puede decir que los disturbios en los anillos de crecimiento de árboles permiten realizar reconstrucciones espaciales y temporales de procesos geomorfológicos, lo que demuestra que la dendrogeomorfología es un método de fechamiento útil. Además, la precisión estacional de los resultados o *proxys* permite que los eventos se conecten con los posibles detonantes. No obstante, como cualquier método de fechamiento, presenta ciertas limitantes, como la ausencia de árboles con potencial dendrocronológico y el difícil acceso a ciertas zonas, lo que restringe el muestreo.

Por otra parte, la combinación de la dendrogeomorfología y la fotogrametría con drones fortaleció la interpretación de los resultados, ya que los dos MDE de alta resolución de la barranca que se construyeron, permitieron localizar de manera precisa los árboles muestreados, además de reconocer las unidades geomorfológicas sobre las que se ubicaban y los procesos geomorfológicos a los que estaban expuestos.

La información que aporta este trabajo puede ser útil para las futuras actualizaciones del Programa de Manejo del Parque Nacional El Pico de Orizaba, así como para los planes de evaluación de peligros naturales, ya que a pocos kilómetros se encuentran algunas comunidades como Cuiyachapa, El Aseradero y Tetelzingo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento realizado por el proyecto DGAPA-PAPIIT, UNAM con clave IA100619. Además, hacemos un reconocimiento especial a José Ernesto Figueroa, Salvador Ponce, Andrés Prado y Alejandra Franco por su apoyo en trabajo de campo y gabinete.

REFERENCIAS

Alcalá-Reygosa, J., Vázquez-Selem, L. y Zamorano, J.J. (2020). Fechamiento de flujos de lava del Holoceno

- mediante el isótopo cosmogénico ^{36}Cl y liquenometría e implicaciones para la cronología eruptiva. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 72(1), 1-18. DOI: <https://doi.org/10.18268/bsgm2020v72n1a260919>
- Alestalo, J. (1971). Dendrochronological interpretation of geomorphic processes. *Fennia*, 105, 1-139.
- Ávila, C. H. y López-Mata, L. (2001). Distribución y análisis estructural de *Abies hickelli* (Flous & Gausson) en México. *Interciencia*, 26(6), 244-251.
- Bollschweiler, M., Stoffel, M., Ehmsich, M. y Monbaron, M. (2007). Reconstructing spatio-temporal patterns of debris-flow activity using dendrogeomorphological methods. *Geomorphology*, 87(4), 337-351. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.10.002>
- Bollschweiler, M., Stoffel, M., Vázquez-Selem, L. y Palacios, D. (2010). Tree-ring reconstruction of past lahar activity at Popocatepetl volcano, Mexico. *The Holocene*, 20(2), 265-274. DOI: <https://doi.org/10.1177/0959683609350394>
- Brain, M.J. y Rosser N.J. (2022) Mass movements. Geological Society of London, Memoirs, 58, DOI: <https://doi.org/10.1144/M58-2021-32>.
- Bräker, O. (2002) Measuring and data processing in tree-ring research - a methodological introduction. *Dendrochronologia*, 20(1-2), 203-216. DOI: <https://doi.org/10.1078/1125-7865-00017>
- Brunsdon, D. (1979). Mass movements. En C. E. Embleton y J. B. Thornes (Eds.), *Progress in Geomorphology* (pp. 130-186). Londres: Arnold.
- Capra, L., Lugo-Hubp, J. y Borselli, L. (2003). Mass movements in tropical volcanic terrains: the case of Teziutlán (México). *Engineering Geology*, 69, 359-379. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(03\)00071-1](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00071-1)
- Carrasco-Núñez, G. (1993). *Structure-erutive history and some major hazardous events at Citlaltépetl volcano (Pico de Orizaba), México*. Tesis doctoral. Michigan Technological University. Hogton, Estados Unidos.
- Carrasco-Núñez, G. (2000). Structure and proximal stratigraphy of Citlaltépetl Volcano (Pico de Orizaba), Mexico. En H. Delgado, G. Aguirre, J. M. Stock (Eds.), *Cenozoic volcanism and tectonics of México* (vol. 334) (pp. 247-262). Boulder, Colorado: Geological Society of America Special Paper. DOI: <https://doi.org/10.1130/0-8137-2334-5.247>.
- Carrasco-Núñez, G. y Gómez-Tuena A. (1997). Volcanogenic sedimentation around Citlaltépetl (Pico de Orizaba) and surroundings, Veracruz, México. En G.J. Aguirre, J.J. Aranda-Gomez, G. Carrasco-Núñez y L. Ferrari (Eds.), *Magmatism and tectonics in the central and northwestern Mexico - a selection of the 1997 LAVCEI General Assembly excursions* (131-151). D.F. México: Instituto de Geología, Excursión.
- Carrasco-Núñez, G. y Rose, W. I. (1995). Eruption of a major Holocene pyroclastic flow at Citlaltépetl volcano (Pico de Orizaba), Mexico, 8.5-9.0 ka. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 69, 197-215. DOI: [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(95\)00023-2](https://doi.org/10.1016/0377-0273(95)00023-2).
- Carrasco-Núñez, G., Díaz-Castellón, R., Siebert, L., Hubbard, B., Sheridan, M. F. y Rodríguez, S. R. (2006). Multiple edifice-collapse events in the Eastern Mexican Volcanic Belt: The role of sloping substrate and implications for hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 158(1-2), 151-176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.04.025>.
- Carrasco-Núñez, G., Hernández, J., Cavazos-Álvarez, J., Norini, G., Orozco-Esquivel, T., López-Quiroz, P. y De León-Barragán, L. (2021). Volcanic geology of the easternmost sector of the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico. *Journal of Maps*, 17(2), 474-484. DOI: <https://doi.org/10.1080/17445647.2021.1970037>
- Chalupová, O., Chalupa, V. y Šilhán, K. (2021). Vertical variability of stem wood formation in the stem of *Fagus sylvatica* L. affected by landslide movement. *Trees*, 35, 1863-1874. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02156-1>.
- Cisneros, V. M. (1981). Estudio para la caracterización del marco geográfico regional de la zona central del estado de Veracruz. Centro Regional Universitario Oriente. UACH. Huatusco, México,.
- Clague, J. J. (2010). Dating Landslides with Trees. En M. Stoffel, M. Bollschweiler, D. R. Butler y B. H. Luckman. (Eds.), *Tree-Rings and Natural Hazard: a state-of-the Art* (pp. 81-89). Berlín: Springer.
- CONAGUA-SMN (2021a). Archivo de datos climatológicos del Servicio Meteorológico Nacional. <https://smn.cna.gob.mx/tools/RECURSOS/estacion/EstacionesClimatologicas.kmz>. Fecha de consulta: 22-03-2021
- CONAGUA-SMN (2021b). Información Histórica. Consultado en marzo, 2021 en <https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/informacion-historica>. Consultado el 22-03-2021
- De-la Cruz-Reyna, S. y Carrasco-Núñez, G. (2002). Probabilistic hazard analysis of Citlaltépetl (Pico de Orizaba) Volcano, eastern Mexican Volcanic Belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 113, 307-318. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(01\)00263-3](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(01)00263-3).
- Favillier, A., Mainieri, R., Lopez-Saez, J., Berger, F., Stoffel, M., y Corona, C. (2017). Dendrogeomorphic assessment of rockfall recurrence intervals at Saint Paul de Varcès, Western French Alps. *Geomorphologie Relief Processus Environnement*, 23(2). DOI: <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.11681>

- Figueroa-García, J. E., Franco-Ramos, O., Bodoque J. M., Ballesteros-Cánovas J. A. y Vázquez-Selem, L. (2021). Long-term lahar reconstruction in Jamapa Gorge, Pico de Orizaba (Mexico) based on botanical evidence and numerical modelling. *Landslides*, 18, 3381-3392. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01716-3>.
- Franco-Ramos, O., Ballesteros-Cánovas, J. A., Figueroa-García, J. E., Vázquez-Selem, L., Stoffel, M. y Caballero, L. (2020). Modelling the 2012 Lahar in a Sector of Jamapa Gorge (Pico de Orizaba Volcano, Mexico) Using RAMMS and Tree-Ring Evidence. *Water*, 12(2), 333. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12020333>
- Franco-Ramos, O., Castillo, M. y Muñoz-Salinas, E. (2016a). Using tree-ring analysis to evaluate the intra-ruptive lahar activity in the Nexpayantla Gorge, Popocatepetl Volcano (Central Mexico). *Catena*, 147, 205-215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.06.045>.
- Franco-Ramos, O., Stoffel, M. y Vázquez-Selem, L. (2016b). Tree-ring based record of intra-ruptive lahar activity: Axaltzintle valley, Malinche volcano, Mexico. *Geochronometria*, 43, 74-83. DOI: <https://doi.org/10.1515/geochr-2015-0033>.
- Franco-Ramos, O., Stoffel, M. y Vázquez-Selem, L. (2017b). Tree-ring based reconstruction of rockfalls at Cofre de Perote volcano, Mexico. *Geomorphology*, 290, 142-152. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.04.003>
- Franco-Ramos, O., Stoffel, M., Ballesteros-Cánovas J. A. (2019). Reconstruction of debris-flow activity in a temperate mountain forest catchment of central Mexico. *Journal of Mountains*, 16(9), 2096-2109. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5496-6>.
- Franco-Ramos, O., Stoffel, M., Vázquez-Selem, L., y Capra, L. (2013). Spatio-temporal reconstruction of lahars on the southern slopes of Colima volcano, Mexico- Adendrogeomorphic approach. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 267, 30-38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.09.011>
- Franco-Ramos, O., Vázquez-Selem, L., Zamorano-Orozco, J. J., Villanueva-Díaz, J. (2017a). Edad, dinámica geomorfológica y tipología de barrancos en el sector norte del volcán Popocatepetl, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 69(1), 1-19.
- García-Ruiz, J. M., Beguería, S., Arnáez, J., Sanjuán Y., Lana-Renault, N., Gómez-Villar, A., Álvarez-Martínez, J. y Coba-Pérez, P. (2017). Deforestation induces shallow landsliding in the montane and sub-alpine belts of the Urbión Mountains, Iberian Range, Northern Spain. *Geomorphology*, 296, 31-44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.08.016>
- Holmes, R. L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree Ring Bulletin*, 43, 69-78.
- Juliev, M., Pulatov, A. y Hübl, J. (2017). Natural hazards in mountain regions of Uzbekistan: A review of mass movement processes in Tashkent province. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 8(2), 1102- 1108. DOI: <https://doi.org/10.14299/ijser.2017.02.013>
- Macías, J. L. (2005). Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58(3), 379-424. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/bsgm/v57n3/1405-3322-bsgm-57-03-379.pdf> N.
- Mainieri, R., Lopez-Saez, J., Corona, C., Stoffel, M., Bourrier, F. y Eckert N. (2019). Assessment of the recurrence intervals of rockfall through dendrogeomorphology and counting scar approach: A comparative study in a mixed forest stand from the Vercors massif (French Alps). *Geomorphology*, 340, 160-171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.05.005>
- Malik, I., Wistuba, M., Tie, Y., Owczarek, P., Woskiewicz-Ślęzak, B., Łuszczynska, K. (2017). Mass movements of differing magnitude and frequency in a developing high-mountain area of the Moxi basin, Hengduan Mts, China – A hazard assessment. *Applied Geography*, 87, 54-65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.08.003>
- Morelli, S., Utili, S., Pazzi, V., Castellanza, R. y Fan X. (2019). Landslides and Geophysical Investigations: Advantages and Limitations. *International Journal of Geophysics*, 1-2. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/8732830>
- Parrilla, G. y Zamorano, J. J. (1996). Análisis de un flujo de depósitos (debris flow) en la ladera norte del Pico de Orizaba (México). En A. Grandal, y J. Pagés (Eds.), *IV Reunión de Geomorfología* (pp. 337-347). España: Sociedad Española de Geomorfología.
- Perret, S., Baumgartner, M., Kienholz, H. (2006a). Inventory and analysis of tree injuries in a rockfall damaged forest stand. *European Journal of Forest Research*, 125, 101-110. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-005-0082-6>.
- Prado-Lallande, A. (2017). *Geomorfología, dendrocronología y análisis sedimentológico en la cuenca alta del valle Alcalican, SW del volcán Iztaccihuatl*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Pringle, P. T., Pierson, T. C., Cameron, K. A. y Sheppard, P. R. (2010). Late eighteenth century old maid eruption and lahars at Mount Hood, Oregon (USA) dated with tree rings and historical observations. En M. Stoffel, M. Bollschweiler, D. R. Butler y B. H. Luckman. (Eds.), *Tree-Rings and Natural Hazard: a state-of-the Art* (pp. 487-491). Berlin, Alemania: Springer.
- Quesada-Román, A., Ballesteros-Cánovas, J.A., Granados-Bolaños, S., Birkel, C. y Stoffel, M. (2020). Dendrogeomorphic reconstruction of floods in a dynamic tropical river. *Geomorphology*, 359, 107133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107133>.
- Quesada-Román, A., Ballesteros-Cánovas, J. A., Granados-Bolaños, S., Birkel, C. y Stoffel, M. (2022). Improving regional flood risk assessment using flood frequency and dendrogeomorphic analyses in mountain catchments impacted by tropical cyclones. *Geomorphology*, 396, 108000. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.108000>.
- Quesada-Román, A., Fallas-López, B., Hernández-Espinoza, K., Stoffel, M., y Ballesteros-Cánovas, J. A. (2019). Relationships between earthquakes, hurricanes, and landslides in Costa Rica. *Landslides*, 16(8), 1539-1550. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01209-4>.
- Rinn, F. (2003). TSAP-Win. Time Series Analysis and Presentation for D Dendrochronology and Related Applications. Version 4.64 for Microsoft Windows. User Reference, Rinntech, Heidelberg, Germany. Disponible en <http://www.rinntech.de>
- Ritter, D. F., Craig-Kochel, R. y Miller, J. R. (1995). *Process geomorphology*. EE.UU.: Brown Publishers.
- Robinson, W.J. y Evans, R. (1980). A microcomputer-based tree-ring measuring system. *Tree-Ring Bulletin*, 40, 59-64.
- Rossotti, A. (2005). *Reconstrucción de la historia eruptiva de la Pómezc Citlaltépetl (Volcán Pico de Orizaba)*. Tesis doctoral. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Rzedowski, J., (2006). *Vegetación de México* (1ra. ed. digital). México: Comisión Nacional para el conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Salaorni E., Stoffel, M., Tutubalina O., Chernomorets, S., Seynova, I., y Sorg, A. (2017) Dendrogeomorphic reconstruction of lahar activity and triggers: Shiveluch volcano, Kamchatka Peninsula, Russia. *Bulletin of Volcanology*, 79. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00445-016-1094-4>
- Sánchez-Asunción, W., Cerano-Paredes, J., Franco-Ramos, O., Cornejo-Oviedo, E., Villanueva-Díaz, J., Flores-López, C., y Garza-Martínez, M. (2020). Dendrogeomorphological potential of Pinus ponderosa Douglas ex C. Lawson for the reconstruction of flash floods in Los Picos de Davis, Coahuila. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 26(3), 451-467. DOI: <http://dx.doi.org/10.5154/rchscfa.2020.02.006>
- Savi, S., Schneuwly-Bollschweiler, M., Bommer-Denns, B., Stoffel, M. y Schlunegger, F. (2013) Geomorphic coupling between hillslopes and channels in the Swiss Alps. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38, 959-969. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.3342>
- Selby, M. J. (1993). *Hillslope materials and processes*. Oxford: Oxford University Press.
- SEMARNAT (2015). Programa de Manejo Parque Nacional El Pico de Orizaba. https://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/pdf/programas_manejo/2015/PICO_DE_ORIZABA.pdf
- Shroder, J. (1978). Dendrogeomorphological analysis of mass movement on Table Cliffs Plateau, Utah. *Quaternary Research*, 9, 168-185. DOI: [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(78\)90065-0](https://doi.org/10.1016/0033-5894(78)90065-0).
- Sieron K., Weissling, B., Morales-Martínez M. A. y Teran, S. (2021). Reconstruction of the Upper Slope Conditions of an Extraordinary Hydro-Meteorological Event Along the Jamapa Glacier Drainage System, Citlaltépetl (Pico de Orizaba) Volcano, Mexico. *Frontiers in Earth Science*, 9, 668266. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2021.668266>
- Šilhán, K. (2021). A new tree-ring-based index for the expression of spatial landslide activity and the assessment of landslide hazards. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(1), 3409-3428. DOI: <https://doi.org/10.1080/19475705.2021.2011790>.
- Stoffel, M. y Bollschweiler, M. (2008). Tree-ring analysis in natural hazards research- an overview. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, 187-202. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-8-187-2008>
- Stoffel, M. y Bollschweiler, M. (2009). What tree-ring can tell about Earth-surface processes: teaching the principles of dendrogeomorphology. *Geography Compass*, 3(3), 1013-1037. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2009.00223.x>.
- Stoffel, M. y Corona, C. (2014). Dendroecological dating of geomorphic disturbance in tree. *Tree-ring research*, 70(1), 3-20. DOI: <http://dx.doi.org/10.3959/1536-1098-70.1.3>
- Stoffel, M., Ballesteros-Cánovas, J. A., Luckman, B. H., Casteller A. y Villalba, R. (2019). Tree-ring correlations suggest links between moderate earthquakes and distant rockfalls in the Patagonian Cordillera. *Scientific Reports*, 9(12112). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48530-5>
- Stoffel, M., Bollschweiler M., Widmer, S. y Sorg A. (2010a). Spatio-temporal variability in debris-flow activity: a tree-ring study at Geisstriftbach (Swiss Alps) extending back to AD 1736. *Swiss Journal of Geosciences*, 103, 283-292. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00015-010-0014-4>
- Stoffel, M., Bollschweiler, M., Butler, D. y Luckman, B. (Eds.) (2010b). *Tree Rings and Natural Hazards: A State-of-the-Art*. Berlin, Alemania: Springer.

- Stoffel, M., Bollschweiler, M., Vázquez-Selem, L., Franco-Ramos, O. y Palacios, D. (2011). Dendrogeomorphic dating of rockfall on low-latitude, high-elevation slopes: Rodadero, Iztaccihuatl volcano, Mexico. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36, 1209-1217. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.2146>.
- Tichavský, R., Šilhán, K. y Stoffel, M. (2017). Age-dependent sensitivity of trees disturbed by debris flows – Implications for dendrogeomorphic reconstructions. *Quaternary Geochronology*, 42, 63-75. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2017.09.002>
- Van Beek, R., Cammeraat, E., Andreu, V., Mickovski, S.B., Dorren, L. (2008). Hillslope Processes: Mass Wasting, Slope Stability and Erosion. En: J. E. Norris, A. Stokes, S. B. Mickovski, E. Cammeraat, R. van Beek, B. C. Nicoll y A. Achim (Eds.), *Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions*. Springer, Dordrecht. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6676-4_3
- Wilford D. J., Sakals M. E., Grainger W.W., Millard, T. H., Giles, T. R. (2009). *Managing forested watersheds for hydrogeomorphic risks on fans*. Land Management Handbook 61. British Columbia, Ministry of Forests and Range Forest Science Program.
- Wilkerson, F. y Schmid, G. (2010). Dendrogeomorphic applications to debris flows in Glacier National Park, Montana USA. En M. Stoffel, M. Bollschweiler, D. R. Butler y B. H. Luckman. (Eds.), *Tree-Rings and Natural Hazard: a state-of-the Art* (pp. 207-209). Berlin, Alemania: Springer.
- Winchester, V., Passmore, D.G., Harrison, S., Rae, A., Severskiy, I., y Pimankina, N.V. (2014). Dendrogeomorphological and Sedimentological Analysis of Debris Flow Hazards in the Northern Zailiiskiy Alatau, Tien Shan Mountains, Kazakhstan. *Vulnerability of Land Systems in Asia*, 91-113. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118854945.ch7>
- Yáñez-García C. y García-Durán, S. (1982). Exploración de la región geotérmica Los Humeros-Las Derrumbadas, estados de Puebla y Veracruz. México. Reporte Técnico. México: Comisión Federal de Electricidad.