

CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA DEL ÁREA NATURAL PROTEGIDA NEVADO DE TOLUCA: COMPLEJO DE VOLCANES NEVADO DE TOLUCA Y SAN ANTONIO

GEOMORPHOLOGIC CHARACTERIZATION OF THE NATURAL PROTECTED AREA NEVADO DE TOLUCA,
COMPLEX VOLCANOES: NEVADO DE TOLUCA AND SAN ANTONIO

**Luis Miguel
Espinosa-Rodríguez*,
Miguel Ángel Balderas-Plata y
Héctor Víctor Cabadas-Báez**

Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Geografía, Cerro de
Coatepec s/n, Toluca, Estado de México, México, C.P. 50180.

*Autor para correspondencia: geo_luismiguel@hotmail.com

Fecha de recepción: 30 de octubre de 2013 / Fecha de aceptación: 25 de octubre de 2014.

RESUMEN

La caracterización geomorfológica es una herramienta para la instrumentación de programas relacionados con el uso y manejo del territorio, la planeación geográfica integral, la evaluación de paisajes y de escenarios relacionados con riesgos en las regiones. En el presente estudio se realizó la cartografía geomorfológica del complejo volcánico Nevado de Toluca - San Antonio, usando criterios morfológicos y morfográficos en escala de trabajo 1:50 000 del Área Natural Protegida Nevado de Toluca, localizada sobre el paralelo 190 en el Estado de México. La carta geomorfológica representa los elementos de origen tectónico, la morfología volcánica

de edificios, relieve explosivo y efusivo; así como la constitución de cimas y parteaguas, sistemas de laderas, y procesos glaciares y fluviales. Este trabajo permitió relacionar los ritmos y procesos eruptivos del volcán con la configuración de su actual morfología, a través de ciclos de construcción-destrucción, en diversos períodos y sectores de los edificios.

PALABRAS CLAVE: geomorfología, Área Natural Protegida, relieve, cartografía.

ABSTRACT

Geomorphological characterization is a tool for the implementation of programs related to use and management of territory, comprehensive

geographical planning, evaluation of landscapes, and risk scenarios of regions. This study consisted in creating a geomorphological map of the Nevado de Toluca - San Antonio volcano complex, using morphological and morphographic criteria on scale 1:50 000 of the Natural Protected Area Nevado de Toluca, located on parallel 190 in the State of Mexico. The geomorphology map shows elements of tectonic origin, volcanic edifice, explosive and effusive relief, as well as formation of peaks, watersheds, systems of slopes, and glacial and fluvial processes. The study found relationships between the rhythms and eruptive processes of the volcanoes and their actual morphology, through construction-deconstruction cycles

of the different periods and sectors of the edifices.

KEYWORDS: geomorphology Natural Protected Area, relief, cartography.

INTRODUCCIÓN

La región comprendida por los volcanes Nevado de Toluca y San Antonio, fue decretada como Parque Nacional en enero de 1936 por el presidente en turno, Lázaro Cárdenas. A partir de entonces se han realizado trabajos específicos en diferentes áreas del conocimiento, destacándose entre otros campos, el geológico estructural, con trabajos como los de Ferrari y col. (2012) y Norini y col. (2008); el biológico con las publicaciones de Franco, (2010) y Krasilnikov y col. (2013); y el cultural, con trabajos como los de Erreguerena y col. (2009) y el de Loera y Arriaga (2010), entre otros. Sin embargo, pocas referencias se pueden encontrar en el área de la geomorfología, aún y cuando se han desarrollado algunos programas de ordenamiento territorial y planes de manejo de recursos, y se ha comprobado que la importancia de la caracterización geomorfológica, representa, entre otras ventajas, el conocimiento requerido para la instrumentación de programas relacionados con el uso y manejo del territorio, la planeación geográfica integral, la evaluación de paisajes y de escenarios relacionados con riesgos.

Por ello, el propósito de este trabajo se centra en la confección de cartografía geomorfológica en escala 1:50 000, del área recategorizada el 1 de octubre de 2013 como Área Natural Protegida. Los objetivos específicos se encaminaron en primer término, hacia el reconocimiento de la estructura geológica-estratigráfica que conformaron la zona de estudio, y en segundo término, en la construcción de una leyenda geomorfológica capaz de integrar elementos de orden estructural, volcánico y morfológico, de carácter erosivo y/o acumulativo, que se integra al nuevo mapa creado.

MATERIALES Y MÉTODOS

La primera etapa consistió en el acopio y revisión de materiales publicados, que abordaran aspectos de orden regional y local, que refieren aspectos como el origen geológico, petrológico, geomorfológico y estratigráfico del Sistema Volcánico Transversal y el Sistema Nevado de Toluca-San Antonio; con

ellos se construyeron tablas que sintetizan el desarrollo evolutivo de la región. El proceso metodológico, seguido para la construcción de la carta geomorfológica, se ajustó a los planteamientos establecidos por Lugo (1989) y Espinosa y Arroyo (2011), centrándose en la construcción analógica de cartografía temática a escala 1:50 000. Con la información recabada, se construyó la leyenda preliminar, basada en los criterios de Palacio (1985), Peña (1997) y De-Pedraza (1997). Asimismo, se construyeron cartas temáticas de tipo altimétrico, de los sistemas de drenaje, de la energía del relieve y la profundidad de la disección; es decir, cartografía morfológica y morfométrica en la misma escala de trabajo, y se verificaron en campo las unidades geomórficas. Una vez establecida la base cartográfica y la leyenda preliminar de la carta, la información espacial se transformó a un formato digital y se procesó en el sistema ArcMap10, en donde se estableció la leyenda definitiva para el documento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Elementos estructurales regionales

Los volcanes San Antonio y Nevado de Toluca han sido objeto de investigaciones y controversias en torno a su origen y evolución; sin embargo, existen puntos de encuentro, en donde se reconoce que a través de una fractura cortical se ha desarrollado el Sistema Volcánico Transversal, el cual, desde el punto de vista regional, se considera como una prolongación del sistema Clarión, que es afectado por la dinámica de la Placa del Caribe y la Norteamericana, la cual a su vez modifica la subducción de la Placa Pacífica y se asocia con sistemas de fallas regionales que han generado la formación de estratovolcanes, campos monogenéticos, estructuras escalonadas de tipo "Rift"; así como rasgos morfoestructurales que se reconocen a través de fracturas, fosas, arcos volcánicos y estructuras circulares de colapso, entre otras (Mooser y col., 1996; Ferrari y col., 2012; Capra y col., 2013).

El patrón general del sistema responde a una configuración paralela de estructuras disyuntivas *en-echelon*, en donde la intersección entre sistemas dominantes permitieron el desarrollo de zonas de debilidad y la consecuente inyección de magma en un sistema de campos volcánicos poli y monogenéticos (Blatter y Hammersley, 2010; Mazzarini y col., 2010; Verma y Luhr, 2010;

Cebriá y col., 2011; Lenhardt y Götz, 2011; Bernal y col., 2011; Alberico y col., 2012; Folch, 2012; Ferrari y col., 2012; Lenhardt y col., 2013; Capra y col., 2013).

Como consecuencia de la configuración del sistema general de los morfolineamientos locales y regionales, se formaron complejos volcánicos (Figura 1), entre los cuales se destacan: el Nevado de Colima y el Volcán de Fuego de Colima, localizados en Colima y Jalisco; los volcanes Ceboruco, Sanganguey y Santa María en Nayarit; los volcanes Tancitaro y Parícutín, en Michoacán; el Popocatepetl e Iztaccíhuatl en la cuenca de México; La Malinche en Tlaxcala, el Pico de Orizaba, Cofre de Perote y la Caldera de los Humeros en Veracruz, entre otros; además de campos monogenéticos como el Chichinautzin y Atlacomulco, localizados en el Distrito Federal y Estado de México de forma respectiva; y grabens como los ubicados en Chapala, Silao, Querétaro y Acambay, por referir algunos ejemplos.

El Sistema Nevado de Toluca-San Antonio

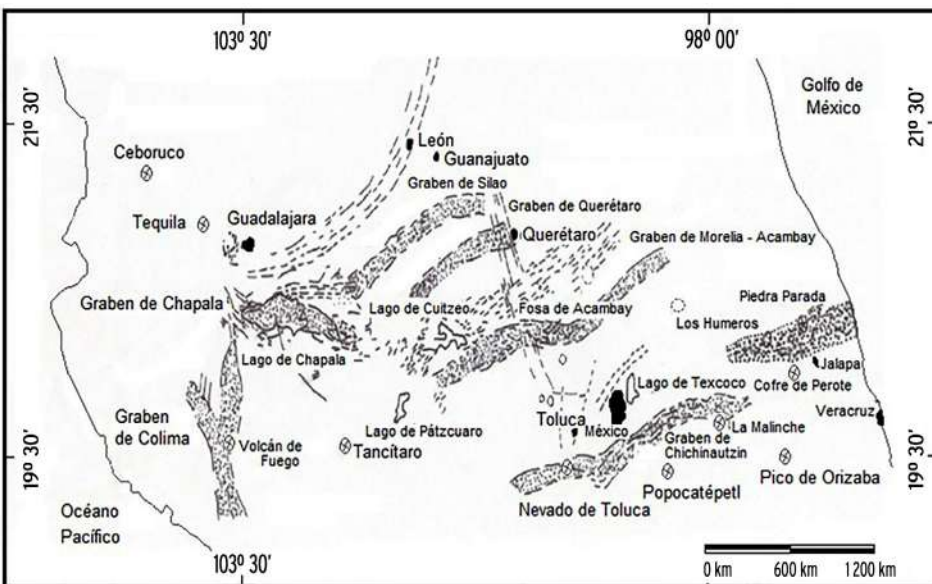
La conformación conceptual del origen y evolución del sistema volcánico local ha sido rica y exhaustiva, expuesta y cuestionada por diferentes científicos como Blomfield y Valastro (1977), Sielbert y Carrasco (2002), Arce y col. (2003), Quintanar y col. (2004), Szykaruk y col. (2004), Gómez y col. (2005), Aceves y col. (2006), Ortega y col. (2008), Servando y Tilling (2008), Norini y col. (2008 y 2010), Bellotti y col. (2010), Capra y col. (2013), entre otros, quienes han realizado diversos estudios como: dataciones de materiales rocosos y orgánicos, así como estudios de columnas estratigráficas distribuidas en todos los flancos del Nevado de Toluca y regiones periféricas al mismo.

Los estudios referidos reconocen diferentes secuencias geológicas y estratigráficas que conforman el paisaje actual y que constituyen el basamento del edificio volcánico. En la Tabla 1 se presenta información que caracteriza a cada uno de los grupos estratigráficos superiores referidos; se indica la edad aproximada de cada formación y la constitución litológica.

Desde la perspectiva de la evolución morfogenética, se considera que los edificios se han formado a través de erupciones violentas y varios períodos de calma que dieron paso a la formación de depósitos heterogéneos de materiales que, al ser depositados, se han alterado por procesos de intemperismo,

Figura 1

Elementos morfoestructurales del Sistema Volcánico Transversal. Fuente: Modificado de Ramírez, 1988.
Figure 1. Morphostructural elements of the Mexican Volcanic Belt. Source: Modified of Ramírez, 1988.



erosión y acumulación, relacionados con ambientes glaciares, periglaciares y fluviales. De forma particular, existen discrepancias en la cronología de las diferentes etapas evolutivas de los volcanes; ello es debido a que las recientes erupciones sepultaron evidencias de eventos geológicos pasados.

De acuerdo con Vázquez (2002) y Aceves y col. (2006), la síntesis de construcción y modificación del edificio volcánico del Nevado se representa en cinco etapas, caracterizadas por ciclos de construcción y destrucción; en éstas se describen procesos de estructuración del edificio, colapsos de caldera, erupciones explosivas y asociación en algunos casos, con eventos climáticos globales (Tabla 1). De acuerdo con ello, las etapas a saber son:

Primera etapa. Se tiene noción que la formación del primer edificio volcánico o estructura primitiva fue hace un millón de años. Se emplazó sobre el sistema de alineamientos NW-SE y se relaciona con los subsistemas de fracturas alineadas en dirección SW-NE y E-W. Se estima que el edificio supera los 5 000 m de altitud y se caracteriza por poseer una amplia chimenea y un cráter abierto. En esta fase se incorpora la Etapa "A" definida por Bloomfield y Valastro en 1974.

Segunda etapa. Ocurrida hace unos 100 000 años, se caracteriza por dos colapsos laterales al sur y sureste que produjeron dos avalanchas, la DAD1 que presenta isopacas de 10 m, y la DAD2 que formó a su vez los depósitos Pilcaya y El Mogote, que cubren una superficie superior a los 200 km² (Aceves y col., 2006).

Tercera etapa. Se desarrolló entre 60 000 años y 36 000 años atrás; presenta una intensa actividad con emanaciones de carácter peleano que rompen parte de la estructura superior del cráter del edificio. La actividad se acompaña del desarrollo de avalanchas, flujos de cenizas, así como de un colapso que permite el origen de la caldera, que presenta un eje que supera más de 1 km, y la destrucción de la parte superior del cono; asimismo, se generan potentes depósitos de sedimentos sobre las laderas, originados por las avalanchas piroclásticas y las cenizas de flujo y de caída; ello corresponde con la etapa "B" de Bloomfield y Valastro (1974).

Cuarta etapa. Ocurrida entre 43 000 años y 21 500 años atrás, desarrollándose una erupción pliniana en cuatro fases que formaron depósitos de pómez vesicular, a la cual Macías y col. (1997), fecharon y denominaron como

el "Flujo de pómez rosado". En este período se formaron flujos de bloques y cenizas, generados por la destrucción de domos, los cuales fueron seguidos por el flujo "Pómez La Ciervita" y la erupción pliniana VEI-3 (por sus siglas en inglés, Volcanic Explosivity Index), que fue denominada por Bloomfield y Valastro (1977), como la "Formación Pómez Toluca Inferior (FPTI)", que fue datada entre 24 000 y 21 760 años atrás, y clasificada en ocho eventos de caída y flujos intercalados (Capra y col., 2013). Algunos autores como Aceves y col. (2006) y Arce y col. (2003 y 2006), coinciden con el desarrollo paralelo de la erupción con la glaciación Serie Mil.

La última etapa de formación fue caracterizada por depósitos de cenizas y una erupción vulcaniana ocurrida hace unos 15 000 años aproximadamente, fue seguida por otra erupción pliniana 2 000 años después, a la cual se le denominó "Pómez blanca intermedia". Esta secuencia fue seguida por una nueva erupción pliniana violenta, la cual fue datada por Bloomfield y Valastro (1974), y designada como "Formación Pómez Toluca Superior (FPTS)", que se caracterizó por el depósito de estratos de materiales volcánoclasticos superiores a 800 m de espesor; etapa conocida como "E" (Aceves y col., 2006).

La dirección de la explosión lateral fue hacia el NE, y como consecuencia de ello, se han localizado depósitos de pómez de caída a

unos 100 km de distancia del cráter, definiendo la forma en herradura.

La edad del último evento explosivo ha sido replanteada en varias ocasiones dependiendo del método de datación empleado. Los valores más recientes publicados por Arce y col. (2013), muestran una edad de aproximadamente 10 500 años atrás.

Rasgos geomorfológicos del ANP

En el entendido que el relieve se define como una evidencia y manifestación de los procesos geológicos y de modelado superficial, resulta lógico comprender que los rasgos geomorfológicos que predominan en el Área Natural Protegida hacen referencia al desarrollo de procesos de modelado volcánico, glaciar, periglaciar y fluvial; algunos de ellos muestran evidencias de procesos de erosión, transporte, acumulación, control estructural y presencia de masas de hielo, entre otros. De acuerdo con lo anterior, la leyenda para la carta geomorfológica ha quedado estructurada con diez clases de relieve dominantes, como se observa en la carta correspondiente (Figura 2).

La leyenda del mapa geomorfológico se integra de la siguiente manera:

1. Elementos lineales de origen tectónico

a. Fracturas. Representan líneas de rompimiento entre las rocas, aunque éstas se encuentren sepultadas y se manifiesten en superficie, sobre este grupo se emplazan valles fluviales que desarrollan perfiles asimétricos.

Tabla 1

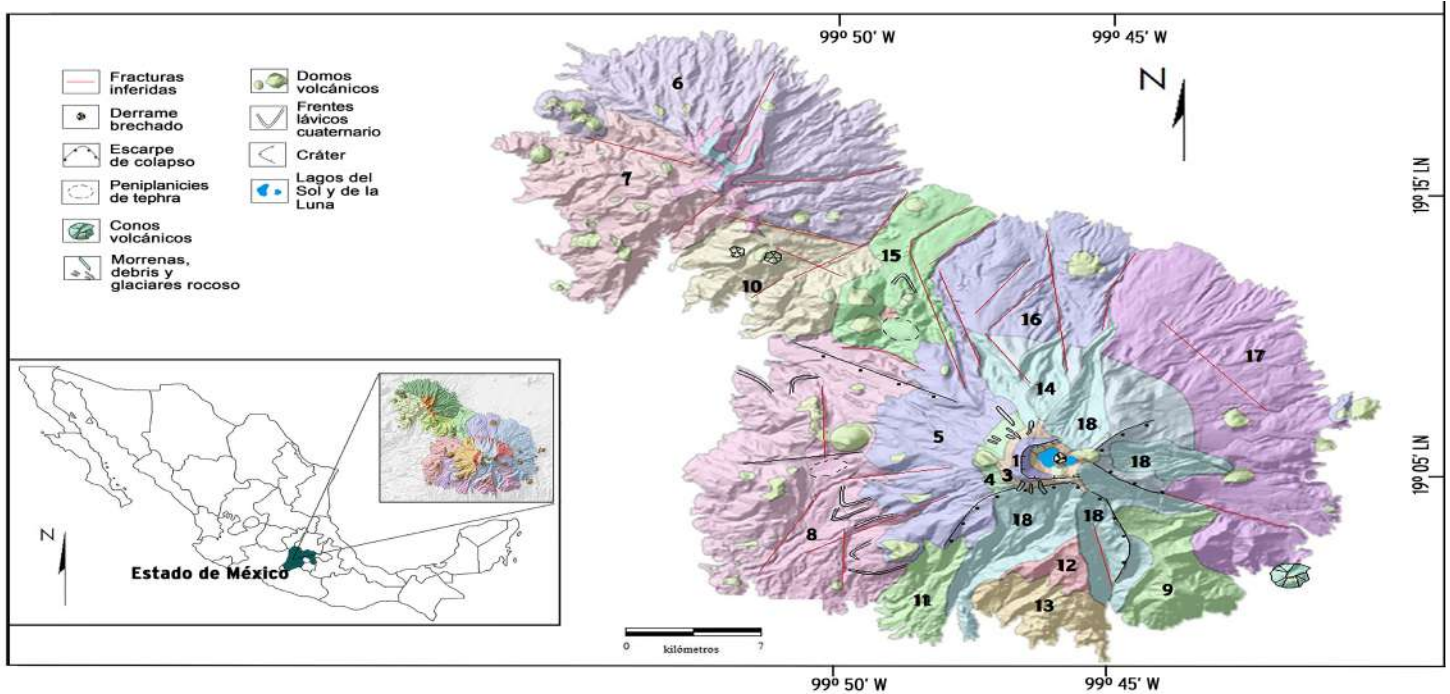
Formaciones y secuencias litológicas que constituyen a la columna estratigráfica del Nevado de Toluca.
Table 1. Geologic and lithological formations and sequences of the Nevado de Toluca.

Secuencia estratigráfica del Nevado de Toluca*							
Grupo superior	Edad	Formación	Rocas			Características generales	
			Ígneas	Sedimentarias	Metamórficas		
Rocas cuaternarias	Reciente	Formación Pómez Toluca Superior	Pómez	-----	-----	Superficie de 2 000 km ² ; volumen de 3.5 km ³ ; isopaca promedio en Calimaya: 200 m.	
		Formación Pómez Toluca Inferior	Pómez	-----	-----	Superficie de 400 km ² ; volumen de 0.33 km ³ ; isopaca promedio en Calimaya: 400 m.	
	60 ka	Formación Zinacantépetl	Lahares y piroclastos	-----	-----	Rellena valles fluviales y se asocia con depósitos recientes como la ceniza blue-gray y depósitos de nubes ardientes y lluvias de cenizas.	
	1 ma a 100 ka	Formación Chontalcuatlán	Lahares Pómez Ceniza	-----	-----	Cubren depósitos al sur del Nevado y forman parte de las cuencas de los ríos San Jerónimo y Chontalcuatlán. Cubren valles fluviales de los ríos Calderón y Tenancingo entre otros.	
Secuencia volcánicas Plioceno a Cuaternaria	Plioceno a Pleistoceno	Andesita Calixtlahuaca	Andesita Flujos piroclásticos	-----	-----	Conforma parte del volcán San Antonio; aflora al NE de la ciudad de Toluca.	
		Andesita Nevado de Toluca	Andesita Dacita	-----	-----	Aflora en laderas W al sur de la Mesón Viejo.	
Secuencia volcánica Zempoala	Mioceno a Plioceno	Andesita Zempoala	Brecha volcánica Basalto Lahares	-----	-----	Localizada al SW de Zempoala y norte de Villa Guerrero. Espesor aproximado de 500 m.	
	Mioceno	Tepoztlán	Lahares Andesita	-----	-----	Aflora en las cercanías de Tenancingo y Villa Guerrero Desarrollo de acantilados y relieve escalonado.	
Rocas terciarias y asociadas a la Sierra Madre del Sur	Terciario	Basalto San Nicolás	Basalto	-----	-----	Formación andesítico a basáltica.	
		Riolita Tilzapotla	Dacita Riolita Riodacita	-----	-----	Espesores de 250 m.	
	Eoceno medio a Oligoceno	Formación Balsas	Toba Andesita Basalto	Conglomerados Arcosas Limolita Caliza	-----	-----	Espesor aproximado de 200 m.
Plataforma Morelos	Jurásico a Cretácico	Mexcala	-----	Caliza Conglomerado Arenisca Dolomita Grauvaca	-----	-----	Localizada en la región de Cacahuamilpa y Amacuzac. Desarrollo de sinclinales y sinclinorios.
		Morelos	-----	Caliza Dolomía Pedernal	-----	-----	Aflora en Ixtapan de la Sal. Espesor máximo: 1 000 m. Calizas arrecifales. Desarrollo del sistema kárstico de Cacahuamilpa.
Secuencia sedimentaria Jurásico a Cretácico	Jurásico a Cretácico	Amatepec	-----	Caliza Lutita	-----	-----	Proximidades de Sultepec. Secuencias de 200 m a 450 m de espesor.
		Xochicalco	-----	Caliza Lutita Pedernal	-----	-----	Se localiza en el sureste. Rocas interestratificadas. Se encuentran fósiles de radiolarios.
		Acuitlapán	Fragmentos no diferenciados	Lutita Caliza Conglomerado Arenisca Grauvaca	Esquisto	-----	-----
Basamento	Triásico tardío a Jurásico temprano	Roca verde Taxco Viejo	Andesita Basalto Tobas Lahares	Grauvaca	-----	-----	Proximidades de Temascaltepec. Sector meridional de la Sierra de Ixtapan a Tonalico.
	Mesozoico a Paleozoico (?)	Esquisto Taxco	Andesita Riolita	Depósitos clásticos	Esquistos Pizarra Cuarcita Metatobas	-----	Afloramiento de 5 km ² . Sierra de Ixtapan a Tonalico. Proximidades de Sultepec.

*Construido con información de Bloomfield (1973); Bloomfield y Valastro (1974); Sánchez (1978); D'Antonio y col. (2008); Norini (2010); Arce y col. (2006); Aceves y col. (2006); Smith y col. (2009) y Caballero y Capra (2011).

Figura 2

Carta geomorfológica del Área Natural Protegida Nevado de Toluca. Escala de construcción 1:50 000.
Figure 2. Geomorphology map of the Nevado de Toluca Natural Protected Area. Map scale 1:50 000.



1. Sistema de cimas y parteaguas del Nevado de Toluca.
2. Sistema de cimas y parteaguas del volcán San Antonio.
3. Laderas cumbreales de composición intermedia-ácida y disección fluvial escasa.
4. Laderas de montaña superiores con geometría recta y convexa formada por flujos de materiales intermedios y ácidos con disección fluvial moderada.
5. Laderas de montaña superiores con geometría de interfluvios convexa que formadas por flujos de materiales intermedios y ácidos disección fluvial moderada.
6. Laderas de montaña superiores con morfología de interfluvios convexa, perfil asimétrico formadas por derrames y flujos intermedios-ácidos y disección fluvial intensa.
7. Laderas convexas formadas por interfluvios, con geometría mixta y asimétrica, constituidas por derrames y flujos piroclásticos de composición intermedia-ácida y disección fluvial moderada a alta.
8. Laderas convexas asimétricas constituidas por derrames y flujos piroclásticos intermedios y ácidos y disección fluvial intensa.
9. Laderas convexas asimétricas constituidas por piroclásticos de composición intermedia-ácida y disección fluvial moderada a intensa.

10. Laderas convexas con geometría rectilínea constituidas por derrames y flujos piroclásticos de composición intermedia-ácida y erosión moderada.
11. Laderas convexas de perfil asimétrico formadas por derrames de basalto y andesita con disección fluvial intensa.
12. Laderas rectas de perfil asimétrico conformadas por derrames y flujos piroclásticos intermedios-ácidos con disección fluvial moderada a intensa.
13. Laderas mixtas de perfil asimétrico conformadas por derrames y flujos piroclásticos intermedios-ácidos con disección fluvial intensa.
14. Laderas superiores mixtas formadas por depósitos piroclásticos y pómez con disección fluvial moderada a intensa.
15. Laderas mixtas y rampas de transición con perfiles asimétricos formadas por derrames y flujos piroclásticos de composición intermedia-ácida con disección fluvial moderada a baja.
16. Laderas convexas con perfiles asimétricos formadas por derrames y flujos piroclásticos y lahares con disección fluvial intensa.
17. Laderas bajas acumulativas de geometría convexa formadas por depósitos de pómez de composición intermedia-ácida con disección fluvial intensa.
18. Valles y circos glaciares con disección fluvial controlada por dominio estructural.

b. Fracturas inferidas. Representan líneas de rompimiento entre las rocas que se han inferido a través del comportamiento del sistema de drenaje y/o distribución espacial litológica.

c. Falla transcurrente. Predomina un movimiento lateral horizontal izquierdo, en dirección NW - SE, con referencia al plano de falla. Se evidencia a través de las modificaciones del patrón fluvial en donde aparecen deformaciones en cabeceras de cauces de primer orden, y en afluentes de segundo y tercer orden en corrientes más desarrolladas.

2. Constitución de cimas y parteaguas

a. Sistema de cimas y parteaguas del Nevado de Toluca. Representa la parte más alta del volcán Nevado de Toluca; presenta una morfología vista en planta de "herradura", la cual se abre con orientación hacia el E, dirección sobre la cual el volcán dirigió la última erupción pliniana.

b. Sistema de cimas y parteaguas del volcán San Antonio. Pertenece a un sistema de cimas sobre las cuales se desarrolla la disección fluvial, presentando alta concentración de cauces y cabeceras escarpadas. La morfología de ésta tiende a ser asimétrica en planta y

perfil, como resultado de la disección fluvial, que es favorecida por la presencia de fracturas.

3. Morfología volcánica: edificios, relieve explosivo y efusivo

Se representa por geoformas de constitución volcánica de diferente geoquímica. Se caracterizan por mostrar morfología cómica que presenta pendientes superiores a los 35°, coronas cupiformes y alturas variables.

a. Domos y edificios secundarios. Representan a un grupo de elevaciones con forma geométrica, relativamente simétrica, de tamaño diverso. El origen de los mismos se relaciona con actividad

volcánica, en donde la extrusión de magma de composición intermedia y ácida forma laderas comprendidas entre los 35° y 40° de pendiente.

b. Cráter interno. Depresión que representa la última erupción explosiva que dejó vestigios en la forma de las pendientes y la abertura oriental del mismo. La profundidad varía entre 50 m y 200 m; dentro del mismo, los materiales se encuentran poco consolidados. Por descongelamiento y ocasionalmente precipitación, se alimentan dos sistemas de lagos que se encuentran divididos por un derrame brechado de dacita, conocido en el ámbito común como "omblijo". Dentro de la unidad se desarrolla un escarpe activo con desprendimiento de lajas de roca y una mesa volcánica.

4. Escarpe de colapso

Se localizan en las cabeceras de colapsos generados por erupciones laterales de carácter explosivo, asociadas con materiales de composición química ácida; presentan una forma alargada y una depresión prolongada en dirección del flujo de los piroclastos emitidos. El volcán muestra cuatro colapsos definidos de forma precisa; el más reciente y conservado de desarrolla desde el cráter hacia el Este (Figura 2).

5. Derrame brechado

Corresponde a la última manifestación fluida de la cámara magmática, que arrojó material que abarca una superficie menor a 500 m². La forma del volcán indica condiciones de viscosidad a través de la pendiente del mismo; ésta rebasa los 37° en cada uno de los lados que posee.

6. Frentes lávicos cuaternarios

Corresponden a la masa frontal de flujos de lavas de composición andesítica, que por la forma, evidencian viscosidad intermedia y alta; motivo por el cual algunas de ellas pueden considerarse de tipo masivo.

7. Constitución de sistemas de laderas

Existen laderas con atributos de altitud, ángulo general de pendiente, geometría (cóncava, convexa, recta y mixta) y disección fluvial con grados de desarrollo disímiles. Todas ellas se relacionan con procesos de origen volcánico, asociados a derrames de composición intermedia y ácida; así como de algunos materiales piroclásticos. Por lo general, los perfiles transversales de los sistemas tienden a ser asimétricos, mientras que desde la perspectiva longitudinal se caracterizan por una morfología semicupuliforme alargada e

interfluvios modelados por sistemas fluviales. Las laderas orientadas hacia el Norte, Sureste y Este presentan evidencias de modelado glaciar, así como de colapsos laterales del edificio.

8. Peniplanicies de tephra y sedimentos fluvio aluviales

Corresponden a superficies que presentan una superficie de modelado poco desarrollado, tanto en sentido positivo o negativo; en donde, la pendiente general no rebasa un promedio generalizado de 60°. Las nominadas tephra están constituidas por materiales piroclásticos mal clasificados y de orden heterométrico, en tanto que las de sedimentación fluvial obedecen a porciones pequeñas de territorio que se relacionan con sistemas de captación de corrientes fluviales autóctonas.

9. Morfología glaciar

Se presentan evidencias en el Nevado de Toluca, el cual se caracteriza por contar con un relieve de exaración. Entre las formas más comunes que se desarrollaron se encuentran: valles glaciares con disección fluvial, originados por procesos de exaración, y que poseen formas en "U". Éstos se desarrollaron sobre antiguos valles fluviales y/o estructurales, los cuales a su vez, en el tiempo presente son retrabajados por la fuerza de los ríos; así como sistemas de depósitos conformados por morrenas, depósitos de debris y glaciares rocosos.

10. Morfología fluvial

El sistema de drenaje, de forma aparente, responde solo al patrón generalizado radial típico de estructuras circulares, en donde la circulación del agua tiende a ser centrífuga; sin embargo, el sistema local resulta complejo, debido a que responde a procesos de control estructural, herencia glaciar, y dinámicas erosivo-acumulativas relacionadas con la litología. Éste se puede clasificar en diferentes tipos de órdenes y configuraciones, entre ellas destacan la dendrítica, la rectangular, la pinada y la asimétrica; sin embargo, por motivos de representación cartográfica se ha representado en un solo tipo de unidad (Figura 3).

La interpretación general de las geoformas del volcán San Antonio y Nevado Toluca posee una complejidad alta, debido a la historia evolutiva regional y local que involucra aspectos de orden tectónico, volcánico, períodos glaciares, cambios térmicos planetarios y de estabilidad morfoclimática. En este orden de ideas, se logran observar cinco áreas particulares que caracterizan a la geomorfología de la zona de estudio (Figuras 4 y 5).

1. Elementos morfoestructurales: el patrón general de la estructura orográfica sigue las direcciones NNE-SSE, como régimen rector del sistema originado durante el Pleistoceno y la manifestación secundaria E-W del Cuaternario.

Figura 3

Cartas de sistema-órdenes de drenaje con unidades geomorfológicas del Área Natural Protegida Nevado de Toluca. Escala de construcción 1:50 000.

Figure 3. Map of drain orders system with geomorphological units of the Nevado de Toluca Natural Protected Area. Map scale 1:50 000.

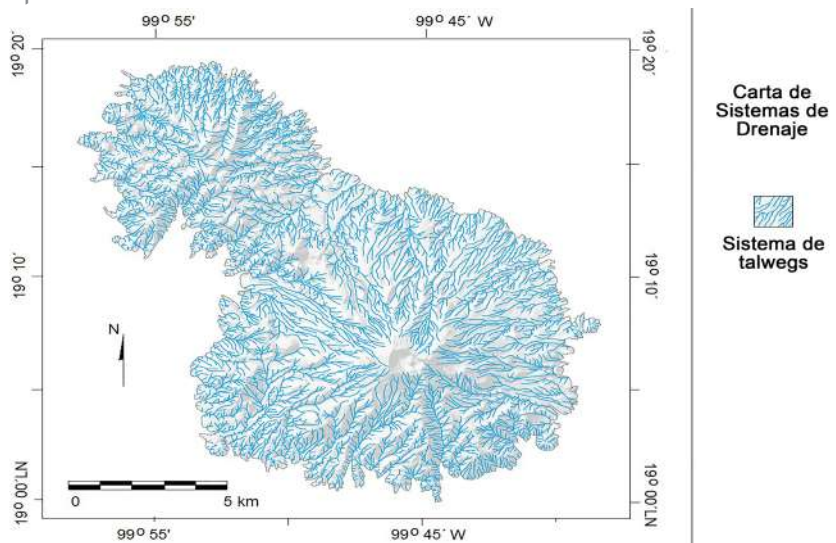
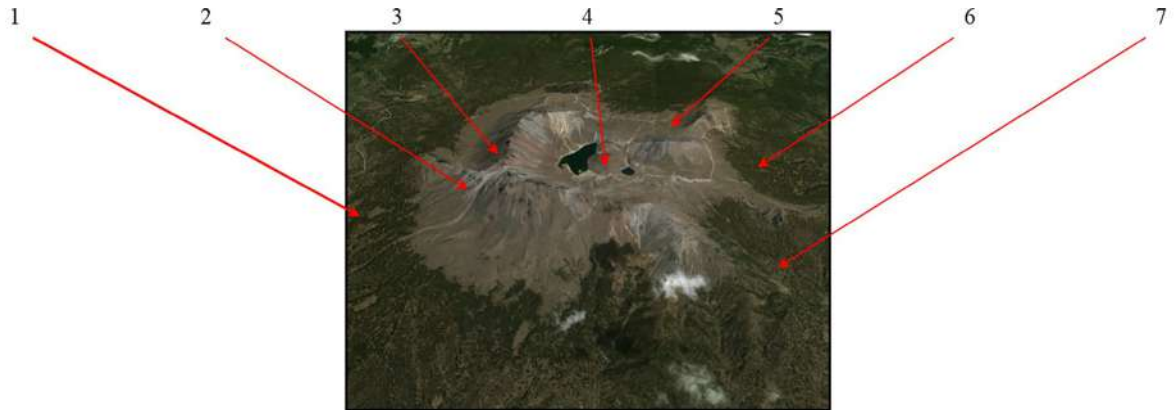


Figura 4

Representación diagramática de las unidades geomorfológicas del Nevado de Toluca.

Figure 4. Diagrammatic representation of the geomorphological units of the Nevado de Toluca volcano.



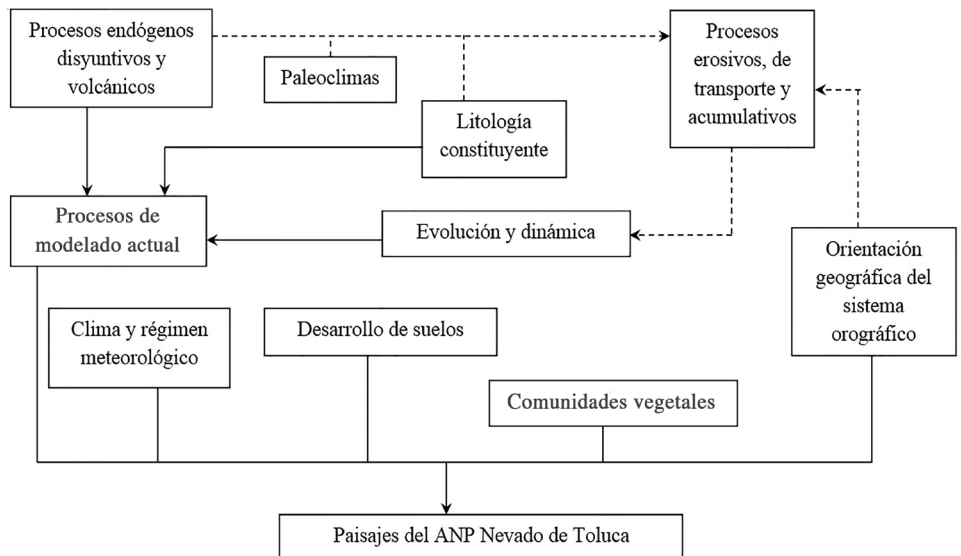
Unidades	1	2	3	4	5	6	7
Morfología	Laderas altas	Laderas cumbrales	Nivel de cimas	Domos	Laderas rectas	Colapsos laterales	Valles glaciares
Litología	Dacitas, piroclastos	Morrenas	Dacitas, piroclastos	Dacita	Pómez	Piroclastos, pómez	Piroclastos, pómez
Procesos dominantes	Disección fluvial alta y moderada, desarrollo de barrancas	Remoción en masa, disección fluvial escasa	Exaración y remoción en masa local	Crioturbación y gelifracción	Disección fluvial de moderada a acelerada, profundización	Disección fluvial, profundización y erosión remontante	Disección fluvial
Modelo de perfil							

Fuente: Modelo modificado de Ortiz (1987); Imagen modificada de Google Earth (2014).

Figura 5

Síntesis del origen, modelado y desarrollo de paisajes del ANP.

Figure 5. Synthesis of origin, modelling and development of landscapes of ANP.



El relieve muestra configuraciones asociadas con dislocación de estructuras disyuntivas, procesos locales de basculamiento y transcurrencia, control estructural de valles fluviales y desmembramiento de algunas estructuras morfológicas secundarias.

2. Elementos volcánico y de depósito: diferenciados a través de períodos eruptivos de orden y edad diferente, caracterizados con eventos efusivos y explosivos, que dejaron isopacas de potencia disímil, observados a través de columnas estratigráficas. Se distinguen colapsos laterales como testigos de la energía eruptiva en el caso de Nevado de Toluca.

3. Elementos paleoclimáticos y morfoclimáticos: observados en el macizo montañoso del Nevado a través de formas como valles y morrenas de diferente edad y granulometría, que indican variaciones en el régimen de temperatura y humedad.

Tabla 2

Variables de conformación de la red fluvial en el sistema ANP Nevado de Toluca y características generales de los patrones de drenaje.

Table 2. Conformation variables of the fluvial network of Nevado de Toluca Natural Protected Area system and general characteristics of drainage patterns.

Red fluvial	
Variabes de conformación	Patrones de configuración (anomalías)
<ul style="list-style-type: none"> - Disposición estructural - Geometría de vertientes - Orientación geográfica - Patrón climático dominante - Régimen de precipitación y temperatura - Litología dominante - Pendiente general del terreno 	<ul style="list-style-type: none"> a. Redes troncales con niveles de base diferentes b. Cambio en patrones de dirección de los sistemas troncales c. Configuración asimétrica de valles, taludes e interfluvios d. Sistemas de bifurcación con ángulos de confluencia disímiles e. Cambios en los gradientes de pendiente y sistemas de captura de cuenca

4. Elementos litológicos: que definen por una parte las características de los procesos genéticos del relieve y por otra, la capacidad de resistencia a la erosión y transporte de sedimentos.

5. Elementos fluviales: observados a través de la variedad de configuraciones de la red de drenaje, que a pesar de la aparente homogeneidad, se desarrollan en patrones morfológicos y de distribución heterogénea; se reconocen procesos de “re-trabajo” sobre estructuras disyuntivas sepultadas por materiales volcanoclasticos y/o modeladas por valles glaciares y/o, sobre colapsos laterales. El sistema reconoce también procesos de socavación desigual de laderas y valles (Tabla 2).

CONCLUSIONES

Con referencia a la construcción de la leyenda de la carta geomorfológica, la gestación de ésta se consideró a partir de una estructura sistémica que conserva además de las propiedades holísticas, el orden y jerarquía apropiada capaz de integrar elementos conformados a partir de la geoforma, el origen, el material constituyente y el carácter erosivo

y/o acumulativo que se integra al nuevo mapa creado. Así la cartografía de orden morfológico y morfométrico generada para la confección del mapa final permite distinguir elementos de diferenciación genética, evolutiva, dinámica y de distribución espacial; así como de la influencia de la zonalidad generada por el cambio de elevación que se relaciona con la herencia de ambientes criogénicos de diferente magnitud y la formación de pisos altitudinales afectados por gradientes de temperatura y humedad. Se observa en la carta que si bien los edificios San Antonio y Nevado de Toluca comparten un origen similar, las diferencias de composición-edad, altitud, extensión y geometría han desarrollado procesos de equifandad y autopoiesis que generan paisajes variados con estados de uso y manejo que imprimen condiciones hemeróbicas de orden desigual. Se zonifican regiones para cada volcán, para el caso del San Antonio se distinguen dos unidades morfológicas con alta densidad de disección; sin embargo, el estado de conservación natural del paisaje es alta; toda vez que el Nevado presenta diferenciación por altitud y orientación en donde, la primera variable representa sistemas de laderas rectas

relacionadas con influencia de procesos de exaración en la zona cumbrial y; por debajo de ella sectores reconocidos en direcciones Norte, Noreste, Sur-Sureste y Oeste. La diferenciación territorial responde a los colapsos del edificio, la presencia de valles glaciares y a la intensidad de los procesos de disección fluvial, encontrándose mayor diversidad de geoformas en el sector SSE seguido del oriental. En este orden de ideas, el reconocimiento de la estructura geológica-estratigráfica que conforma a la zona de estudio pone en evidencia la forma en la cual el sustrato litológico condiciona la mecánica y direccionalidad de los procesos de modelado observados a través una complicada estructura fluvial conformada por más de dos centenas de cuencas con morfología y alometría disímil, condición que motiva a la generación de nuevas preguntas relacionadas con aspectos de calificación cualitativa y cuantitativa de levantamientos, hundimientos, movimientos horizontales, ciclos eruptivos, procesos de erosión, transporte y patrones de sedimentación en el tiempo presente. Entretanto, los contrastes generados entre la dinámica endógena, el sustrato geológico y la manifestación de la historia eruptiva del volcán observada a través del relieve y los depósitos que en él se encuentran, configuran condiciones que propician una geodiversidad compleja que se matiza por el desarrollo de procesos de modelado glaciar y fluvial. Se observa que los ritmos y procesos eruptivos generaron un estilo relacionado con ciclos de construcción-destrucción de diversos sectores del Nevado de Toluca en donde el control estructural ha configurado la morfología que se observa en el tiempo presente. Es así que los colapsos laterales del edificio han dado la pauta a la formación de paisajes naturales con una clara distinción morfológica entre sectores de laderas y valles que generan un mosaico de diversidad, toda vez que en el caso del volcán San Antonio la homogeneidad tiende a ser más común. ■

REFERENCIAS

- Aceves, F., López, J. y Martin del Pozzo, A. (2006). Determinación de peligros volcánicos aplicando técnicas de evaluación multicriterio y Sistemas de información geográfica en el área del Nevado de Toluca. *Revista Mexica de Ciencias geológicas*. 23(2): 113-124.
- Alberico, I., Petrosino, P., Mglione, G., Bruno, L., Capaldo, F., Dal, A., Lirer, L., and Mazzola, S. (2012). Mapping the vulnerability for evacuation of the Campi Flegrei territorial system in case of a volcanic unrest. *Natural Hazardas*. (64): 1823-1854.
- Arce, J., Macías, J., Gardener, J., and Layer, P. (2006). A 2.5 Ka history of dacitic magmatism at Nevado de Toluca, Mexico. Petrological $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ dating and experiental constraints. *Journal of Petrology*. 47(3): 457-479.
- Arce, J., Macías, J., and Vázquez, L. (2003). The 10.5 Ka Plinian eruption of Nevado de Toluca volcano, Mexico: Stratigraphy and hazard implications. *GSA. Bulletin*. 115(2): 230-248.
- Arce, J., Gardner, J. and Macías, J. (2013). Pre-eruptive conditions of dacitic magma erupted during the 21.7 ka Plinian event at Nevado de Toluca volcano, Central Mexico. *Journal of vulcanology and geothermal research*. Elsevier. 249(2013): 49-65.

- Bellotti, F., Capra, L., Sarocchi, D., and D'Antonio, M. (2010). Geostatistics and multivariate analysis as tool to characterize volcanoclastic deposits: application to Nevado de Toluca Volcano, Mexico. *Journal of Volcanology*. 191(1): 117-128.
- Bernal, J., Lachniet, M., McCulloch, M., Mortimer, G., Morales, P., and Cienfuegos, E. (2011). A speleothem record of Holocene climate variability from southwestern Mexico. *Quaternary Research*. 75: 104-113.
- Blatter, W. and Hammersley, L. (2010). Impact of the Orozco fracture zone on the central Mexican Volcanic Belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, Elsevier*. 197: 67-84.
- Bloomfield, K. (1973). The age and significance of the Tenango basalt, Central Mexico. The International Association of Volcanology and Chemistry of the Earths interior in the international Union of Geodesy and Geophysics, Mapoly, Italy. *Bulletin Volcanologique*. 37: 586-595.
- Bloomfield, K. and Valastro, J. (1974). Last Pleistocene eruptive history of the Nevado de Toluca, Central Mexico. Geological Society of America. *Bulletin Volcanologique*. 85: 901-906.
- Bloomfield, K. and Valastro, S. (1977). Late Quaternary tephrchronology of Nevado de Toluca Volcano, Central Mexico. *Overseas Geology and Mineral Resources*. 46: (1-15).
- Caballero, L. and Capra, L. (2011). Textural analysis of particles from El Zaguán debris avalanche deposit, Nevado de Toluca volcano, Mexico: Evidence on flow behavior during emplacement. *Journal of vulcanology and geothermal research. Elsevier*. 200: 75-82.
- Capra, L., Bernal, J., Carrasco, G. and Roverato, M. (2013). Climatic fluctuations as a significant contributing factor for volcanic collapses. Evidence from Mexico during the Late Pleistocene. *Global and Planetary Change*. 100: 194-203.
- Cebriá, J., Martín, C., López, J., Morán, D. and Martiny, B. (2011). Numerical recognition of alignments in monogenetic volcanic areas: examples from the Michoacan—Guanajuato Volcanic Field in Mexico and Calatrava in Spain. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, Elsevier*. 201(1-4): 73-82.
- D'Antonio, M., Capra, L., Sarocchi, D., y Bellotti, F. (2008). Reconstruction of the eruptive event associated to the emplacement of the 13 ka El Refugio pyroclastic flow, Nevado de Toluca volcano (Mexico). *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 25: 115-134.
- De la Cruz-Reyna, and Tilling, R. (2008). Scientific and public responses to the ongoing volcanic crisis at Popocatepetl Volcano, Mexico: importance of an effective hazards-warning system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, Elsevier*. 170 (1-20): 121-134.
- De-Pedraza, J. (1997). *Geomorfología: principios, métodos y aplicaciones*. Madrid: Editorial Rueda. 414 Pp.
- Espinosa L., y Arroyo, K. (2011). *Geomorfología en México. Una visión histórica, metodológica y aplicada*. Saarbrücken Alemania: Editorial Académica Española. 277 Pp.
- Erreguerena, P., Montero, A. y Junco, R. (2009). *Las aguas celestiales: Nevado de Toluca. Arqueología subacuática*. Instituto Nacional de Antropología e Historia. México. 165 Pp.
- Ferrari, L., Orozco, T., Manea, V. and Manea, M. (2012). The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, Elsevier*. 522-523: 122-149.
- Folch, A. (2012). A review of tephra transport and dispersal models: Evolution, current status and future perspectives. *Journal of vulcanology and geothermal research. Elsevier*. 235-236: 1-14.
- Franco, S. (2010). *Los hongos comestibles del Nevado de Toluca*. Universidad Autónoma del Estado de México. 147 Pp.
- Gómez, A., Orozco, T. y Ferrari, L. (2005). Petrogénesis ígnea de la Faja volcánica Trasmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 57(3): 227-283.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2014). Carta topográfica E14A48 Toluca Escala 1:50:000. México
- Krasnikov, P., Gutiérrez, M., Ahrens R., Cruz, C., Sedov, S., and Solleiro E. (2013). *The soils of Mexico. Of the buried paleosols of the Nevado de Toluca, Central Mexico*. World Soils Book Series. Springer. 74 Pp.
- Lenhardt, N., Böhnelt, H., Hinderer, M., and Hornung, J. (2013). Paleocurrent direction measurements in a volcanic setting by means of anisotropy of magnetic susceptibility: a case study from the Lower Miocene Tepoztlán Formation (Transmexican Volcanic Belt, Central Mexico). *Sedimentary Geology*. 1: 1-14.
- Lenhardt, N. and Götz, A. (2011). Volcanic settings and their reservoir potential: An outcrop analog study on the Miocene Tepoztlán Formation, Central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, Elsevier*. 204: 66-75.
- Loera, M. y Arriaga, A. (2010). *En las laderas del volcán. Medio ambiente y paisajes históricos en Calimaya de González*. México: Instituto Nacional de Antropología e Historia. 209 Pp.
- Lugo, J. (1989). *Geomorfología Aplicada, métodos cartográficos*. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. 128 Pp.
- Macías, J., Carrasco, G., Martín del Pozo, A., Siebe, C., Holblitt, R., Sheridan, M. y Tilling, R. (1997). Mapa de peligros del volcán Popocatepetl. Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mazzarini, F., Ferrari, L., and Isola, I. (2010). Self-similar clustering of cinder cones and crust thickness in the Michoacan-Guanajuato and Sierra de Chichinautzin volcanic fields, Trans-Mexican Volcanic Belt. *TecnoPhysics*. 489: 55-64.
- Mooser F., Montiel A. y Zuñiga A. (1996). Nuevo mapa geológico de las cuencas de México, Toluca y Puebla. Estratigrafía, tectónica regional y aspectos geotérmicos. Comisión Federal de Electricidad. 68 Pp.
- Norini, G., Capra, L., Groppelli, G., and Lagmay, A. (2008). Quaternary sector collapses of Nevado de Toluca volcano (Mexico) governed by regional tectonics and volcanic evolution. *Geosphere*. 4: 854-871.
- Norini, G., Capra, L., Groppelli, G., Agliardi, F., Pola, A. and Cortes, A. (2010). The structural architecture of the Colima Volcanic Complex. *Journal of Geophysical Research*. 115(B12): 12209.
- Ortega, F., Herrera, E. y Dávalos, G. (2008) On the nature and role of the lower crust in the volcanic front of the Trans-Mexican Volcanic Belt and its fore-arc región, southern and central Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 25: 405-364.
- Ortiz, M. (1987). Los cambios en el nivel de base como mecanismo morfo-genético de la asimetría de valles. En *Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. 17(1): 9-44.
- Palacio, J. (1985). *El croquis geomorfológico: una alternativa en Geomorfología Aplicada*. En: Divulgación Geográfica No. 3, Instituto de Geografía Universidad Nacional Autónoma de México. 24 Pp.
- Peña, J. (1997). *Cartografía geomorfológica: básica y aplicada*. Geofoma ediciones, Logroño. 227 Pp.
- Quintanar, L., Rodríguez M., and Campos, J. (2004). A shadow crustal earthquake doublet from trans-Mexican Volcanic Belt (Central Mexico). *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1(94): 845-855.
- Ramírez, T. (1988). Análisis morfoestructural de la Faja Volcánica Trasmexicana (Centro-oriental). *Coordinación Científica de la Escuela de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México*. 1(10): 25.
- Sánchez, G. (1978). Notas sobre la vulcanología cenozoica de la región entre Temascaltepec y La Marquesa, Estado de México. Libro guía de la excursión a Tierra caliente, Estados de Guerrero y México. *Sociedad Geológica Mexicana*. 1: 26-32.
- Sielbert, L. and Carrasco, G. (2002). Late-Pleistocene to precolombian behind the arc mafic volcanism in the eastern Mexican Volcanic Belt: implications for future hazards. *Journal of vulcanology and Geothermal Research*. 115: 179-205.
- Smith, C., Blundy, E., and Arce, J. (2009). A temporal record of magma accumulation and evolution beneath Nevado de Toluca, Mexico, preserved in plagioclase phenocrysts. *Journal of Petrology*. 50: 405-426.
- Szynkaruk, E., Garduño, V. and Bocco, G. (2004). Active fault systems and tectono-topographic configuration of the central Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geomorphology*. 61: 111-126.
- Vázquez, S. L. and Heine, K. (2002). Late Quaternary glaciation of México. En J. Ehlers, P. L. Gibbard (Eds.) *Quaternary Glaciations - Extent and Chronology*. Volume 2, Part III: South America, Asia, Africa, Australia, Antarctica, Amsterdam, Netherlands: Elsevier. 233-242 Pp.
- Verma, S. and Luhr, J. (2010). Sr, Nd and Pb isotropic evidence for the origin and evolution of the Cántaro-Coplina volcanic chain, Western Mexican Volcanic Belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, Elsevier*. 197(1-4): 33-51.