

TRABAJO DE CAMPO DENDROCRONLÓGICO PARA ESTUDIOS DE GEOGRAFÍA FÍSICA. EXPERIENCIAS EN LOS VOLCANES POPOCATÉPETL E IZTACCÍHUATL, 2006-2017

Introducción

El trabajo de campo es una tarea indispensable como parte de los métodos directos de investigación en la Geografía Física para la identificación, verificación y obtención de información. Esta tarea, además de ser un deleite para los amantes de la naturaleza, permite al investigador obtener datos *in situ* de las condiciones bio-físicas del territorio. La utilidad del trabajo de campo, por ejemplo, para un geomorfólogo, tiene que ver con el registro de la información de las características del relieve, procesos, edad y dinámica geomorfológica, representada en una libreta de campo a partir de croquis, dibujos, perfiles, descripciones y la colecta de muestras, siendo este instrumento uno de los más valiosos para el quehacer geomorfológico y dendrocronológico.

La dendrocronología es una disciplina que utiliza los anillos de crecimiento de árboles para fechar y estudiar factores ambientales del pasado (Fritts, 1976). Los factores que influyen en el crecimiento de los árboles son el clima (precipitación y temperatura), el suelo, los incendios, las plagas, los procesos geomorfológicos y la perturbación antrópica. La influencia de cada uno de estos factores ha variado en el tiempo. De hecho, es gracias a esta variabilidad como se pueden establecer y datar patrones de crecimiento en el ancho de los anillos. De este modo la dendrocronología permite analizar temporal y espacialmente fenómenos geográficos como la variabilidad climática, hídrica, geomorfológica y antrópica (Speer, 2010).

La relación entre geomorfología y dendrocronología, también conocida como dendrogeomorfología (Stoffel y Bollschweiler, 2008), consiste en fechar y estudiar los disturbios en los anillos de crecimiento de árboles, afectados por procesos geomorfológicos como deslizamientos, avalanchas, caída de rocas, erupciones volcánicas, entre otros. Para realizar estudios dendrogeomorfológicos es indispensable el trabajo de campo, en el cual se pueden identificar, y en muchos casos mapear, las formas de relieve asociadas a los procesos geomorfológicos existentes. Además, el trabajo de campo es indispensable para el muestreo de árboles que sean útiles para fechar y reconstruir eventos del pasado, con miras a reforzar los planes de ordenamiento territorial y mitigación de peligros geomorfológicos.

La mayor parte del centro de México está constituido por un relieve geológicamente joven, construido durante el Cuaternario y caracterizado por el predominio de sistemas montañosos de origen volcánico (Lugo-Hubp, 1990), que en muchos casos presentan condiciones de inestabilidad geomórfica. La Sierra Nevada es una cordillera volcánica conformada principalmente por los volcanes Iztaccíhuatl (~5220 msnm) y Popocatepetl (~5460 msnm), dos de las montañas más altas de México. Esta barrera orográfica, que divide la Cuenca de México y la Cuenca Oriental, es uno de los sistemas montañosos del centro de México más visitados por excursionistas, escaladores, científicos y público en general. Esta cordillera volcánica, decretada en 1935 como parque nacional por encima de la cota de 3000 msnm, es una de las más importantes y complejas del país desde el punto de vista geomorfológico, geológico, climático, dendrocronológico, glaciario, de riesgos volcánicos y del aprovechamiento de recursos naturales.

En el presente trabajo se exponen los materiales y métodos de campo utilizados en dendrocronología, aplicados al estudio de fenómenos de la Geografía Física relacionados con las geoformas

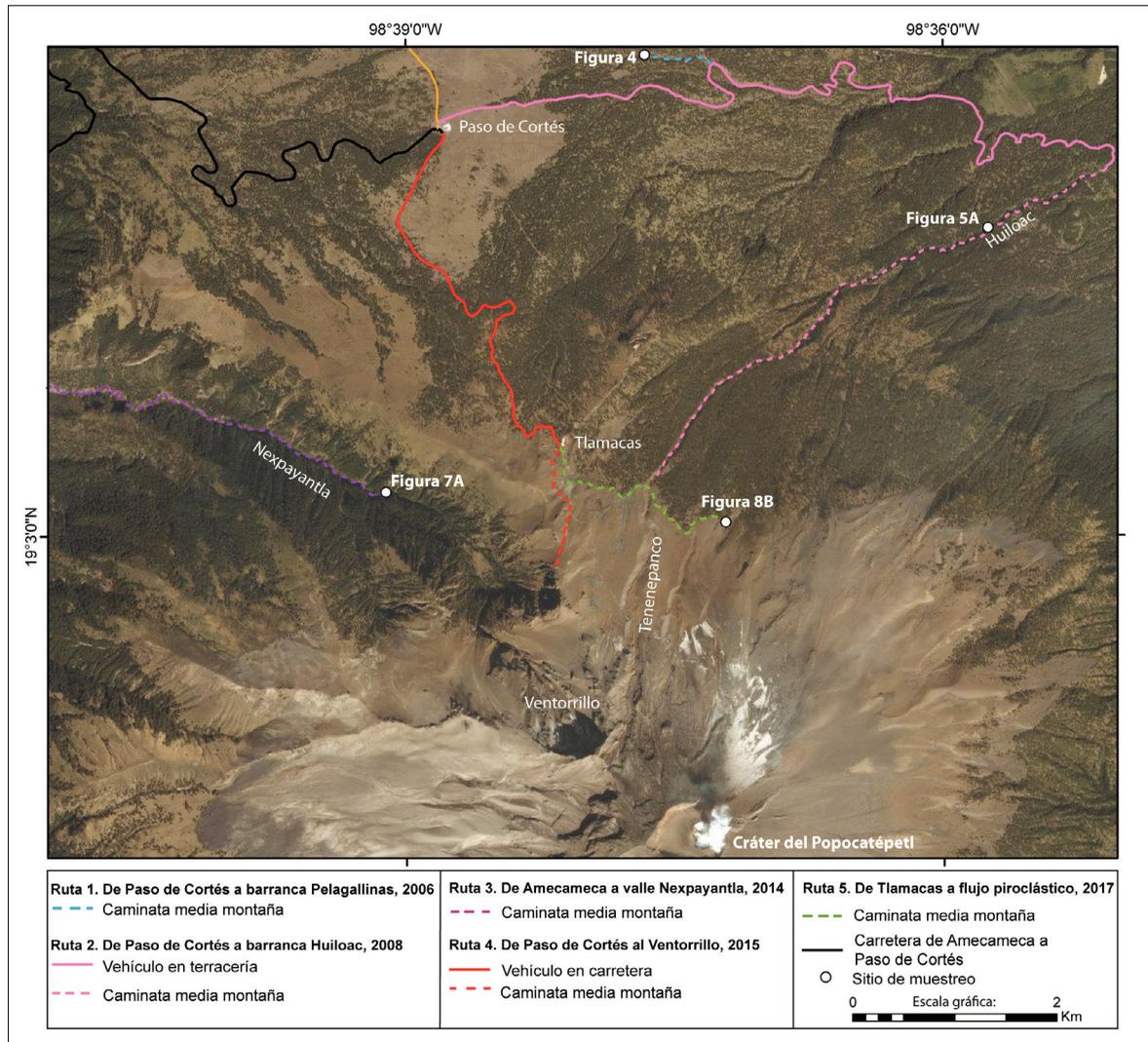


Figura 1. Mapa de rutas de trabajo de campo y sitios de muestreo en el volcán Popocatepetl del 2006 al 2017. Fuente: datos GPS y ArcMap 10.2.2. Cartografía: Osvaldo Franco Ramos.

y el clima. A través de diferentes rutas realizadas durante poco más de una década (2006 a 2017) en la Sierra Nevada, podemos observar los distintos escenarios ambientales que tuvimos la oportunidad de conocer y muestrear. El trabajo de campo se llevó a cabo en las barrancas de la vertiente norte del volcán Popocatepetl (Figura 1) y en la vertiente norte y suroeste del volcán Iztaccíhuatl (Figura 2), con el objetivo de conocer el potencial dendrocronológico de distintas especies de coníferas y la respuesta ante fenómenos climáticos, procesos

volcánicos y geomorfológicos. Hasta el momento los resultados se han publicado en varios productos académicos (Tabla 1).

Preparación, equipo y herramientas de trabajo

Después del diseño de las rutas y sitios de muestreo *a priori*, con base en los objetivos de cada investigación y con el apoyo de mapas, imágenes de satélite y fotointerpretación, se prepara la logística, equipo y materiales adecuados para el trabajo de campo. En laderas de montaña del Iztaccíhuatl y Popoca-

Tabla 1. Productos académicos como resultado del trabajo de campo dendrogeomorfológico en el Izta-Popo, 2009-2017

Año	Artículo/Tesis
2009	Franco Ramos, O. (2009). <i>Procesos morfodinámicos en la vertiente norte del volcán Popocatepetl</i> . Tesis de Maestría en Geografía Ambiental. División de estudios de posgrado, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM.
	Franco-Ramos, O., Vázquez Selem, L., Zamorano-Orozco, J. J. y Villanueva-Díaz J. (2017). Edad, dinámica geomorfológica y tipología de barrancos en el sector norte del volcán Popocatepetl, México. <i>Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana</i> , 69(1), 1-19.
2010	Bollschweiler, M., Stoffel, M., Vázquez-Selem, L. y Palacios, D. (2010). Tree-ring reconstruction of past lahar activity at Popocatepetl volcano, México. <i>The Holocene</i> , 20(2), 265-274. http://dx.doi.org/10.1177/0959683609350394 .
2011	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, Iztaccíhuatl volcano, México. <i>Earth Surface Processes and Landforms</i> , 36, 1209-1217. http://dx.doi.org/10.1002/esp.2146 .
2013	Torres Beltrán, C. (2013). <i>Análisis de los cambios del límite superior del bosque del volcán Iztaccíhuatl</i> . Tesis de licenciatura en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM.
2015	Franco Corona, A. (2015). <i>Cambios en el límite superior del bosque del volcán Popocatepetl</i> . Tesis de licenciatura en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM.
2016	Franco-Ramos, O., Castillo, M. y Muñoz-Salinas, E. (2016). Using tree-ring analysis to evaluate the intra-eruptive lahar activity in the Nexpayantla Gorge, Popocatepetl Volcano (Central Mexico). <i>Catena</i> , 147, 205-215. http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.06.045
	Salas Barrera, C. (2016). <i>Estudio de procesos erosivos y de transporte de sedimentos en el sector medio de la barranca Nexpayantla (Popocatepetl, México)</i> . Tesis de Licenciatura en Ciencias de la Tierra. Facultad de Ciencias, UNAM.
2017	Garduño Cuevas, A. Y. (2017). <i>Distribución espacial del arbusto de alta montaña Juniperus monticola y su relación con la geomorfología en el volcán Iztaccíhuatl</i> . Tesis de licenciatura en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM.
	Prado Lallande, A. (2017). <i>Geomorfología, dendrocronología y análisis sedimentológico en la cuenca alta del valle Alcalican, SW del volcán Iztaccíhuatl</i> . Tesis de licenciatura en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM.

Fuente: elaboración propia.

tépetl, por encima de los 4000 msnm, predominan condiciones de inestabilidad del terreno debido a procesos periglaciares (geliflujión), fusión de la nieve y escasas de vegetación, todo ello en un marco de fuertes pendientes. Domina un clima frío y ventoso la mayor parte del año, sobre todo en invierno. Por lo tanto, la seguridad del trabajo de campo en estos volcanes hace indispensable contar con el equipo adecuado. El equipo básico recomendado en media montaña (3000–4000 msnm),

son botas de media montaña, de preferencia impermeables, mochila de ataque, gorra y lentes para sol, pantalón ligero, guantes, chamarra polar, rompe vientos e impermeable. Resulta muy útil contar con radios de telecomunicación, ya que permiten mantener la comunicación entre distintas brigadas de trabajo, tanto con fines de coordinación como de seguridad, aspecto este último muy importante en terrenos agrestes y geomorfológicamente inestables. En algunas ocasiones es necesario acampar

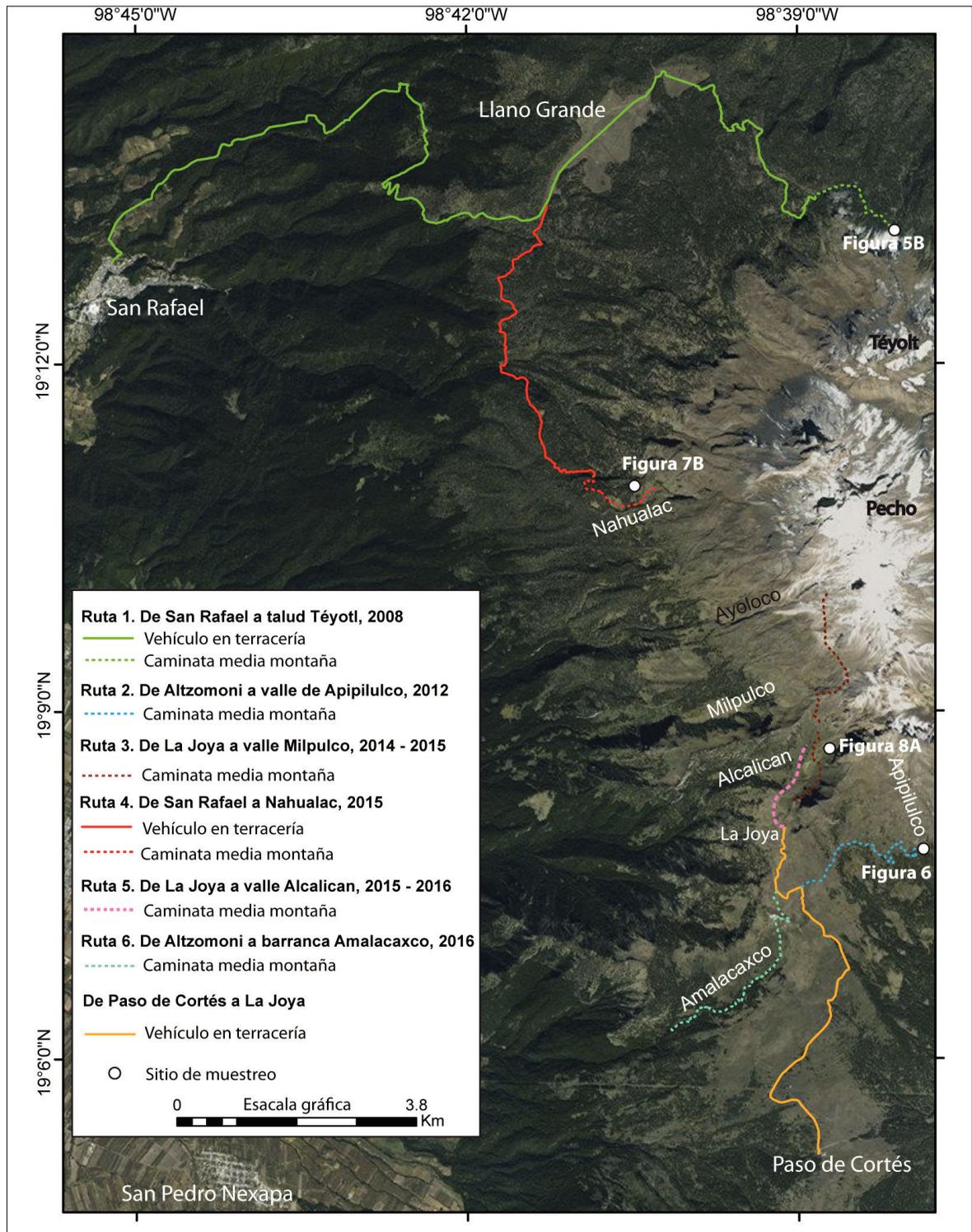


Figura 2. Mapa de rutas de trabajo de campo y sitios de muestreo en el volcán Iztaccíhuatl del 2008 al 2016. Fuente: datos GPS y ArcMap 10.2.2. Cartografía: Osvaldo Franco Ramos.

dentro del parque nacional, lo más cercano al sitio de estudio, por lo que se ha requerido de una tienda de campaña, agua y comida. A veces se ha necesitado la protección por parte de la división de Policía de Alta Montaña de la Policía del Estado de México, ya que en años recientes se ha incrementado la delincuencia en algunos sectores del parque.

Las herramientas de trabajo de campo para un estudio geomorfológico y dendrocronológico son mapas topográficos, GPS, brújula, libreta de campo, barrenos *Pressler*, motosierra eléctrica, porta muestras, cámara fotográfica, cinta métrica o distanciómetro digital, y bolsas de plástico para muestras de sedimentos. Sin embargo, recientemente se están utilizando otras geotecnologías que permiten obtener en campo datos espaciales más precisos como el uso de drones, Láser Escáner Terrestre y GPS diferencial, herramientas que al geomorfólogo y dendrocronólogo le permiten realizar un reconocimiento más detallado de las características del relieve y procesos geomórficos, así como su interacción con el bosque y su representación en mapas dendrogeomorfológicos.

Para el análisis dendrogeomorfológico se utilizan barrenos tipo *Pressler*, con longitud entre 10 cm y 1 m, y diámetro de 5 mm (Figura 3A). Este instrumento permite la obtención de núcleos de madera de árboles vivos o muertos en los cuales se puede observar los anillos de crecimiento anuales que constituyen un registro climático, geomorfológico y ambiental de un lugar. Una de las virtudes de la dendrocronología es que, directamente en el campo, podemos saber, *grosso modo*, la edad de los árboles con el conteo visual de los anillos en los núcleos de madera extraídos, si bien el posterior tratamiento y análisis de laboratorio de las muestras es indispensable para refinar nuestro conocimiento. La colecta de núcleos se complementa con el registro de las condiciones locales del sitio, la localización precisa mediante GPS y la elaboración de un croquis en un formato de campo específico.

Para análisis dendroclimáticos se buscan los árboles sensibles, es decir, aquellos que crecen en sitios con suelo delgado o pendiente fuerte, donde la variabilidad del clima (por ejemplo, un

periodo seco) puede afectar más fuertemente al crecimiento del árbol. Asimismo, se busca que los árboles no presenten daños evidentes por efecto de incendios, plagas o fenómenos geomorfológicos, lo cual permite minimizar la influencia de factores no climáticos en el desarrollo de los anillos. Al menos se deben tomar dos muestras en caras opuestas del árbol, a la altura del pecho (~1.35m). En individuos muertos se colectan secciones transversales o cuñas con una motosierra eléctrica, para tener unas cronologías de anillos de crecimiento más longevas (Villanueva *et al.*, 2009).

El muestreo para fines dendrogeomorfológicos es distinto, pues en este caso interesan árboles con perturbaciones evidentes asociadas a procesos morfodinámicos, tales como árboles impactados, decapitados, inclinados, sepultados, etc. Las muestras se deben tomar lo más cerca posible de la cicatriz de impacto, para observar con claridad la señal del evento geomorfológico. En árboles inclinados se tomaron dos núcleos de madera en el ángulo máximo, una en el sector del tronco más expuesto al proceso morfológico a estudiar. La utilidad de tomar al menos dos núcleos es para co-fecha los patrones de crecimiento, e identificar anillos perdidos o falsos. En este caso es necesario elaborar una cronología de referencia donde se utilizan árboles no perturbados del mismo sitio. Esta cronología permitirá co-fecha los árboles perturbados y eliminar el “ruido” asociado a factores climáticos. Todas las muestras colectadas deben ser correctamente referidas a las formas de relieve y procesos en un mapa y posteriormente se guardan y rotulan en un “porta núcleos” de plástico (Figura 3B). Posteriormente, se preparan para el fechado y análisis en laboratorio. Además, durante el muestreo de campo es necesario contar con un formato de campo para recopilar la información del sitio de estudio, como la especie muestreada, altura y diámetro del árbol, tipo de disturbios, número de fotografías, croquis dendrocronológico y dendrogeomorfológico, entre otras observaciones (Figura 3C).

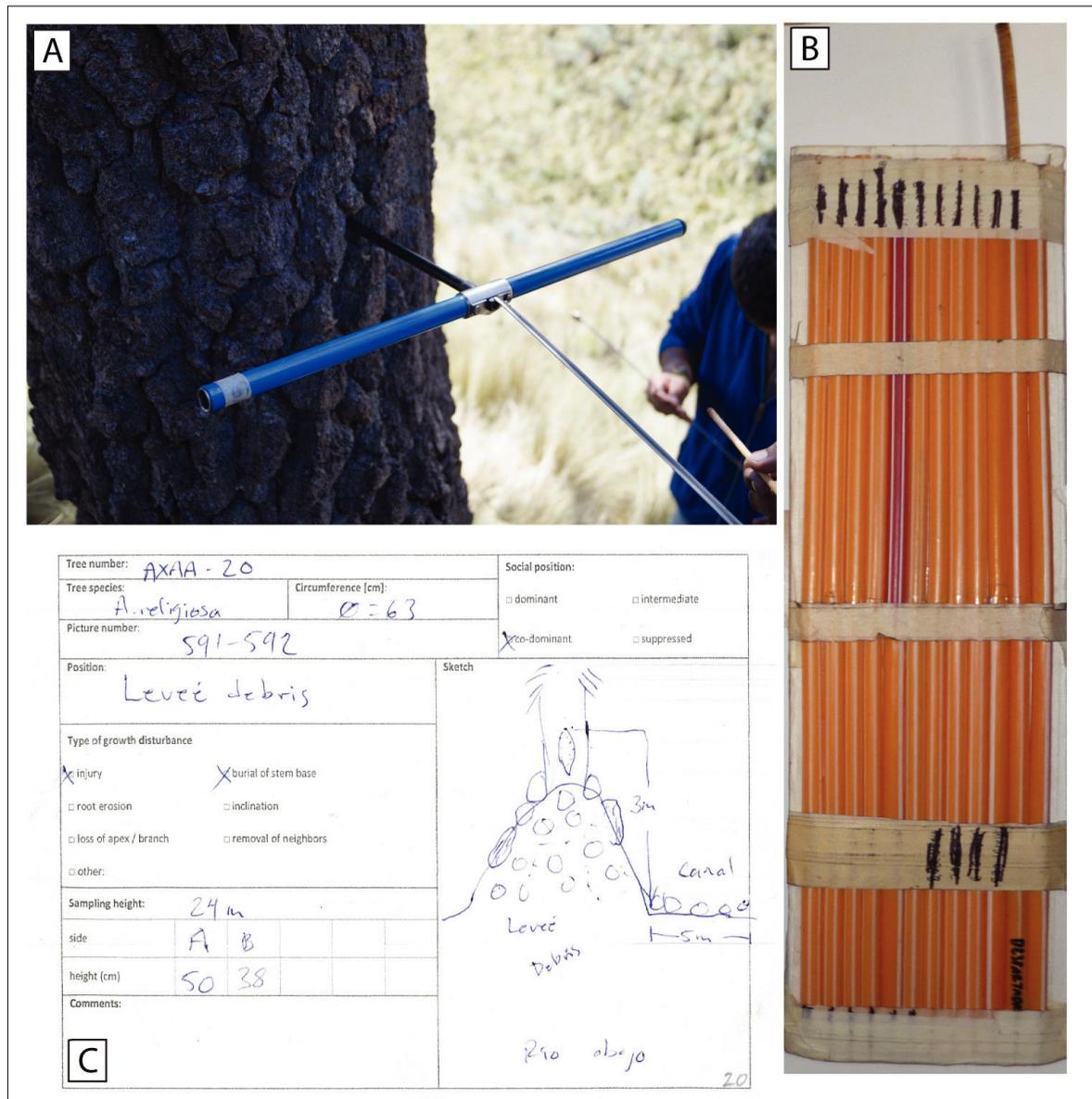


Figura 3. Métodos de campo y muestreo dendrocronológico. A) Obtención de núcleos de madera con barrenos *Pressler*. B) Guarda núcleos de plásticos para el transporte y protección de las muestras y C) formato de trabajo hecho en campo para captura de las características de cada árbol y sitio muestreado. Autor: Salvador Ponce Rojas, archivo de campo, febrero de 2017.

Casos de estudio en el Parque Izta-Popo del 2006 al 2017

Volcán Popocatepetl

El trabajo de campo en el volcán Popocatepetl consistió en cinco rutas de trabajo (Figura 1). Estos recorridos se llevaron a cabo por el interés

por conocer los procesos geomorfológicos post-eruptivos y la dinámica geomorfológica actual, con base en registros estratigráficos, fechamientos por ^{14}C y dendrogeomorfología, así como con el uso de nuevas geotecnologías, como un dron para levantamiento del terreno de alta resolución.

Ruta 1. De Paso de Cortés a barranca Pelagallinas, 2006

Este recorrido tuvo una extensión aproximada de 2.8 km, de Paso de Cortés a la barranca Pelagallina. El objetivo fue realizar una tipología de barrancas con base en su edad y dinámica geomorfológica. Identificamos las secuencias eruptivas del volcán Popocatepetl de los últimos 17 000 años (Figura 4A) y en algunos casos utilizamos materia orgánica y fragmentos de carbón de paleosuelos para poder fechar con el método de ^{14}C y relacionar con la edad de las barrancas y periodos de estabilización geomorfológica. Con objeto de evaluar la dinámica actual, utilizamos métodos dendrocronológicos para conocer la edad de los árboles y relacionarla con edades mínimas de relieve y estabilización. La premisa es que la edad de los árboles indica cuándo cesó la dinámica geomorfológica, ya que estos

difícilmente pueden establecerse en un sitio inestable. Para ello muestreamos varios árboles vivos de *Pinus hartwegii* en el interior de las barrancas, como cabecera, laderas y lecho (Figura 4B). Los resultados más importantes obtenidos fueron que la gran mayoría de las barrancas del Popocatepetl se formaron después de la erupción cataclísmica de hace 17 000 años A.P., y luego han sido cubiertas por mantos sucesivos de tefras (ceniza, piedra pómez) de erupciones más recientes, ocurridas hace 5000, hace 2200 y hace 1100 años. Los árboles más viejos se localizan en las laderas de los barrancos (área más estable), y tienen ~200 años. En cambio, en las cabeceras y fondo de barranco existen los árboles más jóvenes, de unos ~60 años. Se puede decir que estas barrancas han sido estabilizadas desde hace aproximadamente 200 años (Franco-Ramos *et al.*, 2017).



Figura 4. Reconocimiento en campo de las secuencias eruptivas del Popocatepetl en la barranca Pelagallinas a finales del 2006. A) Depósitos de caída de pómez y depósitos de oleada piroclástica en la base, emitidos por la última erupción pliniana del Popocatepetl, fechada en 1100 años A.P. B) Colecta de núcleos de árboles con barrenos para estimación de la edad en distintos sectores de la barranca. Autor: Osvaldo Franco Ramos. Archivo de campo, febrero de 2007.

Ruta 2. De paso de Cortés a barranca Huiloac, 2008

Este trabajo de campo se llevó a cabo en la barranca Huiloac, en colaboración con los dendrogeomorfólogos suizos Markus Stoffel y Michelle Bollschweiler, con un recorrido aproximado de 5.5 km entre los 4000 y los 3200 msnm. Es una de las barrancas más dinámicas y peligrosas del Popocatepetl, ya que es el paso natural de lahares y desemboca en el poblado de Santiago Xalitzintle, Puebla. Al interior de la barranca, adosadas a las laderas, identificamos terrazas laháricas de aspecto. Para datar la edad de estas terrazas colectamos una muestra de carbón para fechar con el método de ^{14}C . Los resultados indican que el depósito lahárico, que después fue excavado y se convirtió en terraza, se depositó entre 1170 y 930 años antes del presente, es decir, durante o inmediatamente después de la erupción pliniana reportada hace 1100 años. La edad estimada de la barranca Huiloac es de menos de 1000 años A.P. (Franco-Ramos *et al.*, 2017). En el fondo de la barranca observamos distintas terrazas jóvenes en los bordes del canal, originadas por los lahares más recientes, como los ocurridos en 1997 y 2001 (Figura 5A). Con las muestras dendrocronológicas obtenidas en campo de *Pinus hartwegii*, *Abies religiosa* y *Pinus ayacahuite*, pudimos saber que los árboles más viejos que crecen dentro de la barranca tienen ~160 años, lo cual representa

una edad mínima. Los árboles más jóvenes fueron de ~70 años, localizados cerca del fondo sobre las terrazas laháricas más recientes. En muchos casos observamos árboles con cicatrices de impacto, sepultados e inclinados por el paso de los lahares de 1997 y 2001 (Bollschweiler *et al.*, 2010).

Ruta 3. De Amecameca a valle Nexpayantla, 2014

Este trayecto, de aproximadamente 4.5 km, se realizó con los colegas geomorfólogos Esperanza Muñoz y Miguel Castillo, del Instituto de Geología de la UNAM, con la finalidad de evaluar la frecuencia y magnitud de lahares post-eruptivos en el fondo del valle Nexpayantla, localizado en la vertiente NW del Popocatepetl. En campo pudimos observar terrazas originadas por lahares de distinta edad y volumen, así como varios procesos de ladera como deslizamientos y caída de rocas que sugieren una dinámica geomorfológica significativa. Para fechar y reconstruir lahares con base en métodos dendrogeomorfológicos, colectamos núcleos de crecimiento con barrenos Pressler en 100 árboles de *Abies religiosa*, entre los 3000 y los 3500 msnm (Figura 7A). Con los resultados pudimos identificar al menos 23 eventos, de los cuales los más importantes ocurrieron en los años 1997, 2000, 2009 y 2010 (Franco-Ramos *et al.*, 2016). También, en colaboración con los investigadores del Instituto de Geología, muestreamos sedimentos en las terrazas



Figura 5. Trabajo de campo realizado a inicios del 2008 al norte del Popocatepetl e Iztaccíhuatl en colaboración con Markus Stoffel y Michelle Bollschweiler. A) Sector medio de la barranca Huiloac, localizada al NE del Popocatepetl, es una de las más dinámicas y peligrosas del volcán. En la foto se reconocen los depósitos de lahar más recientes reportados en 1997 y 2001. B) Colecta de árboles con impactos por caída de rocas en el talud el “Rodadero”, al norte del Teyotl. Autor: Lorenzo Vázquez Selem. Archivo de campo, febrero de 2008.

del fondo del valle para análisis de Luminiscencia Óptica Estimulada para conocer las distintas fases y áreas de acumulación y erosión de sedimentos.

Ruta 4. De Paso de Cortés al Ventorrillo, 2015

Esta ruta se realizó en vehículo de Paso de Cortés a Tlamacas, con un recorrido aproximado de 4km, y a pie del antiguo albergue de montaña a la parte alta de la cañada de Nexpayantla, aproximadamente 1 km. El objetivo central de esta ruta fue evaluar el potencial dendrocronológico del arbusto *Juniperus monticola*, que habita por encima de los 4000 msnm. Muestreamos alrededor de 40 secciones transversales de individuos muertos, con la ayuda de una motosierra eléctrica. Las posibles causas de la muerte de estos arbustos son incendios forestales provocados por sequías severas, así como por la expulsión de material incandescente del Popocatepetl. Los individuos más longevos encontrados en este sitio tienen más de 300 años (José Villanueva, comunicación personal). Esta especie, a pesar de tener problemas de crecimiento, como la asimetría de sus troncos, y generar anillos “perdidos” por crecer en sitios con importantes limitaciones de agua, calor y luz, es viable para fechar y reconstruir patrones climáticos, frecuencia de incendios, y posiblemente disturbios (supresiones abruptas) asociados a erupciones históricas del volcán.

Ruta 5. De Tlamacas a flujo piroclástico, 2017

Este recorrido fue a pie, con una distancia de aproximadamente 1.5 km del antiguo refugio de Tlamacas al depósito de flujo piroclástico ocurrido el 22 de enero del 2001, emplazado en la vertiente norte del Popocatepetl, particularmente sobre las barrancas Tenenepanco, La Espinera y Tepetelcocone. Este trabajo de campo es el más reciente (marzo y mayo de 2017) y consiste en analizar el tipo e intensidad de los disturbios originados por el impacto del flujo piroclástico. En este sitio muestreamos con barrenos Pressler árboles de *Pinus hartwegii* que sobrevivieron al evento, así como secciones transversales de árboles muertos para co-fecha e identificar la fecha de su muerte y validar si fueron muertos durante el evento. Además, estimamos la edad de más de 100 renuevos que están sobre el depósito para estudiar la colonización post-eruptiva y su variabilidad temporal y espacial. La estimación de la edad de los renuevos se realizó con base en el número de verticilos, ya que en las coníferas cada verticilo equivale a un año. También, medimos otros parámetros de los renuevos, como diámetro de la base del tronco y altura del árbol. Por otro lado, Andrés Prado Lallande, tesista de licenciatura del Colegio de Geografía, UNAM, realizó vuelos fotogramétricos con un dron DJI-Phantom 4 (Figura 8B), para obtener modelos digitales de elevación y ortomosaicos de alta resolución sobre el depósito piroclástico. Este material obtenido di-



Figura 6. Muestreo realizado a finales del 2012 al sur del volcán Iztaccíhuatl. A) Subiendo paredes de lava en los alrededores del valle de Apipilulco para la colecta de madera muerta de *Juniperus monticola*. B) Muestreo de árboles vivos de *Pinus hartwegii* para relacionar la edad del arbolado con la dinámica del límite superior del bosque. Autor: Lorenzo Vázquez Selem. Archivo de campo, noviembre de 2012.

rectamente en campo permitirá realizar un mapeo geomorfológico detallado, así como la localización precisa de los árboles muestreados. Cabe señalar que el uso de estas nuevas geotecnologías favorece el seguimiento de las transformaciones del relieve durante un periodo de tiempo establecido, que puede ser estacional o anual, en un sitio de estudio.

Volcán Iztaccíhuatl

En las vertientes norte, oeste y sur del volcán Iztaccíhuatl, realizamos seis rutas de campo del año 2008 al 2016 (Figura 2), específicamente para reconocimiento geomorfológico y muestreo dendrocronológico en árboles de *Pinus hartwegii* y el arbusto *Juniperus monticola*.

Ruta 1. De San Rafael a talud norte del Teyotl, 2008

El recorrido de esta ruta fue de aproximadamente 11.4 km en vehículo por terracería y 1.5 km de caminata de media montaña. Este muestreo se realizó en un talud detrítico llamado “El Rodadero” (Figura 5B) en la cara norte del volcán Teyotl en colaboración con los dendrogeomorfológicos suizos Markus Stoffel y Michelle Bollschweiler. El objetivo de este sitio fue evaluar el potencial de *Pinus hartwegii* para reconstruir la frecuencia de caída de rocas en el límite superior del bosque, alrededor de los ~4,000 msnm. Muestreamos núcleos con barrenos *Pressler* de 24 árboles con claras evidencias de afectación por desprendimientos de roca como cicatrices de impacto, árboles decapitados e inclinados. Se encontraron 67 impactos de roca desde 1836, y se elaboraron mapas de periodo de retorno por caída de rocas en el talud (Stoffel *et al.*, 2011).

Ruta 2. De Alzomoni a valle Apipilulco, 2012

El recorrido de esta ruta fue de 2.7 km de caminata, de la estación Alzomoni a la cuenca alta del valle Apipilulco, localizado al SE del Iztaccíhuatl (Figura 6A). El muestreo dendrocronológico sirvió para analizar y relacionar la dinámica del límite superior del bosque, con base en la edad de los árboles de *Pinus hartwegii*. Se colectaron dos núcleos a la altura del pecho (1.35m) de 70 árboles para estimar la edad, y relacionar los resultados con la altitud (Figura 6B). Se observó una relación inversa entre

la edad y la altitud, ya que los individuos más longevos (edades de hasta ~200 años) se encuentran alrededor de los 4000 msnm, y a mayor altitud disminuye la edad, encontrándose el árbol más joven (6 años) a ~4300 msnm (Torres, 2013).

Ruta 3. De La Joya al valle de Milpulco, 2014 - 2015

El trayecto de esta ruta fue de ~2.4km de caminata en media montaña, de la Joya a la cuenca alta del valle glaciar Milpulco, en la vertiente SW del Iztaccíhuatl. Se realizaron dos salidas al sitio de estudio, la primera en 2014 y la segunda en 2015, con la colaboración de los dendrocronólogos José Villanueva Díaz y Julian Cerano Paredes, del Laboratorio Nacional de Dendrocronología del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera (CENID-RASPA), del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en Gómez Palacio, Durango. El objetivo principal de este trabajo de campo fue colectar muestras dendrocronológicas de individuos muertos de *Juniperus monticola* alrededor de los 4000 msnm. Con la ayuda de una motosierra eléctrica muestreamos 36 secciones transversales de distintos individuos muertos. Encontramos individuos de más de 500 años, con lo cual se pudo realizar una cronología climática del año 1500 al 2014. Al parecer esta especie es sensible a la temperatura y precipitación (José Villanueva, comunicación personal), por lo que será útil para la reconstrucción climática en ambientes de montaña del centro de México. Vale la pena señalar que gracias a estas investigaciones hemos podido documentar que este pequeño arbusto alpino es la especie más longeva hasta ahora encontrada en las montañas del centro de México, más perdurable que los pinos de la zona y hasta ahora solo superado en edad por el ahuehuete (*Taxodium mucronatum*).

Ruta 4. De San Rafael a Nahualac, 2015

Este trabajo de campo fue en colaboración de arqueólogos del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), para relacionar factores climáticos con dendrocronología y la presencia humana en sitios de alta montaña. El recorrido



Figura 7. A) Colecta de árboles de *Abies religiosa* afectados por lahares sin y post-eruptivos en la barranca Nexpayantla a finales del 2014. B) Trabajo de campo en 2015 cerca del sitio arqueológico conocido como “Nahualac”, localizado en la vertiente occidental del Iztaccíhuatl. Nótese la presencia de la Policía de Alta Montaña fuertemente armada para resguardo y seguridad durante el trabajo de campo. Autores: Lorenzo Vázquez Selem y Osvaldo Franco Ramos. Archivo de campo, noviembre de 2015.

aproximado de esta ruta fue de 8 km con vehículo sobre la terracería que va de San Rafael a los alrededores del sitio arqueológico conocido como “Nahualac”, localizado a los ~3900 msnm en la vertiente noroccidental del Iztaccíhuatl. Dada la distancia e inaccesibilidad del sitio, acampamos una noche a los ~3800 msnm. Al día siguiente caminamos ~1.6 km del campamento base al sitio donde predominan los arbustos de *Juniperus monticola* a los ~4100 msnm. Colectamos aproximadamente una decena de individuos muertos, que usamos para fechar y reconstruir patrones climáticos de los últimos siglos, y posiblemente “teleconectar” con antiguos asentamientos humanos en el sitio. Cabe resaltar que debido a la inseguridad reportada en los últimos años en muchas regiones del país, y en particular en las principales rutas de acceso al Iztaccíhuatl, se contó con el apoyo de la Policía de Alta Montaña, que es una subdivisión de la policía estatal del Estado de México encargada de vigilar y resguardar el Parque Nacional Iza-Popo (Figura 7B).

Ruta 5. De La Joya al valle de Alcalican, 2015-2016

Este recorrido de trabajo de campo fue de 1.5 km de caminata, de La Joya al interior del valle Alcalican, localizado al SW del Iztaccíhuatl. Del 2015 al 2016

realizamos cuatro salidas al sitio de estudio con dos objetivos principales. El primero fue para realizar un reconocimiento geomorfológico del valle, y posteriormente fechar con dendrogeomorfología los flujos de escombros más recientes presentes en el fondo del valle, alrededor de los 3900 msnm. Para ello muestreamos los árboles de *Pinus hartwegii* impactados y sepultados por depósitos de flujo de escombros. El segundo objetivo fue coleccionar secciones transversales de *Juniperus monticola* que habitan sobre las paredes rocosas del valle para un análisis dendroclimático (Figura 8A). Este muestreo será útil para analizar patrones de temperatura y/o precipitación de los últimos 500 años y buscar algunas anomalías en los anillos como “anillos de congelamiento”, asociados a periodos muy fríos registrados en los últimos siglos. Con dendrogeomorfología fue posible fechar el flujo de escombros más reciente en el fondo del valle, datado en el año 2012, posiblemente originado por lluvias torrenciales provocadas por un huracán (Prado, 2017). Los periodos de lluvias posteriores al evento generan una removilización del material detrítico en los bordes laterales y frontales del depósito.

Ruta 6. De Altzomoni a barranca Amalacaxco, 2016

Esta ruta se llevó a cabo con los colegas geomorfológicos del Instituto de Geología de la UNAM, de la

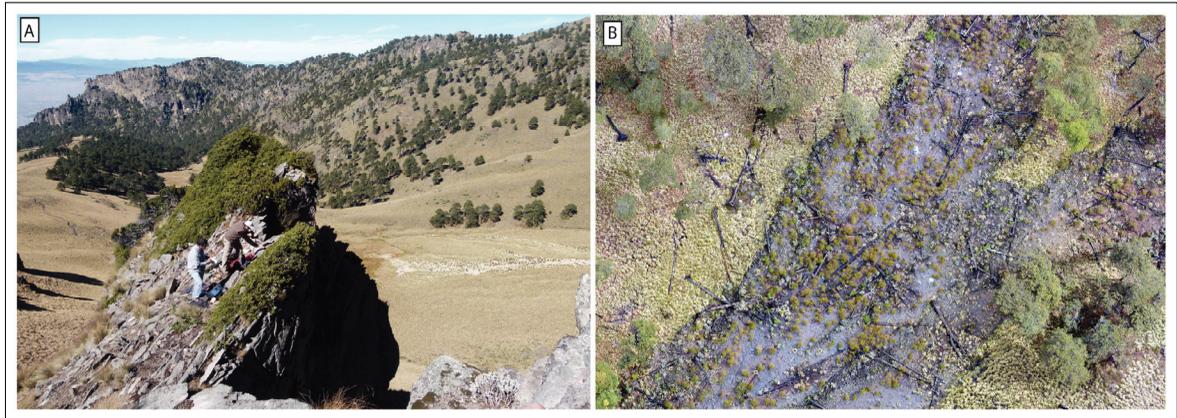


Figura 8. El trabajo de campo más reciente en los volcanes, de 2015 al 2017. A) Muestreo de *Juniperus monticola* en el valle de Alcalican (SW del Iztaccíhuatl) para elaboración de cronologías centenarias de tipo climático. En el fondo del valle se observa el depósito de flujo de escombros fechado en 2012 por dendrogeomorfología. Autor: Lorenzo Vázquez Selem. Archivo de campo, noviembre de 2014. B) Toma realizada con un dron DJI-Phantom 4, sobre el depósito de flujo piroclástico de enero del 2001, al norte del volcán Popocatepetl. Autor: Andrés Prado Lallande. Archivo de campo, marzo de 2017.

estación climática y de monitoreo conocida como Altzomoni, al fondo de la barranca Amalacaxco, con un recorrido de ~1.7 km a pie. Los objetivos centrales fueron realizar una cronología dendroclimática a partir de los árboles vivos que crecen sobre los 3800 msnm, y relacionar con procesos de erosión/acumulación en el fondo de la barranca. Por otro lado, sugerimos fechar y analizar las concentraciones de Cesio 137 (^{137}Cs) en los anillos de crecimiento. Por lo tanto, muestreamos núcleos de crecimiento con barrenos *Pressler* en 20 árboles vivos de *Pinus hartwegii*, así como un par de cuñas con motosierra para análisis químico de ^{137}Cs . El análisis dendrocronológico y dendroquímico de este sitio está en proceso.

A modo de conclusión

En años recientes la dendrocronología se ha convertido en una disciplina de gran valor para el fechamiento y el análisis espacio-temporal de diversos aspectos de interés físico-geográfico, en particular de tipo geomorfológico y climático. Este método proporciona información con precisión anual y abarca periodos de hasta varios siglos para los cuales existe poca información documental o instrumental, además de reportar sobre la distribución espacial precisa de los fenómenos analizados. La preparación del equipo

de trabajo y método de muestreo dendrocronológico depende de las condiciones del sitio y de los objetivos e hipótesis de trabajo planteados previamente. Gracias al trabajo de campo apoyado en dendrocronología, en años recientes ha sido posible investigar desde nuevas perspectivas las zonas montañosas del centro de México, en particular los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl. Esto incluye el análisis de fenómenos de remoción en masa, fenómenos volcánicos como lahares y flujos piroclásticos, y la reconstrucción del clima en los últimos siglos.

Oswaldo Franco-Ramos y Lorenzo Vázquez Selem
Departamento de Geografía Física,
Instituto de Geografía,
Universidad Nacional Autónoma de México

BIBLIOGRAFÍA

- Bollschweiler, M., Stoffel, M., Vázquez-Selem, L. y Palacios, D. (2010). Tree-ring reconstruction of past lahar activity at Popocatepetl volcano, México. *The Holocene*, 20 (2), 265-274. <http://dx.doi.org/10.1177/0959683609350394>.
- Franco-Ramos, O., Castillo, M. y Muñoz-Salinas, E. (2016). Using tree-ring analysis to evaluate the intra-eruptive lahar activity in the Nexpayantla

- Gorge, Popocatepetl Volcano (Central Mexico). *Catena*, 147, 205-215. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.06.045>.
- Franco-Ramos, O., Vázquez-Selem, L., Zamorano-Orozco, J. J., y Villanueva-Díaz J. (2017). 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.
- Fritts, H. C. (1976). *Tree Rings and Climate*. New Jersey: The Blackburn Press.
- Lugo-Hubp, J. (1990). El Relieve de la República Mexicana. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 9, 82-111.
- Prado Lallande, A. (2017). *Geomorfología, dendrocronología y análisis sedimentológico en la cuenca alta del valle Alcalican, SW del volcán Iztaccíhuatl*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM.
- Speer, J. H. (2010). *Fundamentals of tree-rings research*. Tucson: The University of Arizona Press.
- Stoffel, M. y Bollschweiler, M. (2008). Tree-ring analysis in natural hazards research- an overview. *Natural Hazards and Earth System Science*, 8, 187-202. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-8-187-2008>.
- 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, Iztaccíhuatl volcano, México. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36: 1209-1217. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.2146>.
- Torres Beltran, C. (2013). *Análisis de los cambios del límite superior del bosque en el volcán Iztaccíhuatl*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM.
- Villanueva, J., Cerano, J., Constante, V., Montes, M. C. L. E. y Vázquez, L. (2009). *Muestreo Dendrocronológico: colecta, preparación y procesamiento de núcleos de crecimiento y secciones transversales* (pp. 1-49). Folleto Técnico, núm. 13. Gómez Palacio, Durango: INIFAP, CENID-RASPA.