








Metodología para una evaluación cuantitativa de la geodiversidad volcánica en la Meseta Purépecha: una herramienta para futuros planes de geoturismo y geoconservación

Adrián García-Nava¹, José Teodoro Silva-García¹, Ricardo Saucedo-Girón², Gustavo Cruz-Cárdenas¹, Luis Arturo Ávila-Meléndez¹, Dioselina Álvarez-Bernal¹ y Fabián Villalpando-Barragán¹

Abstract

Quantitative assessments of geodiversity provide an objective appraisal of the abiotic landscape elements and represent a fundamental tool for the development of geoconservation programs. Currently, quantitative assessments of geodiversity with selective approaches have been published, characterized by using specific geoelements (parameters) depending on the objectives of each study. The present assessment proposes the application of an adapted methodology to calculate the “volcanic geodiversity index” of the Meseta Purépecha (3,835 km²), a region located in the western sector of the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field. The current analysis considers only two parameters (geodiversity subindices): the general terrain geometry (10 landform types) and volcanic geomorphologies (7 types of volcanic structures). The methodology consisted of four main stages: (1) collection and preparation of geospatial data, involving the compilation and standardization of relevant spatial datasets, (2) data processing and fieldwork, for methodological and practical purposes of this study, was carried out a physiographic delimitation of the Meseta Purépecha, an automated geomorphometric analysis using the *r.geomorphons* algorithm and a classification of volcanic structures identified through integrated field verification and remote sensing techniques, supported by a DEM (12.5 m resolution), SPOT imagery (10 m resolution), and aerial orthoimages (1 m resolution), (3) quantification of geodiversity through a systematic process using a 5 × 5 km grid (201 cells), employing the Single-Parts technique to tally vector elements and normalizing values using the Maximum Obtained Value method, with the sum of subindices yielding the total volcanic geodiversity index, (4) finally delineating a georoute based on volcanic geodiversity results, incorporating six strategically selected volcanic viewpoints. The volcanic geodiversity index of the Meseta Purépecha was classified into five categories: very high (16% of the study area), high (28%), medium (24%), low (18%), and very low (14%). The applied approach enables the identification of three zones (polygons) considered as priority for future geotourism and geoconservation plans, which could promote the holistic development of local communities.

Key words: geodiversity index, Meseta Purépecha, volcanic geodiversity, georoute, geoconservation.

Resumen

Las evaluaciones cuantitativas de la geodiversidad permiten una valoración objetiva de los elementos abióticos del paisaje y representan una herramienta fundamental para el desarrollo de programas de geoconservación. Actualmente, se han publicado evaluaciones cuantitativas de geodiversidad con enfoques selectivos, caracterizadas por el uso de geoelementos (parámetros) específicos dependiendo de los objetivos de cada estudio. Bajo esta premisa, en el presente trabajo se propone la aplicación de una metodología adaptada para calcular el “índice de geodiversidad volcánica” de la Meseta Purépecha (3,835 km²), región situada en el sector oeste del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato. La presente evaluación considera únicamente dos parámetros (subíndices de geodiversidad): la geometría general del terreno (10 tipos de formas del relieve) y las geoformas volcánicas (7 tipos de estructuras volcánicas). La metodología consistió en cuatro etapas principales: (1) recopilación y preparación de datos geoespaciales, (2) procesamiento de datos y trabajo de campo, donde para los fines prácticos de este estudio se realizó una delimitación fisiográfica de la Meseta Purépecha, así como un análisis automatizado del relieve mediante el código *r.geomorphons* y una clasificación de estructuras volcánicas, identificadas en campo y con el uso de un MDE (12.5 m), imágenes SPOT (10 m) y ortofotos aéreas (1 m), (3) cuantificación de la geodiversidad empleando una malla de 201 celdas de 5 × 5 km para contabilizar los elementos vectoriales empleando la técnica de Partes Únicas y la posterior normalización de valores con la técnica de Valor Máximo Obtenido, donde la suma de los subíndices resultó en la “geodiversidad volcánica total”, (4) finalmente, se trazó una georuta con base en los resultados de los índices de geodiversidad volcánica, la cual, incluye seis miradores volcánicos. El índice de geodiversidad volcánica de la Meseta Purépecha se divide en cinco categorías: muy alta (16% del área analizada), alta (28%), media (24%), baja (18%) y muy baja (14%). La presente evaluación permitió reconocer tres zonas (polígonos) consideradas como prioritarias para futuros planes de geoturismo y geoconservación, lo que podría favorecer al desarrollo integral de las comunidades locales.

Palabras clave: Índice de geodiversidad, Meseta Purépecha, geodiversidad volcánica, georuta, geoconservación.

Received: February 12, 2025; Accepted: September 18, 2025; Published on-line: January 1, 2026.

Editorial responsibility: Dr. Giovanni Sosa-Ceballos

* Corresponding author: Ricardo Saucedo-Girón, rgiron@uaslp.mx

¹ Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Michoacán, México.

² Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Instituto de Geología, San Luis Potosí, México.

Adrián García-Nava, José Teodoro Silva-García, Ricardo Saucedo-Girón, Gustavo Cruz-Cárdenas, Luis Arturo Ávila-Meléndez, Dioselina Álvarez-Bernal, Fabián Villalpando-Barragán

<https://doi.org/10.22201/igeof.2954436xe.2026.65.1.1862>

1. Introducción

La geodiversidad como concepto teórico comenzó a desarrollarse en la década de los 90 (Sharples, 1993; Dixon 1995; Kiernan, 1996; Zwoliński, 2004; Serrano y Ruiz-Flaño, 2007; Gordon *et al.*, 2012; Gray, 2013), pero es a partir del 2010 que se ha incrementado significativamente el número de publicaciones que abordan la geodiversidad desde distintas perspectivas, convirtiéndose en un tema emergente dentro de las ciencias de la tierra y el ambiente (Herrera-Franco *et al.*, 2022; Németh, 2022). Comúnmente, el concepto de geodiversidad se define como “la variedad natural de las características geológicas, geomorfológicas, edafológicas e hidrológicas de un área determinada, incluyendo los ensamblajes y sistemas naturales de estos elementos, así como sus contribuciones al paisaje” (Zwoliński, 2004; Gray, 2013; Brilha, 2016; Ferrer-Valero, 2018). Los elementos que conforman la geodiversidad se encuentran en constante evolución a medida que nuevos materiales y estructuras geológicas se forman como resultado de distintos procesos naturales, cada uno a diferentes ritmos y episodios a lo largo del tiempo (Gray, 2013; 2018). Estos elementos de la geodiversidad pueden verse degradados o destruidos por la intensa explotación humana, el cambio indebido de uso del suelo, la contaminación y el cambio climático (Fuertes-Gutiérrez y Fernández-Martínez, 2012; Gray *et al.*, 2013, Brilha, 2016; Krieger, 2023), por tal motivo, la geodiversidad busca proveer de valores científicos, estéticos, económicos, culturales, educativos e históricos a determinados elementos geológicos y geomorfológicos (geoelementos) para su protección como objetos de geopatrimonio (Sharples, 2002; Erikstad, 2013; Zwolinski *et al.*, 2018; Brilha, 2016; Duangkrayom *et al.*, 2022). La protección de los geoelementos se ejecuta mediante programas de geoconservación basados en el manejo sostenible del territorio en busca del beneficio social común, prohibiendo el mal uso del territorio (Quintero-Marín *et al.*, 2023; Duangkrayom *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2015; Williams *et al.*, 2020; Ocelli-Pinheiro *et al.*, 2023).

Las evaluaciones de la geodiversidad poseen enfoques cualitativos y cuantitativos que buscan generar una valoración espacial y/o temporal de los geoelementos, por lo que suelen ser la columna vertebral de los programas de geopatrimonio y, por tanto, de geoconservación (Gray, 2018). Es importante destacar que las evaluaciones cuantitativas emplean parámetros numéricos e indicadores para representar la distribución (frecuencia y repetición) de los elementos de geodiversidad en un área determinada, obteniendo resultados objetivos que facilitan su interpretación y repetibilidad (Brilha *et al.*, 2018; Zwolinski *et al.*, 2018; Dos Santos *et al.*, 2020). En las evaluaciones cuantitativas se generan índices de geodiversidad mediante el uso de álgebra de mapas, lo que permite categorizar los resultados y visualizar su distribución espacial (Pereira *et al.*, 2013; De

Paula-Silva *et al.*, 2015; Gonçalves *et al.*, 2020; Carrión-Mero *et al.*, 2022; Barancoková *et al.*, 2023). Los parámetros comúnmente utilizados en las evaluaciones cuantitativas corresponden a los elementos clásicos de la geodiversidad (tipo de roca, tipo de suelo, características hidrográficas y aspectos geomorfológicos), no obstante, trabajos recientes han incluido dentro de sus evaluaciones nuevos parámetros como la temperatura, cantidad de lluvia y uso de suelo, así como parámetros geológicos y geomorfológicos específicos de cada región (ej. Zwolinski y Stachowiak, 2012; Manosso y Nóbrega, 2016; Tukiainen *et al.*, 2017; Najwer *et al.*, 2016; Manosso *et al.*, 2021). Por otro lado, se han propuesto metodologías, que solo se enfocan en alguno de estos parámetros, descartando ciertos parámetros clásicos debido a su poca relevancia en estudios más específicos (Zwolinski *et al.*, 2018; Vörös *et al.*, 2021; Németh, 2023).

En México, las evaluaciones de geodiversidad con enfoques cualitativos son más frecuentes en comparación con las evaluaciones basadas en métodos cuantitativos, donde en general, las publicaciones suelen estar dirigidas al reconocimiento de áreas con potencial para la geoconservación y el geoturismo (Canet, 2023). Por ejemplo, en el trabajo de Miros-Gómez *et al.* (2024) se empleó una metodología que combina procesos cualitativos y cuantitativos para resaltar distintos elementos de la geodiversidad que podrían impulsar el geoturismo y la geoconservación en la región de la costa central de Sonora, en el Golfo de California. Por otro lado, en el trabajo de Parrot *et al.* (2024) se llevó a cabo una evaluación cuantitativa de la geodiversidad a nivel nacional, donde se utilizó una metodología caracterizada por la generación de subíndices mediante una malla de conteo de 25 × 25 km. En lo que respecta al análisis de la geodiversidad y el geopatrimonio en zonas volcánicas, Guilbaud *et al.* (2021) realizan una evaluación únicamente cualitativa basada en descripciones geológicas detalladas para determinar sitios de interés en el Volcán Xitle, en la Ciudad de México.

En este estudio, el interés de la evaluación recae en la geodiversidad volcánica, definida como “la variedad de características y estructuras geológicas y geomorfológicas relacionadas, principalmente, con procesos volcánicos, esto puede incluir los tipos de volcanes y materiales emitidos, así como su importancia en términos de biodiversidad, recursos naturales y estudio científico (Németh *et al.*, 2017; Khalaf *et al.*, 2019; Kienle *et al.*, 2021; Abramowicz *et al.*, 2022; Németh y Gravis, 2022). Las estructuras volcánicas suelen ser elementos representativos o icónicos del paisaje debido a su particular geometría, número y diversidad, lo cual les proporciona un alto valor estético y de representatividad territorial, características fundamentales para el desarrollo del geopatrimonio (Joyce, 2009; Németh, 2023). En este contexto, los resultados de este trabajo generan una serie de índices que exploran y resaltan la geodiversidad volcánica de la Meseta Purépecha (MP), Campo Volcánico Michoacán-Gua-

najuato (CVMG), anteriormente oculta bajo este concepto. Los índices de geodiversidad generados en este trabajo están basados en un análisis espacial de la geometría del terreno y de la identificación y clasificación de las diversas estructuras volcánicas, bajo criterios vulcanológicos.

Como parte final de este trabajo, y con base en los resultados de geodiversidad volcánica, se realizó el mapeo de una georuta nombrada “Ruta Volcánica Meseta Purépecha”. A nivel mundial, ha quedado demostrado el potencial que poseen las zonas volcánicas para el desarrollo del geoturismo, siendo las áreas de interés geológico más frecuentadas, con más de 150 millones de visitantes anualmente (Erfurt-Cooper, 2011). Las georutas son recorridos que conectan estos sitios de interés geológico y/o geomorfológico de manera secuencial y ordenada, son auto-guiadas y diseñadas para conocer las características del espacio natural a través de un recorrido donde se establecen paradas y miradores (Carrión-Mero *et al.* 2021; Morante-Carballo *et al.*, 2023). La georuta aquí propuesta, traza un recorrido por las zonas con los índices más altos de geodiversidad volcánica y cuenta con una serie de miradores que permiten contemplar la gran cantidad y variedad de geofomas volcánicas, las cuales otorgan un valor estético único y muestran el alto potencial como geopatrimonio de la región.

2. Área de estudio

2.1 Marco tectónico

La Meseta Purépecha (MP) es una región fisiográfica que forma parte del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG), que, a su vez, está ubicado en la sección centro-oeste del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM). El CVTM es un arco volcánico continental que inició su actividad en el Mioceno, hace ~19.5 Ma (Ferrari *et al.*, 2003; 2012); está formado por alrededor de 8,000 estructuras volcánicas distribuidas dentro de un área de ~160,000 km², presenta una longitud de ~1,000 km y un ancho que varía entre los 90 y 230 km (Gómez-Tuena *et al.*, 2008), delineando una franja que cruza el territorio mexicano de Este a Oeste (Figura 1). El vulcanismo del CVTM está asociado a la interacción de las placas Norteamericana, Cocos y la microplaca de Rivera, donde las últimas dos subducen a la primera en un ambiente tectónico complejo que da lugar a la trinchera Mesoamericana (Campa y Coney, 1983; Ferrari *et al.*, 2007).

El CVTM muestra un frente de arco volcánico anómalo, donde los centros eruptivos asociados a la subducción no exhiben una alineación paralela respecto a la trinchera Mesoamericana,

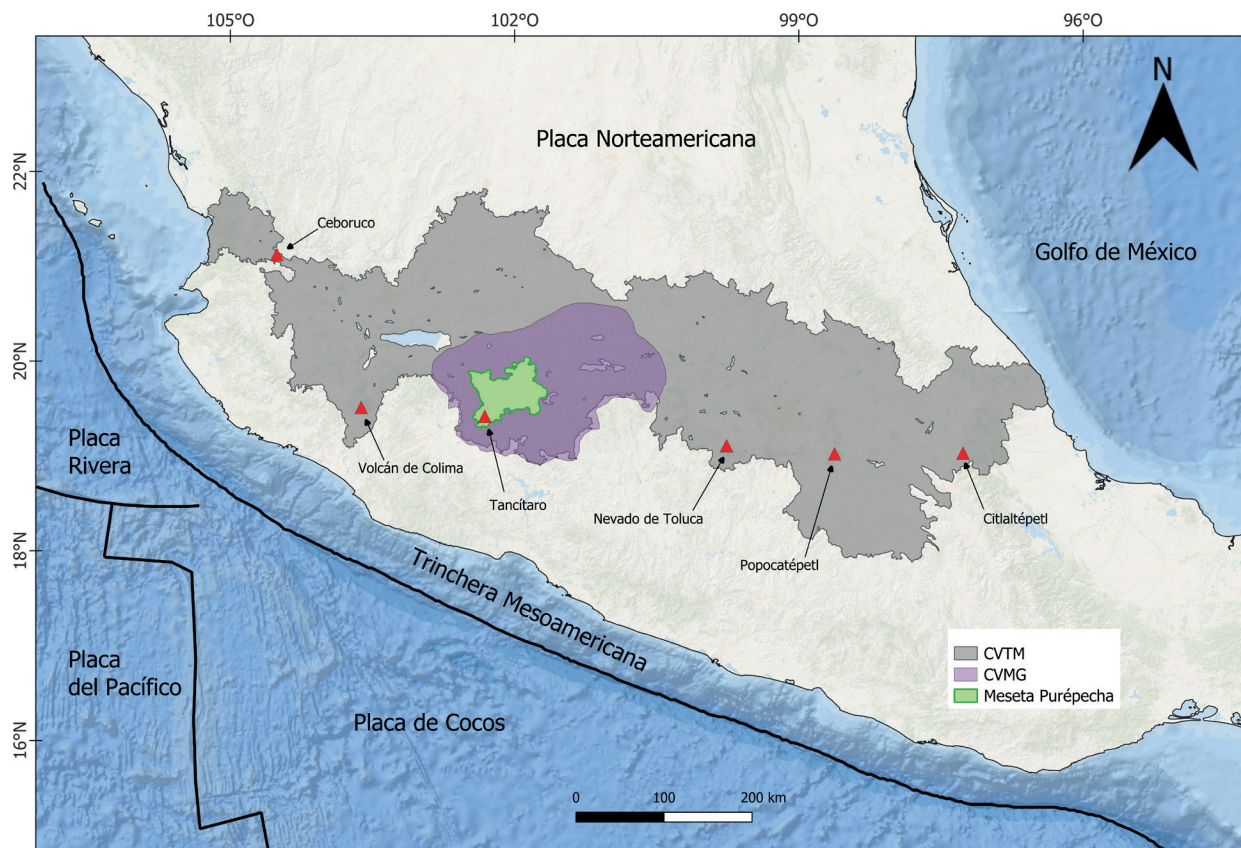


Figura 1. Marco tectónico general del área de estudio. Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM); Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG); Meseta Purépecha (MP). Los triángulos rojos muestran la ubicación de los estratovolcanes más importantes.

sino que están alineados de manera oblicua, con una orientación preferencial Este-Oeste. Diversos autores han sugerido que esta anomalía en la distribución de los volcanes está ligada a la compleja geometría del ambiente de subducción (Urrutia-Fucugauchi y Böhnell, 1988; Pardo y Suárez, 1995; Pérez-Campos *et al.*, 2008; Iglesias *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2010; 2012). En términos generales, la porción centro-occidental del CVTM, donde se encuentra el área de estudio de esta investigación, estaría influenciada por la subducción de la placa Rivera bajo la placa Norteamericana y la placa de Cocos que subduce de manera casi horizontal a una profundidad de 90 a 120 km y hasta una distancia de 250 km desde la trinchera, donde se piensa se hunde en el manto (Pérez-Campos *et al.*, 2008).

2.2 Meseta Purépecha

La Meseta Purépecha obtiene su nombre por los pueblos originarios de la cultura Purépecha que habitan este sector del estado mexicano de Michoacán. La MP no cuenta con una delimitación cartográfica y fisiográfica definida, ni en la literatura científica ni en las instituciones oficiales. Existen diversas fuentes de información que abordan y delimitan esta zona de maneras distintas. En el caso del Anuario Estadístico y Geográfico de Michoacán de Ocampo (INEGI, 2017), se le nombra Subprovincia Neovolcánica Tarasca, pero sin especificar su área total o la cantidad de municipios que la conforman. Por otro lado, en el documento llamado “Carpeta Regional 2020” generado por el Instituto de Planeación del Estado de Michoacán de Ocampo (IPLAEM), disponible en el Sistema Estatal de Información Estadística y Geográfica (SEIEG), se le asigna a esta zona la Región VI – Meseta Purépecha conformada por once municipios; Charapán, Cherán, Chilchota, Nahuatzen, Nuevo Parangaricutiro, Paracho, Tancítaro, Taretan, Tingambato, Uruapan y Ziracuaretiro ocupando una superficie total de ~3805 km² y con una población aproximada de 155,000 habitantes. En el capítulo de Ávila-García (2008) titulado “La cultura del agua en los pueblos indígenas de la Meseta Purépecha”, se menciona que la región está constituida por alrededor de 43 localidades, la mayoría pertenecientes a los municipios de Charapan, Cherán, Nahuatzen y Paracho. De igual forma, Vázquez (2003) publica en los “Perfiles indígenas de México: Purépechas de Michoacán” que la zona de la Meseta Purépecha está constituida únicamente por los cuatro municipios antes mencionados. En estas publicaciones la delimitación de la MP es arbitraria, ligada mayormente a las características culturales de la región y dejando de lado las condiciones fisiográficas y volcánicas de la meseta. En cambio, el trabajo de Corona-Chávez (2018) sugiere una delimitación fisiográfica de la MP, indicando que su altura basal se ubica entre los 2,200 y 2,400 msnm, sin embargo, esto continúa siendo una

aproximación. Para los fines prácticos del presente trabajo, y considerando la información anterior, se realizó una delimitación fisiográfica de la Meseta Purépecha.

2.2.1 Vulcanismo de la Meseta Purépecha

Los geoelementos volcánicos que posee la MP forman parte del CVMG, catalogado como uno de los campos volcánicos más importantes del mundo, debido a su extensión y a la gran cantidad y diversidad de estructuras que alberga, con más de 1,200 volcanes distribuidos en un área de ~40,000 km² (Hasenaka y Carmichael, 1985; Connor 1987; Guilbaud *et al.*, 2011; Valentine y Connor, 2015). El vulcanismo en el CVMG comenzó en el Plioceno, hace al menos 5 Ma, pero es hasta el Pleistoceno y Holoceno que muestra un incremento de actividad (Ban *et al.* 1992; Guilbaud *et al.*, 2011; 2012; Pola *et al.* 2014; Reyes-Guzmán *et al.* 2018; Macías y Arce, 2019). Los volcanes más numerosos dentro del CVMG son los conos monogenéticos o conos cineríticos, caracterizados por ser estructuras volcánicas pequeñas (<1 km³) formadas en episodios eruptivos individuales de corta duración y donde según diversas fuentes, se forma una nueva de estas estructuras cada ~435 años (Conway *et al.*, 1997; Schmincke, 2004; Valentine y Gregg, 2008; Németh y Kereszturi, 2015; Valentine y Connor, 2015; Macías y Arce, 2019). En un número reducido, el CVMG también presenta estructuras de origen poligenético, formadas durante varios periodos de actividad de cientos o miles de años, asociados a un sistema complejo de reservorios magmáticos y a una red de conductos estables (De Silva y Lindsay, 2015). Los volcanes Tancítaro, Patámban y el Complejo Volcánico Paracho, ubicados dentro de la MP, son los más representativos de este tipo de geoformas, los cuales, junto a los productos volcánicos producidos en los episodios monogenéticos, moldean un paisaje volcánico que incluye; conos cineríticos, cráteres de explosiones freatomagmáticas, volcanes escudo, estratovolcanes, flujos de lava, domos de lava, entre otras estructuras (Hasenaka y Carmichael, 1985; Hasenaka 1994; Guilbaud *et al.*, 2012; Sosa-Ceballos *et al.*, 2021). Estas condiciones geológicas muestran que la MP es parte de un ambiente volcánico caracterizado por la coexistencia de episodios monogenéticos y poligenéticos, lo que produce una gran diversidad de estructuras volcánicas (Németh, 2010; Tchamabé *et al.*, 2016; Navasardyan *et al.*, 2023).

En la sección suroeste de la MP se encuentra el volcán Tancítaro, un estratovolcán de gran volumen que inició su actividad hace 793±22 ka y su erupción más reciente fue una efusión de lavas hace 237±34 ka (Ownby *et al.*, 2007). Esta gran estructura volcánica ha presentado al menos dos colapsos gravitacionales, el primero entre 694 y 571, y un segundo entre 261 y 238 ka, generando depósitos de avalanchas de escombros

con un volumen de $\sim 7 \text{ km}^3$ (Ownby *et al.*, 2007). En la sección centro-sur de la MP se ubica volcán El Metate, un volcán escudo de naturaleza monogenética con una edad de $\sim 1250 \text{ AD}$ y un volumen de $\sim 9.2 \text{ km}^3$ de lavas andesíticas (Chevrel *et al.*, 2016a; Mahgoub *et al.*, 2017). Sus lavas fueron producidas en un único episodio eruptivo con una duración aproximada de 30 años, siendo la erupción efusiva andesítica más grande del CVTM y de todo el mundo durante el Holoceno según Chevrel *et al.* (2016b). Por su parte, en la región noreste se formaron cuatro volcanes escudo de gran tamaño durante el Pleistoceno tardío. Mientras que en el Holoceno tardío se reportan una serie de erupciones fisurales que produjeron flujos de lava de gran espesor, depósitos sobre los cuales se han encontrado ruinas de asentamientos prehispánicos Purépechas (Reyes-Guzmán *et al.*, 2018). Probablemente, el volcán más famoso dentro de la MP es el Parícutin. Este volcán, se encuentra en el flanco noreste del volcán Tancítaro y representa el vulcanismo más reciente dentro

de la MP, inició su actividad en febrero de 1943 y culminó en marzo de 1952 (Wilcox, 1954). El volcán Parícutin es uno de los conos cineríticos más estudiados en la historia, siendo un referente mundial para las investigaciones sobre vulcanismo monogenético (ej. Luhr, 2001; Erlund *et al.*, 2010; Larrea *et al.*, 2017; Bolós *et al.*, 2020; Jácome-Paz *et al.*, 2022).

3. Materiales y métodos

La metodología aquí propuesta tiene el objetivo de ser una herramienta viable para elaborar una evaluación cuantitativa de la geodiversidad volcánica en zonas con alta concentración y variedad de estructuras volcánicas. La metodología está dividida en cuatro fases principales con el propósito de seguir un flujo de trabajo lógico, eficaz y ordenado (Figura 2). La secuencia del proceso es la siguiente: (1) recopilación y preparación de

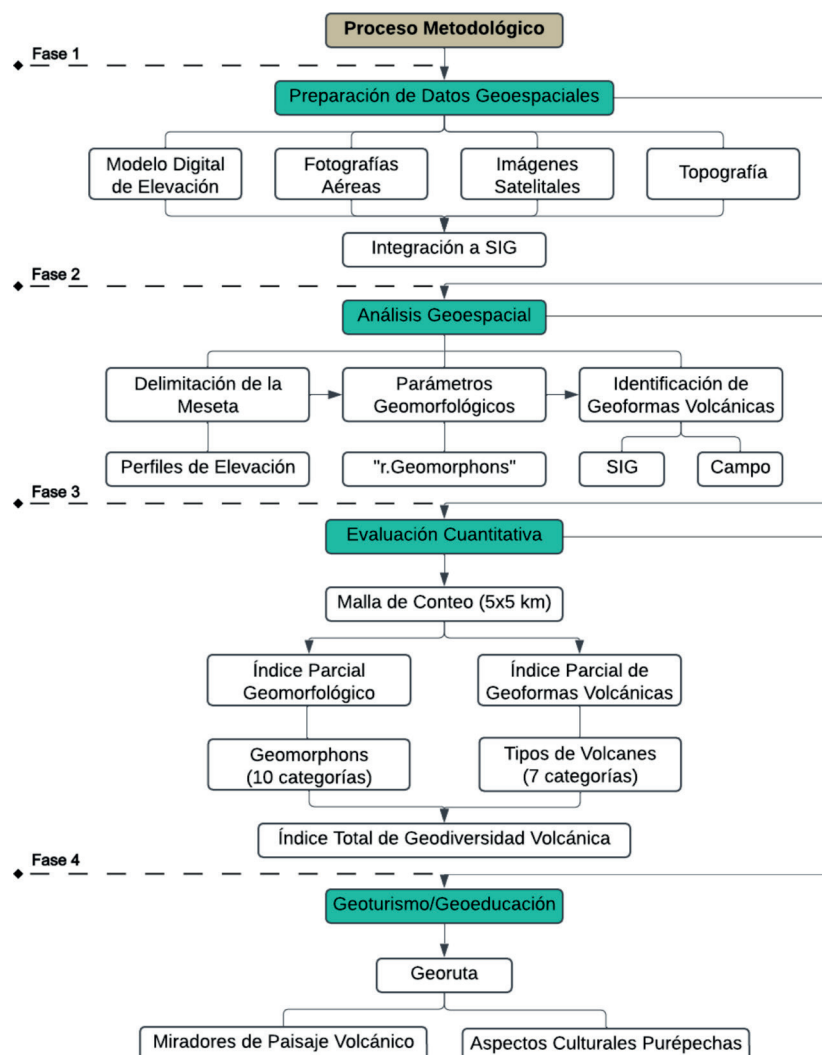


Figura 2. Esquema general de la metodología aplicada.

datos geoespaciales, (2) análisis de los datos para generar e identificar los parámetros de conteo: la “geometría del terreno” y las “geoformas volcánicas”, además de realizar una serie de visitas al campo para la comprobación de las estructuras, (3) evaluación cuantitativa de los elementos y representación espacial de la geodiversidad volcánica, (4) generación de la georuta y definición de los puntos de observación volcánica (miradores).

3.1 Fase I: Preparación de datos geoespaciales y trabajo de campo

Los datos geoespaciales para la generación de un Modelo Digital de Elevación (MDE) con resolución de 12.5 m se obtuvieron de la plataforma de descarga de la Instalación Satelital de Alaska en colaboración con la NASA. Estos datos provienen de un Radar de Apertura Sintética (PALSAR) instalado en el satélite ALOS perteneciente a la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA). Adicionalmente, se obtuvieron imágenes satelitales multispectrales SPOT 5, con una resolución espacial de 10 m y con fecha del 18 de diciembre de 2014. Por otro lado, las capas de información topográfica general y las fotografías aéreas ortorectificadas del año 2010 (1 m) se obtuvieron de los recursos en línea del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). El trabajo de campo consistió en tres recorridos por los distintos sectores de la MP durante el periodo de enero 2023 a

julio 2024, cuyo objetivo fue la verificación in situ de estructuras que generaron dudas durante la identificación con herramientas geoespaciales. Además, se tomaron fotografías de los diferentes tipos de volcanes considerados en este estudio y se realizaron descripciones geológicas puntuales en algunos sitios de interés (cf. Amine *et al.*, 2019; Dóniz-Páez *et al.*, 2020; Abramowicz *et al.*, 2022; Németh y Gravis, 2022).

3.2 Fase II: Análisis geoespacial e identificación de estructuras

Para evitar ambigüedades en las evaluaciones de geodiversidad y geopatrimonio, es fundamental una delimitación precisa del área de estudio (Brilha, 2002; Williams *et al.*, 2020). Como se mencionó anteriormente, la MP no cuenta con una delimitación oficial, por lo tanto, para los fines prácticos del presente estudio se realizó una delimitación fisiográfica basada en los cambios de elevación más significativos a nivel regional, obtenidos mediante una serie de perfiles de elevación sobre el MDE (12.5 m) que permitieron generar un isocontorno (Runge *et al.*, 2015) de la MP con un área final total de 3,835 km² (Figura 3).

En esta etapa, se generó una representación de los atributos del terreno mediante un escaneo del MDE con la herramienta *r.geomorphons* en GRASS (Jasiewicz y Stepinski, 2013). Esta herramienta se ajusta al MDE para realizar un análisis automático

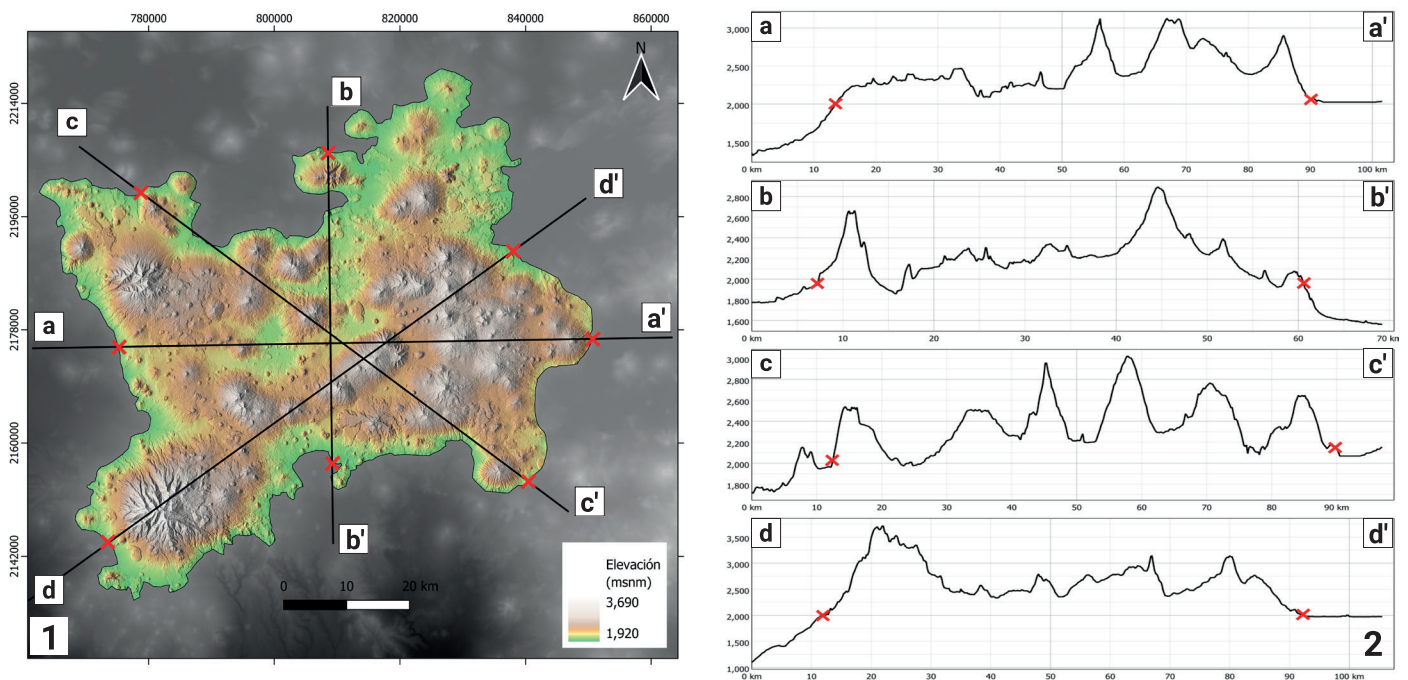


Figura 3. Delimitación fisiográfica y definición del área de análisis. 1) Orientación de las 4 secciones transversales trazadas sobre el MDE (12.5 m) y delimitación final de la Meseta Purépecha en sombreado hipsométrico (3,835 km²). 2) Perfiles topográficos; las cruces rojas indican los límites de la meseta (para los fines del presente trabajo), donde se presenta un cambio significativo de la pendiente a nivel regional.

de los patrones geométricos del terreno y clasificarlos dentro de 10 clases distintas (plano, cima, cresta, escarpe, espolón, pendiente, oquedad, pie de pendiente, valle y depresión). La herramienta *r.geomorphons* está siendo cada vez más utilizada dentro de los procesos de cuantificación de la geodiversidad para generar parámetros relacionados a la geomorfología (Ferrando *et al.*, 2021; Vorös *et al.*, 2021; Tukiainen *et al.*, 2024). Posteriormente, se llevó a cabo el proceso de identificación y clasificación de las geoformas volcánicas individuales (tipos de volcanes) utilizando técnicas visuales (Morante-Carballo *et al.*, 2023). Para este propósito, se empleó una combinación (cotejo) de cuatro capas, conformadas por el MDE (12.5 m), imágenes SPOT (10 m), fotografías aéreas ortorectificadas (1 m) y el ráster

creado con *r.geomorphons* (Figura 4). La clasificación de las geoformas volcánicas se realizó tomando como referencia los criterios utilizados por Keresturi y Németh (2012), Németh y Keresturi (2015) y Dóniz-Páez *et al.* (2020), donde, en campos volcánicos similares a la MP, definen los diferentes tipos de volcanes de acuerdo con la dinámica eruptiva que los generó. La identificación se realizó por cuadrantes con el uso de una malla con 201 celdas de 5×5 km que también fue utilizada en el proceso de evaluación cuantitativa de la geodiversidad. En la Figura 5 se muestran los ejemplos más representativos de los tipos de volcanes identificados (estratovolcán, cono cinerítico, cono colapsado, domo de lava, volcán escudo, flujo o mesa de lava y cráter freatomagmático).

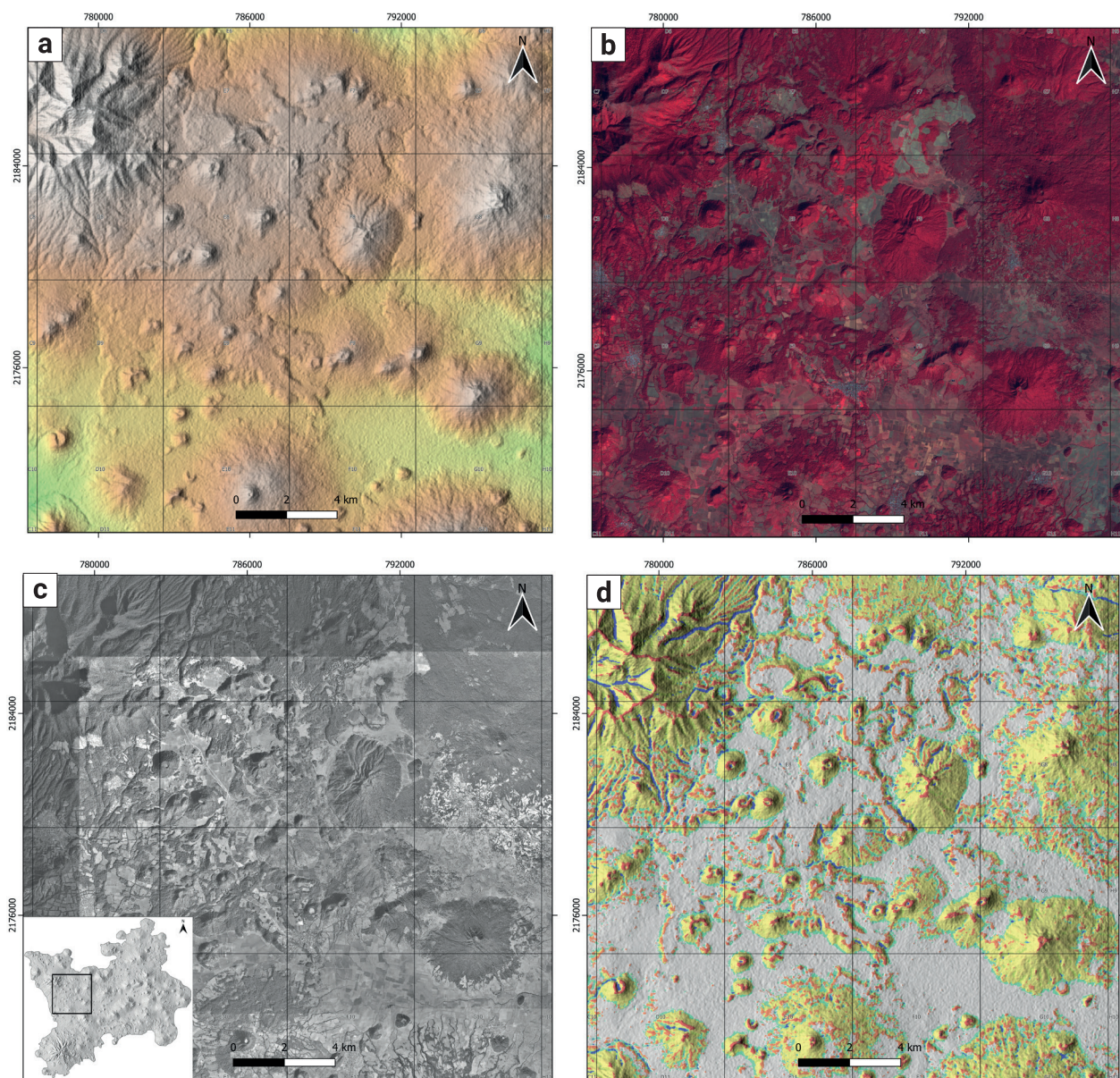


Figura 4. Capas utilizadas para el proceso de identificación visual de las geoformas volcánicas. a) Relieve sombreado del MDE (12.5 m); b) imagen SPOT (10 m); c) ortofoto aérea (1 m); d) capa de geometría del terreno (*r.geomorphons*).

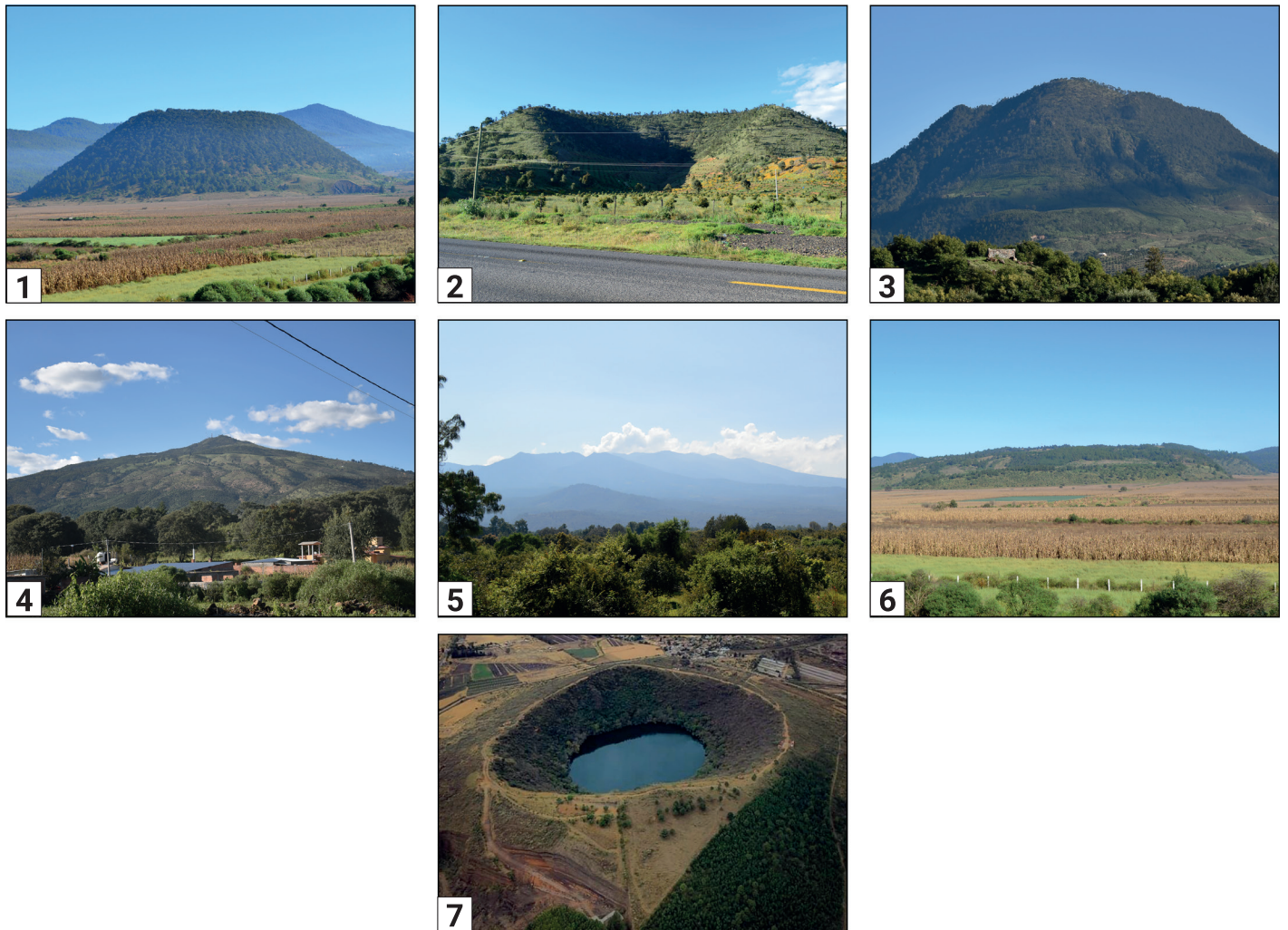


Figura 5. Ejemplos representativos de los siete tipos de geofomas volcánicas identificadas en SIG y en campo. 1) Cono cinerítico Juanyan, 2) cono cinerítico colapsado El Pueblito, 3) domo de lava El Tecolote, 4) volcán escudo El Tule, 5) estratovolcán Tancítaro, 6) mesa de lava Cheranástico, 7) cráter freatomagmático Alberca de Los Espinos (fotografía por Cristian Negrete, 2020).

3.3 Fase III: Evaluación cuantitativa de la geodiversidad

Los campos volcánicos como la MP suelen mostrar valores bajos en los índices clásicos de geodiversidad a pesar de presentar una gran cantidad y tipo de estructuras, esto ocurre debido a que los parámetros tradicionales utilizados para evaluar la geodiversidad no coinciden con las características específicas de estas zonas volcánicas (Vörös *et al.*, 2021). En relación con lo anterior, la metodología aquí presentada posee un enfoque selectivo (Zowlinski *et al.*, 2018), se basa únicamente en dos subíndices (parámetros), para resaltar exclusivamente la geodiversidad volcánica de la MP: (1) el subíndice de la geométrica del terreno (SGt) y (2) el subíndice de las geofomas volcánicas (SGv). La suma de ambos subíndices da como resultado el índice de geodiversidad volcánica (IGv). Procedimiento que se resume en la siguiente expresión:

$$IGv = SGt + SGv$$

El SGt está conformado por los 10 diferentes tipos de geometrías del terreno generadas con la herramienta de *r.geomorphons*, mientras que el SGv está constituido por los 7 tipos de geofomas volcánicas identificadas. Cada uno de estos 17 elementos que constituyen ambos subíndices representan, a su vez, un índice parcial. Estos índices parciales fueron generados bajo el principio de distribución espacial y niveles de frecuencia, tomando como referencia las metodologías desarrolladas y aplicadas por Pereira *et al.* (2013), De Paula-Silva *et al.* (2015), Gonçalves *et al.* (2020), Vörös *et al.* (2021), Manosso *et al.* (2021) y Barancoková *et al.* (2023). En esta evaluación, se usó una malla de conteo conformada por 201 celdas de 5×5 km que fue superpuesta a las capas de los elementos de geodiver-

sidad. La definición del tamaño de celda sigue siendo un tema de discusión en este tipo de evaluaciones (Pereira *et al.*, 2013; Dias *et al.*, 2021). Sin embargo, consideramos que el tamaño de celda establecido en este trabajo es adecuado para diferenciar los elementos de geodiversidad analizados, que en este caso son los diversos tipos volcanes, que en general son estructuras relativamente grandes que se encuentran distribuidas por toda la MP.

Los índices parciales se obtuvieron mediante un proceso de conteo y normalización de valores. Primero, se contabilizaron los elementos con la técnica de “Partes Únicas”, la cual consiste en separar cada elemento de la geodiversidad de manera individual y registrar el número de ocurrencias (incluidas las repeticiones) en cada una de las celdas de la malla (Pereira *et al.*, 2013; Gonçalves *et al.*, 2020). Posteriormente, las puntuaciones obtenidas en el conteo son normalizadas dentro de cinco categorías bajo el criterio del Valor Máximo Obtenido (Gonçalves *et al.*, 2020; Carrión-Mero *et al.*, 2022), donde se utiliza como referencia el valor máximo registrado de cada elemento, permitiendo generar

resultados que pueden ser sumados entre sí; el proceso se expresa de la siguiente manera:

$$\text{Valor Norm} = \frac{V_{Obs} \times 5}{V_{Max}}$$

Donde:

V_{Obs} : número de ocurrencia del elemento contabilizado en cada una de las celdas de 5×5 km.

V_{Max} : valor máximo registrado de cada elemento.

El conteo de los elementos de geodiversidad se realizó de manera automática con la herramienta *Spatial Join* de ArcMap. Esta herramienta sólo es capaz de contabilizar elementos en formato vectorial, motivo por el cual, para el caso del *SGt*, fue necesario transformar la capa original producida por *r.geomorphons* de un archivo ráster a uno vectorial (polígonos) con la herramienta *Raster to Polygon*. En la Figura 6 se muestra la capa vectorial utilizada para contabilizar y generar los 10 índices

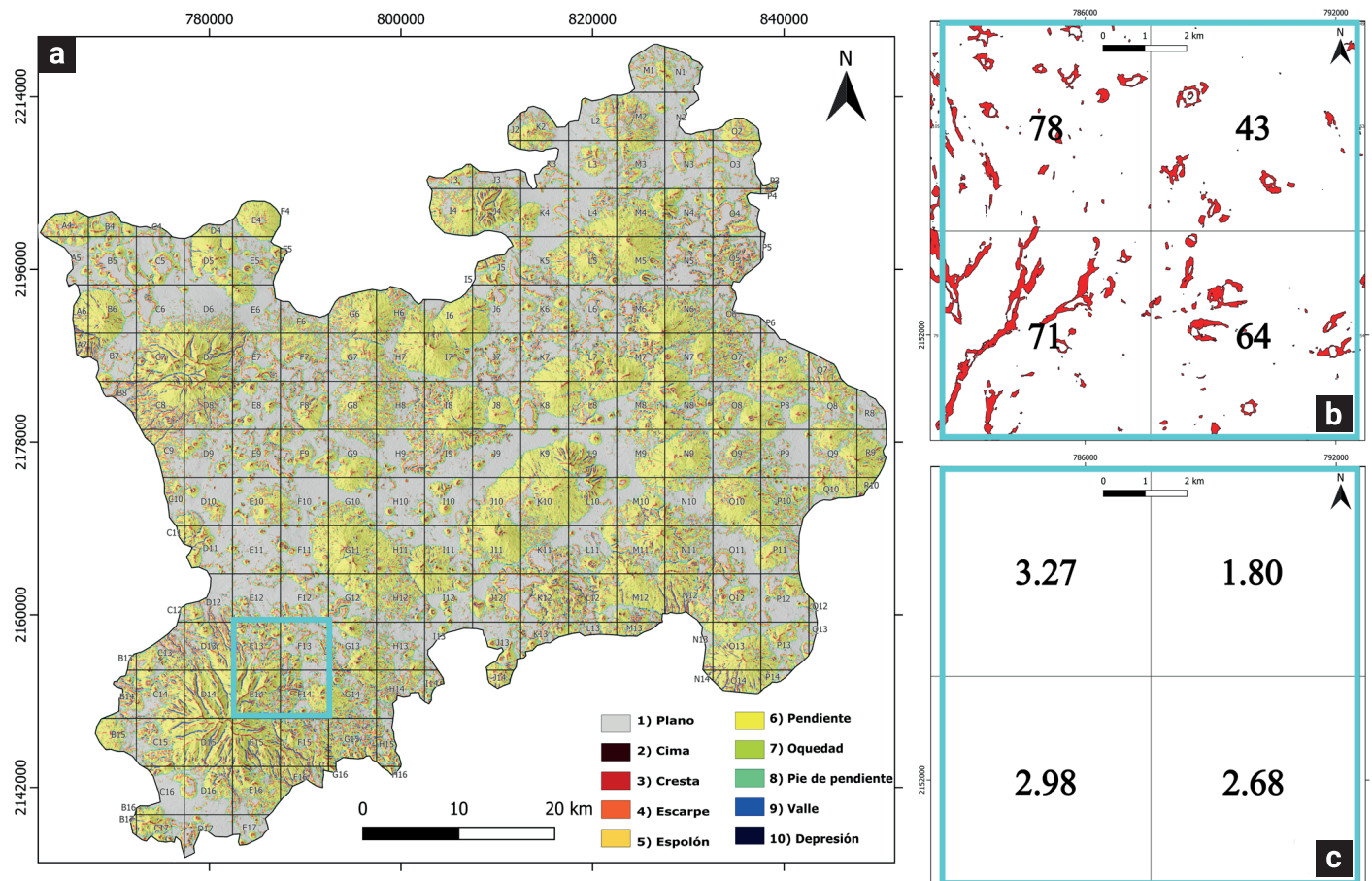


Figura 6. Proceso de conteo y normalización de valores para la generación de los índices parciales de geometría del terreno; se tomó como ejemplo el elemento “cresta”. a) Mapa que muestra la malla de análisis de 5×5 km (con el código de identificación dentro de cada celda) sobrepuesta sobre la capa vectorial de geometrías del terreno conformada por las 10 clases distintas del código *r.geomorphons*. El recuadro indica un acercamiento de las celdas. b) Número de ocurrencias del elemento geométrico “cresta” mediante la técnica de Partes Únicas. c) Valores normalizados mediante el método de Valor Máximo, que en este caso fue de 119.

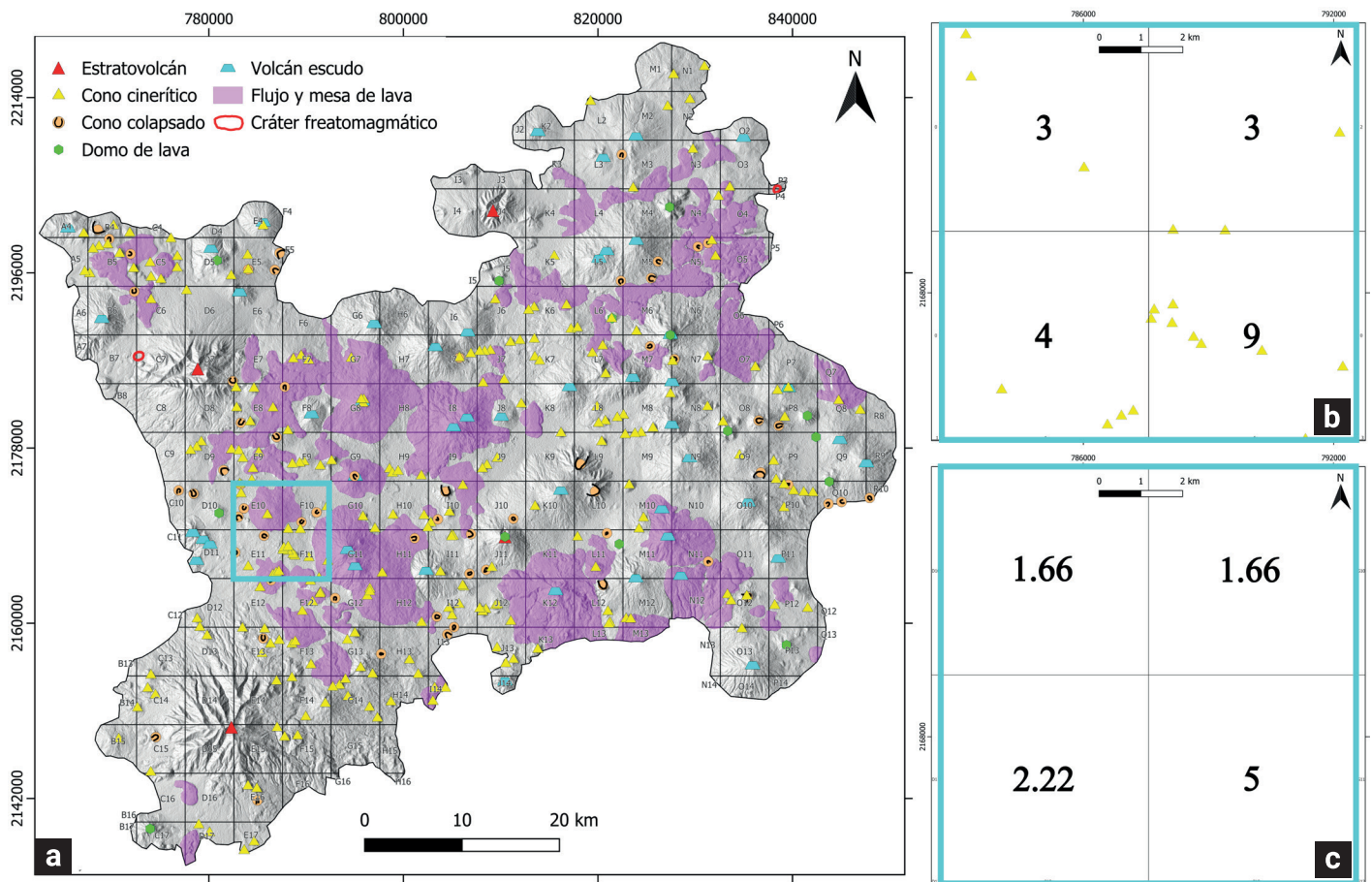


Figura 7. Proceso de conteo y normalización de valores para la generación de los índices parciales de geformas volcánicas; se muestra el ejemplo para el elemento “cono cinerítico”. a) Mapa que muestra la malla de análisis de 5×5 km (con el código de identificación dentro de cada celda) superpuesta sobre la capa vectorial de geformas volcánicas conformada por las 7 clases distintas de estructuras identificadas en este estudio. El recuadro indica las celdas con acercamiento. b) Número de ocurrencias del elemento “cono cinerítico” mediante la técnica de Partes Únicas. c) Valores normalizados mediante el método de Valor Máximo Obtenido, que en este caso fue de 9.

parciales de la geometría del terreno, donde para fines didácticos se ilustra el proceso de obtención de valores de ocurrencia y normalización tomando como ejemplo el caso del elemento “crestas” (ver material complementario). Por su parte, en las geformas volcánicas se realizó el conteo y normalización de cada uno de los 7 elementos identificados (tipos de estructuras volcánicas). La Figura 7 muestra la capa vectorial utilizada para la generación de los subíndices y se ejemplifica el procedimiento con el elemento “cono cinerítico” (ver material complementario). Todos los índices fueron clasificados dentro de cinco grupos jerárquicos de geodiversidad (1 = muy baja, 2 = baja, 3 = media, 4 = alta y 5 = muy alta).

La suma de ambos índices parciales ($SG_t + SG_v$) y su posterior normalización dio como resultado el IG_v . Finalmente, los valores del IG_v dentro de cada celda fueron extraídos en 201 puntos con la herramienta *centroids* de QGIS, los cuales, fueron empleados como datos de entrada en una interpolación que generó un mapa de distribución con el método de *kriging* (Oliver y Webster, 1990). Para llevar a cabo este proceso se

utilizó la herramienta *Spatial Analysis* de ArcMap (e.g. Araujo y Pereira, 2018; Carrión-Mero *et al.*, 2022).

3.4 Fase IV: Definición de la georuta

Una vez que se contó con el mapa del índice de geodiversidad volcánica total, el trabajo se complementó con el trazado de una georuta diseñada para conectar las zonas con los valores más altos de geodiversidad volcánica dentro de la MP. La definición de la georuta está pensada en servir de soporte a estrategias de geoturismo y geoconservación, a través de un itinerario que resalta diversos sitios de interés vinculados al valor estético y de geopatrimonio volcánico de la MP (cf. Carrión-Mero *et al.*, 2021; Meléndez *et al.*, 2012). La georuta fue nombrada “Ruta Volcánica Meseta Purépecha”. Se estableció como un recorrido auto-guiado donde el usuario pueda apreciar la riqueza del entorno natural. Se complementó con una serie de locaciones designadas como miradores del paisaje volcánico (Joyce, 2009). Además, incluye sitios con ejemplos de aspectos culturales,

donde los pueblos originarios muestran su relación con el entorno volcánico, tales como expresiones artísticas, uso sostenible de los recursos volcánicos y desarrollo de proyectos ecoturísticos.

4. Resultados

La geometría del terreno producida por el código *r.geomorphons* estuvo conformada por un total de 208,506 polígonos clasificados dentro de 10 clases distintas: plano (24,970), cima (759), cresta (6,390), escarpe (38,563), espolón (24,831), pendiente (31,976), oquedad (20,330), pie de pendiente (54,043), valle (6,563) y depresión (81). Por su parte, los elementos de geoformas volcánicas constituyeron un total de 432 estructuras volcánicas (polígonos y puntos) clasificadas dentro de 7 clases: conos cineríticos (237), conos colapsados (59), domos de lava (14), volcanes escudo (47), estratovolcanes (4), flujos/mesas de lava (69) y cráteres freatomagmáticos (2).

4.1 Índices parciales y subíndices de geodiversidad

Esta evaluación se basó en 10 índices parciales que conforman el subíndice de geometría del terreno (*SGt*) y 7 índices parciales que conforman el subíndice de geoformas volcánicas (*SGv*). A fin de mostrar los resultados de manera simplificada, la Figura 8 muestra como ejemplo únicamente los resultados de los dos índices parciales ejemplificados en la metodología; para

el parámetro de la geometría del terreno se trató del elemento “cresta” y para el caso de las geoformas volcánicas, se tomó como ejemplo el elemento “cono cinerítico” (los 15 mapas restantes pueden consultarse en el material complementario). Los resultados del conteo de los elementos y sus índices correspondientes se muestran distribuidos dentro de la malla de análisis; cada celda contiene el número de ocurrencias y está representado dentro de una escala de color que indica a qué categoría (o nivel normalizado) pertenece.

Tomando en cuenta que la normalización se realizó a partir del Valor Máximo Obtenido, se observa que, en el caso del elemento “cresta” (Figura 8a), el valor máximo de ocurrencia fue de 119, lo que determinó que dentro de las cinco categorías se obtuvieran los rangos siguientes: 1 = muy baja (rango de valores: 12 – 35), 2 = baja (36 – 59), 3 = media (60 – 83), 4 = alta (84 – 105), 5 = muy alta (106 – 119). En lo que concierne al elemento “cono cinerítico” (Figura 8b), el valor máximo de ocurrencias fue de 9, lo que determinó los rangos siguientes en cada categoría: 1 = muy baja (1 – 2), 2 = baja (3 – 4), 3 = media (5 – 6), 4 = alta (7 – 8), 5 = muy alta (8 – 9). Las celdas en blanco indican que el valor normalizado es 0, o significativamente bajo dentro de la clasificación normalizada.

Siguiendo el mismo principio, el *SGt* representa el resultado de la suma de los 10 índices parciales de la geometría del terreno (Figura 9a), mientras que el *SGv* es el resultado de la suma de los 7 índices parciales de las geoformas volcánicas (Figura 9b). En este caso, dentro de cada celda de la malla de análisis se encuentra

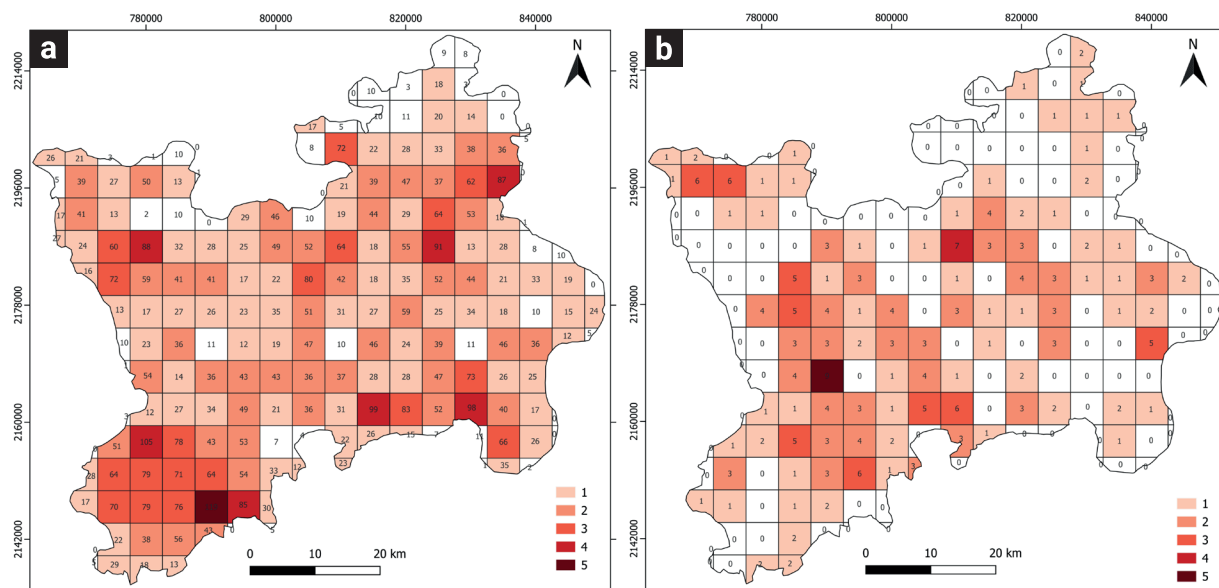


Figura 8. Resultado de índices parciales. a) Índice parcial del elemento “cresta”; perteneciente al grupo de las geometrías del terreno. b) Índice parcial del ejemplo del elemento “cono cinerítico”, perteneciente al grupo geoformas volcánicas. Los valores dentro de cada celda representan el número total de ocurrencias. El color de la celda corresponde a la clasificación dentro del índice normalizado.

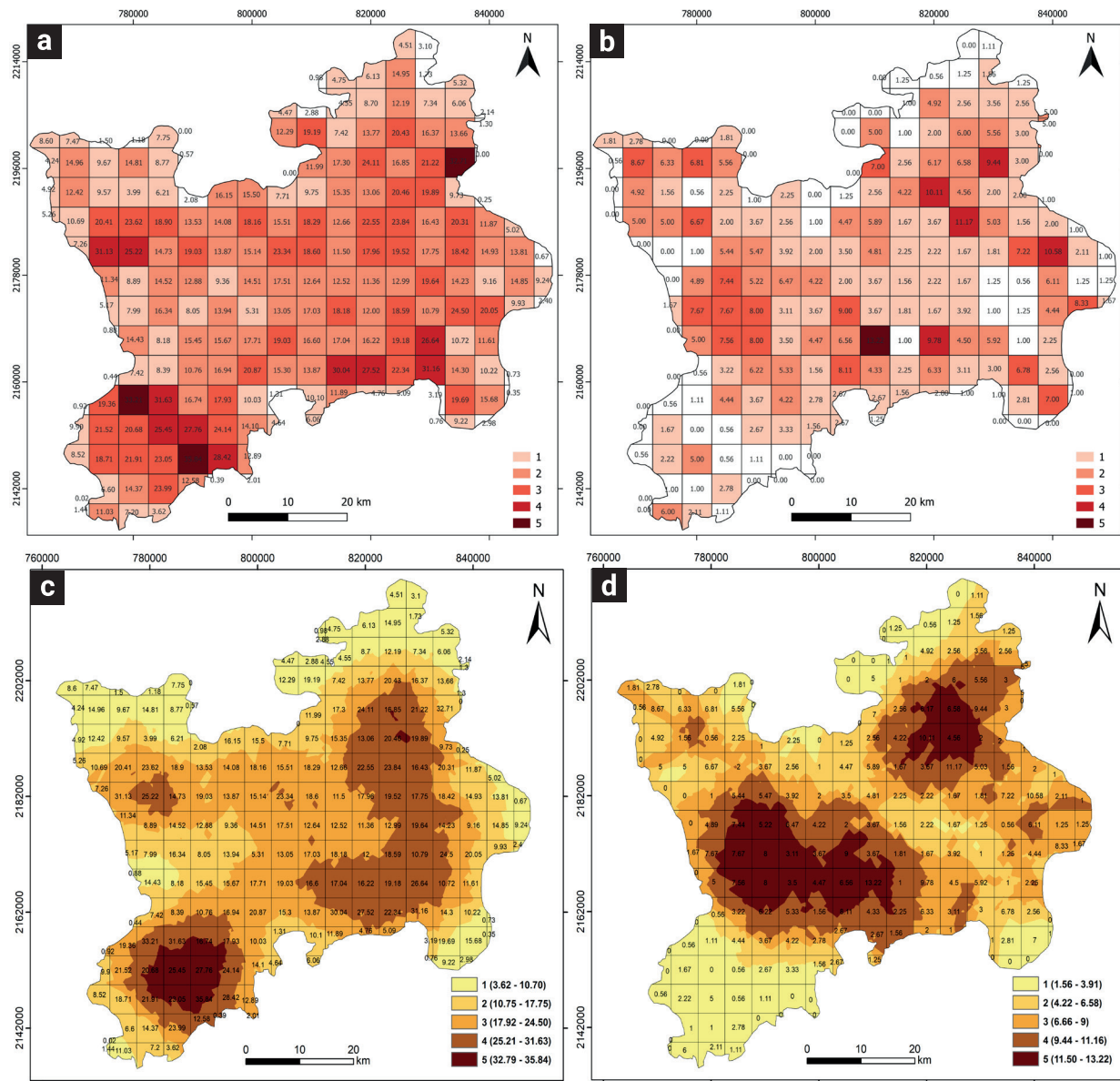


Figura 9. Resultados de los subíndices de geodiversidad. (a) Subíndice de geometría del terreno (SG_t). (b) Subíndice de geoformas volcánicas (SG_v). Mapas de interpolación *kriging* del SG_t (c) y del SG_v (d). Los números entre paréntesis indican los rangos de valores normalizados en cada categoría.

el resultado de la suma de valores normalizados de cada índice parcial. Con estos valores se realizó una interpolación *kriging* para generar un mapa de distribución de ambos subíndices. El mapa de distribución del SG_t exhibe una clara concentración de geodiversidad categoría 5 (muy alta) en la sección suroeste de la MP (Figura 9c). Los valores corresponden con la ubicación del volcán Tancítaro, el cual representa la estructura volcánica más relevante de la región en términos de la diversidad de elementos geométricos que presenta. En cuanto a las zonas con niveles de “alta” geodiversidad (categoría 4), se observa que estas cubren una extensa área que abarca desde el centro-sur, donde se lo-

caliza el complejo volcánico de Paracho, hasta el noreste, lugar ocupado por la cuenca de Zacapu, donde destaca la presencia de estructuras complejas como el gran estratovolcán coronado por un domo de lava El Tecolote y el volcán escudo El Tule, el cual presenta un cono cinerítico en su cima. Por su parte, el mapa de distribución del SG_v delimita dos grandes zonas de “muy alta” geodiversidad (nivel 5). Una se encuentra en la sección central y corresponde a una gran concentración de conos cineríticos, conos colapsados y volcanes escudo; mientras que la otra zona se localiza en la sección noreste que corresponde, de nuevo, a la cuenca de Zacapu (Figura 9d).

4.2 Índice de geodiversidad volcánica

Las estructuras volcánicas son los elementos de geodiversidad a resaltar en esta evaluación, por tanto, la metodología propone que la generación del *IGv*, es el producto de la suma de *SGt* y *SGv*. Con esta propuesta en mente, dentro de las celdas de los mapas finales (Figura 10), se encuentran los valores resultantes de la suma final de ambos subíndices, así como su categorización en la escala de colores (Figura 10a). La cual tiene como referencia el valor máximo registrado en el *IGv* de 7.55, con el que se definieron los rangos de valores de la siguiente manera: 1 = muy baja (0.77 – 2.25), 2 = baja (2.30 – 3.77), 3 = media (3.81 – 5.22), 4 = alta (5.30 – 6.53), 5 = muy alta (7.10 – 7.55).

El mapa de distribución final del *IGv*, producto de la interpolación de valores de la Figura 10a, delimita claramente tres zonas con valores de “muy alta” geodiversidad volcánica en la MP; al oeste-suroeste, zona central y noreste (Figura 10b). Estas áreas de muy alta geodiversidad están asociadas a regiones con una elevada acumulación de geformas volcánicas y a zonas de mayor complejidad en cuanto a la diversidad de elementos de geometría del terreno.

4.3 Distribución de valores en la malla de análisis

Los valores dentro de la malla de análisis exhiben distintos porcentajes de área ocupada (número de celdas por categoría), tanto para los subíndices como para el índice final. En el caso

del *SGt* (Figura 11a), la mayoría de las celdas (67) se encuentran en la categoría de “baja” geodiversidad, lo que representa el 33.3% de las 201 celdas totales, mientras que las categorías de “alta” y “muy alta” suman el 6.5% de las celdas; las celdas con nivel 0 de geodiversidad representan el 14.4% de la malla. Cabe mencionar que las celdas con valor 0 no indican la ausencia de elementos de la geometría del relieve, si no que su número de ocurrencia es demasiado bajo para ser representado después de la normalización.

En el caso del *SGv*, el análisis muestra un predominio de celdas con valores de geodiversidad 0 (35.3%), es decir, 71 de las 201 celdas (Figura 11b). Esto ocurre debido a que, a diferencia del *SGt*, las geformas volcánicas se agrupan espacialmente en determinados sectores dentro de la MP, lo que resulta en un mayor número de celdas que no contienen ningún elemento vectorial (ocurrencia). El nivel de geodiversidad “baja” se encuentra en segundo lugar con el 33.8%, mientras que los niveles de “alta” y “muy alta” geodiversidad representan sólo el 3% derivado de lo mencionado previamente (la agrupación de estructuras volcánicas se encuentra dentro de un número de celdas relativamente bajo).

Los valores del *IGv* (Figura 11c), muestran que los niveles de “muy baja” (23.4%), “baja” (31.3%) y “media” (24.4%) predominan. Mientras que las categorías de “alta” y “muy alta” representan solo el 8%, las que, al realizar la interpolación, coinciden espacialmente con las tres zonas de mayor geodiversidad resultantes en este estudio (Figura 10b), lo que demuestra la relevancia que poseen los valores más altos de geodiversidad para la identificación de zonas de interés.

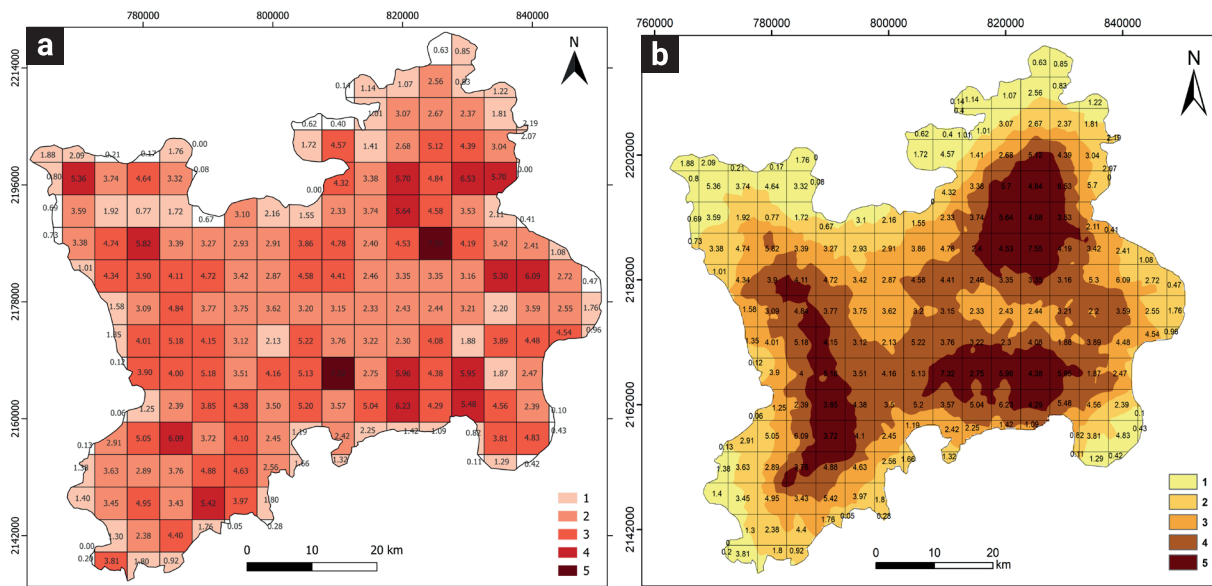


Figura 10. Resultados del índice de geodiversidad volcánica (*IGv*). a) Mapa de categorización del *IGv* dentro de la malla de análisis. b) Mapa final de distribución del *IGv* de la MP.

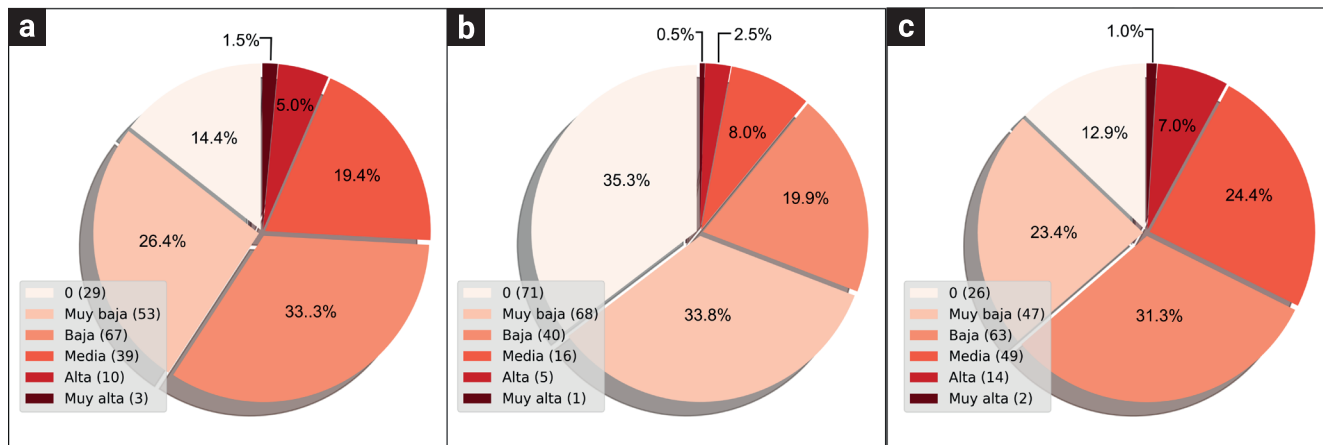


Figura 11. Porcentaje de celdas ocupadas por categoría de los subíndices e índice final. a) Gráfica correspondiente al subíndice de geometría del terreno (SGt), b) gráfica correspondiente al subíndice de geoformas volcánicas (SGv), c) gráfica correspondiente al índice de geodiversidad volcánica (IGv). Los números entre paréntesis indican el número de celdas ocupadas por cada categoría.

5. Discusión

En la metodología aplicada en este trabajo, la capa de características geométricas del terreno generada con la herramienta *r.geomorphons* tuvo un doble propósito. Por un lado, facilitó la identificación visual de las geoformas volcánicas dentro del SIG, gracias a la fuerte diferenciación de colores que ayudó a destacar cada uno de los elementos geométricos considerados (Figura 4d). Por otra parte, la transformación de la capa ráster original a una capa vectorial permitió contabilizar los elementos y normalizar los valores del SGt . Esto mostró que la combinación de procesos geoespaciales, reforzados con la comprobación en campo, es fundamental para evaluar la geodiversidad. Sin embargo, es recomendable ajustar los procesos y parámetros de análisis de acuerdo con las necesidades y alcances específicas de cada estudio (Hjort *et al.*, 2022; 2024).

Los valores más altos del SGt coinciden con la ubicación de grandes volcanes (estratovolcanes y volcanes escudo) y con estructuras relacionadas a flujos y mesas de lava. El ejemplo más claro es la zona donde se localiza el volcán Tancítaro, en el extremo suroeste de la MP, donde los valores más altos del SGt coinciden con la ubicación de este volcán (Figura 9c). Los valores, sin duda son resultado de las complejas condiciones del terreno, relacionadas con los múltiples procesos eruptivos y erosivos que ha presentado el Tancítaro durante su historia eruptiva, ya que se trata del estratovolcán de mayor edad y tamaño (~3860 msnm) dentro de la MP. Asimismo, los altos valores del SGt en este volcán son un ejemplo del excelente indicador que resultó ser este parámetro para mostrar el peso que representa la geometría del terreno en la metodología propuesta, pues sí sólo se utiliza el parámetro de geoformas volcánicas (SGv), el área del volcán

Tancítaro tendría valores bajos de geodiversidad (Figura 9d), es decir, los resultados finales del índice de geodiversidad volcánica estarían sesgados, al no mostrar la verdadera riqueza e importancia que representa el estratovolcán más grande e importante de la MP.

Los valores de “muy alta” geodiversidad del SGv se encuentran agrupados en la sección centro-oeste y noreste de la MP (Figura 9d). En el caso de la sección centro-oeste, los altos valores se deben a la presencia de una gran cantidad de conos cineríticos, conos colapsados, flujos de lava y volcanes escudo. Mientras que, en la sección noreste que cubre la zona lacustre de Zacapu, los valores de geodiversidad elevados se deben al amplio espectro (variedad) de estructuras volcánicas. Tal diversidad de geoformas volcánicas fue producida en importantes episodios eruptivos durante el Pleistoceno tardío, donde se formaron cuatro volcanes de gran tamaño. Además, en el Holoceno tardío se generaron una serie de erupciones fisurales que dieron lugar a flujos de lava de gran espesor, los cuales, posteriormente fueron sitios de asentamiento de poblaciones Purépechas en épocas prehispánicas (Reyes-Guzmán *et al.*, 2018).

La metodología aplicada permitió determinar que la suma del SGt y SGv es un proceso efectivo para obtener el IGv , y, de este modo, generar un mapa de fácil interpretación que ilustra de manera gráfica la geodiversidad volcánica que posee la MP (Figura 10b). Es pertinente mencionar que los parámetros clásicos para la cuantificación de la geodiversidad (subíndices de geología, pedología, hidrografía y paleontología), pueden ser poco efectivos en zonas volcánicas con características similares a las de la MP, ya que los valores que arrojan son relativamente bajos, debido a la escasa diversidad que existe en el tipo de roca, de suelos y a la nula presencia de fósiles en los campos volcánicos (Vorös *et al.*, 2021). Bajo estas condiciones, la metodología

empleada, se basa en un enfoque selectivo de evaluación de la geodiversidad, donde se generaron parámetros de evaluación propios, descartando, de acuerdo con los propósitos planteados, parámetros como el tipo de roca, suelo e hidrografía, que, para los fines del presente trabajo, su aporte no era significativo (e.g. Zwolinski *et al.*, 2018). El proceso de evaluación aquí empleado puede ser aplicado en otros campos volcánicos, sin embargo, se recomienda enriquecer las evaluaciones con la inclusión de parámetros tales como agrupaciones y/o lineamientos de volcanes, datos de textura de los depósitos (litofacies), datos

cronológicos, química de rocas y sitios de interés cultural relacionados al fenómeno volcánico.

Por último, los resultados fueron utilizados para la propuesta de una georuta con el propósito de incentivar el geoturismo. Nombrada como “Ruta Volcánica Meseta Purépecha”, consta de ~176 km de carreteras en buen estado y conecta los tres polígonos de “muy alta” geodiversidad de la MP, que, para este propósito, fueron nombrados “Zona 1, Zona 2 y Zona 3” (Figura 12). El recorrido incluye 6 puntos de observación llamados “Miradores del Paisaje Volcánico”, los cuales se dividieron en la sección

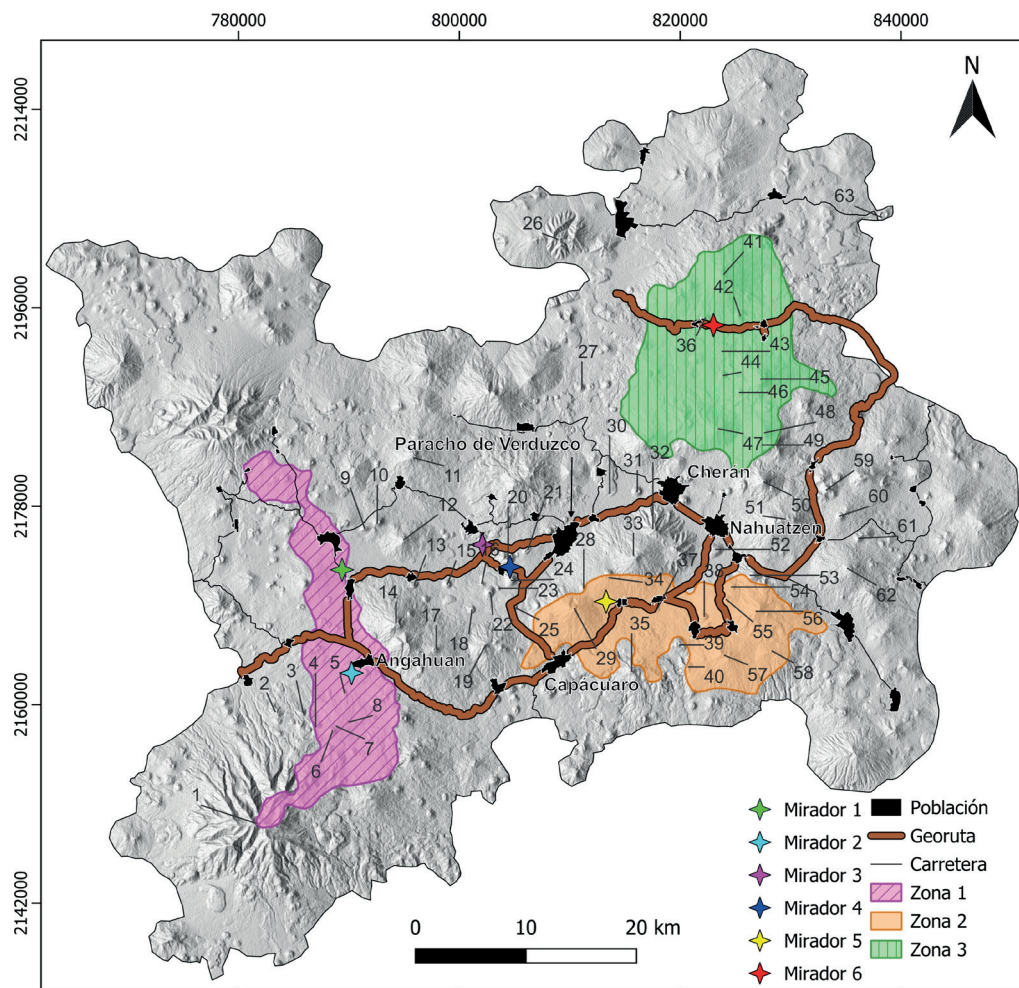


Figura 12. Mapa de la “Ruta Volcánica Purépecha” propuesta en este estudio. El recorrido conecta los tres polígonos de mayor geodiversidad (Zona 1, Zona 2 y Zona 3) e incluye una serie de miradores volcánicos. Los números e indicadores de posición señalan las geoformas volcánicas mencionadas en este artículo y visitadas en campo. 1-Tancitaro, 2-Pueblo Viejo, 3-El Salto, 4-Canic Juata, 5-Capatzun, 6-Parícutin, 7-Sapichu, 8-Lavas del Parícutin, 9-La Culebra, 10-Apundaro, 11-Cocucho, 12-El Molino, 13-Ipandán, 14-El Santísimo, 15-Santa Catarina, 16-Gacho, 17-Janamo, 18-Los Amoles (W), 19-El Horno, 20-Iglesia Vieja, 21-Paracho Viejo, 22-Yondima, 23-Garacutiro, 24-San Miguel, 25-Cicapien, 26-T’arhe Juataru, 27-Las Yervas, 28-Sinar Juata, 29-Paracho, 30-Cheranástico, 31-Juanyan, 32-San Marcos, 33-Caraquitiro, 34-Caín Juata, 35-El Metate, 36-El Pueblito, 37-Juataqueri, 38-La Cantera, 39-Urutzen, 40-Las Cruces, 41-El Tule, 42-Las Cabras, 43-La Víbora, 44-La Arena (W), 45-El Tecolote, 46-Sin Nombre, 47-La Virgen (N), 48-El Pitorreal, 49-Hoya del Pitorreal, 50-El Pílon, 51-El Capen, 52-Guachan, 53-El Iriepu, 54-Haratz, 55-Tejocote Ancho, 56-La Virgen (S), 57-Hueratiro, 58-Zarapo, 59-Partidas, 60-El Mesteño, 61-Caratacua, 62-El Chivo, 63-Alberca de Los Espinos.

oeste, centro y noreste de acuerdo con su ubicación dentro de la MP. La Figura 13 muestra los tres miradores más representativos. En el Mirador 1 se observan 14 geoformas volcánicas en una vista caracterizada por la acumulación de ocho conos cineríticos al frente y una serie de volcanes escudo al fondo (Figura 13a). El Mirador 5 es el punto de observación con más geoformas visibles, conformado por 17 estructuras volcánicas que rodean un majestuoso valle central en el que se encuentran asentados los pueblos de Quinceo y Arantepacua (Figura 13b).

En el Mirador 6, localizado en la sección noreste, predomina la imponente geoforma del estratovolcán coronado por un domo de lava El Tecolote, el cual posee estructuras que muestran antiguos colapsos y que podrían ser indicadores del peligro geológico en la zona (Figura 13c).

La “Ruta Volcánica Meseta Purépecha” se propone como una estrategia dirigida a mostrar el amplio espectro de estructuras volcánicas de la región. Con la ruta como recurso, se busca resaltar y concientizar sobre la importancia de estas zonas de

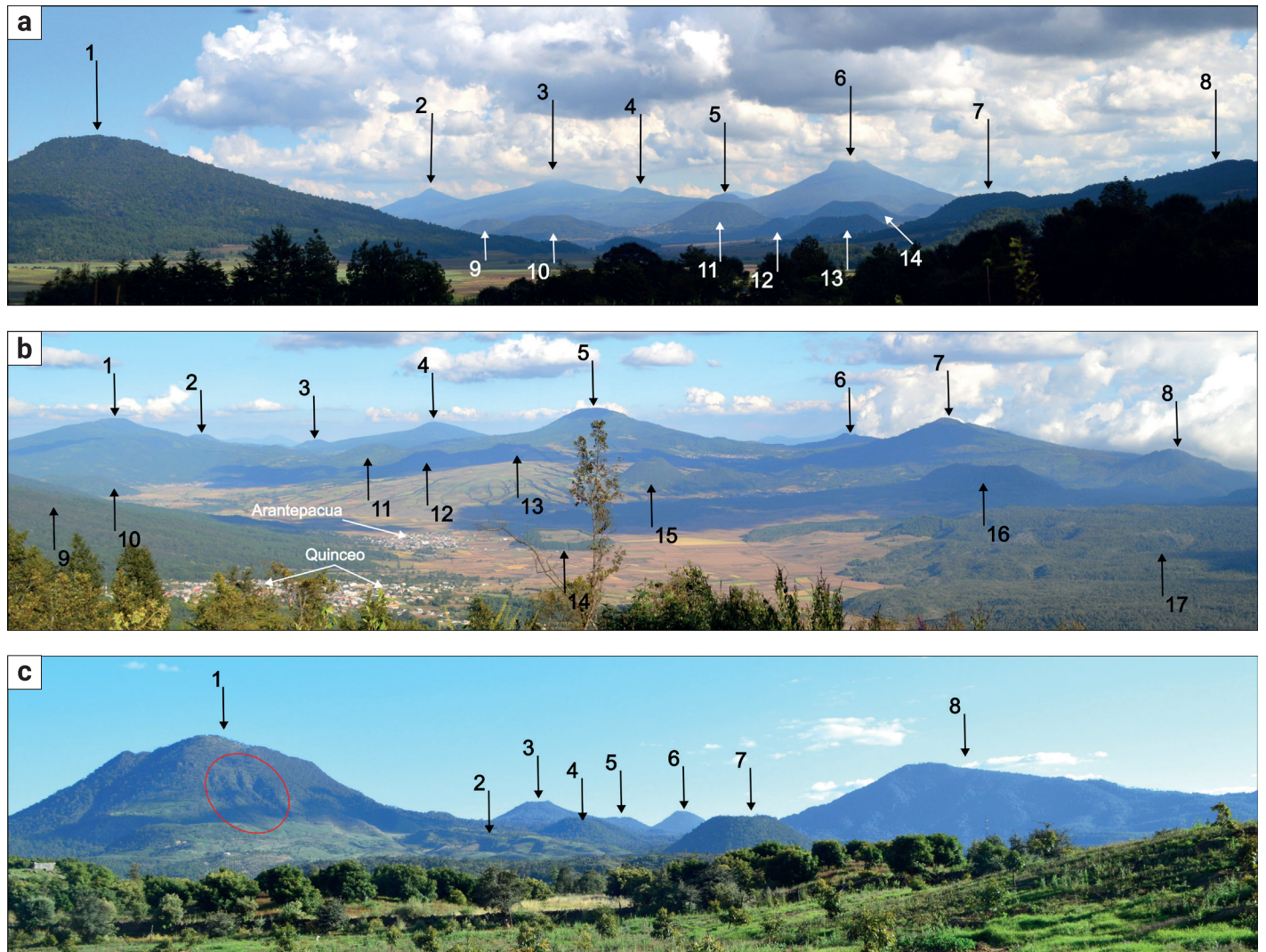


Figura 13. Miradores volcánicos incluidos en la georuta. a) Mirador 1 (sección oeste): 1-Volcán escudo El Molino, 2-Volcán escudo San Marcos, 3-Volcán escudo Caraquitaro, 4-Cono cinerítico Cañ Juata, 5-Cono colapsado Sinar Juata, 6-Estratovolcán Paracho, 7-Cono cinerítico Ipanandan, 8-Volcán escudo El Santísimo, 9- Cono cinerítico Paracho Viejo, 10- Cono colapsado Iglesia Vieja, 11- Cono cinerítico San Miguel, 12- Cono colapsado Gacho, 13- Cono cinerítico Santa Catarina, 14-Cono cinerítico Yondima. b) Mirador 5 (sección central): 1-Volcán escudo El Capen, 2-Cono cinerítico El Mesteño, 3-Cono colapsado Caratacua, 4-Volcán escudo El Chivo, 5-Volcán escudo La Virgen (centro), 6-Volcán escudo Zarapo, 7-Volcán escudo Hueratiro, 8-Cono colapsado Las Cruces, 9-Volcán escudo Caraquitaro, 10-Cono cinerítico Guachan, 11-Volcán escudo Irepo, 12-Cono cinerítico Haratz, 13-Cono cinerítico Tejocote Ancho, 14-Cono cinerítico Juataqueri, 15-Domo de lava La Cantera, 16-Cono colapsado Urutzen, 17-Volcán escudo El Metate. c) Mirador 6 (sección noreste): 1-Domo de lava El Tecolote, 2-Mesa de lava La Víbora, 3-Volcán escudo El Pitorreal, 4-Cono colapsado sin nombre, 5-Cono cinerítico Hoya del Pitorreal, 6-Cono cinerítico El Pilón, 7-Cono cinerítico La Arena, 8-Volcán escudo La Virgen (noreste). El círculo rojo muestra marcas de volumen removilizado debido a una posible avalancha de escombros.

interés geológico, destacando su valor científico, educativo, económico y cultural (e.g. Dóniz-Páez *et al.*, 2021; Gao *et al.*, 2013; Migón y Pijet-Migón, 2016). Con esta idea en mente, los miradores volcánicos propuestos son puntos referenciales para la observación de la geodiversidad volcánica y su relación con los pueblos originarios de la MP. De esta manera, el paisaje volcánico puede ser comprendido como un conjunto de elementos geológicos, a través de los cuales se trata de incentivar la sensibilización social hacia los valores de la naturaleza abiótica, y su relación con la sociedad (Joyce, 1995; 2009; Németh *et al.*, 2017). La georuta cruza alrededor de 20 pueblos donde es posible encontrar diversas expresiones culturales y económicas relacionadas al fenómeno volcánico, tales como la presencia de murales en la comunidad de Angahuan (Figura 14a), el desarrollo de pequeños proyectos geoturísticos en la comunidad de Cherán (Figura 14b) y el aprovechamiento de las geoformas volcánicas para proyectos comunitarios sustentables de captación de agua, mediante la instalación de geomembranas dentro del cráter de un cono cinerítico (Figura 14c). Estas expresiones son sólo una muestra de la indisoluble conexión entre la identidad de los pueblos Purépechas y la actividad volcánica de la región.

5.1 Perspectivas generales para la geoconservación y el geopatrimonio volcánico.

Las zonas asignadas para la estimulación de la conciencia visual (georuta y miradores) promueven la concientización del paisaje en términos de su composición y nuestro lugar en él, además, representan una contribución esencial para la comprensión y preservación del geopatrimonio (Krieger, 2023). Asimismo, estas zonas permiten visualizar los geoelementos que tienen el potencial de impulsar la economía, una vez que

se convierten en sitios de geoconservación, de geoturismo e incluso en geoparques (Farsani *et al.*, 2011; Bouzekraoui *et al.*, 2018). En la MP habitan aproximadamente 154,943 personas en alrededor de 177 comunidades (INEGI, 2020), donde la geodiversidad volcánica constituye un componente central del patrimonio cultural de los pueblos Purépechas, por lo cual, estas condiciones geológico-sociales aportan valores de geopatrimonio apreciablemente altos (Lopes y Radebaugh 2014; Moreira y Guimarães 2014; Moufti *et al.*, 2013; 2015). Creemos que la MP aún no ha sido designada como zona de geopatrimonio o geoconservación, debido a su poca difusión y falta de trabajos de evaluación, donde es claro que el geoturismo podría ser una de varias vías para promover un desarrollo sustentable en la región (Newsome *et al.* 2012; Newsome y Ladd, 2022).

La metodología y resultados de la evaluación cuantitativa de geodiversidad volcánica aquí presentado, podrían ser la base para nuevas investigaciones con enfoques multidisciplinares, mismas que podrían abordar la geodiversidad y el geopatrimonio desde diversas perspectivas. De esta manera, se deja un amplio margen para la discusión y mejoramiento de los productos aquí generados (e.g. Coratza *et al.*, 2011; Palacio-Prieto, 2013; Amine *et al.*, 2019), donde futuros trabajos podrían incluir la evaluación de servicios geosistémicos y aprovechamiento sostenible de los diversos elementos geológicos de la MP, lo que sin duda favorecería la calidad de vida de los pobladores y mejoraría la valoración del geopatrimonio (Zouros, 2010; Gray, 2011; 2012; Gordon y Barron, 2013; Najwer *et al.*, 2016; Van Ree *et al.*, 2017; Gray 2018; Ren *et al.*, 2021; Duangkrayom *et al.*, 2022; Frisk *et al.*, 2022; Tukiainen *et al.*, 2023).

Es importante mencionar que en la MP se ha registrado actividad sísmica reciente. Registros de los últimos 25 años muestra eventos sísmicos localizados en una zona de apenas 4



Figura 14. Elementos socioculturales relacionados con el fenómeno volcánico en la Meseta Purépecha. a) Mural del volcán Parícutin dentro del Centro geoturístico de Angahuan en la comunidad homónima. b) Cabañas del proyecto ecoturístico San Marcos en la comunidad de Cherán. c) Sistema de captación de agua dentro del cráter del cono cinerítico Cucundicata en la comunidad de Cherán.

km de extensión, bajo el flanco noreste del volcán Tancítaro, a profundidades de entre 8 y 15 km (Legrand *et al.*, 2023). En este contexto, es pertinente señalar que las zonas con mayor densidad espacial de geoformas volcánicas pueden estar relacionadas a la influencia de fallas de carácter regional, las cuales podrían asociarse a zonas de debilidad que permiten el ascenso del magma (cf. Nakamura, 1977; Németh, 2010). Este control estructural ha sido estudiado dentro de otras regiones del CVMG, donde las fallas preexistentes parecen ser un elemento que influye en la distribución, morfología y volumen de las estructuras volcánicas (Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2020). La presencia de esta sismicidad, indica que existe una posibilidad latente de nueva actividad volcánica en la MP, por lo tanto, esta probabilidad de actividad futura debe ser considerada como un factor primordial para el desarrollo de trabajos en la región.

6. Conclusiones

En este estudio se propuso una metodología adaptada para evaluar de forma cuantitativa el índice de geodiversidad volcánica en una zona determinada. La metodología, consistió en la generación y combinación de los subíndices de geometría del terreno (*SGt*) y de geoformas volcánicas (*SGv*). La suma de ambos subíndices dio lugar al índice de geodiversidad volcánica (*IGv*) de la Meseta Purépecha, región de gran importancia geológica y cultural dentro del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG). Los resultados del análisis geoespacial delimitaron tres zonas (polígonos) de “muy alta” geodiversidad volcánica, las cuales son consistentes con las observaciones en campo. Estos polígonos abarcan diversas regiones y localidades de gran relevancia científica, estética y cultural, convirtiéndolas en zonas con un alto potencial para el desarrollo del geoturismo y la geoconservación. La implementación de programas de esta índole podría concientizar a diversos actores sociales sobre la relevancia abiótica del área de estudio (MP), así como incentivar la creación de proyectos económicos compatibles con la cosmovisión de los pueblos Purépechas que habitan la región.

Los análisis cuantitativos de la geodiversidad pueden representar un sólido soporte teórico y práctico para la gestión y desarrollo de políticas públicas que favorezcan la conservación de la naturaleza. Por lo tanto, los productos generados en este trabajo; mapa de geodiversidad volcánica, georuta y la ubicación de los miradores volcánicos, están dirigidos a entidades académicas, políticas, sociales, económicas y público en general, que busquen coadyuvar en la promoción de estrategias de conservación y ordenamiento territorial en México. Del mismo modo, esta investigación forma parte de una serie de

esfuerzos iniciales que buscan posicionar las evaluaciones de geodiversidad como un componente esencial en los estudios de las Ciencias de la Tierra.

7. Agradecimientos

Los autores, agradecen a la SECIHTI (Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación) por su apoyo financiero a través del proyecto Ciencia de Frontera clave CF- 2023, así como al Instituto Politécnico Nacional por su apoyo, mediante fondos institucionales.

8. Referencias

- Abramowicz, D., Dóniz-Páez, J., Tritt, R., & Bąk, M. (2022). Methodological framework for geodiversity application in geographic education from a case study of Canary Islands, Spain. *Quaestiones Geographicae*, 41(1), 79–91. doi: <https://doi.org/10.2478/quageo-2022-0006>
- Amine, A., El Amrani El Hassani, I.-E., Remmal, T., El Kamel, F., Van Wyk De Vries, B., & Boivin, P. (2019). Geomorphological classification and landforms inventory of the Middle-Atlas Volcanic Province (Morocco): Scientific value and educational potential. *Quaestiones Geographicae*, 38(1), 107–129. doi: <https://doi.org/10.2478/quageo-2019-0010>
- Araujo, A. M., & Pereira, D. Í. (2018). A new methodological contribution for the geodiversity assessment: Applicability to Ceará State (Brazil). *Geoheritage*, 10(4), 591–605. doi: <https://doi.org/10.1007/s12371-017-0250-3>
- Ávila-García, P. (2008). La cultura del agua en los pueblos indígenas de la Meseta Purépecha. In I. Sandre-Osorio, & D. Murillo (Eds). *Agua y diversidad cultural en México. Programa hidrológico internacional (PHI) de la oficina regional de ciencia para América Latina y el Caribe de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO)*. (pp. 39-54). Montevideo, Uruguay.
- Ban, M., Hasenaka, T., Delgado-Granados, H., & Takaoka, N. (1992). K–Ar ages of lavas from shield volcanoes in the Michoacán–Guanajuato volcanic field, Mexico. *Geofísica Internacional*, 31(4), 467–473. Doi: <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1992.31.4.1367>
- Barancoková, M., Hutárová, D., & Nikolaj, M. (2023). Quantitative assessment of geodiversity for conservation purposes in Slovenské rudohorie Mountains (Slovakia). *Land*, 12(9), 1650. doi: <https://doi.org/10.3390/land12091650>
- Bolós, X., Delgado-Torres, A., Cifuentes, G., Macías, J. L., Boijseaneau-López, M., Tinoco, C., & Salguero, D. (2020). Internal structure and hydrothermal fluid circulation of Parícutin Volcano, Mexico: Insights Gained From Near-Surface Geophysics. *Geophysical Research Letters*, 47(16), e2020GL089270. doi: <https://doi.org/10.1029/2020GL089270>
- Bouzekraoui, H., Barakat, A., El Youssi, M., Touhami, F., Mouaddine,

- A., Hafid, A., & Zwoliński, Z. (2018). Mapping geosites as gateways to the geotourism management in Central High-Atlas (Morocco). *Quaestiones Geographicae*, 37(1), 87–102. doi: <https://doi.org/10.2478/quageo-2018-0007>
- Brilha, J. (2002). Geoconservation and protected areas. *Environmental Conservation*, 29(3), 273–276. doi: <https://doi.org/10.1017/S0376892902000188>
- Brilha, J. (2016). Inventory and Quantitative Assessment of Geosites and Geodiversity sites: A Review. *Geoheritage*, 8(2), 119–134. doi: <https://doi.org/10.1007/s12371-014-0139-3>
- Brilha, J., Gray, M., Pereira, D. I., & Pereira, P. (2018). Geodiversity: An integrative review as a contribution to the sustainable management of the whole of nature. *Environmental Science & Policy*, 86, 19–28. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.05.001>
- Campa, M. F., & Coney, P. J. (1983). Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences* 20(6), 1040–1051. doi: <https://doi.org/10.1139/e83-094>
- Canet, C. (2023). Is Mexico a “Megageodiverse” Country? *Geoheritage* 15, 98. doi: <https://doi.org/10.1007/s12371-023-00865-2>
- Carrión-Mero, P., Herrera-Narváez, G., Herrera-Franco, G., Sánchez-Zambrano, E., Mata-Perelló, J., & Berrezueta, E. (2021). Assessment and promotion of geotouristic and geomining routes as a basis for local development: A case study. *Minerals*, 11(4), 351. doi: <https://doi.org/10.3390/min11040351>
- Carrión-Mero, P., Dueñas-Tovar, J., Jaya-Montalvo, M., Berrezueta, E., & Jiménez-Orellana, N. (2022). Geodiversity assessment to regional scale: Ecuador as a case study. *Environmental Science & Policy*, 136, 167–186. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.06.009>
- Chevrel, M. O., Guilbaud, M.-N., & Siebe, C. (2016a). The ~AD 1250 effusive eruption of El Metate shield volcano (Michoacán, Mexico): Magma source, crustal storage, eruptive dynamics, and lava rheology. *Bulletin of Volcanology*, 78(4), 32. doi: <https://doi.org/10.1007/s00445-016-1020-9>
- Chevrel, M. O., Siebe, C., Guilbaud, M.-N., & Salinas, S. (2016b). The AD 1250 El Metate shield volcano (Michoacán): Mexico’s most voluminous Holocene eruption and its significance for archaeology and hazards. *The Holocene*, 26(3), 471–488. doi: <https://doi.org/10.1177/0959683615609757>
- Connor, C. B. (1987). Structure of the Michoacan–Guanajuato volcanic field, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 33(1-3), 191–200. doi: [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(87\)90061-8](https://doi.org/10.1016/0377-0273(87)90061-8)
- Conway, F. M., Ferrill, D. A., Hall, C. M., Morris, A. P., Stamatakos, J. A., Connor, C. B., Halliday, A. N., & Condit, C. (1997). Timing of basaltic volcanism along the Mesa Butte fault in the San Francisco volcanic field, Arizona, from ⁴⁰Ar/³⁹Ar dates: implications for longevity of cinder cone alignments. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 102(B1), 815–824. doi: <https://doi.org/10.1029/96JB02853>
- Coratza, P., Bruschi, V. M., Piacentini, D., Saliba, D., & Soldati, M. (2011). Recognition and Assessment of Geomorphosites in Malta at the Il-Majjistral Nature and History Park. *Geoheritage*, 3(3), 175–185. doi: <https://doi.org/10.1007/s12371-011-0034-0>
- Corona-Chávez, P. (2018). Revisitando los volcanes de la región del Parícutín: morfología, petrología y edad. *Ciencia Nicolaita*, 74, 31–58.
- De Paula Silva, J., Rodrigues, C., & Pereira, D. I. (2015). Mapping and analysis of geodiversity indices in the Xingu River Basin, Amazonia, Brazil. *Geoheritage*, 7(4), 337–350. doi: <https://doi.org/10.1007/s12371-014-0134-8>
- De Silva, S., & Lindsay, J. M. (2015). Primary volcanic landforms. In Haraldur Sigurdsson (Ed.), *The Encyclopedia of Volcanoes* (pp. 273–297). Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00015-8>
- Dias, M. C. S. S., Domingos, J. O., dos Santos Costa, S. S. (2021). Geodiversity Index Map of Rio Grande do Norte State, Northeast Brazil: Cartography and Quantitative Assessment. *Geoheritage* 13(10). doi: <https://doi.org/10.1007/s12371-021-00532-4>
- Dixon, G. (1995). Geoconservation: an international review and strategy for Tasmania; a report to the Australian Heritage Commission. *Occasional Paper No. 35*, Parks & Wildlife Service, Tasmania.
- Dóniz-Páez, J., Beltrán-Yanes, E., Becerra-Ramírez, R., Pérez, N. M., Hernández, P. A., & Hernández, W. (2020). Diversity of Volcanic Geoheritage in the Canary Islands, Spain. *Geosciences*, 10(10), 390. doi: <https://doi.org/10.3390/geosciences10100390>
- Dóniz Páez, J., Becerra-Ramírez, R., & Beltrán Yanes, E. (2021). Geomorfositos en el Geoparque Mundial Unesco de El Hierro (Islas Canarias, España) para fomentar el geoturismo en espacios volcánicos. *Revista de geografía Norte Grande*, 80, 165–186. doi: <https://doi.org/10.4067/S0718-34022021000300165>
- Dos Santos, F. M., De La Corte Bacci, D., Saad, A. R., & Da Silva Ferreira, A. T. (2020). Geodiversity index weighted by multivariate statistical analysis. *Applied Geomatics*, 12(3), 361–370. doi: <https://doi.org/10.1007/s12518-020-00303-w>
- Duangkrayom, J., Jintasakul, P., Songtham, W., Kruainok, P., Naksri, W., Thongdee, N., Grote, P. J., Phetprayoon, T., Janjitpaiboon, K., & Meepoka, R. (2022). Geodiversity in Khorat Geopark, Thailand: Approaches to geoconservation and sustainable development. *International Journal of Geoheritage and Parks*, 10(4), 569–596. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2022.09.003>
- Erfurt-Cooper, P. (2011). Geotourism in volcanic and geothermal environments: Playing with fire? *Geoheritage*, 3(3), 187–193. doi: <https://doi.org/10.1007/s12371-010-0025-6>
- Erikstad, L. (2013). Geoheritage and geodiversity management – the questions for tomorrow. *Proceedings of the Geologists’ Association*, 124(4), 713–719. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2012.07.003>
- Erlund, E. J., Cashman, K. V., Wallace, P. J., Pioli, L., Rosi, M., Johnson, E., & Granados, H. D. (2010). Compositional evolution of magma from Parícutin Volcano, Mexico: The tephra record. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 197(1–4), 167–187. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.09.015>

- Farsani, N. T., Coelho, C., & Costa, C. (2011). Geotourism and geoparks as novel strategies for socio-economic development in rural areas. *International Journal of Tourism Research*, 13(1), 68–81. doi: <https://doi.org/10.1002/jtr.800>
- Ferrando, A., Faccini, F., Paliaga, G., & Coratza, P. (2021). A Quantitative GIS and AHP based analysis for geodiversity assessment and mapping. *Sustainability*, 13(18), 10376. doi: <https://doi.org/10.3390/su131810376>
- Ferrari, L., López-Martínez, M., González-Cervantes, N., Jacobo-Albarán, J., & HernándezBernal, M. (2003). Volcanic record and age of formation of the Mexico City basin. *Geosphere*, 23, 120.
- Ferrari, L., Morán-Zenteno, D., & González-Torres, E. A. (2007). Actualización de la Carta Geológica de México, [Mapa] 1:4,000,000: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, Nuevo Atlas Nacional de México,
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., & Manea, M. (2012). The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, 522–523, 122–149. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.09.018>
- Ferrer-Valero, N. (2018). Measuring geomorphological diversity on coastal environments: A new approach to geodiversity. *Geomorphology*, 318, 217–229. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.06.013>
- Frisk, E. L., Volchko, Y., Sandström, O. T., Söderqvist, T., Ericsson, L. O., Mossmark, F., Lindhe, A., Blom, G., Lång, L.-O., Carlsson, C., & Norrman, J. (2022). The geosystem services concept – What is it and can it support subsurface planning? *Ecosystem Services*, 58, 101493. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101493>
- Fuertes-Gutiérrez, I., & Fernández-Martínez, E. (2012). Mapping geosites for geoheritage management: A methodological proposal for the Regional Park of Picos de Europa (León, Spain). *Environmental Management*, 50(5), 789–806. doi: <https://doi.org/10.1007/s00267-012-9915-5>
- Gao, W., Li, J., Mao, X., & Li, H. (2013). Geological and Geomorphological Value of the Monogenetic Volcanoes in Wudalianchi National Park, NE China. *Geoheritage*, 5(2), 73–85. doi: <https://doi.org/10.1007/s12371-013-0077-5>
- Gómez-Tuena, A., Mori, L., Rincón-Herrera, N. E., Ortega-Gutiérrez, F., Solé, J., & Iriondo, A. (2008). The origin of a primitive trondhjemite from the Trans-Mexican Volcanic Belt and its implications for the construction of a modern continental arc. *Geology*, 36(6), 471–474. doi: <https://doi.org/10.1130/G24687A.1>
- Gómez-Vasconcelos, M. G., Macías, J. L., Avellán, D. R., Sosa-Ceballos, G., Garduño-Monroy, V. H., Cisneros-Máximo, G., Layer, P. W., Benowitz, J., López-Loera, H., López, F. M., & Pertou, M. (2020). The control of preexisting faults on the distribution, morphology, and volume of monogenetic volcanism in the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field. *GSA Bulletin*, 132(11–12), 2455–2474. doi: <https://doi.org/10.1130/B35397.1>
- Gonçalves, J., Mansur, K., Santos, D., Henriques, R., & Pereira, P. (2020). A Discussion on the quantification and classification of geodiversity Indices Based on GIS Methodological Tests. *Geoheritage*, 12(2), 38. doi: <https://doi.org/10.1007/s12371-020-00458-3>
- Gordon, J. E., Barron, H. F., Hansom, J. D., & Thomas, M. F. (2012). Engaging with geodiversity—Why it matters. *Proceedings of the Geologists' Association*, 123(1), 1–6. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2011.08.002>
- Gordon, J. E., & Barron, H. F. (2013). The role of geodiversity in delivering ecosystem services and benefits in Scotland. *Scottish Journal of Geology*, 49(1), 41–58. doi: <https://doi.org/10.1144/sjg2011-465>
- Gray, M. (2011). Other nature: Geodiversity and geosystem services. *Environmental Conservation*, 38(3), 271–274. doi: <https://doi.org/10.1017/S0376892911000117>
- Gray, M. (2012). Valuing Geodiversity in an 'Ecosystem Services' Context. *Scottish Geographical Journal*, 128(3–4), 177–194. doi: <https://doi.org/10.1080/14702541.2012.725858>
- Gray, M. (2013). *Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature* (2a ed.). Wiley-Blackwell, Chichester UK.
- Gray, M., Gordon, J. E., & Brown, E. J. (2013). Geodiversity and the ecosystem approach: The contribution of geoscience in delivering integrated environmental management. *Proceedings of the Geologists' Association*, 124(4), 659–673. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2013.01.003>
- Gray, M. (2018). Geodiversity. In Reynard, E. & Brilha, J. (Eds.), *Geoheritage* (pp. 13–25). Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809531-7.00001-0>
- Guilbaud, M.-N., Siebe, C., Layer, P., Salinas, S., Castro-Govea, R., Garduño-Monroy, V. H., & Le Corvec, N. (2011). Geology, geochronology, and tectonic setting of the Jorullo Volcano region, Michoacán, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 201(1–4), 97–112. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.09.005>
- Guilbaud, M.-N., Siebe, C., Layer, P., & Salinas, S. (2012). Reconstruction of the volcanic history of the Tacámbaro-Puruarán area (Michoacán, México) reveals high frequency of Holocene monogenetic eruptions. *Bulletin of Volcanology*, 74(5), 1187–1211. doi: <https://doi.org/10.1007/s00445-012-0594-0>
- Guilbaud, M.-N., Ortega-Larrocea, M. D. P., Cram, S., & Van Wyk De Vries, B. (2021). Xitle Volcano Geoheritage, Mexico City: Raising Awareness of Natural Hazards and Environmental Sustainability in Active Volcanic Areas. *Geoheritage*, 13(1), 6. doi: <https://doi.org/10.1007/s12371-020-00525-9>
- Hasenaka, T., & Carmichael, I. S. E. (1985). The cinder cones of Michoacán–Guanajuato, central Mexico: their age, volume and distribution, and magma discharge rate. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 25(1–2), 105–124. doi: [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(85\)90007-1](https://doi.org/10.1016/0377-0273(85)90007-1)
- Hasenaka, T. (1994). Size, distribution, and magma output rate for shield volcanoes of the Michoacán-Guanajuato volcanic field: Central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 63(1–2), 13–31. doi: [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(94\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0377-0273(94)90016-7)

- Herrera-Franco, G., Carrión-Mero, P., Montalván-Burbano, N., Caicedo-Potosí, J., & Berrezueta, E. (2022). Geoheritage and Geosites: A Bibliometric Analysis and Literature Review. *Geosciences*, 12(4), 169. doi: <https://doi.org/10.3390/geosciences12040169>
- Hjort, J., Seijmonsbergen, A. C., Kempainen, J., Tukiainen, H., Maliniemi, T., Gordon, J. E., Alahuhta, J., & Gray, M. (2024). Towards a taxonomy of geodiversity. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 382(2269), 20230060. doi: <https://doi.org/10.1098/rsta.2023.0060>
- Hjort, J., Tukiainen, H., Salminen, H., Kempainen, J., Kiilunen, P., Snåre, H., Alahuhta, J., & Maliniemi, T. (2022). A methodological guide to observe local-scale geodiversity for biodiversity research and management. *Journal of Applied Ecology*, 59(7), 1756–1768. doi: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14183>
- Iglesias, A., Clayton, R. W., Pérez-Campos, X., Singh, S. K., Pacheco, J. F., García, D., & Valdés-González, C. (2010). S wave velocity structure below central Mexico using high-resolution surface wave tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B6), 2009JB006332. doi: <https://doi.org/10.1029/2009JB006332>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2017). Anuario estadístico y geográfico por entidad federativa (Michoacán de Ocampo). Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825092092>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). Censos nacionales. Recuperado de <https://inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- Jácome-Paz, M. P., Delgado-Granados, H., Pérez-Campos, X., Espinasa-Pereña, R., & Campion, R. (2022). Diffuse Degassing Baseline in Paricutin volcano and Michoacán-Guanajuato monogenetic volcanic field, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 425(5), 107534. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107534>
- Jasiewicz, J., & Stepinski, T. F. (2013). Geomorphons—A pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. *Geomorphology*, 182, 147–156. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.11.005>
- Joyce, E. B. (1995). *Assessing the significance of geological heritage: a methodology study for the Australian Heritage Commission*. Australian Heritage Commission.
- Joyce, E. B. (2009). Geomorphosites and volcanism. In Reynard, E., Coratza, P., & Redolini-Bissig, G. (Eds.), *Geomorphosites* (pp.177–190). Pfeil, Munich.
- Kereszturi, G., & Nemeth, K. (2012). Monogenetic Basaltic Volcanoes: Genetic Classification, Growth, Geomorphology and Degradation. In K. Nemeth (Ed.), *Updates in Volcanology—New Advances in Understanding Volcanic Systems*. InTech. doi: <https://doi.org/10.5772/51387>
- Khalaf, E. E. D. A. H., Wahed, M. A., Maged, A., & Mokhtar, H. (2019). Volcanic geosites and their geoheritage values preserved in monogenetic neogene volcanic field, Bahariya Depression, Western Desert, Egypt: Implication for climatic change-controlling volcanic eruption. *Geoheritage*, 11(3), 855–873. doi: <https://doi.org/10.1007/s12371-018-0336-6>
- Kienle, D., Walentowitz, A., Sungur, L., Chiarucci, A., Irl, S. D. H., Jentsch, A., Veetas, O. R., Field, R., & Beierkuhnlein, C. (2021). Geodiversity and biodiversity on a volcanic island: the role of scattered phonolites for plant diversity and performance. *Biogeosciences*, 19, 1691–1703. doi: <https://doi.org/10.5194/bg-2021-107>
- Kiernan, K. (1996). Conserving Geodiversity and Geoheritage: The conservation of glacial landforms. Forest practices unit. Hobart, Tasmania.
- Kim, Y., Clayton, R. W., & Jackson, J. M. (2010). Geometry and seismic properties of the subducting Cocos plate in central Mexico. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B6), 2009JB006942. doi: <https://doi.org/10.1029/2009JB006942>
- Kim, Y., Miller, M. S., Pearce, F., & Clayton, R. W. (2012). Seismic imaging of the Cocos plate subduction zone system in central Mexico. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(7), 2012GC004033. doi: <https://doi.org/10.1029/2012GC004033>
- Krieger, P. (2023). Preserving geodiversity in Mexican hyper urban conflict zones: A geo-aesthetic approach. *International Journal of Geoheritage and Parks*, 11(1), 64–81. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2022.08.010>
- Larrea, P., Salinas, S., Widom, E., Siebe, C., & Abbitt, R. J. F. (2017). Compositional and volumetric development of a monogenetic lava flow field: The historical case of Paricutin (Michoacán, Mexico). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 348, 36–48. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.10.016>
- Legrand, D., Pertou, M., Macías, J. L., Siebe, C., Pacheco, J., Chacón, F., Lermo, J., Quintanar, L., & Cisneros, G. (2023). Repeated seismic swarms near Paricutin volcano: Precursors to the birth of a new monogenetic volcano in the Michoacán-Guanajuato volcanic field, México? *Bulletin of Volcanology*, 85(5), 30. doi: <https://doi.org/10.1007/s00445-023-01645-0>
- Lopes, R. M. C., & Radebaugh, J. (2014). Erta Ale and the Danakil Rift Zone. En *Volcanic Tourist Destinations* (pp 307–314). Springer Berlin Heidelberg. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-16191-9_23
- Luhr, J. F. (2001). Glass inclusions and melt volatile contents at Paricutin Volcano, Mexico. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 142, 261–283. doi: <https://doi.org/10.1007/s004100100293>
- Macías, J. L., & Arce, J. L. (2019). Volcanic activity in Mexico during the Holocene. In Torrescano-Valle, N., Islebe, G., Roy, P. (Eds.), *The Holocene and Anthropocene Environmental History of Mexico* (pp 129–170). Springer. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-31719-5_8
- Mahgoub, A., Böhnel, H., Siebe, C., Salinas, S., & Guilbaud, M. N. (2017). Paleomagnetically inferred ages of a cluster of Holocene monogenetic eruptions in the Tacámbaro-Puruarán area (Michoacán, México): implications for volcanic hazards. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 347, 360–370. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.10.004>
- Manosso, F. C., & De Nóbrega, M. T. (2016). Calculation of Geodiversity from Landscape Units of the Cadeado Range Region in Paraná, Brazil. *Geoheritage*, 8(3), 189–199. doi: <https://doi.org/10.1007/>

- [s12371-015-0152-1](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107703)
- Manosso, F. C., Zwoliński, Zb., Najwer, A., Basso, B. T., Santos, D. S., & Pagliarini, M. V. (2021). Spatial pattern of geodiversity assessment in the Marrecas River drainage basin, Paraná, Brazil. *Ecological Indicators*, 126, 107703. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107703>
- Meléndez, G., Barella, R., Calonge, A., Fermeli, G., & Escorihuela, J. (2012). Los geotopos paleontológicos como puntos de interés paleontológico de carácter patrimonial, didáctico, museístico y geoturístico: elaboración de una ruta de geotopos paleontológicos en áreas señaladas de la Cordillera Ibérica. *Proceedings of the XXVIII Jornadas de la Sociedad Española de Paleontología y Simposios de los Proyectos* (pp. 275–278).
- Migoñ, P., & Pijet-Migoñ, E. (2016). Overlooked Geomorphological Component of Volcanic Geoheritage—Diversity and Perspectives for Tourism Industry, Pogórze Kaczawskie Region, SW Poland. *Geoheritage*, 8(4), 333–350. doi: <https://doi.org/10.1007/s12371-015-0166-8>
- Miros-Gómez, J. A., Canet, C., & Calmus, T. (2024). Geodiversity Assessment in the Midriff Islands Region of the Gulf of California (Northwest Mexico). *Geoheritage*, 16(2). doi: <https://doi.org/10.1007/s12371-024-00946-w>
- Morante-Carballo, F., Domínguez-Cuesta, M. J., Paz-Salas, N., Malavé-Hernández, J., Dueñas-Tovar, J., & Carrión-Mero, P. (2023). Evaluation of the potential of coastal cliffs as geosites for the promotion of geotourism. *Geography and Sustainability*, 4(4), 356–371. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2023.08.003>
- Moreira, J. C., & Guimarães, G. B. (2014). Fernando de Noronha Archipelago: A Paradise formed by volcanism in Brazil. In P. Erfurt-Cooper (Ed.), *Volcanic Tourist Destinations* (pp. 315–323). Springer Berlin Heidelberg. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-16191-9_24
- Moufti, M. R., Németh, K., El-Masry, N., & Qaddah, A. (2013). Geoheritage values of one of the largest maar craters in the Arabian peninsula: the Al Wahbah crater and other volcanoes (Harrat Kishb, Saudi Arabia). *Central European Journal of Geosciences*, 5(2), 254–271. doi: <https://doi.org/10.2478/s13533-012-0125-8>
- Moufti, M. R., Németh, K., El-Masry, N., & Qaddah, A. (2015). Volcanic geotopes and their geosites preserved in an arid climate related to landscape and climate changes since the Neogene in Northern Saudi Arabia: Harrat Hutaymah (Hai'il Region). *Geoheritage*, 7(2), 103–118. doi: <https://doi.org/10.1007/s12371-014-0110-3>
- Najwer, A., Borysiak, J., Gudowicz, J., Mazurek, M., & Zwoliński, Z. (2016). Geodiversity and Biodiversity of the Postglacial Landscape (Dębnica River Catchment, Poland). *Quaestiones Geographicae*, 35(1), 5–28. doi: <https://doi.org/10.1515/quageo-2016-0001>
- Nakamura, K. (1977). Volcanoes as possible indicators of tectonic stress orientation—principle and proposal. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2(1), 1–6. doi: [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(77\)90012-9](https://doi.org/10.1016/0377-0273(77)90012-9)
- Navasardyan, G., Savov, I., Grigoryan, E., Metaxian, J.-P., Sargsyan, L., Sahakyan, E., Galstyan, A., & Meliksetian, K. (2023). *Nature of polygenetic to monogenetic transition of volcanism of Gegham volcanic ridge (Armenia)* [Conference session]. Conference presented at EGU General Assembly 2023. Vienna, Austria doi: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-13580>
- Németh, K. (2010). Monogenetic volcanic fields: Origin, sedimentary record, and relationship with polygenetic volcanism. In E. Cañón-Tapia & A. Szakács (Eds.), *What Is a Volcano?* Geological Society of America. doi: [https://doi.org/10.1130/2010.2470\(04\)](https://doi.org/10.1130/2010.2470(04))
- Németh, K., & Kereszturi, G. (2015). Monogenetic volcanism: Personal views and discussion. *International Journal of Earth Sciences*, 104(8), 2131–2146. doi: <https://doi.org/10.1007/s00531-015-1243-6>
- Németh, K., Casadevall, T., Moufti, M. R., & Marti, J. (2017). Volcanic Geoheritage. *Geoheritage*, 9(3), 251–254. doi: <https://doi.org/10.1007/s12371-017-0257-9>
- Németh, K. (2022). Geoheritage and geodiversity aspects of catastrophic volcanic eruptions: Lessons from the 15th of January 2022 Hunga Tonga - Hunga Ha'apai eruption, SW Pacific. *International Journal of Geoheritage and Parks*, 10(4), 546–568. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2022.08.003>
- Németh, K., & Gravis, I. (2022). Geoheritage and geodiversity elements of the SW Pacific: A conceptual framework. *International Journal of Geoheritage and Parks*, 10(4), 523–545. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2022.09.001>
- Németh, K. (2023). Volcanic Geoheritage in the Light of Volcano Geology. In Dóniz-Páez, J., Pérez, N.M. (Eds), *El Hierro Island Global Geopark. Geoheritage, Geoparks and Geotourism*. Springer. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-07289-5_1
- Newsome, D., & Ladd, P. (2022). The dimensions of geotourism with a spotlight on geodiversity in a subdued landscape. *International Journal of Geoheritage and Parks*, 10(3), 351–366. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2022.06.001>
- Newsome, D., Dowling, R., & Leung, Y. F. (2012). The nature and management of geotourism: A case study of two established iconic geotourism destinations. *Tourism Management Perspectives*, 2, 19–27. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tmp.2011.12.009>
- Ocelli Pinheiro, R., Gentilini, S., & Giardino, M. (2023). A Framework for Geoconservation in Mining Landscapes: Opportunities for Geopark and GEOfood Approaches in Minas Gerais, Brazil. *Resources*, 12(2), 20. doi: <https://doi.org/10.3390/resources1202020>
- Oliver, M. A., & Webster, R. (1990). Kriging: A method of interpolation for geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Systems*, 4(3), 313–332. doi: <https://doi.org/10.1080/02693799008941549>
- Ownby, S., Delgado Granados, H., Lange, R. A., & Hall, C. M. (2007). Volcán Tancitaro, Michoacán, Mexico, 40Ar/39Ar constraints on its history of sector collapse. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 161(1–2), 1–14. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.10.009>
- Palacio Prieto, J. L. (2013). Geositos, geomorfositos y geoparques;

- importancia, situación actual y perspectivas en México. *Investigaciones Geográficas*, 81, 24. doi: <https://doi.org/10.14350/rig.32817>
- Pardo, M., & Suárez, G. (1995). Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico: Seismic and tectonic implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B7), 12357–12373. doi: <https://doi.org/10.1029/95JB00919>
- Parrot, J.-F., Ramírez Núñez, C., & Palacio Prieto, J. L. (2024). Geodiversity of Mexico. *Investigaciones Geográficas*, 115. doi: <https://doi.org/10.14350/rig.60903>
- Pereira, D. I., Pereira, P., Brilha, J., & Santos, L. (2013). Geodiversity Assessment of Paraná State (Brazil): An Innovative Approach. *Environmental Management*, 52(3), 541–552. doi: <https://doi.org/10.1007/s00267-013-0100-2>
- Pérez-Campos, X., Kim, Y., Husker, A., Davis, P. M., Clayton, R. W., Iglesias, A., Pacheco, J. F., Singh, S. K., Manea, V. C., & Gurnis, M. (2008). Horizontal subduction and truncation of the Cocos Plate beneath central Mexico. *Geophysical Research Letters*, 35(18), 2008GL035127. doi: <https://doi.org/10.1029/2008GL035127>
- Pola, A., Macías, J. L., Garduño-Monroy, V. H., Osorio-Ocampo, S., & Cardona-Melchor, S. (2014). Successive collapses of the El Estribo volcanic complex in the Pátzcuaro Lake, Michoacán, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 289, 41–50. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.10.011>
- Quintero-Marín, J. E., Rendón-Rivera, A., & Brilha, J. (2023). A Study on Geodiversity and Geoconservation's Impact on the Management of Natural Resources in the Alto Ricaurte Region, Boyacá, Colombia. *Geoh Heritage*, 15(4), 122. doi: <https://doi.org/10.1007/s12371-023-00890-1>
- Ren, Y., Lü, Y., Hu, J., & Yin, L. (2021). Geodiversity underpins biodiversity but the relations can be complex: Implications from two biodiversity proxies. *Global Ecology and Conservation*, 31, e01830. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01830>
- Reyes-Guzmán, N., Siebe, C., Chevrel, M. O., Guilbaud, M.-N., Salinas, S., & Layer, P. (2018). Geology and radiometric dating of Quaternary monogenetic volcanism in the western Zacapu lacustrine basin (Michoacán, México): Implications for archeology and future hazard evaluations. *Bulletin of Volcanology*, 80(2), 18. doi: <https://doi.org/10.1007/s00445-018-1193-5>
- Runge, M. G., Bebbington, M. S., Cronin, S. J., Lindsay, J. M., & Moufti, M. R. (2015). Sensitivity to volcanic field boundary. *Journal of Applied Volcanology*, 4(1), 22. doi: <https://doi.org/10.1186/s13617-015-0040-z>
- Schmincke, H. U. (2004). *Volcanism*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-18952-4>
- Serrano, E., & Ruiz-Flaño, P. (2007). Geodiversity: A theoretical and applied concept. *Geographica Helvetica*, 62(3), 140–147. doi: <https://doi.org/10.5194/gh-62-140-2007>
- Sharples, C. (1993). A methodology for the identification of significant landforms and geological sites for geoconservation purposes. *Forestry Commission, Tasmania*.
- Sharples, C. (2002). *Concepts and principles of geoconservation*. Tasmanian Parks & Wildlife Service, Hobart.
- Sosa-Ceballos, G., Boijseaneau-López, M. E., Pérez-Orozco, J. D., Cifuentes-Nava, G., Bolós, X., Pertón, M., & Simón-Velázquez, D. (2021). Silicic magmas in the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field: An overview about plumbing systems, crustal storage and genesis processes. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 38(3), 210–225. doi: <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2021.3.1668>
- Tchamabé, B. C., Kereszturi, G., Németh, K., & Carrasco-Núñez, G. (2016). How Polygenetic are Monogenetic Volcanoes: Case Studies of Some Complex Maar-Diatreme Volcanoes. In K. Németh (Ed.), *Updates in Volcanology—From Volcano Modelling to Volcano Geology*. doi: <https://doi.org/10.5772/63486>
- Tukiainen, H., Bailey, J. J., Field, R., Kangas, K., & Hjort, J. (2017). Combining geodiversity with climate and topography to account for threatened species richness. *Conservation Biology*, 31(2), 364–375. doi: <https://doi.org/10.1111/cobi.12799>
- Tukiainen, H., Maliniemi, T., Brilha, J., Alahuhta, J., & Hjort, J. (2024). A framework for quantifying geodiversity at the local scale: A case study from the Rokua UNESCO Global Geopark. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 382(2269), 1–18. doi: <https://doi.org/10.1098/rsta.2023.0059>
- Tukiainen, H., Toivanen, M., & Maliniemi, T. (2023). Geodiversity and Biodiversity. *Geological Society, London, Special Publications*, 530(1), 31–47. doi: <https://doi.org/10.1144/SP530-2022-107>
- Urrutia-Fucugauchi, J., & Böhnell, H. (1988). Tectonics along the Trans-Mexican volcanic belt according to palaeomagnetic data. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 52(3–4), 320–329. doi: [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(88\)90124-0](https://doi.org/10.1016/0031-9201(88)90124-0)
- Valentine, G. A., & Connor, C. B. (2015). Basaltic volcanic fields. In *Encyclopedia of volcanoes*, (2a ed., pp. 423–439). Academic, London.
- Valentine, G. A., & Gregg, T. K. P. (2008). Continental basaltic volcanoes—Processes and problems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177(4), 857–873. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.01.050>
- Van Ree, C. C. D. F., Van Beukering, P. J. H., & Boekstijn, J. (2017). Geosystem services: A hidden link in ecosystem management. *Ecosystem Services*, 26(A), 58–69. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.05.013>
- Vázquez, L. (2003). *Purépechas de Michoacán*. Proyecto Perfiles Indígenas de México, Documento de trabajo. Centro de Investigación y Estudios Superiores en Antropología Social Pacífico Sur, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- Vörös, F., Pál, M., Van Wyk De Vries, B., & Székely, B. (2021). Development of a New Type of Geodiversity System for the Scoria Cones of the Chaîne des Puys Based on Geomorphometric Studies. *Geosciences*, 11(2), 58. doi: <https://doi.org/10.3390/geosciences11020058>
- Wang, L., Tian, M., & Wang, L. (2015). Geodiversity, geoconservation and geotourism in Hong Kong Global Geopark of China. *Proceedings of the Geologists' Association*, 126(3), 426–437. doi: <https://doi.org/10.1017/S0016764615000011>

[org/10.1016/j.pgeola.2015.02.006](https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2015.02.006)

- Wilcox, R. E. (1954) The petrology of Parícutin volcano. *U. S. Geological Survey, Bulletin*, 965(C), 281–354.
- Williams, M. A., McHenry, M. T., & Boothroyd, A. (2020). Geoconservation and Geotourism: Challenges and Unifying Themes. *Geoheritage*, 12(3), 63. doi: <https://doi.org/10.1007/s12371-020-00492-1>
- Zouros, N. C. (2010). Lesvos Petrified Forest Geopark, Greece: Geoconservation, Geotourism, and Local Development. *The George Wright Forum*, 27(1), 19–28.

- Zwoliński, Z. (2004). Geodiversity. In *Encyclopedia of Geomorphology*, (vol. 1, pp 417–418). Routledge, London.
- Zwoliński, Z., & Stachowiak, J. (2012). Geodiversity map of the Tatra National Park for geotourism. *QUAGEO*, 31(1), 99–107. doi: <https://doi.org/10.2478/v10117-012-0012-x>
- Zwoliński, Z., Najwer, A., & Giardino, M. (2018). Methods for assessing geodiversity. In Reynard, E. & Brilha, J. (Eds.), *Geoheritage* (pp. 27–52). Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809531-7.00002-2>