



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOFÍSICA
GEOFÍSICA DE LA TIERRA SÓLIDA-VULCANOLOGÍA**

**HISTORIA GEOLÓGICA Y GEOPATRIMONIO DEL PARQUE ECOTURÍSTICO EL ARENAL Y
ÁREA ALEDAÑA, CIUDAD DE MÉXICO**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA

NATALIA ISABEL VILLALBA MANTILLA

TUTORA

**DRA MARIE-NOËLLE GUILBAUD
INSTITUTO DE GEOFÍSICA (UNAM)**

COMITÉ TUTOR

**DR. CARLES CANET MIQUEL
INSTITUTO DE GEOFÍSICA (UNAM)**

**DRA. SILKE CRAM
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA (UNAM)**

CIUDAD DE MÉXICO, diciembre, 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo brindado a través de la beca de Maestría.

Al proyecto DGAPA-PAPIIT-IN103421 titulado “Las últimas erupciones volcánicas en la Sierra Pinacate, la Sierra Chichinautzin y la Cuenca Serdán-Oriental (México): Edad, estilo y relevancia para la evaluación de peligros y la geoeducación”, otorgado a la Dra. Marie-Noëlle Guilbaud, a través del cual se financió este trabajo de tesis.

A la Dra. Marie-Noëlle por apoyarme de forma paciente, por todas sus enseñanzas que han sido sumamente valiosas y por animarme a disfrutar de la vulcanología y el geopatrimonio a través de numerosas actividades y de las visitas al Geopedregal.

Al Dr. Carles por involucrarme en el Geoparque Comarca Minera, donde pude aprender del geopatrimonio desde otras perspectivas, y a la Dra. Silke por acompañar el proceso de esta tesis con comentarios e ideas enriquecedoras.

Al Dr. Hugo Murcia y a la Dra. Dolors Ferres por sus comentarios y observaciones que permitieron mejorar este documento.

A Sergio Salinas por su ayuda en la recolección de muestras y la toma de fotos y videos de dron en campo. A Carlos Linares por su apoyo con los análisis de química mineral. A Eduardo por su apoyo con el tamizado y la separación de las muestras.

A los representantes del Parque Ecoturístico El Arenal por recibirnos y permitirnos compartir los resultados de esta investigación, e intercambiar conocimientos y experiencias.

A mi padre por su apoyo incondicional, a mis hermanas, a Sparki y a Linda por su compañía en la distancia.

A mis amigos Javi, Guillermo, Joshua, Carmen, Victor, Omar, Jose, Andrés, Ileana, porque se convirtieron en mi familia mexicana, por sus consejos, por las conversaciones enriquecedoras y por las risas. Y a todas las personas que de alguna forma contribuyeron en este proyecto y en mi crecimiento personal durante este tiempo.

Contenido

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
INTRODUCCIÓN	4
Problemática.....	7
Primeras observaciones, hipótesis y metodología.....	7
Objetivos.....	8
CAPÍTULO 1: HISTORIA GEOLÓGICA DEL ARENAL Y SU ÁREA ALEDAÑA	10
1. Marco teórico	10
2. Contexto geológico	11
3. Materiales y métodos	13
3.1. Fotografías aéreas e imágenes Lidar	13
3.2. Trabajo de campo	13
3.3. Trabajo de laboratorio	13
4. Resultados	17
4.1. Marco vulcanológico del área de estudio	17
4.2. Descripción del área de estudio	20
4.3. Estratigrafía y datos radiométricos	33
4.4. Granulometría de los depósitos de tefra	35
4.5. Componentría de los depósitos de tefra	39
4.6. Petrografía	43
4.7. Geoquímica	49
4.8. Química mineral	54
5. Discusión	56
5.1. Origen del depósito El Arenal	56
5.2. Historia vulcanológica de la zona	62
CAPITULO 2: GEOPATRIMONIO EN EL ARENAL Y SU ÁREA ALEDAÑA	66
1. Marco teórico	66
2. Contexto socioambiental: factores de vulnerabilidad	68
3. Métodos	70
3.1. Identificación y evaluación de geositos potenciales	70
3.2. Riesgo de degradación antrópica	71
4. Resultados	78
4.1. Inventario de sitios geológicos en el área de estudio	78

4.2.	Evaluación de los geositios.....	87
4.3.	Evaluación del riesgo de degradación antrópica.....	91
5.	Discusión.....	101
5.1.	Diagnóstico del estado y uso de los geositios.....	101
5.2.	Propuesta de uso de los geositios.....	104
	CONCLUSIONES.....	109
	REFERENCIAS.....	111
	ANEXOS.....	119
	Anexo 1. Composición química de los cristales de olivino analizados en la lava del volcán Yololica.....	117
	Anexo 2. Composición química de los cristales de olivino analizados en la tefra del volcán Yololica.....	121
	Anexo 3. Composición química de los cristales de olivino analizados en la tefra del volcán Xitle y en la ceniza del Arenal	122
	Anexo 4. Composición química de los cristales de olivino analizados en la tefra inferior y superior del volcán Pelado.....	123
	Anexo 5. Composición química de los cristales de plagioclasa analizados en la tefra superior del volcán Pelado.....	124
	Anexo 6. Composición química de los cristales de plagioclasa de la ceniza del Arenal.....	125
	Anexo 7. Composición química de los cristales de piroxeno analizados en la ceniza del Arenal y la tefra superior del volcán Pelado	126
	Anexo 8. Criterios de la evaluación de Brilha (2016) del valor científico de geositios.....	124
	Anexo 9. Criterios de la evaluación de Brilha (2016) de valores educativo y turístico de geositios.....	125
	Anexo 1. Criterios e indicadores de la evaluación de Kubalíková et al. (2021) para los valores científico, educativo, turístico, valores adicionales y de conservación de geositios.....	127
	Anexo 11. Inventario de las características de los geositios seleccionados.....	132

Lista de figuras

Figura 1. Ubicación del depósito de ceniza del Ecoparque sobre la ladera del Cerro Magdalena.....	5
Figura 2. Artículos sobre el depósito de ceniza del Ecoparque en blogs de la web.....	6
Figura 3. Videos sobre el depósito de ceniza del Ecoparque, disponibles en YouTube.....	6
Figura 4. Ubicación del Ecoparque y el Campo Volcánico de la Sierra Chichinautzin en el Cinturón Volcánico transmexicano.....	12
Figura 5. Ubicación del Ecoparque dentro del Campo Volcánico de la Sierra Chichinautzin.....	12
Figura 6. Edificios volcánicos del área local alrededor del Ecoparque.....	19
Figura 7. Unidades geológicas y sitios de muestreo del área de estudio.....	20
Figura 8. Dimensiones y estratigrafía del material del Ecoparque aflorante en el ápice del depósito....	21
Figura 9. Material del Ecoparque en el ápice del depósito.....	22
Figura 10. Depósitos de ceniza endurecidos, ubicados al oeste del Cerro Magdalena.....	23
Figura 11. Laminación cruzada en el depósito de ceniza de la sección CHI-28.....	23
Figura 12. Laminación cruzada en el depósito de ceniza de la sección CHI-204.....	24
Figura 13. Depósito endurecido de ceniza sin estratificación, bajo un flujo de lava del volcán Xitle....	25
Figura 14. Montículo alargado de ceniza, con rizaduras superficiales y escalones en la zona lateral...	25
Figura 15. Fotografía aérea de 1973 de los depósitos de ceniza al norte del Cerro Magdalena.....	26
Figura 16. Fotografías de la morfología y roca expuesta del Cerro Magdalena.....	27
Figura 17. Mapa y foto del volcán Yololica, su cono, flujos de lava y montículos.....	28
Figura 18. Afloramientos de lavas del volcán Yololica.....	29
Figura 19. Depósitos bloque-soportados que conforman los montículos del volcán Yololica.....	30
Figura 20. Depósito bloque-soportado de un montículo del volcán Yololica.....	30
Figura 21. Fotografías de la sección 208 que expone la relación entre los depósitos de caída del área.	31
Figura 22. Depósitos de caída del volcán Yololica.....	32
Figura 23. Depósitos de caída del volcán Pelado.....	33
Figura 24. Relación estratigráfica entre los depósitos de caída muestreados de la zona de estudio.....	34
Figura 25. Relación estratigráfica entre las secciones que incluyen depósitos de ceniza Arenal.....	35
Figura 26. Curvas de distribución granulométrica del material de los depósitos de ceniza.....	36
Figura 27. Curvas de distribución granulométrica de la tefra del Volcán Yololica.....	37
Figura 28. Curva de distribución granulométrica de la pómez Tutti Frutti.....	38
Figura 29. Curva de distribución granulométrica de la tefra inferior del Volcán Pelado.....	38
Figura 30. Fragmentos que componen la ceniza del Ecoparque y su abundancia.....	40
Figura 31. Fragmentos que componen a los depósitos de ceniza.....	40
Figura 32. Abundancia de los fragmentos que componen el material de la tefra del volcán Yololica...	41
Figura 33. Partículas del depósito de caída de la pómez Tutti Frutti de la sección CHI-208.....	42
Figura 34. Abundancia de los fragmentos de la tefra inferior del Volcán Pelado.....	43
Figura 35. Fotomicrografías de los componentes de la ceniza del Ecoparque.....	44
Figura 36. Fotomicrografías de los componentes de la tefra del Volcán Yololica.....	45
Figura 37. Mineralogía de las lavas del Cerro Magdalena.....	46
Figura 38. Fotomicrografías de los productos del volcán Yololica.....	47
Figura 39. Abundancia de minerales de los flujos de lava del volcán Yololica.....	48
Figura 40. Diagrama de álcalis vs sílice de los productos volcánicos del área de estudio.....	49
Figura 41. Diagramas de SiO ₂ vs óxidos mayores en los productos volcánicos del área de estudio.....	52
Figura 42. Diagrama de elementos traza normalizados a la composición del manto primitivo.....	53

Figura 43. Contenido de elementos traza en los productos volcánicos del área de estudio.....	53
Figura 44. Composición de los cristales de olivino contenidos en los productos volcánicos del área ..	54
Figura 45. Contenido de anortita en los cristales de plagioclasa contenidos en las cenizas del Arenal y la tefra superior del volcán Pelado.....	55
Figura 46. Clasificación de los cristales de piroxeno contenidos en las cenizas del Arenal y la tefra superior del volcán Pelado	55
Figura 47. Fotomicrografías de los cristales de piroxeno con zonación	56
Figura 48. Modelo 3D de la topografía de la zona.....	61
Figura 49. Modelo de formación de dunas barlovento y sotavento adecuado al caso de estudio.....	650
Figura 50. Modelo evolutivo del área de estudio.....	64
Figura 51. Ubicación geográfica del Ecoparque	70
Figura 52. Firmas espectrales de vegetación encino, material de construcción y suelo volcánico.....	75
Figura 53. Composición a falso color RGB NIR, R, G de imágenes Landsat de 1985 y 2020.....	77
Figura 54. Composición RGB por cocientes de imágenes Landsat de 1985 y 2020.....	75
Figura 55. Puntos de muestreo para la estimación de error de la clasificación de uso de suelo.....	76
Figura 56. Mapa de los geositos inventariados	78
Figura 57. Geosito 1: Depósito de ceniza del Ecoparque El Arenal	79
Figura 58. Labores de reacomodo de la ceniza del Arenal del Ecoparque	80
Figura 59. Geosito 2: Cantera Cerro Magdalena	81
Figura 60. Geosito 3: Panorámica Cerro Magdalena	82
Figura 61. Geosito 4: Secuencia tefra Yololica	83
Figura 62. Geosito 5: Cantera del volcán Yololica	¡Error! Marcador no definido.
Figura 63. Geosito 6: Cráter del volcán Yololica	84
Figura 64. Geosito 7: Cuevas del Aire.....	86
Figura 65. Mapa y estado de las cuevas del Aire.....	86
Figura 66. Geosito 8: Sección de ceniza y lava San Buenaventura	87
Figura 67. Evaluación de los geositos inventariados	92
Figura 68. Mapas de vulnerabilidad y probabilidad de deterioro por proximidad a zonas degradantes.....	92
Figura 69. Mapa de clasificación de uso de suelo den los años 1985 y 2020	93
Figura 70. Cambio de uso de suelo en el área de estudio, entre los años 1985 y 2020.....	94
Figura 71. Mapa de cambio de uso de suelo y de probabilidad de deterioro por este.....	96
Figura 72. Mapa de probabilidad de deterioro según la distancia a vías y densidad de población.....	96
Figura 73. Mapa de probabilidad de Riesgo de degradación por actividad antrópica	97
Figura 74. Mapa de las zonas de acumulación de residuos en la zona de estudio	98
Figura 75. Zonas de acumulación de residuos urbanos.....	99
Figura 76. Zonas de acumulación de residuos sólidos urbanos y de manejo especial	100
Figura 77. Zona de acumulación de residuos cercanía al geosito 2. Cantera del Cerro Magdalena	100
Figura 78. Mapa de la georuta turística planteada	106
Figura 79. Recorrido geológico con brigadistas del CORENADR en el área de estudio	108

Índice de tablas

Tabla 1. Localización y tipo de análisis realizado a las muestras estudiadas	16
Tabla 2. Fechamientos por radiocarbono en capas de paleosuelos y fragmentos de carbón, bajo depósitos de caída	35
Tabla 3. Porcentaje en peso de distribución de tamaño de grano.....	36
Tabla 4. Componentes de los depósitos de tefra analizados, en porcentaje en peso.....	41
Tabla 5. Abundancia mineral en los flujos de lava del volcán Yololica. *Bomba del volcan Yololica.	48
Tabla 6. Composición geoquímica de los productos volcánicos estudiados.....	50
Tabla 7. Sistema de evaluación para el criterio de deterioro de elementos según su litología.....	73
Tabla 8. Sistema de evaluación para el criterio de deterioro de proximidad a áreas o actividades con potencial de causar degradación.....	73
Tabla 9. Características de las imágenes satelitales utilizadas en el análisis de cambio de uso de suelo	73
Tabla 10. Características de la firma espectral de los materiales presentes en la zona de estudio.....	74
Tabla 11. Sistema de asignación de valores para el criterio de cambio de uso de suelo.....	76
Tabla 12. Sistema de asignación de valores para el criterio de accesibilidad por vías pavimentadas	77
Tabla 13. Sistema de asignación de valores para el criterio de densidad de población	77
Tabla 14. Evaluación cuantitativa de los valores de los geositos según Brilha (2016).....	88
Tabla 15. Evaluación cuantitativa de los valores de los geositos según Kubalíková et al. (2021)	89
Tabla 16. Matriz de error del muestreo para la clasificación del uso de suelo de 1985.....	94
Tabla 17. Matriz de error del muestreo para la clasificación del uso de suelo de 2020.....	94
Tabla 18. Áreas y porcentajes de uso de suelo estimados para 1985 y 2020.....	95
Tabla 19. Estimación del área de cambio de uso de suelo entre 1985 y 2020 en el área de estudio.....	95
Tabla 20. Temas propuestos para abordar en actividades geoducativas en la georuta.....	105

RESUMEN

El parque ecoturístico El Arenal, ubicado en Magdalena Petlacalco, Ciudad de México, México, es un sitio reconocido por locales y turistas debido al atractivo que genera un depósito de ceniza volcánica poco consolidada que se asemeja a una duna, y en el que se realizan actividades recreativas diversas. En el área cercana al parque se encuentra un domo volcánico (Cerro Magdalena) y un cono de escoria (volcán Yololica), sitios en los que se realizan actividades de senderismo y acampada. Debido a su paisaje llamativo y a su ubicación dentro del Campo Volcánico de la Sierra Chichinautzin, el desarrollo del geoturismo podría contribuir a promover la conciencia pública sobre peligros geológicos. Sin embargo, tanto la historia vulcanológica, como el origen de la ceniza son desconocidos, y los riesgos de degradación del área deben ser evaluados, dada la actividad turística y el rápido desarrollo urbano en la zona. En este trabajo se realizaron estudios sedimentológicos, estratigráficos, geoquímicos y geocronológicos sobre el depósito de ceniza del Ecoparque y las unidades volcánicas del área aledaña. Además, se llevó a cabo un inventario de geositios en el área que fueron evaluados según su valor científico, educativo, turístico, ecológico y de conservación, y se estimó el riesgo de degradación antrópica mediante un modelo en un sistema de información geográfica.

Los resultados de los estudios geológicos indican que la ceniza del Ecoparque no se originó de los volcanes próximos (Yololica, Cerro Magdalena), sino que proviene de una fuente más lejana y que no se depositó por procesos de caída sino que sufrió un transporte turbulento. Con base en estudios de los volcanes y depósitos encontrados alrededor del Ecoparque se sugiere que el depósito del Arenal se derivó principalmente de la removilización eólica de depósitos de caída del volcán Pelado, ubicado 10 km hacia el sur, y de depósitos de la tefra Tutti-Frutti del Volcán Popocatepétl que se ubican estratigráficamente justo abajo, y que la mezcla de estos dos principales componentes se depositó en el sotavento de un obstáculo (Cerro Magdalena). Se identificaron ocho geositios con características representativas de diversos procesos volcánicos y erosivos, siete de los cuales se incluyeron en la propuesta de una georuta turística. Esto fue complementado con el desarrollo de actividades educativas para público de diferentes niveles de escolaridad, tomando como punto de partida el parque ecoturístico el Arenal, que ya cuenta con reconocimiento por la comunidad y cuenta con infraestructura turística. Asimismo, se resalta que deben tomarse acciones en conjunto con la comunidad para el manejo y monitoreo de los sitios, así como para la adecuación de estos al uso turístico y educativo, incluyendo el manejo de la disposición de residuos.

ABSTRACT

El Arenal ecotouristic park located in Magdalena Petlacalco, Mexico City, Mexico, is famous among locals and tourist for the attraction that represents an unconsolidated volcanic ash deposit which resembles a dune and where diverse recreative activities take place. Near to the park there is a volcanic dome (Cerro Magdalena) and a scoria cone (Yololica volcano), where diverse recreational activities occur. Since the landscape of the place is very attractive for visitors and is located within the Sierra Chichinautzin volcanic field, geotourism development could contribute to promote public awareness about geological hazards. However, both the volcanic history and the ash origin is unknown, and the degradation risk in the area should be assessed, given the touristic activity and rapid urban development in the area. This work presents sedimentologic, stratigraphic, geochemical, and geochronological studies of the park's ash deposit and the volcanic units in the surroundings. Additionally, an inventory of geosites in the area was made, their scientific, educational, touristic, ecological and conservation values were assessed, and risk of anthropic degradation was estimated using a model in a Geographic Information System.

The results of the geological studies indicate that the park's ash did not originate from the closest volcanoes (Yololica, Cerro Magdalena), but it comes from a more distant source, and was not deposited by fallout but through turbulent transport. Moreover, base on the studies of the volcanoes and deposits mapped around the park, we suggest that the Arenal deposit results from the aeolian remobilization of fall deposits from Pelado volcano, located 10 km to the south, and the Tutti Frutti fall layer from Popocatepétl volcano that lies stratigraphically bellow. The mixture of these components was deposited on the leeward of an obstacle (Cerro Magdalena). We identified eight geosites which contain representative characteristics of diverse volcanic and erosive processes and included seven of these in a proposed touristic georoute. This was complemented with the development of educational activities for audiences of different educational levels, starting from the Arenal ecotouristic park, that is already known by the community, and has touristic infrastructure. We note that actions must be taken together with the community to manage and monitor the geosites, as well as to adapt these for their touristic and educational use, considering the management of waste disposal.

INTRODUCCIÓN

El turismo urbano en zonas con atractivos de carácter geológico (geositios) ha demostrado ser útil para familiarizar al público general sobre los procesos geológicos como formadores del paisaje, así como sobre los beneficios, limitaciones y riesgos propios que estos implican (e.g. Del Lama et al., 2015; Chylińska & Kołodziejczyk, 2018; Salazar et al., 2021; Fepuleai et al., 2021). Los geositios pueden funcionar como sitios educativos para concientizar a las comunidades sobre los riesgos geológicos, lo que permite el desarrollo de una cultura de resiliencia ante estos (Coratza y De waele, 2012; Migoñ & Pijet-Migoñ, 2019; Vereb et al., 2020; Németh et al., 2021). El desarrollo de esta conciencia en la comunidad es de gran importancia en las grandes urbes que se encuentran en zonas geológicamente activas, como es el caso de la Ciudad de México, que cuenta con 9.2 millones de habitantes (Censo de población y vivienda 2020, INEGI, 2023) y se ubica en la parte central-este del Cinturón Volcánico Transmexicano, un arco volcánico activo. La Ciudad de México está expuesta a riesgos geológicos como sismos, fenómenos de subsidencia, deslizamientos de tierra y actividad volcánica (Casanova et al., 2021), esta última relacionada tanto a la actividad del volcán Popocatepetl, como a la posibilidad de erupción de un nuevo volcán en el campo volcánico monogenético Sierra Chichinautzin (Nieto-Torres & Martin del Pozzo, 2019; Nieto-Torres et al., 2023). Un escenario de desastre volcánico ya sucedió hace 1,700 años en lo que actualmente es el sur de la Ciudad de México, con la erupción del volcán Xitle, cuyos flujos de lava sepultaron la ciudad prehispánica de Cuicuilco y posiblemente causaron la migración de su población (González et al., 2000; Siebe, 2000). Este evento sirve de ejemplo sobre la importancia del reconocimiento de la historia geológica para las comunidades. En este caso específico, algunos afloramientos de lavas del volcán Xitle se han adecuado como geositios en los cuales se realizan actividades educativas y ambientales para crear conciencia sobre el peligro volcánico en la Ciudad y sobre la importancia de la conservación de estos para varios servicios ambientales (Guilbaud et al., 2021b).

El Parque Ecoturístico El Arenal (en adelante: Ecoparque) es un sitio turístico ubicado en un pueblo originario con muy alto grado de marginación y con ingresos menores al promedio de la Ciudad de México, según el programa integrado territorial para el desarrollo social (SIDESO, 2003). El atractivo principal del Ecoparque es un depósito de cenizas volcánicas dispuesto sobre la ladera del Cerro Magdalena (Figura 1A), donde existen algunas instalaciones de recreación (Figura 1B). El Ecoparque es reconocido por la comunidad local y manejado por el ejido de Magdalena Petlacalco, y ha ganado visibilidad en la Ciudad de México en los últimos años debido a que se incluyó en la ruta de parques de aventura de la alcaldía de Tlalpan, y es recomendado en artículos (Figura 2) y videos de la web (Figura 3). De hecho, estos últimos cuentan con aproximadamente 25,000 visitas a la fecha de diciembre 2022, por lo cual se puede considerar un sitio turístico popular. En dichas recomendaciones sobresale la curiosidad que genera en sus visitantes la similitud entre el depósito de ceniza y

una duna de arena (a lo cual se debe el nombre del Ecoparque), a la vez que se promueve su uso recreativo y deportivo, con actividades como picnics y *sandboarding*, entre otras. En estos blogs de internet, el depósito se describe como originado por el volcán Xitle (Figura 2A, 2B, 2C).



Figura 1. A. Ubicación del depósito de ceniza del Ecoparque sobre la ladera norte del Cerro Magdalena (Imagen de Google Earth, marzo 29 de 2019) B. Acceso del Ecoparque (fotografía tomada en abril de 2021).

<p>Sandboard México</p> <p>El Arenal esta ubicado en el km 3 de la Av. México-Ajusco en el pueblo de La Magdalena Petlalcalco, muy cerca de San Andrés Totoltepec y es una clara muestra de la gran diversidad natural que podemos observar en Tlalpan, pues es una verdadera duna de arena gris, permeable (que no se pega), formada por la ceniza del volcán Xitle, que esta rodeada de una zona arbolada y campos sembrados pues a pesar del clima desértico esta es una tierra sumamente fértil.</p>	<p>Conoce la “duna chilanga” en el Parque El Arenal</p> <p>“Las dunas” para practicar Sandboard en CDMX</p> <p>En la alcaldía Tlalpan hay un lugar donde puedes iniciarte en el sandboarding, a la vez que resulta sumamente divertido: es el Parque Ecoturístico El Arenal. La montaña de arena que cubre la ladera de un cerro se formó con la ceniza del volcán Xitle — que hizo erupción hace unos 1,300 años— en las faldas del cerro del Ajusco.</p>
<p>¿Por qué hay duna en Parque Ecoturístico El Arenal?</p> <p>Justo en esta localidad es donde encontramos el Parque Ecoturístico El Arenal, el cual posee una duna de arena gris, que se formó de la ceniza del volcán Xitle, el cual hizo erupción hace mil 300 años. Actualmente es un punto de encuentro para las familias vecinas y para aquellos que gustan del arte del sandboarding.</p>	<p>La Magdalena Petlalcalco alberga también el recientemente afamado parque de dunas de arena que, además de posibilitar un atrevido deslizamiento por sus cenizas volcánicas, ofrece también la opción de hacer picnic en los alrededores, por lo que ha alcanzado gran popularidad.</p>

Figura 2. Artículos sobre el depósito de ceniza del Ecoparque en blogs de la web. A. Reyes (2012). B. Bernal (2021). C. Ávila (2021). D. Redacción de Mexicocity.cdmx.gob.mx (2021).





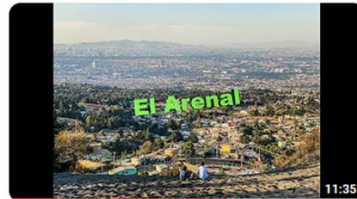
	<p>El Arenal, lugar de esparcimiento para los capitalinos Noticias</p> <p>11,041 visualizaciones · hace 7 años</p> <p>Azteca Noticias</p> <p>La duna se formó por la ceniza del volcán Xitle y para llegar a este sitio solo debe tomar el camino antiguo al Ajusco</p>
	<p>El arenal en San Miguel Ajusco. o en Magdalena Petlalcalco</p> <p>9829 visualizaciones · hace 9 años</p> <p>Dominguez Gonzalez</p> <p>El Arenal Ajusco Duna de arena volcánica formada después de la erupción del Xitle.</p>
	<p>Aprendiendo Sandboarding en el arenal del Ajusco</p> <p>3397 visualizaciones · hace 8 años</p> <p>R. Paris</p> <p>El Arenal Tlalpan, DF. coordenadas 19.233889, -99.185556 camera: gopro</p>
	<p>De Visita Por El Parque Ecoturístico El Arenal</p> <p>504 visualizaciones · hace 1 año</p> <p>Sin Nombre //Marlon Salgado</p>
	<p>El Arenal, Ajusco</p> <p>1345 visualizaciones · hace 1 año</p> <p>Fénix and Derek</p> <p>Parque Ecoturístico el Arenal Este parque se encuentra en Avenida México Ajusco 480, en el pueblo de Magdalena Petlalcalco.</p>

Figura 3. Videos sobre el depósito de ceniza del Ecoparque, disponibles en YouTube (consulta realizada en enero de 2023), donde recomiendan o describen las actividades turísticas que se realizan en el sitio.

Problemática

Debido a su popularidad y sus características, el Ecoparque podría considerarse como un sitio idóneo para difundir información sobre la geología del área y los riesgos asociados. Sin embargo, no existen estudios geológicos detallados sobre la ceniza y el área circundante. En particular, no hay datos que permitan constreñir con certeza la fuente y los procesos de deposición de ceniza volcánica que representa el atractivo principal del Ecoparque. De igual manera, es escasa la información acerca de las características y la edad de los edificios volcánicos más cercanos (Volcán Yololica y Cerro Magdalena), los cuales están brevemente descritos en una tesis de licenciatura (Cervantes y Molinero, 1995). En resumen, la información vulcanológica es muy escasa para esta área, lo cual afecta la correcta evaluación de los peligros que podrían estar asociados con ella, y además, no permite informar a sus habitantes sobre su entorno inmediato. Cabe destacar que el Ecoparque está ubicado en una de las pocas áreas naturales remanentes, como parte del “suelo de conservación” de la Ciudad de México, la cual está sometida a procesos de degradación y urbanización, por lo que urge concientizar a la población cercana sobre su valor para la geología y el medio ambiente.

Primeras observaciones, hipótesis y metodología

En cuanto al origen de la ceniza del Ecoparque, un primer acercamiento permite descartar que estas provengan del cerro sobre el cual se ubica (Cerro Magdalena), ya que éste es un domo silíceo, mientras el aspecto oscuro de las cenizas sugiere una fuente principalmente máfica de tipo cono de escoria. Dado que el depósito ocupa un área importante, con espesores mayores a 5 m, presenta una homogeneidad aparente (Figura 1) y buena clasificación, se plantea la hipótesis de que la fuente del depósito debe ubicarse relativamente cerca del Ecoparque (aproximadamente en un radio de 10 km). Además, el carácter fresco de la ceniza permite suponer que los depósitos son relativamente recientes ya que no han sufrido procesos avanzados de intemperismo, por lo cual este trabajo se enfoca en el estudio de volcanes y depósitos volcánicos recientes cerca del Ecoparque. Finalmente, ya que la ceniza no se encuentra en su lugar de origen, sus procesos de deposición deben ser establecidos mediante estudios sedimentológicos. Así entonces, la metodología de este trabajo consiste en realizar estudios geológicos detallados sobre la ceniza del Ecoparque y el área aldeña, además de considerar la geología de una área más amplia alrededor donde se considera que podría encontrarse el cono de escoria que dio origen al depósito.

Sumado a lo anterior, se plantea como hipótesis que el Ecoparque el Arenal y área aldeña tiene una importancia geológica que reside en la presencia de productos volcánicos diversos (incluido el Cerro Magdalena, el volcán Yololica, los depósitos de ceniza propios del Ecoparque y flujos de lava), lo que le da un interés para el geopatrimonio del área. En los afloramientos de los distintos productos se podrían realizar actividades educativas y turísticas, que permitirían la difusión de información sobre procesos geológicos, implicaciones de

peligro, relación con el medio ambiente y la conservación de estos. En particular, dar a conocer el origen de las cenizas del Ecoparque El Arenal podría permitir una mayor apreciación de este elemento geológico, así como de los procesos y paisajes volcánicos, por parte de los visitantes y habitantes de Magdalena Petlacalco. Esto con el fin de fomentar un manejo más sostenible del Ecoparque y generar conciencia acerca de los peligros volcánicos y la conservación de la zona, teniendo en cuenta que esta es una población con un grado alto de marginación, es decir que sufre de desigualdad de oportunidades sociales por falta acceso a la educación, salud, vivienda y/o servicios básicos (CONAPO, 2020), y que ha sufrido una expansión urbana acelerada, en gran parte con la construcción de asentamientos irregulares. Estas condiciones implican el incremento de la vulnerabilidad social y ambiental, lo que puede aumentar la probabilidad de impacto ante amenazas naturales. Para estos aspectos, se propone realizar un inventario de sitios de mayor interés geológico en el área además de una evaluación del riesgo de degradación antrópica.

Objetivos

Para este estudio se plantean dos objetivos generales, cada uno con sus objetivos específicos correspondientes, que serán abordados en dos capítulos separados.

Objetivo general 1 (Capítulo 1): Determinar el origen de la ceniza del Ecoparque El Arenal con base a estudios geológicos en el área aledaña y reconstruir la historia vulcanológica del área.

Objetivos específicos:

- I. Realizar una revisión bibliográfica de trabajos publicados sobre los temas del vulcanismo monogenético y de los procesos de erosión de ceniza syn- y post-eruptivos, así como sobre el contexto geológico del área.
- II. Determinar el tipo y la distribución de los productos volcánicos en el Ecoparque y en un área de 12 km² a su alrededor, mediante estudios de cartografía y estratigrafía, usando percepción remota (imágenes satelitales, fotografías aéreas y modelos de elevación digital generados a partir de datos Lidar) y trabajo de campo.
- III. Caracterizar los productos volcánicos de esta área mediante análisis granulométricos, de componentes, petrográficos y geoquímicos.
- IV. Interpretar los datos obtenidos para el depósito de ceniza del Arenal y compararlos con datos existentes sobre otros volcanes jóvenes cercanos, para constreñir su origen.
- V. Integrar todos los datos existentes para reconstruir la historia vulcanológica del área.

Objetivo general 2 (Capítulo 2): Caracterizar el valor del área para la población local y el riesgo de degradación antrópica.

Objetivos específicos:

- I. Realizar una revisión bibliográfica de trabajos publicados sobre los temas de la caracterización de la geodiversidad, del geopatrimonio y del geoturismo en contextos urbano y volcánico.
- II. Determinar el contexto demográfico y ambiental en el área, para entender los factores que podrían afectar el geopatrimonio y que a su vez son determinantes en la vulnerabilidad y exposición de la comunidad al riesgo de desastres de origen geológico.
- III. Realizar una evaluación de afloramientos y lugares con características geológicas destacadas, para definir sitios con potencial de uso científico, educativo y turístico.
- IV. Evaluar el riesgo de degradación antrópica en el área, con base en parámetros de litología, accesibilidad, uso de suelo, proximidad a zonas turísticas y urbanas, y densidad poblacional.
- V. Analizar las limitaciones de uso de los sitios seleccionados, según su uso potencial y el riesgo de degradación de este, con el fin de sugerir el desarrollo de planes de gestión y conservación de estos sitios.

CAPÍTULO 1: HISTORIA GEOLÓGICA DEL ARENAL Y SU ÁREA ALEDAÑA

1. Marco teórico

Vulcanismo monogenético y procesos de erosión de depósitos de caída

Los volcanes pueden clasificarse en poligenéticos y monogenéticos en función de su historia eruptiva, la cual influye sobre el tamaño del edificio y los volúmenes de magma emitidos (e.g., Francis 1993; Takada, 1994 Walker 2000). Los volcanes poligenéticos consisten en edificios complejos y voluminosos formados por una sucesión de diversos productos volcánicos emitidos por numerosos episodios eruptivos durante miles o cientos de miles de años (Németh, 2016). En comparación, los volcanes monogenéticos se caracterizan por un episodio eruptivo relativamente corto y pequeño, que puede darse en varias fases eruptivas, con volúmenes acumulados menores a 1 km³ y una duración de décadas, y están asociados a sistemas magmáticos más sencillos sin el desarrollo de grandes cámaras magmáticas que los alimenten (Németh & Kereszturi, 2015). Los volcanes monogenéticos son el tipo de volcán más común en la Tierra y suelen encontrarse agrupados en campos volcánicos o alineaciones, con diversidad de estructuras entre domos de lava, conos de salpicadura (spattercones), conos de escoria, maars, anillos de toba y conos de toba (Németh, 2010).

Las erupciones volcánicas explosivas típicamente producen depósitos de ceniza por caída desde las plumas que se forman sobre el centro eruptivo (e.g., Pyle, 1989; Cas & Wright, 2012; Houghton & Carey, 2015). Dado el tamaño de las partículas que conforman los depósitos de caída, que pueden incluir ceniza muy fina (<30 μm), estas pueden ser transportadas cientos o miles de kilómetros lejos de la fuente de emisión (Rose & Durant, 2009). Sin embargo, los depósitos muy distales están en general erosionados, re TRABAJADOS y redepositados rápidamente por precipitación y viento, sumado a esto, su poco espesor y su granulometría fina hace más difícil que se preserven en la estratigrafía, lo cual ocurre bajo condiciones específicas (e.g. Rose & Durant, 2009; Wilson et al., 2010; Kandlbauer et al., 2013). Los posibles medios de transporte que pueden afectar a la ceniza durante y después de su emisión desde el volcán de origen son agua, hielo y viento, y los procesos que ocurren son escorrentía y removilización superficial de la ceniza por eventos de lluvia o deshielo, y erosión eólica que dispersa las partículas por saltación, reptación o suspensión, alcanzando áreas distales inicialmente (durante la erupción) inafectadas (Domínguez et al., 2020). Estos procesos de erosión y sedimentación son controlados por factores como el clima, la pendiente, la cobertura vegetal y los elementos topográficos existentes (Jarvis et al., 2020; Bolós et al., 2021), y pueden ocurrir repetidamente por años, décadas o siglos (Hadley et al., 2004). Cuando la acumulación de ceniza es suficiente, se desarrollan depósitos secundarios, de tipo reprocessados si sus partículas se originaron directamente por erupciones volcánicas pero su depósito final ocurrió por procesos no-volcánicos sin que hayan sufrido litificación y disgregación previamente (Sohn & Sohn, 2019).

En el caso del volcanismo monogenético los procesos de erosión que pueden afectar a las cenizas de caída fueron particularmente bien descritos y analizados durante y después de la erupción del volcán Parícutín (1943-1952). Segerstrom (1950) reportó la erosión de los depósitos de tefra por deslizamientos, reptación, flujos de lodo, erosión hídrica y eólica, con la formación de flujos laminares, canales, abanicos aluviales, surcos, superficies en rizaduras y dunas, procesos que fueron dominados por agua o viento según la época estacional. Cabe destacar la existencia de registros videográficos de tormentas de ceniza durante la erupción. Bolós et al. (2021) estudiaron los depósitos remanentes de esta erupción tal como pueden ser observados el día de hoy, a casi 80 años del evento, y reportan grandes cambios laterales en el espesor y estructuras sedimentarias como estratificación cruzada, ondulaciones, laminación paralela interrumpida por surcos erosivos y laminación convoluta, además de unidades sin estructuras; estos depósitos presentan una distribución bimodal del tamaño de grano, explicado por la removilización de material en cortas distancias, con alta carga de sedimentos finos por erosión y fragmentación de las partículas en transporte. Es entonces notable que la mayor parte del volumen de depósitos remanentes de las fases explosivas de la erupción del Parícutín sean productos removilizados y retrabajados. En base a los estudios de Segerstrom (1950, 1960), los procesos de removilización ocurrieron principalmente durante los 5 años posteriores a la erupción, mientras que 10 años después de aquella, las tasas de erosión se habían reducido considerablemente debido a la revegetación.

2. Contexto geológico

El Ecoparque se encuentra en el Campo Volcánico de la Sierra Chichinautzin, el cual se ubica en la zona central-este del Cinturón Volcánico Transmexicano, que es un arco continental formado por la subducción de la placa Cocos bajo la placa Norteamericana (Figura 4) (Demant, 1978). El arco tiene una extensión aproximada de 1,000 km en dirección E-W y sus productos tienen un rango de edad Mioceno medio - Holoceno (Ferrari et al., 2012). La actividad de este arco volcánico ha generado tanto volcanes poligenéticos como campos monogenéticos, entre los cuales se encuentra el campo volcánico de la Sierra Chichinautzin (Figura 4). Este campo está enmarcado en un régimen tectónico de extensión N-S y NNW-SSE con un componente de movimiento lateral (Márquez et al., 1999). Cuenta con más de 220 estructuras volcánicas entre conos de escoria, escudos de lava, de composiciones basálticas a dacíticas, con edades menores a 1.2 Ma (Cuaternario), que ocupan un área aproximada de 2,500 km² (Márquez et al., 1999; Arce et al., 2013, 2019).

El Ecoparque se ubica en la zona central del campo volcánico, cerca de su límite norte con la cuenca del Valle de México (Figura 5), más específicamente se localiza en la ladera del Cerro Magdalena y 1.3 km al noroeste del volcán Yololica. Estos volcanes no han sido estudiados a detalle, siendo la única publicación encontrada una tesis de licenciatura sobre el vulcanismo en el sur de la Ciudad de México (Cervantes & Molinero 1995). Dichos autores denominan “andesita Magdalena” a la unidad del Cerro Magdalena, asignándole una edad del Pleistoceno Temprano, y “Formación Yololica” a las lavas basálticas y a las cenizas que rodean y cubren al

cerro, de edad Holoceno, que según estos autores se encuentran estratigráficamente encima de los productos del volcán Maninal y bajo las lavas del volcán Xitle.



Figura 4. Ubicación del Ecoparque (estrella roja) y el Campo Volcánico Monogenético Sierra Chichinautzin (CVSC) en el Cinturón Volcánico transmexicano (CVTM). Modificado de Siebe et al. (2004).

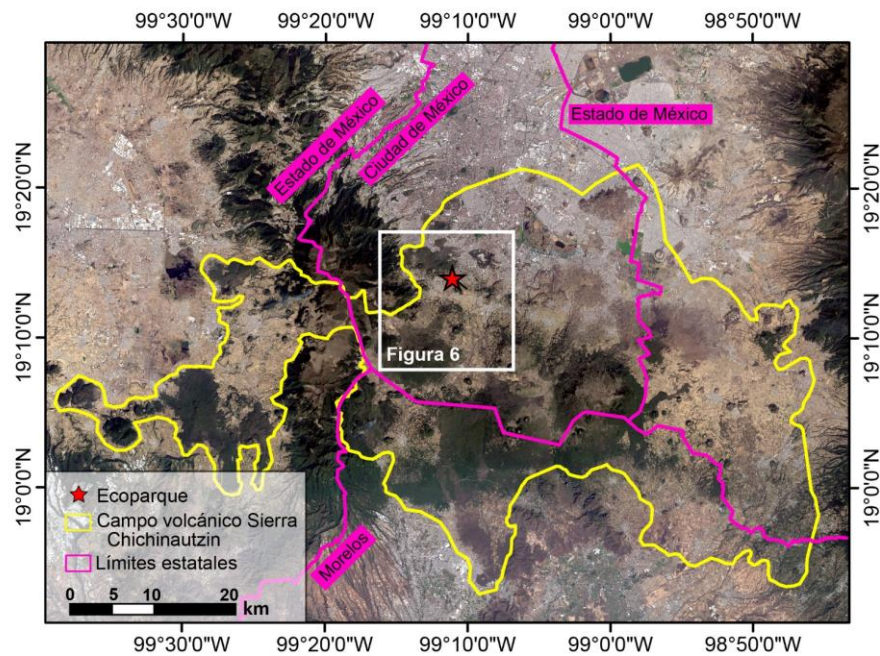


Figura 5. Ubicación del Ecoparque (estrella roja) dentro del Campo Volcánico de la Sierra Chichinautzin (polígono amarillo), los límites del campo fueron modificados de Siebe et al. (2004a). El mapa base corresponde a una imagen satelital Landsat 8 (2020) en composición RGB de color natural (B4, B3, B2).

3. Materiales y métodos

3.1. Fotografías aéreas e imágenes Lidar

En un área local de 400 km² alrededor del Ecoparque se identificaron los edificios volcánicos presentes, mediante modelos de elevación obtenidos con datos Lidar del portal web del INEGI, de escala 1:10,000 de las zonas E14a39 y E14a49. Ubicada dentro del área geológica local, la zona de estudio comprende 12 km² entre las coordenadas 19°12'40''N - 19°14'50''N y 99°10'00''W - 99°11'40''W; en esta zona se estudió la distribución y morfología de los productos volcánicos, utilizando los modelos de elevación de las zonas E14a49b1 y E14a49b2 y una fotografía aérea de 1973 obtenida del INEGI.

3.2. Trabajo de campo

Se realizaron dos fases de campo entre agosto de 2021 y febrero de 2023, con el fin de identificar y caracterizar los productos volcánicos presentes en el área de estudio, elaborar la cartografía y determinar las relaciones estratigráficas entre estos. Se levantaron 24 secciones estratigráficas, de las cuales se describió el espesor, color, forma, vesicularidad y mineralogía de los productos volcánicos, correspondientes a tefra (ceniza, lapilli y bombas) y lava, además de las características generales de los paleosuelos intercalados. Se obtuvieron muestras de tefra y lava para el análisis en laboratorio, procurando elegir los fragmentos con el menor grado de alteración posible. Adicionalmente, se extrajeron muestras para datación por C¹⁴ de paleosuelos ubicados bajo capas de tefra, extrayendo material de los primeros 5 cm del tope de los paleosuelos ricos en materia orgánica o de fragmentos de carbón incluidos en estos.

3.3. Trabajo de laboratorio

De las muestras recolectadas en la fase de campo se seleccionaron 33 muestras para los diversos análisis, cinco correspondientes a paleosuelos, 17 a depósitos de tefra y 11 a muestras de lava. La localización de las muestras analizadas se presenta en la Tabla 1.

3.3.1. Granulometría

El procesamiento granulométrico se realizó en el Laboratorio de Sedimentología Volcánica del departamento de Vulcanología en el Instituto de Geofísica (UNAM). Para el análisis de variación de tamaño de grano se procesaron 11 muestras de depósitos de tefra no endurecidos, las cuales se secaron en horno a 50 °C durante 24 horas. Posteriormente, se obtuvo el peso de estas, para luego tamizar mecánicamente la totalidad de cada muestra con los tamices de -4 phi a 4 phi, en intervalos de 1 phi, siendo $\phi = -2\log(d)$, donde d corresponde a la abertura del tamiz en mm, obteniendo el peso de material retenido en cada tamiz y convirtiéndolo a porcentaje en peso. Los parámetros estadísticos de los datos (la media, desviación estándar y asimetría gráfica) se obtuvieron con el *software* KWare SFT versión 2.19.0170.

3.3.2. Componentría

El análisis de componentes se realizó en el Laboratorio Microscopios de Vulcanología del departamento de Vulcanología en el Instituto de Geofísica (UNAM), utilizando los microscopios binoculares Nikon SMZ-2T Leica S9D para procesar 9 de las 11 muestras tamizadas previamente. Se utilizaron las fracciones entre -2 y 1 phi, según fuese el mayor tamaño de fragmentos con suficiente abundancia en las distintas muestras, separando un total de 400 partículas en cada muestra, para asegurar que no ocurriera una variación significativa en el porcentaje estimado de componentes. Se separaron 300 partículas inicialmente, y adicionalmente 100 partículas más, a partir de lo cual se obtuvo una variación en los resultados que no supera el 8 wt. %. Los fragmentos se clasificaron según su redondez, vesicularidad, contenido mineral y cristalinidad en juveniles y líticos accidentales, los primeros definidos como fragmentos producidos directamente por la fragmentación del magma durante la erupción, y los segundos como fragmentos de rocas sedimentarias, metamórficas o ígneas no-comagmáticas, es decir que no fueron producidos por la erupción (Murcia et al., 2013). A su vez los fragmentos juveniles se separaron según su cristalinidad en sideromelana, considerados fragmentos vítreos de baja cristalinidad, y taquilita, correspondiente a fragmentos opacos criptocristalinos (White & Houghton, 2000).

3.3.3. Petrografía

Se realizaron 23 láminas delgadas de 21 muestras, 11 en lavas y 12 en depósitos de tefra, estas últimas al ser material no consolidado debieron ser montadas en resina epoxi previo al corte y pulido. Estas laminas fueron realizadas por el laboratorio Brandt E&M en Ciudad de México. El análisis petrográfico de las láminas delgadas se realizó en el Laboratorio de Microscopios de Vulcanología del departamento de Vulcanología en el Instituto de Geofísica (UNAM), utilizando un microscopio Olympus BH-2, así como un contador de puntos PELCON para el análisis modal de mineralogía de 1,000 puntos en muestras de lava. Los cristales fueron diferenciados por su tamaño siguiendo la clasificación de González (2008), en fenocristales (>0.5 mm), microfenocristales (0.05 y 0.5 mm), y microcristales (<0.05 mm), estos últimos como parte de la masa fundamental. Los porcentajes minerales se presentan recalculados a roca densa, dado que la mayoría de las muestras cuentan con vesicularidad significativa. Se utilizó un microscopio petrográfico Leica DM 4500-P para adquirir las fotomicrografías de las láminas delgadas.

3.3.4. Dataciones de C¹⁴

Se fecharon por este método cinco muestras con contenido de materia orgánica, cuatro muestras correspondientes a paleosuelos y una a fragmentos de carbón contenido en un paleosuelo. El material se secó en horno a 50 °C durante 24 horas en el Laboratorio de Sedimentología Volcánica del departamento de Vulcanología en el Instituto de Geofísica (UNAM) antes de ser enviadas para su análisis. Las mediciones fueron realizadas por Beta Analytic Inc. en Miami, Estados Unidos, mediante espectrometría de aceleración de masa

(AMS) y de masas de isótopos de relaciones isotópicas (IRMS). Se reportan tanto las edades convencionales de radiocarbono en años antes del presente (AP, antes de 1950), como la edad calendario obtenida por la conversión de la edad convencional mediante la corrección en función del fraccionamiento isotópico usando un valor de ^{13}C . Para la calibración se utiliza la base de datos más reciente IntCal20 y el método de rango de densidad de alta probabilidad, en el que se tienen datos de edad en dos rangos de probabilidad, de 95.4% y 68.2%, correspondientes a 1 sigma y 2 sigma, respectivamente; entre mayor sea el porcentaje de probabilidad, mayor es la posibilidad que la fecha real del material datado se encuentre en este rango de edad.

3.3.5. Geoquímica

Se obtuvieron análisis químicos de roca total para 10 muestras, siete de las cuales corresponden a lavas y las tres restantes a depósitos de tefra, para los cuales se tomó una muestra total representativa. Estos análisis fueron realizados por Activation Laboratories Ltd. (Actlabs) en Ancaster, Canadá (www.actlabs.com). El contenido de óxidos mayores se midió usando la técnica de plasma acoplado inductivamente por fusión (FUS-ICP), misma que se utilizó para medir el contenido de algunos elementos traza, al igual que la espectrometría de masa de plasma acoplado inductivamente por fusión (FUS-MS), digestión total de plasma acoplado inductivamente por fusión (TD-ICP) y análisis de activación neutrónica instrumental (INAA). Cabe resaltar que se obtuvo el contenido de hierro como Fe_2O_3 (T), el cual se convirtió a FeO (T) usando el factor de conversión $\text{FeO(T)} = 0.8998 * \text{Fe}_2\text{O}_3$ (T) de Irvine & Baragar (1971).

Se realizaron análisis de química mineral en cristales de olivino de una muestra de lava y una de muestra de tefra del volcán Yololica (Anexos 1 y 2), e incluidos en fragmentos de tefra del volcán Xitle (X10, Anexo 3), de ceniza del Arenal (Anexo 4), y del volcán Pelado (CHI-25, Anexo 5). Las muestras de tefra de los volcanes Xitle y Pelado fueron recolectadas previamente por la Dra. Marie-Noëlle Guilbaud. También se analizaron cristales de plagioclasa y piroxeno contenidos en las cenizas del depósito El Arenal y en la tefra superior del volcán Pelado (Anexos 6 y 7). Estos análisis se llevaron a cabo en laminas delgadas pulidas cubiertas con una capa de grafito. Las mediciones se ejecutaron en el equipo de microsonda electrónica de barrido (EPMA) JEOL JXA-8900R en el Laboratorio Universitario de Petrología del Instituto de Geofísica (UNAM). El equipo tiene un límite de detección de 400 ppm, y las condiciones de operación fueron: energía del haz de 20 kV y una corriente de 20 nA. Los resultados reportados corresponden a mediciones cuya suma total de elementos se encuentre entre 98 y 102 wt. % (Anexo 7). Para el procesamiento de los datos se utilizaron los programas CFU y CFU-PINGU (Cortés, 2022).

Tabla 1. Localización y tipo de análisis realizado a las muestras estudiadas.

Código	Coordenadas			Tipo de análisis
	Latitud N	Longitud W	Altitud	
CHI-25-B	19° 11' 40.5"	99° 10' 35.1"	2867	Química mineral
CHI-25-C	19° 11' 40.5"	99° 10' 35.1"	2867	Química mineral
CHI-28-A	19° 14' 3.8"	99° 11' 14.2"	2760	Petrografía
CHI-28-B	19° 14' 3.8"	99° 11' 14.2"	2760	Granulometría, componentría
CHI-28-D	19° 14' 3.8"	99° 11' 14.2"	2760	Química de roca total
CHI-30-B	19° 13' 40.3"	99° 10' 56.4"	2760	Granulometría, componentría
CHI-31-A	19° 13' 36.3"	99° 10' 51.5"	2892	Petrografía
CHI-31-B	19° 13' 36.3"	99° 10' 51.5"	2892	Petrografía
CHI-31-C	19° 13' 36.3"	99° 10' 51.5"	2892	Química de roca total
CHI-32-A1	19° 13' 20.9"	99° 10' 28.6"	2888	Petrografía
CHI-35-B	19° 13' 9.6"	99° 10' 41.4"	3014	Petrografía
CHI-38-B	19° 13' 40.0"	99° 11' 20.2"	2890	Petrografía, roca total
CHI-49-A	19° 13' 46.3"	99° 10' 47.2"	2763	Granulometría, componentría
CHI-49-B	19° 13' 46.3"	99° 10' 47.2"	2763	Petrografía
CHI-49-E	19° 13' 46.3"	99° 10' 47.2"	2763	Granulometría, química de roca total, química mineral
CHI-49-G	19° 13' 46.3"	99° 10' 47.2"	2763	Granulometría
CHI-49-I	19° 13' 46.3"	99° 10' 47.2"	2763	Geoquímica de roca total
CHI-100-A	19° 14' 4.1"	99° 11' 3.9"	2740	Granulometría, componentría, petrografía, química de roca total
CHI-100-B	19° 14' 4.1"	99° 11' 3.9"	2740	Química mineral
CHI-100-C	19° 14' 4.1"	99° 11' 3.9"	2740	Química mineral
CHI-200-A	19° 14' 09.9"	99° 11' 15.2"	2715	Datación C14
CHI-203-A	19° 14' 34.8"	99° 11' 11.2"	2649	Granulometría, componentría, química de roca total
CHI-203-B	19° 14' 34.8"	99° 11' 11.2"	2649	Petrografía, roca total, química mineral
CHI-204-A	19° 13' 56.4"	99° 11' 22.4"	2700	Granulometría, componentría
CHI-205-A	19° 13' 47.6"	99° 10' 47.4"	2754	Datación C14
CHI-205-C	19° 13' 47.6"	99° 10' 47.4"	2755	Granulometría, componentría
CHI-208-A	19° 14' 02.8"	99° 11' 06.8"	2773	Datación C14
CHI-208-B	19° 14' 02.8"	99° 11' 06.8"	2773	Datación C14
CHI-208-C	19° 14' 02.8"	99° 11' 06.8"	2773	Granulometría, componentría
CHI-208-E	19° 14' 02.8"	99° 11' 06.8"	2773	Datación C14
CHI-208-F	19° 14' 02.8"	99° 11' 06.8"	2773	Granulometría, componentría
CHI-209-A	19° 14' 19.8"	99° 10' 41.9"	2640	Petrografía
CHI-210-A	19° 12' 51.9"	99° 10' 28.9"	2895	Petrografía, química de roca total
CHI-219-A	19° 14' 11.3"	99° 11' 34.3"	2781	Granulometría, componentría
X10	19° 14' 0.5"	99° 13' 09.5"	2947	Química mineral

4. Resultados

4.1. Marco vulcanológico del área de estudio

Tal como se planteó en la introducción, para constreñir el origen de la ceniza del Ecoparque además de otros productos volcánicos que se encuentran en el área aledaña, es necesario conocer el marco vulcanológico del área. Como hipótesis de trabajo, consideramos un área que se localiza aproximadamente en un radio de 10 km alrededor del Ecoparque. En esta área, se encuentran diversos edificios volcánicos (Figura 6). El más grande es el Ajusco, definido como Formación Ajusco por Schlaepfer (1968), un complejo volcánico que hace parte de la Sierra de las Cruces, compuesto por flujos de lava andesíticos, domos dacíticos, y un depósito de avalancha de escombros (Cervantes & Molinero, 1995). Según la información existente, es el edificio volcánico más antiguo en la zona, con una edad entre el Plioceno y Pleistoceno medio, con edades publicadas de 0.39 ± 0.16 Ma (Álvarez et al., 1991), 0.73 Ma (Delgado & Del Pozzo, 1993), y 3.37 ± 0.27 Ma (Cervantes & Molinero, 1995). Otros productos volcánicos antiguos presentes en el área son varios domos que afloran parcialmente y muestran rastros de erosión importantes, el domo Xochitepec, y otro domo sin nombre, aquí llamado como domo Santa Mónica, los cuales son descritos por Arce et al. (2015) como domos dacíticos que hacen parte de la Sierra de las cruces, y cuyas edades U-Pb en zircones son de $1.23 +0.04, -0.03$ Ma y $1.66 +0.06, -0.07$ Ma, respectivamente.

Además del Ajusco, existen múltiples conos de escoria, que debido a sus características morfológicas y los datos de edad publicados, son considerados de edad mayor a 15 ka (Figura 6). Estos tienen pendientes moderadas ($< 20^\circ$) y cráteres de poca profundidad (< 20 m), lo que indica mayor grado de erosión y por lo tanto más antigüedad, además de flujos de lava asociados, con morfología en escudo, que se encuentran unos cubriendo a otros, lo que evidencia la relación estratigráfica entre ellos. Entre los que han sido fechados, el volcán Cuatzontle es el más antiguo con una edad por Ar-Ar de 222 ± 12 ka, seguido por los volcanes Malacatepec con una edad de 95 ± 12 ka (Jaimes-Viera et al. 2018) y Maninal de 18.9 ± 6 ka (Nieto-Torres & Martin del Pozzo, 2019). El Mezontepec tiene edades por Ar-Ar reportadas entre 10.93 ± 3 ka y 11 ± 3 ka (Jaimes-Viera et al 2018; Nieto-Torres & Martin del Pozzo, 2019), pero su posición estratigráfica debajo de las lavas del volcán Pelado fechadas a 12,000 años calibrados antes del presente (cal AP; Guilbaud et al., 2022) implica que la edad sea mayor a la reportada.

Los volcanes más recientes del área son el Pelado y el Xitle, que se ubican a 9.7 km al suroeste y 4.2 km al noroeste del Ecoparque, respectivamente (Figura 6). Estos volcanes han sido ampliamente estudiados debido a la buena preservación de sus productos, y resumimos estos trabajos a continuación. El volcán Pelado es de composición andesita basáltica a andesítica y está compuesto por un cono principal de 220 m de altura, un cono más pequeño (Tzotzocol) y un escudo de lava, los cuales ocupan un área de 79 km² (Siebe et al., 2004b;

Lorenzo-Merino et al., 2018). La erupción de este volcán es catalogada como estromboliana violenta, la cual ocurrió hace aproximadamente 12,000 años cal AP y consistió en tres etapas: una etapa inicial de carácter explosivo fisural, seguido de una etapa intermedia con actividad efusiva y explosiva simultáneas, y una etapa final predominantemente efusiva (Siebe et al., 2004a, 2004b; Lorenzo-Merino et al., 2018; Guilbaud et al., 2022). Lorenzo-Merino (2016) separó la secuencia de la tefra en dos partes, una basal, denominada Tefra inferior, conformada por ceniza gruesa a lapilli medio, y una parte alta de ceniza fina a gruesa con un volumen total de tefra aproximado de 0.8 km^3 en roca densa, denominada Tefra superior. La tefra de la secuencia está distribuida en más de 500 km^2 y alcanzó distancias mayores a 8 km en dirección noreste y suroeste (Figura 6).

El volcán Xitle es un cono de escoria de composición basáltica a basáltico-andesítica, de 160 m de altura, con un cono de lava parásito (Xicontle) y múltiples flujos de lava que ocupan un área de 70.2 km^2 (Boland, 1996; Siebe, 2000). Su erupción ocurrió hace aproximadamente 1,700 años cal AP con actividad inicialmente estromboliana, con la formación del cono, seguida por una fase efusiva que fue interrumpida por una segunda fase explosiva (Delgado et al., 1998; Siebe, 2000; Guilbaud et al., 2021b). Cervantes & Molinero (1995) caracterizaron la tefra con tamaños entre ceniza fina y bloques, y estimaron el volumen total de esta aproximado a 0.11 km^3 en roca densa, distribuido en aproximadamente 10 km^2 , alcanzando una distancia de casi 3.2 km hacia el sur (Figura 6).

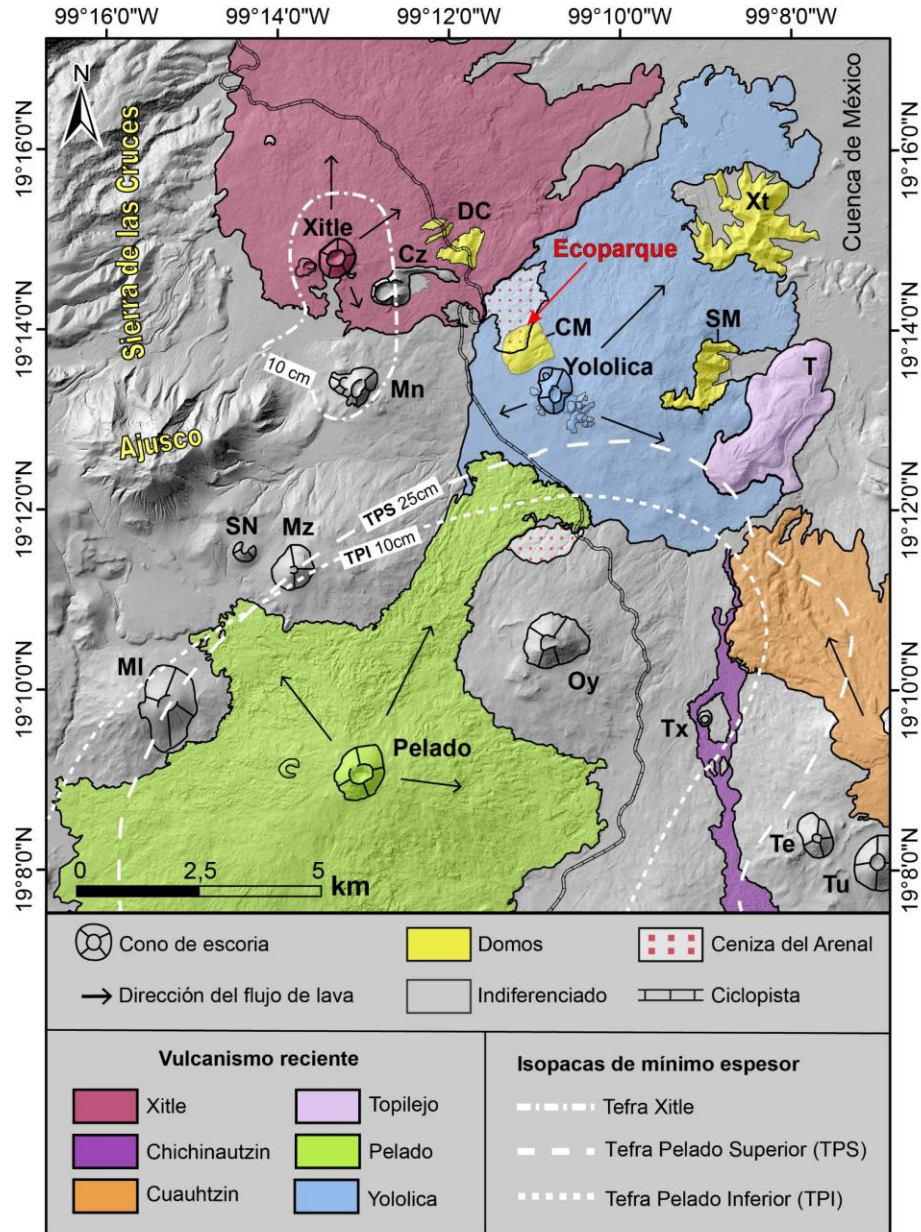


Figura 6. Edificios volcánicos del área local alrededor del Ecoparque. CM- Cerro Magdalena, Cz- Cuatzontle, DC- Domos de la ciclopista, MI- Malacatepec, Mn- Maninal, Mz- Mezontepec, Oy- Oyameyo, SM- Santa Mónica, T- Topilejo, Te- Tetzalcoalt, Tu- Tulmiac, Tx- Toxtepec, Tz- Tzotzocol, SN- conos sin nombre, Xt- Xochitepec. Las isopacas corresponden al espesor de máximo alcance de dispersión descrito para las unidades de tefra de los volcanes Pelado (en Lorenzo-Merino, 2018) y Xitle (en Cervantes y Molinero, 1995). Mapa base de sombras a partir del modelo de elevación obtenido de los datos Lidar del INEGI. Notamos que los depósitos parecidos a la ceniza del Arenal que se encontraron hacia el volcán Oyameyo serán mencionados en la discusión.

4.2. Descripción del área de estudio

En esta sección se presentan los resultados de los estudios llevados a cabo en el Ecoparque y un área de 12 km² a su alrededor, definida como el área de estudio (Figura 7). En esta área se encuentran cuatro tipos de unidades o depósitos (Figura 7): 1) Ceniza del Ecoparque, 2) domo Cerro Magdalena, 3) volcán Yololica, 4) depósitos de caída de los volcanes Yololica (tefra Yololica), Popocatepétl (Pómez Tutti Frutti), y Pelado (tefra Pelado). A continuación, se describen las características generales de cada unidad con base en su cartografía y observaciones de campo, para después presentar los resultados de los estudios de laboratorio.

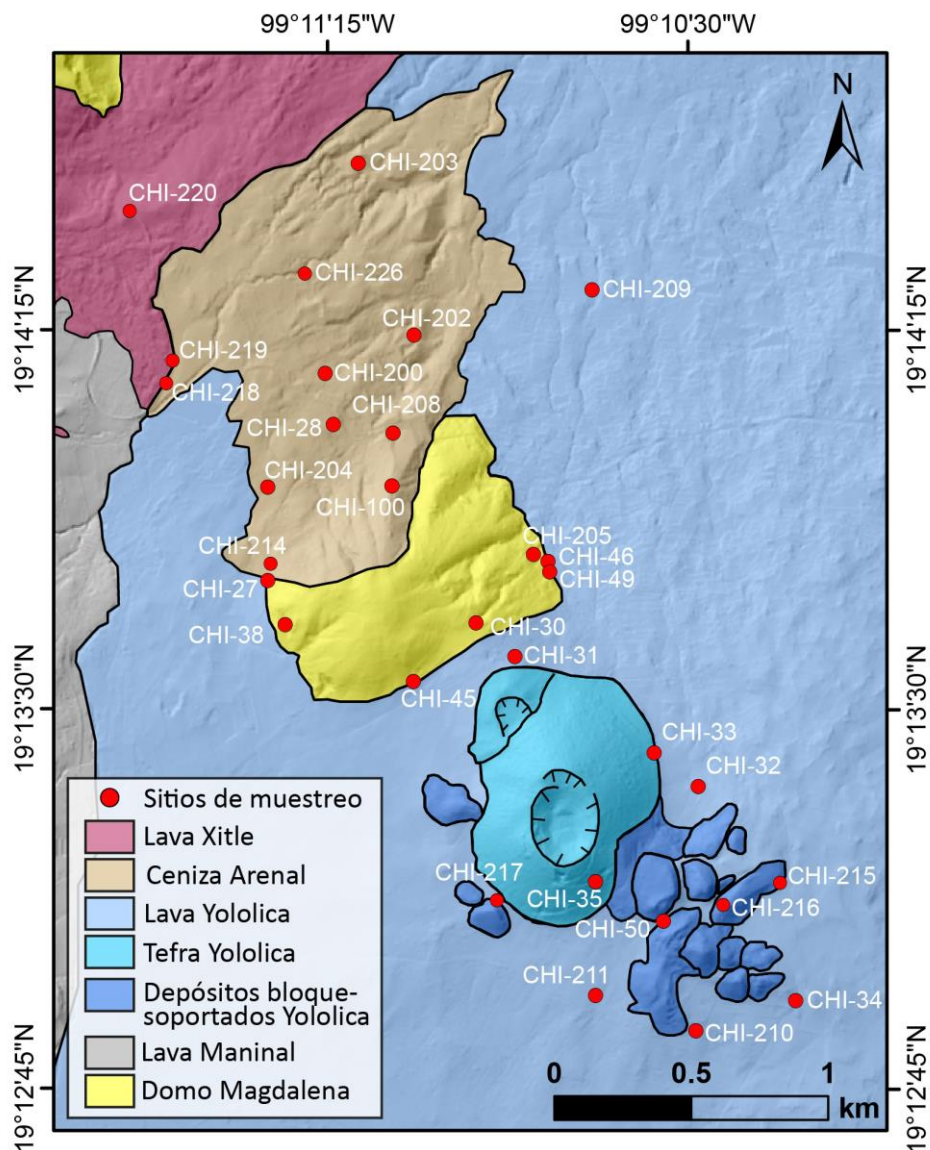


Figura 7. Unidades geológicas y sitios de muestreo del área de estudio (Mapa base de sombras a partir del modelo de elevación obtenido de los datos Lidar del INEGI).

Ceniza del Ecoparque

El Arenal del Ecoparque ocupa un área de aproximadamente 12,500 m², con 230 m de largo, y cuenta con un frente en forma de arco de aproximadamente 152 m de ancho (Figura 8). Hacia el ápice del Arenal, el material se encuentra suelto en superficie, con leve endurecimiento (Figuras 9A y 9B). Se levantó una sección de 1.5 m de profundidad (sección CHI-100, Figura 8B), con 30 cm de suelo poco desarrollado. El material de esta sección se encuentra levemente endurecido, presenta estratificación en artesa y se destaca la presencia de agregados redondos y lentes color marrón compuestos por material de suelo (Figura 9C). En el frente del depósito (parte baja del Ecoparque) el material se encuentra totalmente suelto debido a la actividad turística que lo mantiene en constante removilización.

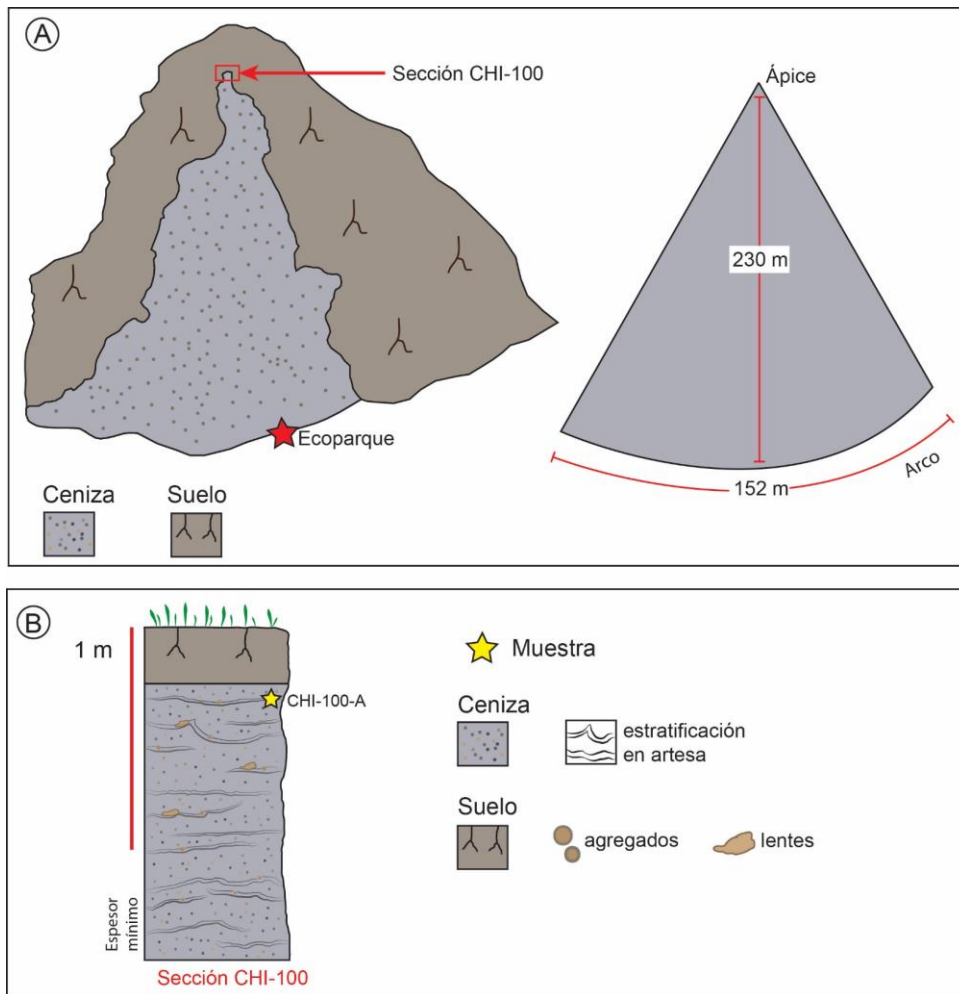


Figura 8. A. Dimensiones superficiales del depósito del Ecoparque. B. Columna estratigráfica del material del Ecoparque aflorante en el ápice del depósito.

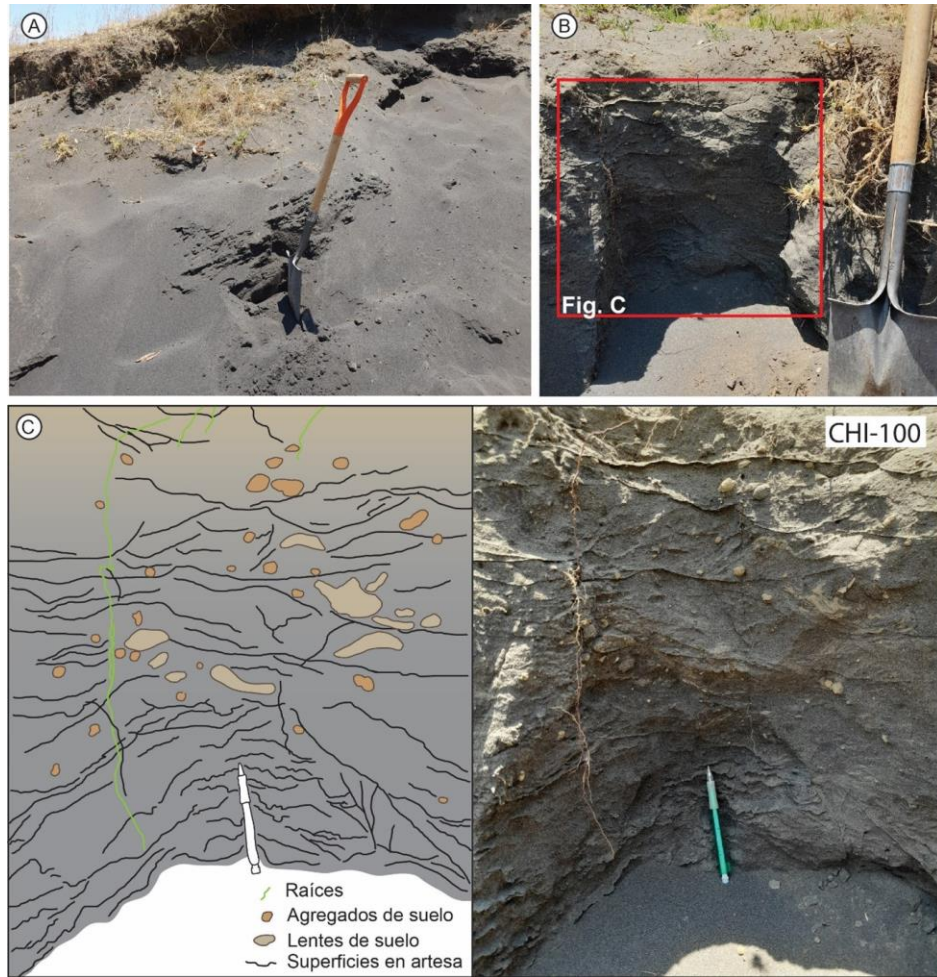


Figura 9. Material del Ecoparque en el ápice del depósito. A. Material suelto en superficie y distribuido de forma irregular, pero que internamente tiene estratos finos desarrollados. B. Vista general del material levemente endurecido con desarrollo leve de suelo. C. Corte de la disposición del material levemente endurecido (Sección CHI-100), presenta superficies en artesas, así como agregados y lentes de suelo.

Hacia el norte del Ecoparque se encuentran depósitos similares al Arenal, que corresponden a su prolongación en dirección de la pendiente (Figura 7). Se encontraron dos tipos de depósito según el grado de endurecimiento del material:

- i) Depósitos endurecidos (Figura 10). Éstos están localizados en afloramientos al oeste de la base del Cerro Magdalena y tienen espesores entre 2 y 5 m. En la sección CHI-28, la ceniza descansa directamente sobre flujos de lava del volcán Yololica. Estos depósitos presentan laminación predominantemente cruzada (Figuras 11 y 12). En la parte noroeste del área de estudio, el depósito de ceniza endurecida, de mínimo 90 cm de espesor, carece de estratificación y estructuras internas y se encuentra debajo de flujos de lava del volcán Xitle (CHI-219, Figura 13).

ii) Depósitos de material suelto (Figura 14). Éstos están localizados a una distancia entre 300 y 900 m al norte del Ecoparque y tienen espesores variables que alcanzan los 10 m. Forman montículos que pueden ser redondeados o alargados. En la superficie de la cima de los montículos se encuentran rizaduras eólicas de crestas sinuosas, tanto continuas como discontinuas, y escalones en su ladera. En la zona más distal forman una capa de ceniza suelta menor a 1 m, depositada directamente sobre un flujo de lava del volcán Yololica (CHI-203).



Figura 10. Depósitos de ceniza endurecidos, ubicados al oeste del Cerro Magdalena. A. Depósito de ceniza sobre un flujo de lava de más de 3 m de espesor (sección CHI-28). B. Depósito de ceniza con desarrollo notorio de laminación interna (sección CHI-204).

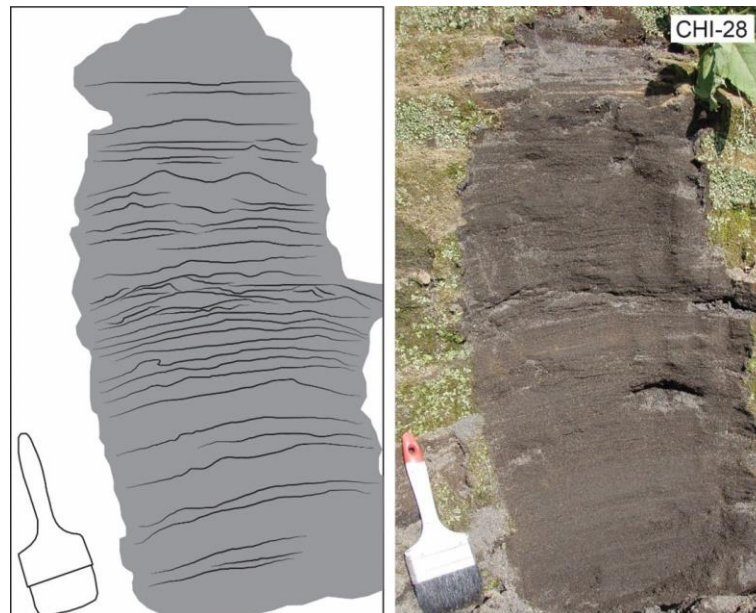


Figura 11. Laminación cruzada levemente desarrollada en el depósito de ceniza endurecido de la sección CHI-28.

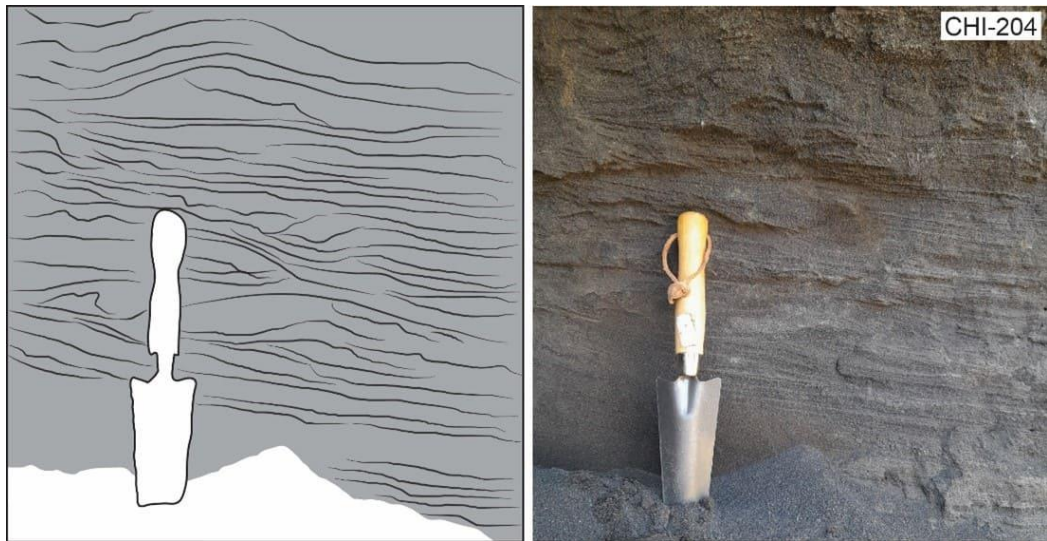


Figura 12. Laminación cruzada bien desarrollada en el depósito de ceniza endurecido de la sección CHI-204.

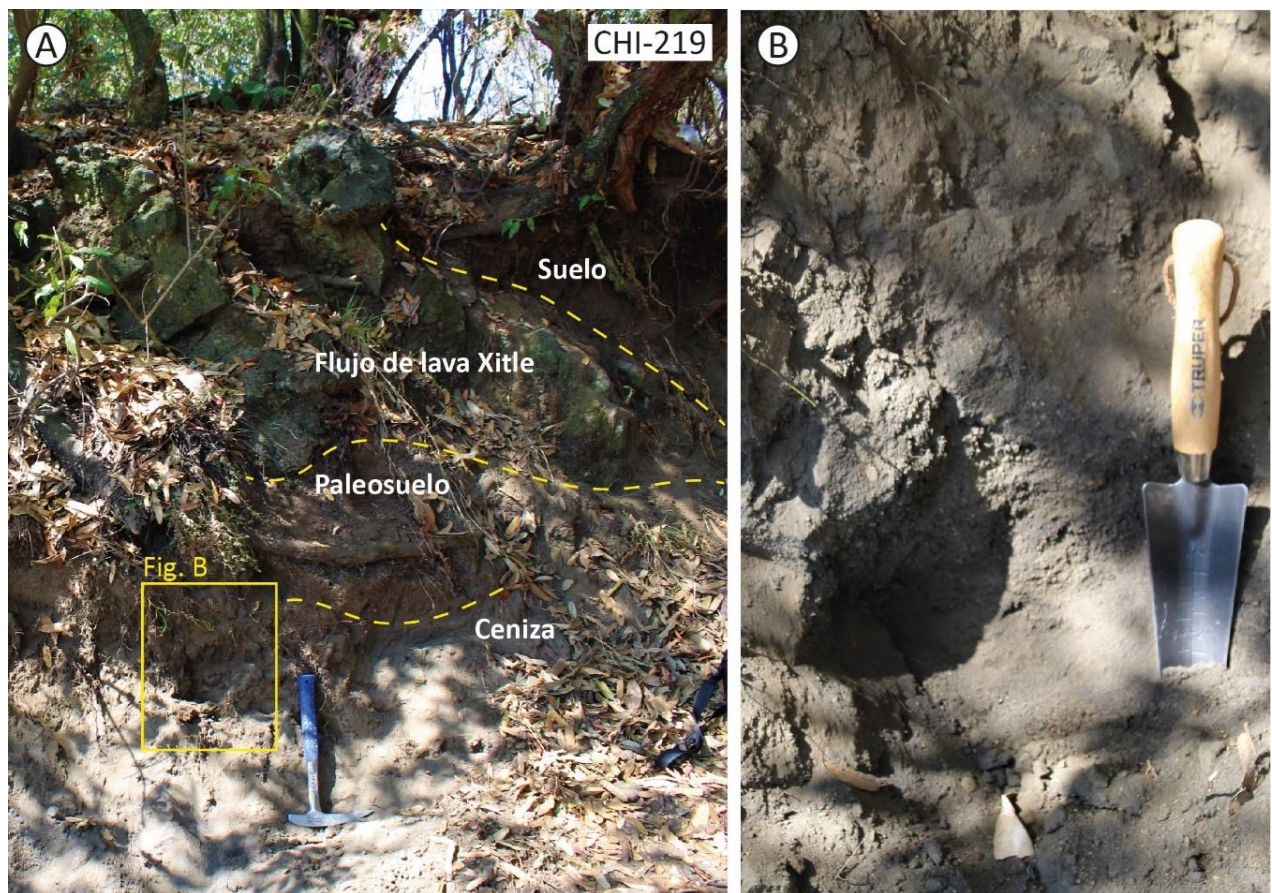


Figura 13. A. Depósito endurecido de ceniza sin estratificación, bajo un flujo de lava del volcán Xitle. B. Detalle de la ceniza del depósito endurecido, que carece de estructuras internas.



Figura 14. Montículo alargado compuesto por ceniza suelta, con más de 8 m de altura, presenta rizaduras en la superficie, y escalones en la zona lateral.

En la fotografía aérea de 1973 (INEGI) se puede observar la morfología de los depósitos antes de que ocurriera la urbanización del área. Los depósitos con una superficie directamente expuesta (sin desarrollo de suelo) ocurren en seis zonas (Figura 31):

- Zona D1: ubicado en la ladera del Cerro Magdalena, y del cual hace parte el actual Ecoparque, este depósito tiene relieve negativo, su superficie sigue la pendiente de la ladera del cerro, y cuenta con escalones y coronas de deslizamiento en las que aflora más claramente la ceniza.
- Zona D2: este depósito tiene forma de loma, con una cima relativamente delgada, alargada en dirección noreste, con pendientes más pronunciadas en su parte suroeste, correspondiente con una duna lineal.
- Zona D3: este tiene una menor altura que la zona D2, consta de tres superficies: una cima central alargada en dirección noroeste, otra más irregular separada de la primera por una depresión alargada en la misma dirección, y hacia el frente del depósito un montículo semi-ovalado.
- Zona D4: este depósito corresponde a un montículo alargado en dirección este-oeste, con una depresión central.
- Zona D5: este depósito está alargado en dirección este-oeste, y se compone por dos estructuras contiguas, un montículo con depresión central, y dos dunas adyacentes en barján, caracterizadas por su forma de medialuna, así como una pendiente suave en su cara sur y una más escarpada en su cara norte.
- Zona D6: este depósito tiene una forma irregular y está disectado por barrancas de poca anchura, en la parte central cuenta con una cima redondeada, y en la parte oeste con una corona de deslizamiento.

En la actualidad se conservan remanentes de estos depósitos solamente en las zonas D3 (Figura 14), y D6 (sección CHI-203).

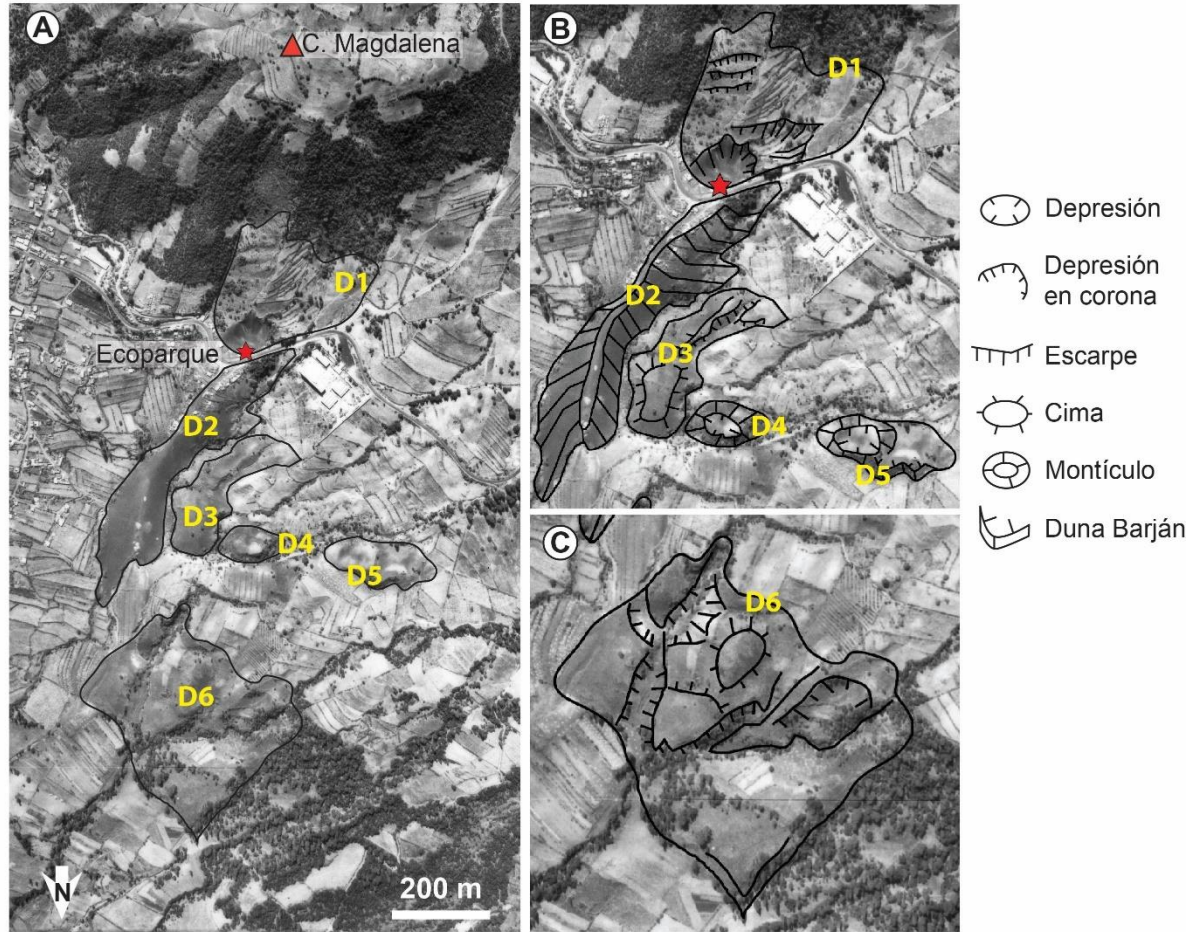


Figura 15. Fotografía aérea (INEGI, 1973) en la que se observa la morfología de los depósitos de ceniza al norte del Cerro Magdalena. Ver descripción de las cuatro zonas (D1 a D6) en el texto.

Domo Cerro Magdalena

El Cerro Magdalena sobre el cual descansa la ceniza del Ecoparque corresponde a un domo que ocupa un área aproximada de 0.65 km², con una parte cumbral plana (< 10°) y laderas que tienen alta pendiente hacia el norte (50 – 70°) y baja hacia el sur (10 – 30°) (Figura 16A). El domo de lava se encuentra mayormente cubierto por suelo y las rocas dacíticas que lo componen se encuentran expuestas únicamente en sus laderas oeste. Estas son de color rosado amarillento a gris, con un grado de alteración moderado (Figura 16B). En algunas zonas presentan estructuras de flujo marcadas por la alineación de cristales.



Figura 16. A. Fotografía de dron del Cerro Magdalena, se observa una zona cumbral de baja pendiente, y laderas de pendiente media hacia el sur, y altas hacia el norte. B. Afloramiento de las lavas del Cerro Magdalena con grado moderado de alteración.

Volcán Yololica

El edificio principal del volcán Yololica es un cono de escoria, con 110 m de altura, un ancho de base de 740 m en promedio, con un cráter de 45 m de profundidad y 175 m de diámetro (Figura 17), y un cono parásito ajunto a la parte noroeste, con 25 m de altura, y un cráter de 5 m de profundidad y 140 m de diámetro. Este volcán cuenta con un escudo de lava compuesto por flujos basálticos que están parcialmente recubiertos por el cono, que rodean y parcialmente recubren a los domos antiguos de Santa Mónica y Xochitepec, a las lavas Topilejo y al Cerro Magdalena, extendiéndose predominantemente hacia la cuenca de México al noreste (Figura 6). Las lavas del volcán Yololica presentan cortezas superiores vesiculadas y núcleos densos en los sitios proximales, siendo de tipo pãhoehoe en esta área (Figura 18A y 18B, CHI-210 y CHI-211) mientras que presentan zonas de brechamiento basales y superiores en afloramientos medios y distales, características de lavas tipo 'A'ã (Figuras 18C, CHI-203).

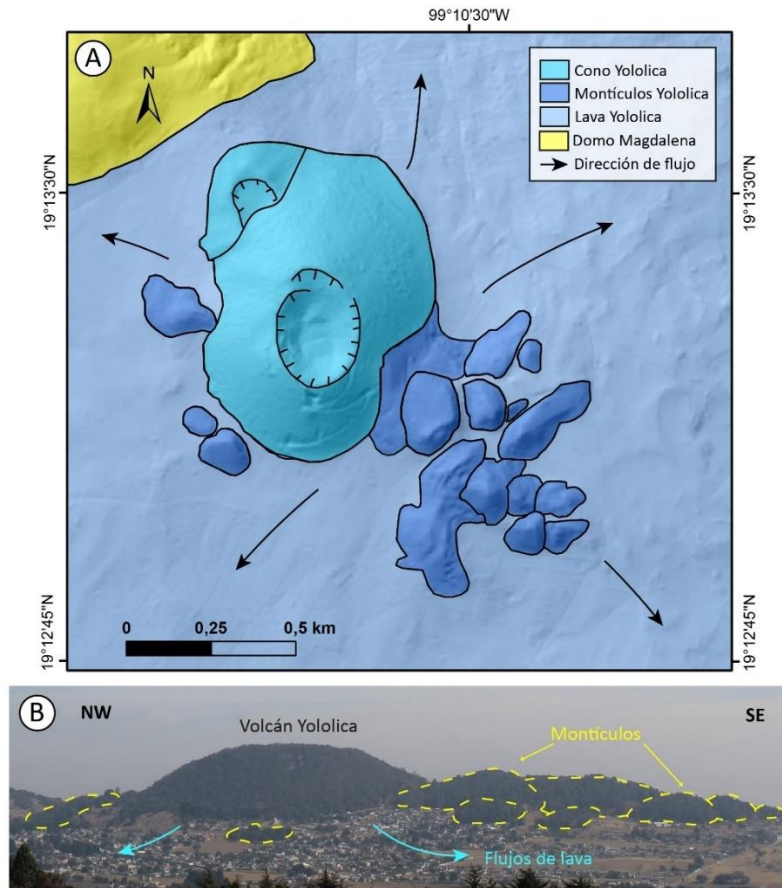


Figura 17. A. Mapa del volcán Yololica, delimitación de su cono, flujos de lava y montículos (mapa base de sombras a partir de imágenes Lidar obtenidas del INEGI). B. Foto de la vista del volcán Yololica desde el sureste.

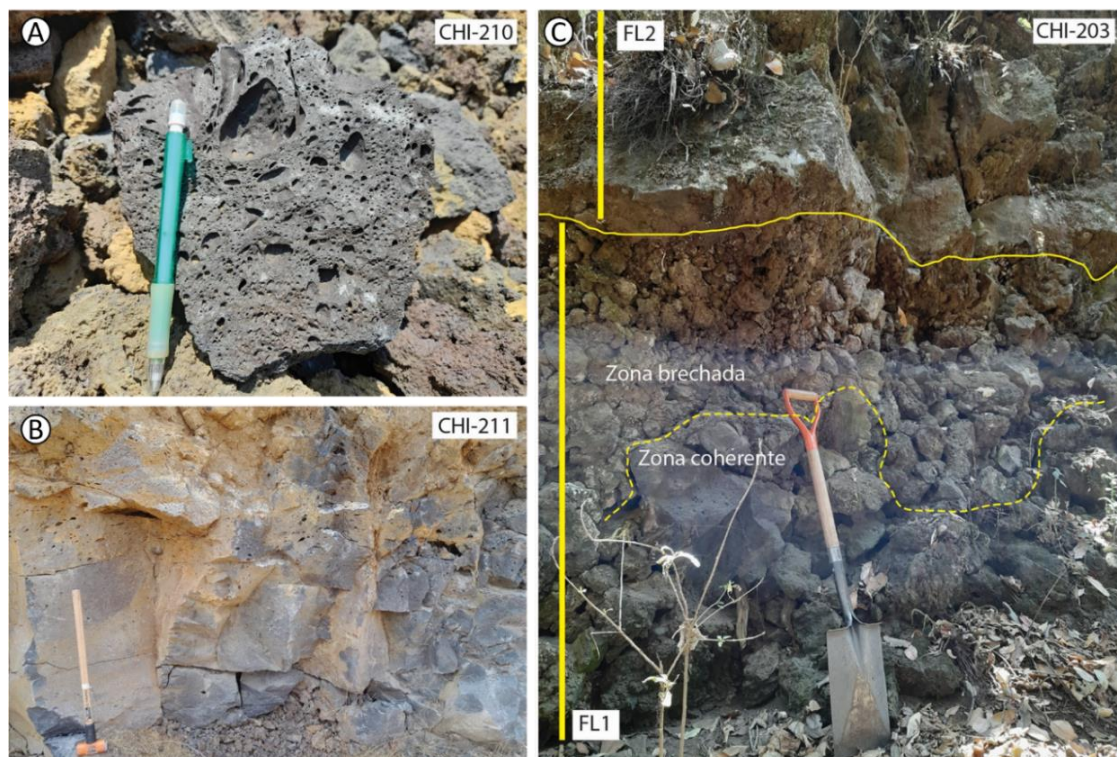


Figura 18. Afloramientos de lavas del volcán Yololica. A. Fragmento de corteza de lava tipo pāhoehoe de un flujo hacia el SE del volcán Yololica. B. Sección en un flujo de lava tipo pāhoehoe; SE del volcán. C. Flujos de lava distales tipo 'A'ā, compuestos por dos unidades de lava: una inferior (FL1), y una superior (FL2).

Contiguo al extremo sureste del cono se identificaron 13 montículos (Figura 17). Entre estos, los de menores dimensiones se asemejan a pirámides triangulares cuyo ancho de base varía entre 100 y 200 m, con alturas de entre 10 y 30 m, en contraste, los más grandes tienen formas alargadas de entre 200 y 400 m de longitud, con alturas entre 30 y 40 m. En la sección CHI-215, correspondiente a un corte realizado para la extracción de material para construcción, se observó una secuencia de al menos 4.5 m, compuesta por aproximadamente 0.2 m de suelo limoso sobre 4.2 m de un depósito bloque soportado por bloques angulares de lava que alcanzan 1.7 m de alto, algunos de los cuales exhiben estructura en rompecabezas (Figura 19A), estos contienen vesículas alargadas y redondeadas de hasta 4 cm y fenocristales de olivino y plagioclasa (Figura 19B). En menor proporción se encuentran fragmentos de salpicadura (*spatter*). Entre los bloques que han sido extraídos para construcción, se encontraron algunos bloques de lava con superficies cordadas (Figura 19C). En los límites suroeste del cono hay tres montículos, uno de estos descrito en la sección CHI-217, caracterizada por un depósito de mínimo 2 m de espesor, clasto-soportado principalmente por fragmentos de salpicadura (*spatter*), dada su alta vesicularidad y la presencia de superficies de aglutinamiento, que contiene fenocristales de olivino, y en menor proporción por bloques de lava con estructuras en rompecabezas (Figura 20).



Figura 19. A. Afloramiento en corte de un montículo al este del volcán Yololica. El depósito es soportado por bloques, con estructura en rompecabeza. B. Bloques de lava vesiculados que componen el depósito. C. Bloques de lava con textura cordada, que hacen parte del depósito.

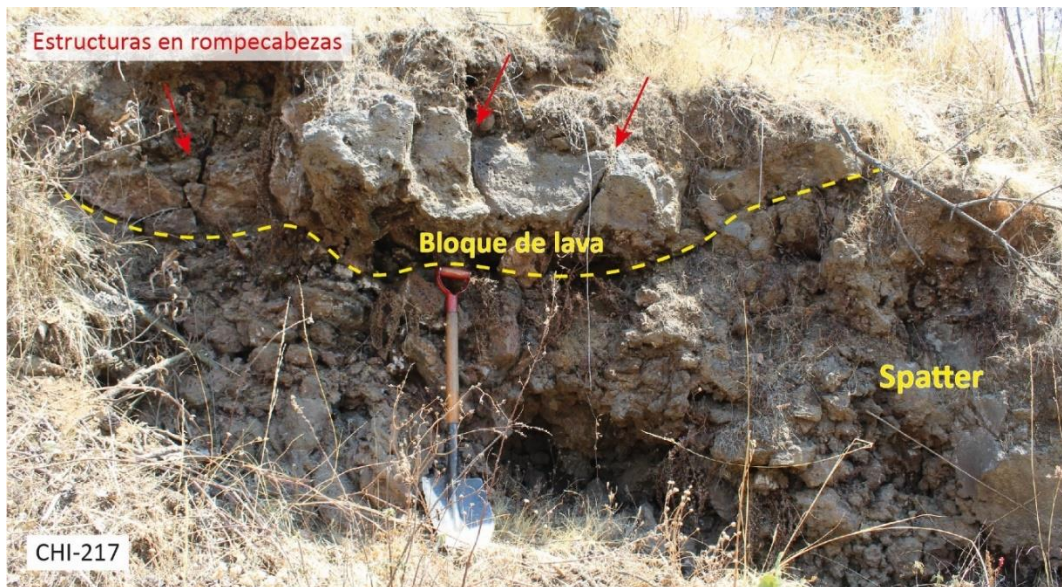


Figura 20. Afloramiento en corte de un montículo al suroeste del volcán Yololica. El depósito es soportado por bloques de spatter y lava, con estructuras en rompecabeza.

Depósitos de caída

La sección CHI-208 cerca del Ecoparque expone la sucesión de depósitos de caída que se encuentran también en cortes en el área de estudio (Figura 21). En la parte baja de la secuencia se encuentran depósitos de caída que corresponden al volcán Yololica. En las zonas cercanas al volcán, estas secuencias cubren los flujos de lava del mismo volcán y tienen espesores menores a 2 m. Están formadas por capas endurecidas de color gris oscuro con estratificación paralela, compuestas por un estrato basal de lapilli, sobrepuesto por estratos intercalados de ceniza y lapilli (secciones CHI-49 y CHI-30, CHI-31, Figura 22). En una sección distal (CHI-200) se encuentra una capa de ceniza tamaño lapilli a la base de una secuencia de varias unidades de lava tipo 'A'ā, con un contacto de color rojizo (ceniza quemada) entre los dos (Figura 22C).

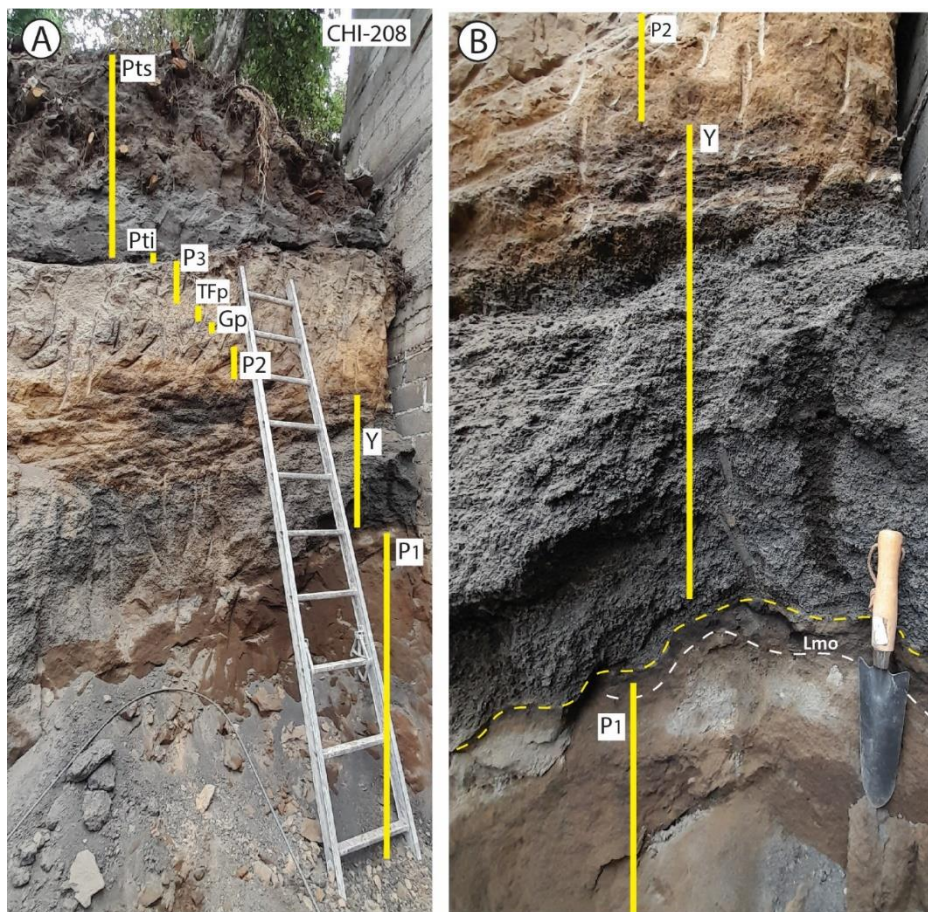


Figura 21. Fotografías de la sección 208 que expone la relación entre los depósitos de caída del área. A. P1, P2, P3: paleosuelos; Y: depósito de caída del volcán Yololica; GP, Tfp: depósitos de la pómez Tutti Frutti; Pti, Pts: depósitos de caída del volcán Pelado. B. Acercamiento a la base de la secuencia. Lmo: lámina de materia orgánica.

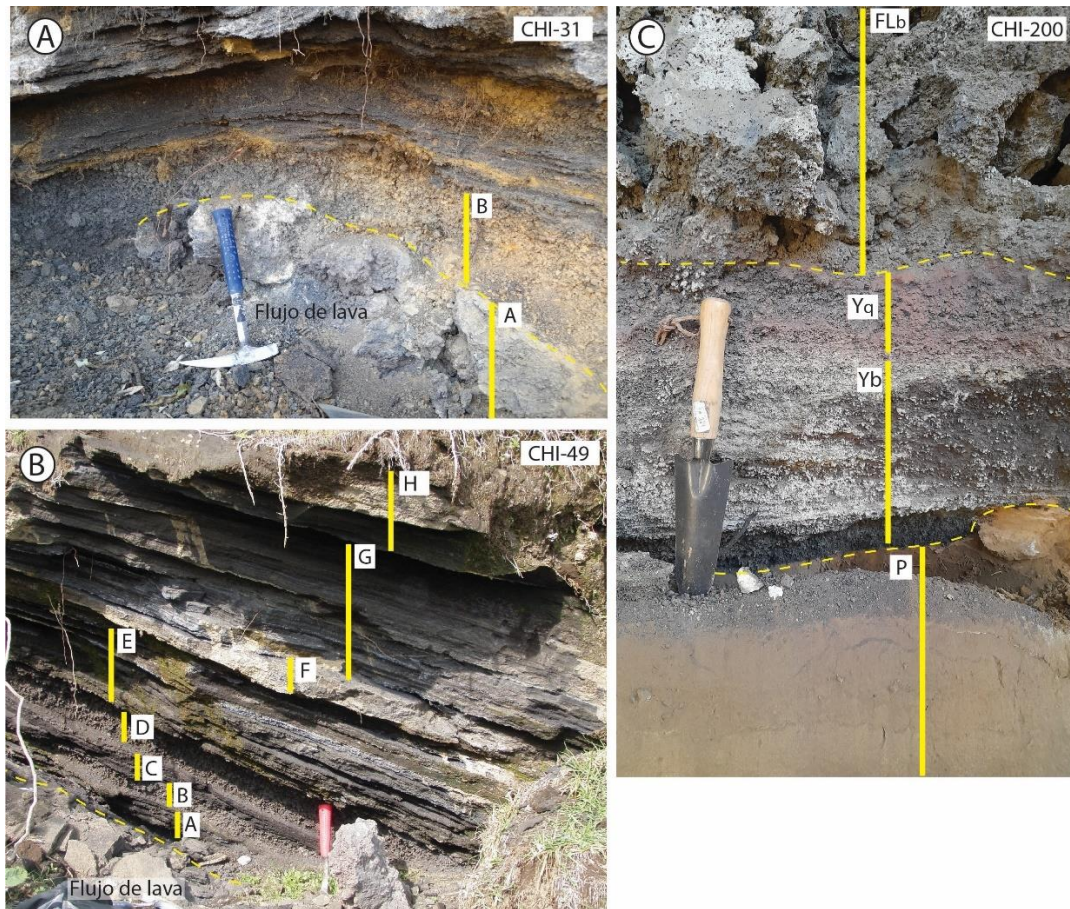


Figura 22. Fotografías de depósitos de caída del volcán Yololica. A. Sección proximal (CHI-31), depósitos de tamaño ceniza y lapilli sobre un flujo de lava (A) del volcán Yololica; la muestra CHI-31-B fue extraída del estrato B. B. Sección media (CHI-49) compuesto por ocho estratos (A-H), ubicados sobre un flujo de lava. C. Sección medio-distal (CHI-200), depósito de lapilli, dispuesto sobre un paleosuelo (P), con una zona superior quemada de color rojizo (Yq), bajo en un flujo de lava brechado de tipo aa (FLb).

Encima de la tefra Yololica, y separados por un paleosuelo color pardo de 35 cm de espesor intercalado, se identificó un depósito de caída que consiste en una capa basal de ceniza con 5 cm de espesor, de color gris, cubierta por una capa de 10 cm de espesor, la cual se compone de fragmentos más gruesos de colores entre amarillo, naranja y gris (Figura 21A). Las características de este depósito (descrito con mayor detalle más adelante) coinciden con las de la secuencia producida por la erupción pliniana Tutti Frutti del volcán Popocatepetl (63 km al sureste del Ecoparque), cuyos productos se dispersaron principalmente en dirección noreste y se caracterizan por una capa inferior gris (Grey pumice) y una capa superior de pómez con fragmentos líticos de varios colores (Tutti Frutti Pumice). En general, este depósito constituye un marcador estratigráfico en la Cuenca del Valle de México, debido al contraste de este material con la tefra predominantemente gris de los volcanes del campo volcánico Sierra Chichinautzin (e.g., Siebe et al., 2004a), y su presencia ha sido reportada tanto en las laderas del Ajusco (Siebe et al., 1999), como en la zona este y suroeste del volcán Pelado (Lorenzo-Merino, 2016).

Los depósitos de caída del volcán Pelado se encontraron en dos secciones del área de estudio (CHI-208, Figura 23A; CHI-205, Figura 23B). En estos dos sitios constan de dos capas, una inferior de 4 cm de ceniza gris (tefra Pelado inferior) y una superior de 80 cm de ceniza fina color gris claro (tefra Pelado superior). En ambos sitios estos depósitos se encuentran sobre paleosuelos de espesor variable y que ocasionalmente contienen fragmentos de carbón.

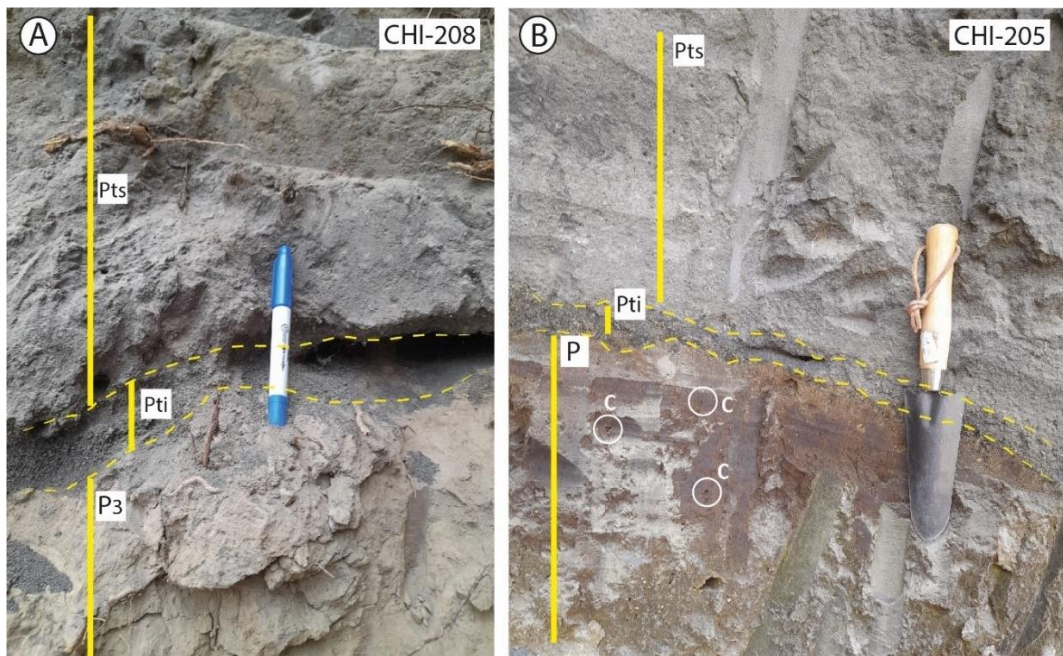


Figura 23. Depósitos de caída del volcán Pelado conformados por una capa basal de ceniza media (Pti) y una superior de ceniza fina (Pts), dispuestos sobre paleosuelos. A) Sección CHI-208. B) Sección CHI-205, el paleosuelo bajo los depósitos de caída contiene fragmentos de carbón (C) de menos de 1 cm.

4.3. Estratigrafía y datos radiométricos

A partir de las relaciones estratigráficas entre los productos descritos en varias secciones claves (Figura 24), se reconstruyó la secuencia estratigráfica en el área, y los fechamientos de radiocarbono realizados en paleosuelos intercalados permitieron datar varios de los depósitos.

Se determinó que el domo del Cerro Magdalena es la base de la secuencia, seguido por los flujos de lava y depósitos de caída del Volcán Yololica. Para estos últimos, se obtuvieron tres fechamientos. Dos de éstos son similares y corresponden a la datación de un paleosuelo orgánico (CHI-208B, 22384 – 22116 años cal AP) y de fragmentos de carbón extraídos del mismo (CHI-208A, 22165 – 21868 años cal AP) (Tabla 2, Figura 24). Sin embargo, una muestra total de paleosuelo en otra sección dio una edad muy diferente de 9903 – 9654 años cal AP (CHI-200A), la cual es incongruente con la edad de los productos que se encuentran sobre la tefra Yololica y podría deberse a una contaminación de origen antrópico en el lugar del muestreo.

Sobre la tefra del Yololica se encuentra el depósito de caída del volcán Popocatepetl (Pómez Tutti Frutti), para la cual se reporta una edad de 16,870 años cal AP (Sosa-Ceballos et al. 2012). Encima de esta y separadas por un paleosuelo están las capas de tefra de caída del volcán Pelado, las muestras de paleosuelo se dataron en 16698 – 16636 años cal AP (CHI-205A, Figura 24, Tabla 2), y en 14884 – 14275 años cal AP (CHI-208D, Figura 24, Tabla 2). El tope de la secuencia está comprendido por los depósitos de ceniza Arenal, los cuales están depositados directamente sobre las lavas del Yololica (CHI-28 y CHI-203), y están cubiertos por los flujos de lava del volcán Xitle (CHI-219) (Figura 25).

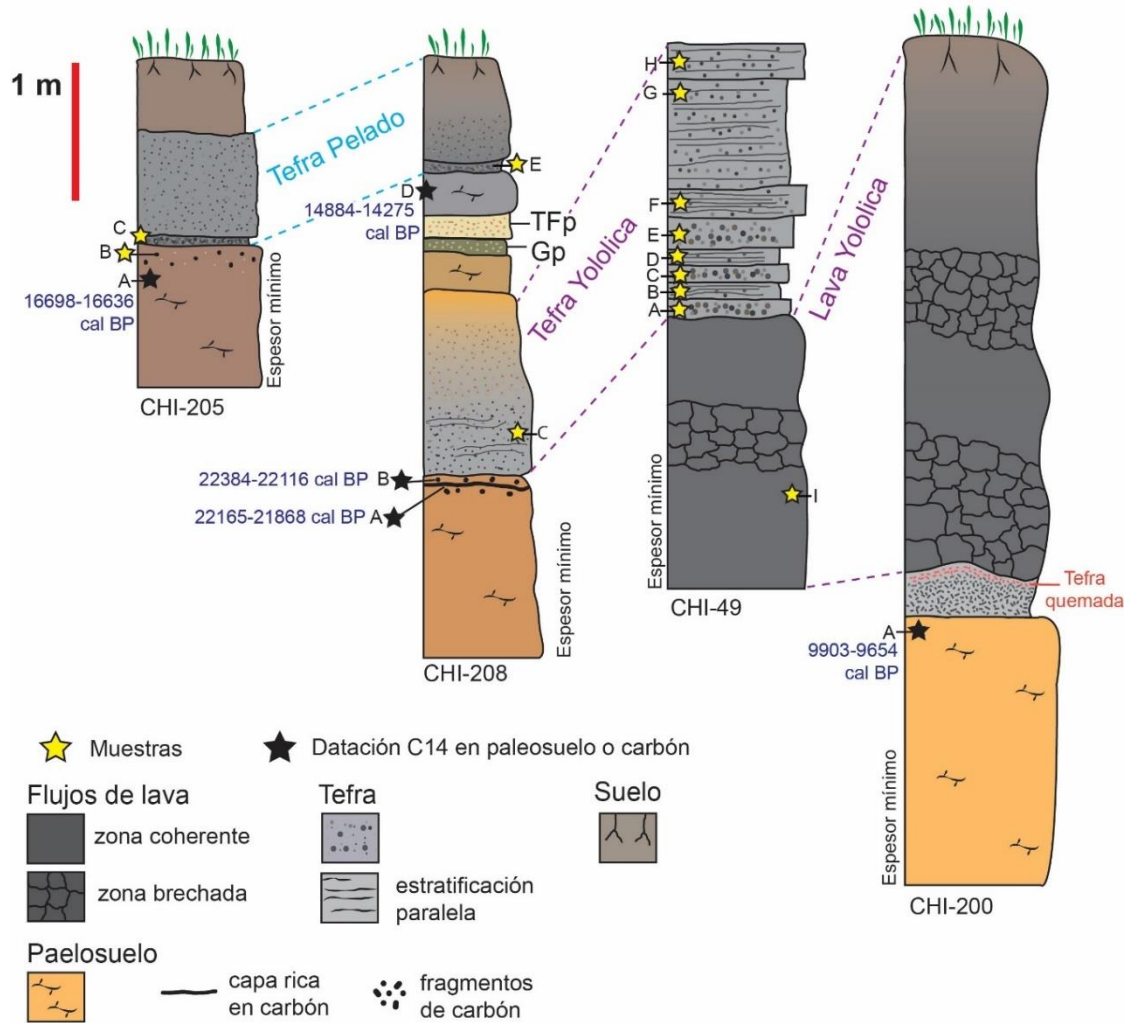


Figura 24. Relación estratigráfica entre los depósitos de caída muestreados de la zona de estudio.

Tabla 2. Fechamientos por radiocarbono en capas de paleosuelos y fragmentos de carbón, bajo depósitos de caída. Las edades calibradas fueron calibradas con la base de datos IntCal20.

Muestra	Cod. de laboratorio	Latitud N	Longitud W	Altitud msnm	Edad convencional (BP)	Edad calibrada (BP 2σ)	δ13C
CHI-200-A	Beta - 627460	19° 14' 09.9"	99° 11' 15.2"	2715	8,770 +/- 30	9,903 – 9,654 (90.1%) 9,649 – 9,603 (4.5%) 9,570 – 9,560 (0.8%)	-22.1
CHI-205-A	Beta – 627461	19° 13' 47.6"	99° 10' 47.4"	2754	13,850 +/- 40	16,998 – 16,636 (95.4%)	-24.2
CHI-208-A	Beta - 627462	19° 14' 02.8"	99° 11' 06.8"	2773	18,300 +/- 50	22,384 – 22,116 (95.4%)	-24
CHI-208-B (carbón)	Beta - 627463	19° 14' 02.8"	99° 11' 06.8"	2773	18,070 +/- 50	22,165 – 21,868 (95.4)	-23.7
CHI-208-E	Beta - 627464	19° 14' 02.8"	99° 11' 06.8"	2773	12,420 +/- 40	14,884 – 14,275 (95.4)	-23.8

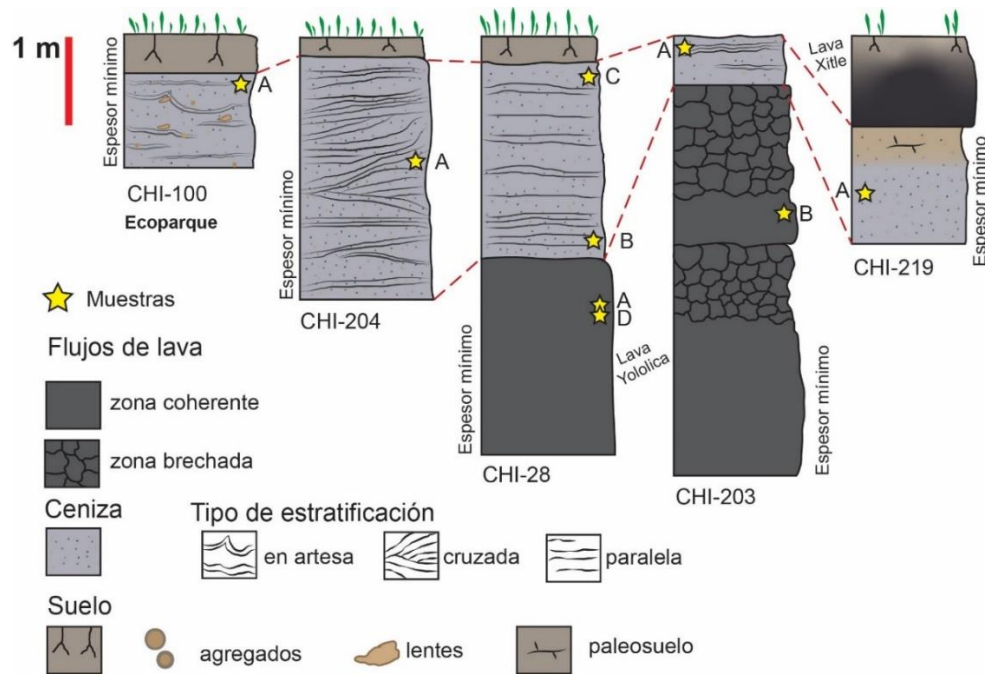


Figura 25. Relación estratigráfica entre las secciones que incluyen depósitos de ceniza Arenal distales al Ecoparque.

4.4. Granulometría de los depósitos de tefra

Ceniza del Ecoparque

El material del Ecoparque (CHI-100-A) tiene buena clasificación ($\sigma = 1 \text{ phi}$) y está conformado por ceniza entre gruesa y muy fina (0 phi - 4phi), con una curva de distribución de tamaño de grano cercanamente simétrica, con media en ceniza media (Figura 26; Tabla 3).

En cuanto a los sitios externos al Ecoparque, los depósitos (tanto endurecidos como sueltos) son muy similares a la ceniza del Ecoparque (Figura 26), con buena clasificación ($\sigma = 0.7 - 0.8 \text{ phi}$) y curva de distribución de tamaños casi simétrica, con partículas entre ceniza gruesa y muy fina (0 - 4 phi), cuya media corresponde a ceniza media (2 phi).

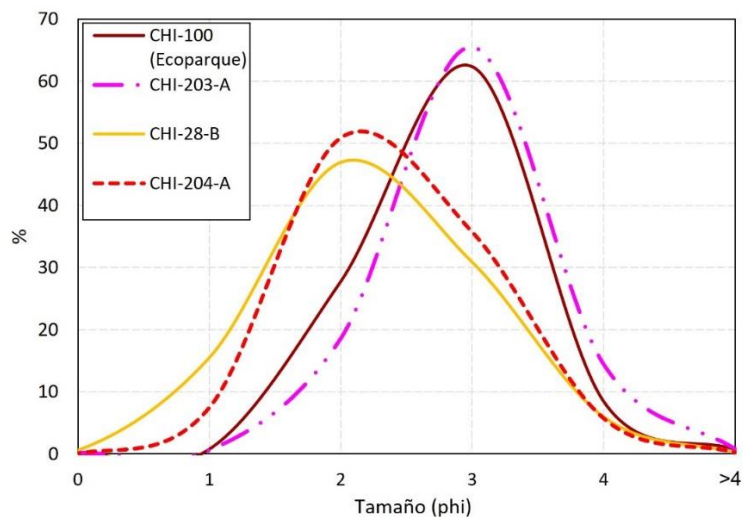


Figura 26. Curvas de distribución granulométrica de la ceniza del Arenal, en el Ecoparque (CHI-100) y en otros sitios.

Tabla 3. Porcentaje en peso de distribución de tamaño de grano. Abreviaciones: Mz- Media, σ - desviación estándar, SKg- asimetría gráfica

Muestra	Peso total(g)	Porcentaje en peso por fracción de tamaño de grano (ϕ)										Parámetros estadísticos (Folk, 1974)		
		-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	>4	Mz	σ	SKg
CHI-100-A	1749.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.8	27.8	62.3	8.4	0.7	2.3	0.7	-0.1
CHI-28-B	201.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	15.5	47.0	30.9	6.0	0.2	1.8	0.8	0.02
CHI-30-B	351.5	1.2	5.3	19.5	21.0	18.8	17.1	9.0	4.0	2.2	1.9	-0.7	1.8	0.1
CHI-49-A	437.6	0.0	6.5	14.6	18.3	24.9	19.5	10.8	3.8	1.1	0.5	-0.6	1.6	-0.02
CHI-49-G	101.1	0.0	0.0	0.0	0.1	1.5	21.2	52.1	20.5	3.6	1.0	1.5	0.8	1.2
CHI-49-E	554.3	2.3	17.1	21.5	13.1	11.2	12.8	12.0	6.4	2.4	1.1	-1.0	2.1	0.2
CHI-203-A	478.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.6	18.6	65.5	14.4	0.8	2.4	0.7	0.0
CHI-204-A	736.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	7.4	50.9	35.7	5.7	0.2	1.9	0.7	0.09
CHI-205-C	135.4	0.0	0.0	0.1	1.9	12.1	31.2	25.9	25.1	2.7	1.1	1.2	1.1	0.01
CHI-208-C	222.5	0.0	0.0	10.9	20.7	19.1	19.7	15.1	8.8	3.8	2.0	-0.02	1.8	0.1
CHI-208-D	40.9	0.0	1.6	9.3	13.2	13.4	15.3	25.9	14.0	3.2	4.2	0.4	1.9	-0.2
CHI-208-F	245.6	0.0	0.0	0.3	1.7	10.6	37.5	39.6	7.9	1.6	0.9	0.9	0.9	-0.04
CHI-219-A	226.9	0.0	0.0	0.7	2.8	5.7	16.4	37.0	25.4	7.2	4.7	1.65	1.04	-0.03

Depósitos de caída

Los depósitos de caída del volcán Yololica presentan en general mala clasificación ($\sigma = 1.63 - 2.1 \text{ phi}$), con curvas de distribución bimodales y un amplio rango de distribución entre lapilli grueso y ceniza muy fina (-4 a 3 phi), cuya media varía entre -1 y 0 phi (Figura 27; Tabla 3). Únicamente una muestra de la parte superior de la secuencia exhibe un comportamiento distinto (CHI-49-G: estrato G en la Figura 22B), con distribución unimodal, clasificación moderada ($\sigma = 0.82$) y variación en tamaño de ceniza gruesa a fina, con una media de 1.5 phi (Figura 27; Tabla 3).

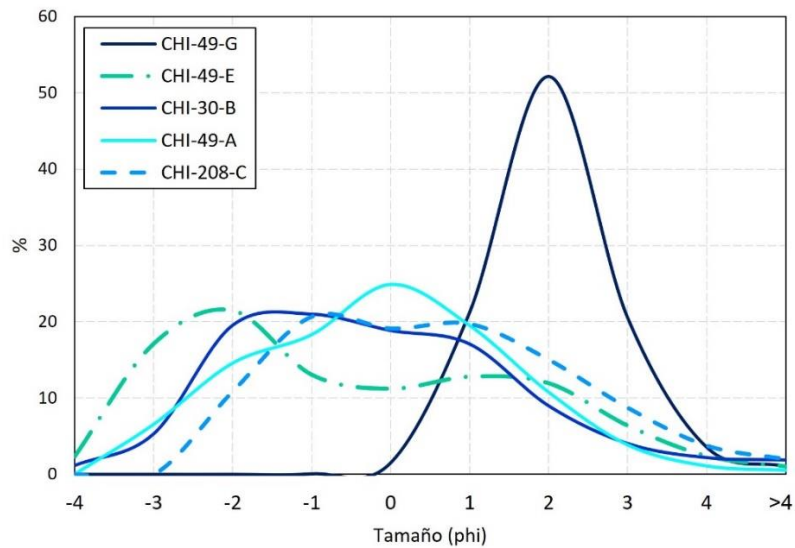


Figura 27. Curvas de distribución granulométrica de la tefra del volcán Yololica.

La capa Pómez Tutti Frutti se caracteriza por una clasificación moderada ($\sigma = 0.91 \text{ phi}$), con distribución bimodal en un rango de tamaño entre lapilli medio y ceniza fina (-2 - 3 phi), cuya media corresponde a 0.9 phi (Figura 28; Tabla 3).

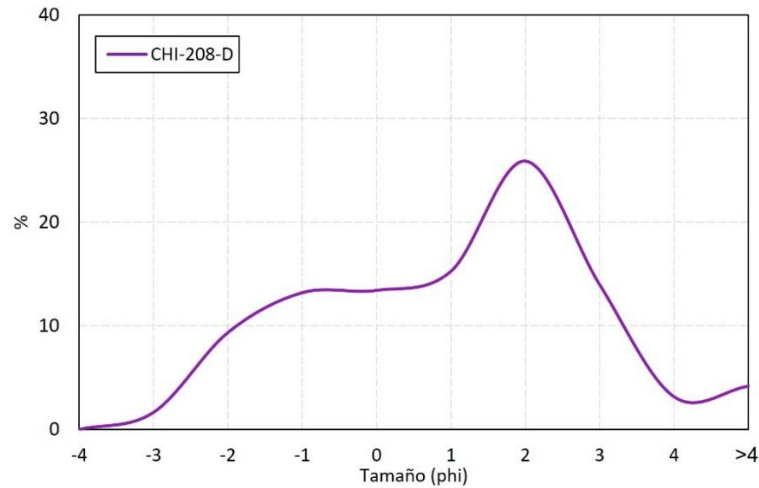


Figura 28. Curva de distribución granulométrica de la pómez Tutti Frutti (CHI-208).

La tefra Pelado interior tiene una clasificación buena ($\sigma = 1 - 1.1$ phi), con curvas de distribución de tamaño casi simétricas, cuyos fragmentos varían entre lapilli fino y ceniza muy fina (-1 a 4 phi), con su media en ceniza gruesa (1 phi) (Figura 29; Tabla 2). La granulometría de la tefra Pelado superior no fue analizada dado que esta era muy fina, sin embargo existen datos publicados sobre la granulometría de esta capa en las zonas proximal y media publicados (Lorenzo-Merino et al. 2018).

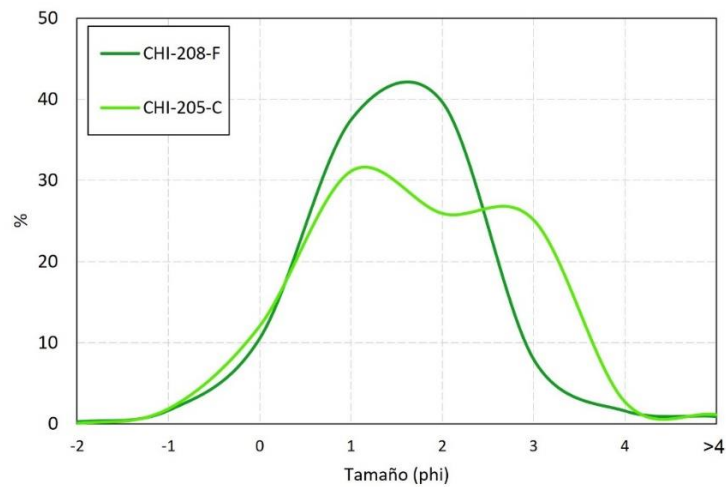


Figura 29. Curva de distribución granulométrica de la tefra inferior del Volcán Pelado.

4.5. Componentría de los depósitos de tefra

Ceniza del Ecoparque

La ceniza en el Ecoparque está compuesta por fragmentos líticos accidentales, fragmentos juveniles y cristales sueltos (Figuras 30).

Entre los fragmentos líticos accidentales se distinguen dos tipos:

- I) Líticos densos (13 wt. %), que son subredondeados a subangulares, de colores blanco, rosado y naranja, que corresponden a fragmentos graníticos.
- II) Pómez (6 wt. %), que son redondeadas, de color amarillo claro, y con alto grado de vesicularidad.

Los fragmentos juveniles se clasificaron en cuatro tipos:

- I) Taquilita marrón densa (31 wt%): fragmentos angulares de color marrón, de baja vesicularidad, con fenocristales de plagioclasa, olivino y piroxeno.
- II) Taquilita negra densa (5 wt. %): fragmentos subangulares de color negro, de baja vesicularidad.
- III) Taquilita negra vesiculada (28 wt. %): fragmentos subredondeados de alta a media vesicularidad, de color negro, que contienen fenocristales de plagioclasa y piroxeno.
- IV) Sideromelana (14 wt. %): fragmentos subangulares de vidrio color amarillo grisáceo, con alta vesicularidad, vesículas de hasta 12 mm de diámetro, y que contienen fenocristales de plagioclasa, olivino y piroxeno.

Las cenizas también contienen cristales sueltos (3 wt. %) de piroxeno, plagioclasa, olivino, anfíbol y cuarzo. Adicionalmente contiene fragmentos de carbón y agregados de taquilita y sideromelana, cuya abundancia no se consideró significativa (<1.5 wt. %).



Figura 30. Fragmentos que componen la ceniza del Ecoparque y su abundancia. Minerales: Ol- olivino, Pl- plagioclasa, Px- piroxeno, Qz- cuarzo.

En comparación, los componentes de los depósitos fuera del Ecoparque coinciden con los descritos para la ceniza del Ecoparque, pero varía su abundancia (Figura 31, Tabla 4). En particular, sobresale la muestra CHI-219-A, que corresponde a la ceniza bajo las lavas del volcán Xitle, por un alto contenido de pómez (7 wt. %) y de sideromelana (89 wt. %).

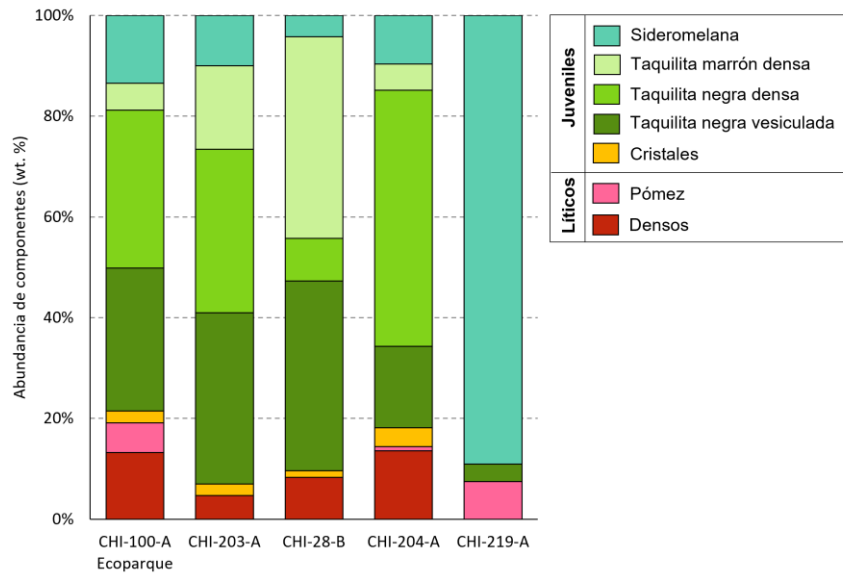


Figura 31. Fragmentos que componen a los depósitos de ceniza ubicados al oeste y norte del Cerro Magdalena.

Tabla 4. Componentes de los depósitos de tefra analizados, en porcentaje en peso.

Muestra	Tamaño muestreado (φ)	Peso Total (g)	Porcentaje en peso por componentes												
			Líticos		Juveniles										
			Ld	P	Crist	Tnv	Tnd	Tmd	S	Se	Sg	Ag	Crist	C	
CHI-100-A	0	0.3	12.7	5.6	2.2	27.1	29.9	5.1	12.9	0.0	0.0	1.4	2.2	0.9	
CHI-28-B	1	0.1	7.8	0.0	1.2	35.7	8.0	37.9	4.0	0.0	0.0	4.1	1.2	0.0	
CHI-30-B	-2	40.8	0.0	0.0	0.0	20.2	0.0	0.0	0.0	79.7	0.0	0.0	0.2	0.0	
	0	0.8	0.0	0.0	8.1	76.6	0.0	0.0	0.0	15.3	0.0	0.0	0.0	0.0	
CHI-49-A	-2	38.8	0.0	0.0	0.0	25.7	0.0	0.0	0.0	74.2	0.0	0.0	0.1	0.0	
	0	0.8	0.0	0.0	3.2	72.8	0.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
CHI-203-A	1	0.1	4.7	0.0	2.3	34.0	32.5	16.6	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
CHI-204-A	1	0.3	13.4	0.8	3.7	16.1	50.4	5.2	9.5	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	
CHI-205-C	-1	3.1	0.0	0.0	0.0	9.2	0.0	0.0	0.0	0.0	90.8	0.0	0.0	0.0	
CHI-208-C	-2	23.3	0.0	0.0	0.0	37.0	0.0	0.0	0.0	62.9	0.0	0.1	0.0	0.0	
CHI-208-F	-1	3.5	0.0	0.0	0.0	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	90.7	0.0	0.3	0.0	
CHI-219-A	-1	1.1	0.0	7.43	0.0	3.4	0.0	0.0	89.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

Depósitos de caída

Los fragmentos que componen a la tefra Yololica se clasificaron según sus características texturales en:

I) Taquilita negra vesicular (20-37 wt. %): Son de forma subredondeada con alta vesicularidad, cuyas vesículas son redondas y ovaladas (Figura 32). Estos fragmentos son de textura porfirítica, contienen fenocristales euhedrales de olivino y plagioclasa.

II) Sideromelana espumosa (63-80 wt. %): fragmentos vitreos de sideromelana de aspecto espumoso, de muy alta vesicularidad (Figura 32), cuyas vesículas son redondas y alargadas. Estos fragmentos contienen fenocristales de plagioclasa y olivino.

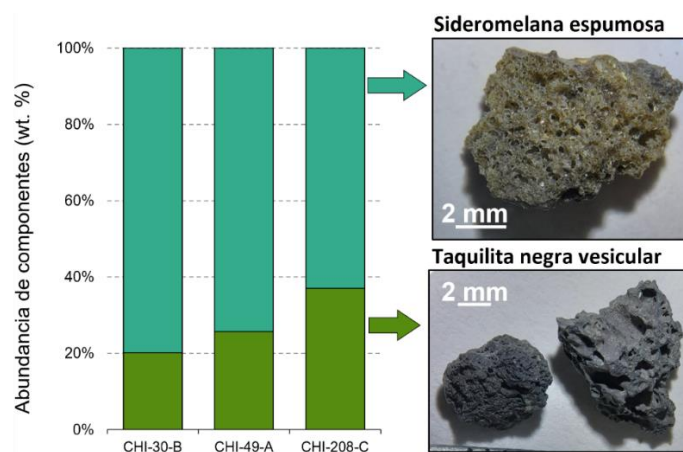


Figura 32. Abundancia de los fragmentos que componen el material de la tefra del volcán Yololica.

La capa **Pómez Tutti Frutti** está compuesta por fragmentos redondeados de pómez color amarillo, con fenocristales de anfíbol, y por líticos densos subredondeados que varían entre graníticos y metamórficos tipo skarn (Figura 33). Debido a la escasez de material disponible en afloramiento además de su alto grado de alteración, no se realizó el análisis cuantitativo.



Figura 33. Partículas que componen el depósito de caída de la pómez Tutti Frutti de la sección CHI-208.

La tefra Pelado interior se compone de:

- I) Taquilita negra vesicular (10 wt. %): de forma subangular, con alta vesicularidad, estos contienen fenocristales de olivino (Figura 34).
- II) Sideromelana granular (90 wt%): fragmentos vitreos subredondeados, vesiculados, con matriz de apariencia granular (Figura 34).

Cabe notar que estos resultados son similares a los publicados por Lorenzo-Merino et al. (2018) para la unidad inferior de la secuencia tipo del Pelado, quienes también reportan resultados de análisis de composición de la tefra Pelado superior, los cuales se considerarán en la discusión.

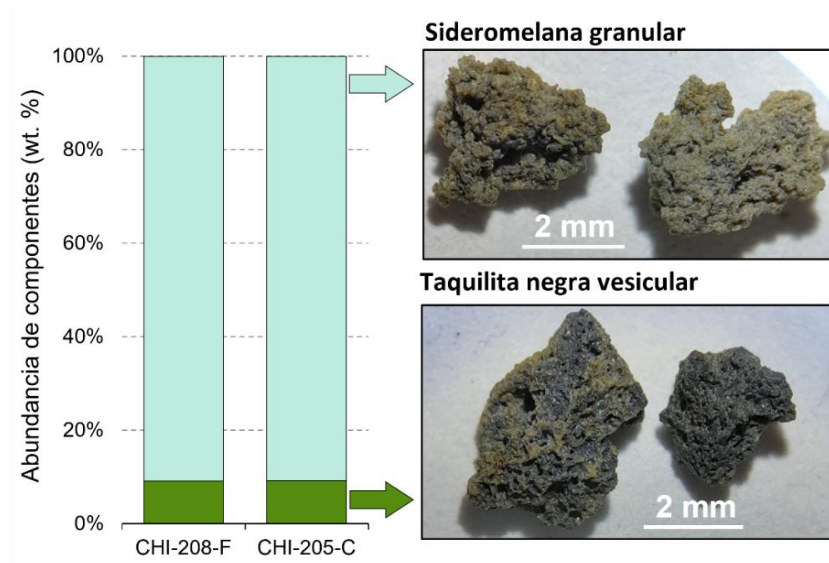


Figura 34. Abundancia de los fragmentos que componen el material de la tefra inferior del Volcán Pelado.

4.6. Petrografía

Ceniza del Ecoparque

En la ceniza del Ecoparque, los fragmentos juveniles tienen las siguientes características (Figura 35):

- I) Taquilita densa: Fragmentos porfíricos que contienen fenocristales euhedrales a subhedrales de plagioclasa, olivino y piroxeno de hasta 0.5 mm de tamaño, en una masa fundamental hipocristalina con microcristales de plagioclasa y olivinos.
- II) Taquilita negra vesiculada: Fragmentos porfíricos, con fenocristales euhedrales de plagioclasa y subhedrales de ortopiroxenos, cuyos tamaños alcanzan 0.3 mm, en una masa fundamental holocristalina con microcristales de plagioclasa y minerales opacos.
- III) Sideromelana: Fragmentos porfíricos que contienen fenocristales euhedrales de plagioclasa, olivino y piroxeno, con tamaños que alcanzan 0.3 mm, en una matriz hipohialina con microcristales de plagioclasa y olivino.

Los cristales sueltos corresponden a piroxeno euhedral, olivino y cuarzo subhedral con bordes angulares, y plagioclasa subhedral con bordes redondeados.

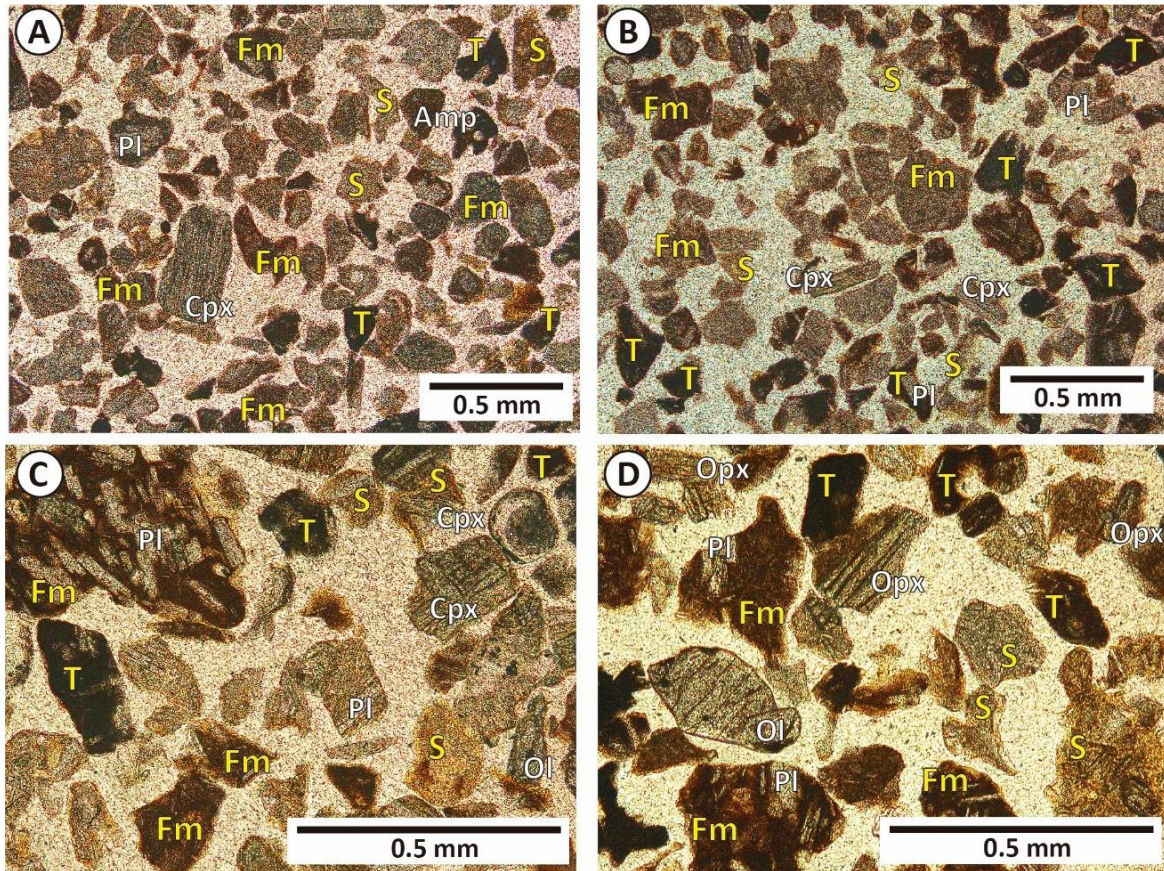


Figura 35. Fotomicrografías de los componentes de la ceniza del Ecoparque (muestra CHI-100-A). Fragmentos: Fo- Fragmentos de matriz opaca, T: Taquilita, S: sideromelana; Minerales: Amp: anfíbol, Cpx- clinopiroxeno, Opx- ortopiroxeno, Ol- olivino, Pl- plagioclasa.

Tefra Yololica

Los fragmentos de la tefra Yololica se caracterizaron así:

I) Taquilita negra vesicular: Fragmentos de textura porfírica que contienen fenocristales euhedrales de olivino y plagioclasa con tamaños entre 0.2 y 2.3 mm, en masa fundamental hipocristalina, compuesta por vidrio y microcristales de plagioclasa (Figura 36).

II) Sideromelana espumosa: Estos fragmentos son de textura porfírica, contienen fenocristales euhedrales de plagioclasa de hasta 1.2 mm y olivino de tamaños entre 0.3 y 1.9 mm, en masa fundamental hipohialina con microcristales de plagioclasa y olivino (Figura 36).

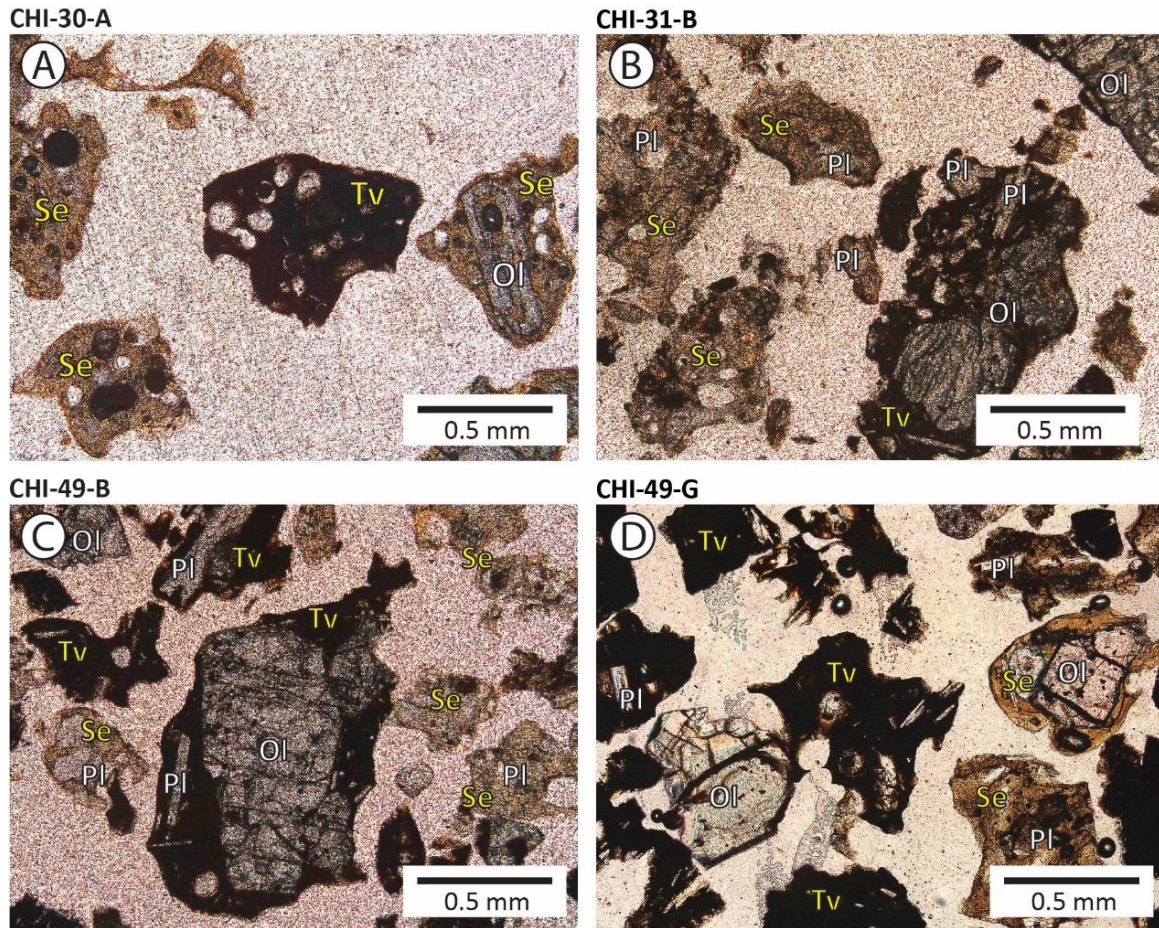


Figura 36. Fotomicrografías de los componentes de la tefra del Volcán Yololica. Fragmentos: Fo- Fragmentos de matriz opaca, Tv: taquilita vesicular, Se: sideromelana espumosa; Minerales: Ol- olivino, Pl- plagioclasa.

Domo del Cerro Magdalena

Las rocas del domo son de textura porfirítica hipocristalina (Figura 37A). Contienen fenocristales y microfenocristales euhedrales a subhedrales de: 1) plagioclasa (36 vol. %), con tamaños entre 0.5 y 3.6 mm, que presentan macla de calsbad y periclina, así como zonación y textura en tamiz; 2) anfíbol (5 vol. %), de 1.2 a 2.7 mm de largo, que presentan oxidación y bahías de disolución; 3) piroxeno (0.9 vol. %), con bordes de oxidación; y 4) biotita (0.6 vol. %), presente en glomero cristales de entre 0.5 y 3 mm de largo, con anfíbol y plagioclasa (Figuras 37B, 37C). La masa fundamental (57 vol. %) es hipohialina, predominando el vidrio (31 vol. %), y en menor proporción formada por opacos (17 vol. %), microcristales de plagioclasa (6 vol. %), anfíbol (2 vol. %) y piroxeno (0.6 vol. %).

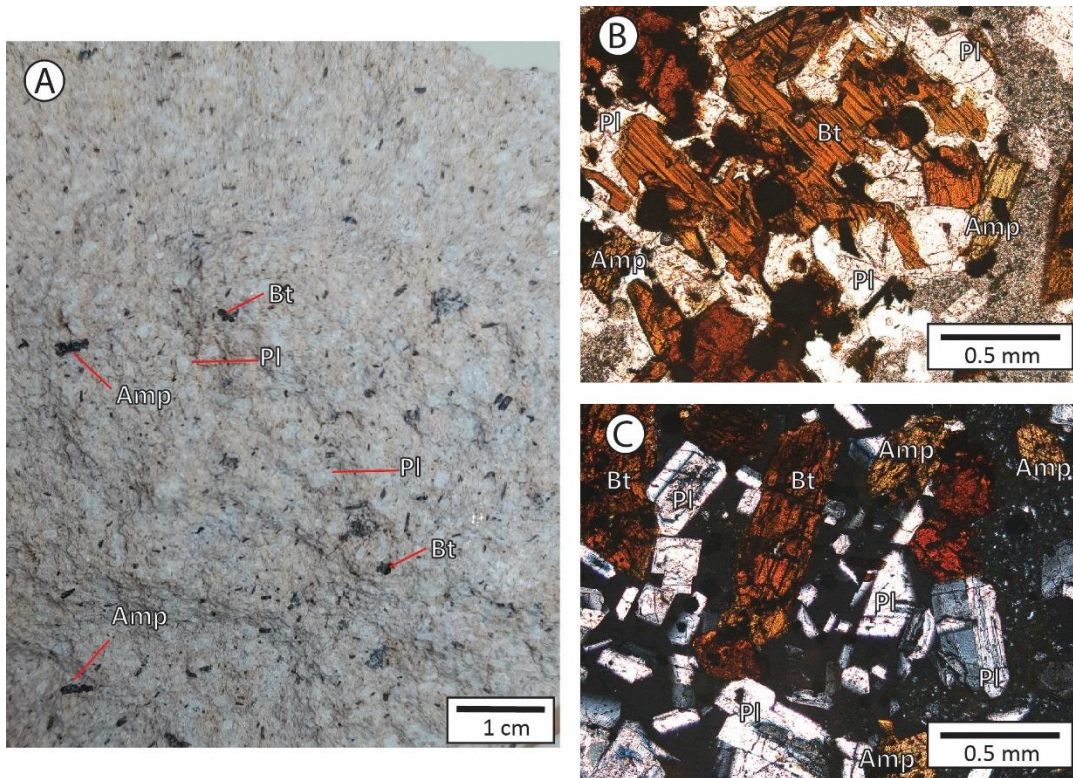


Figura 37. Mineralogía de las lavas del Cerro Magdalena (muestra CHI-38-B). A. Dacita porfirítica compuesta por fenocristales de plagioclasa (Pl), anfíbol (Amp) y biotita (Bt) en masa fundamental hipohialina. B. Glomerocristales subhedrales de biotita, plagioclasa y anfíbol, rodeados de matriz predominantemente cristalina (fotomicrografía en nicoles paralelos). C. Fenocristales subhedrales de plagioclasa con maclas de carlsbad, biotita y euhedrales de anfíbol (fotomicrografía en nicoles cruzados).

Lavas y bomba del Volcán Yololica

Los flujos de lava del Yololica se caracterizan por su textura porfirítica holocristalina, contienen fenocristales y microfenocristales euhedrales a subhedrales de olivino de hasta 3.6 mm, fracturados y con disolución (Figura 38A), así como fenocristales y microfenocristales euhedrales de plagioclasa de hasta 2.1 mm, algunos con zonación, maclas tipo albita y ocasionalmente textura en tamiz. Estos cristales forman ocasionalmente glomerocristales con tamaños entre 0.75 y 1.5 mm (Figura 38B). Los feno- y microfenocristales de olivino representan un contenido entre el 4 y 7 vol. % y los de plagioclasa entre el 8 y 17 vol. % (Figura 39, Tabla 5).

La masa fundamental es holocristalina y contiene minerales opacos (22 - 38 vol. %) y microcristales de plagioclasa (28 - 50 vol. %) y olivino (5 - 19 vol. %) (Figura 38, Tabla 5). Sobresale la presencia de cristales de cuarzo en la muestra CHI-49-I, con dimensiones aproximadas en área de 1.5 x 2 cm y cuyo contacto es irregular con una zona microcristalina (Figura 38C).

Se analizó una muestra de bomba del cono del volcán, la cual tiene una vesicularidad de 74 vol. %, las vesículas son predominantemente redondas con diámetros entre 0.21 y 7 mm (Figura 38D). Esta muestra contiene fenocristales y microfenocristales de 1) olivino (4 vol. %) de forma subhedral, algunos con fracturamiento y disolución, con tamaños entre 0.12 y 1.5 mm, y 2) plagioclasa (12 vol. %) de forma euhedral, con tamaños entre 0.3 y 0.75 mm. Estos minerales pueden encontrarse formando glomero-cristales, los cuales son escasos (< 1% vol. %). La matriz (84 vol. %) es hipohialina y está compuesta en su mayoría por vidrio (69 vol. %) con bajo contenido de microcristales de plagioclasa (12 vol. %) y olivino (1 vol. %).

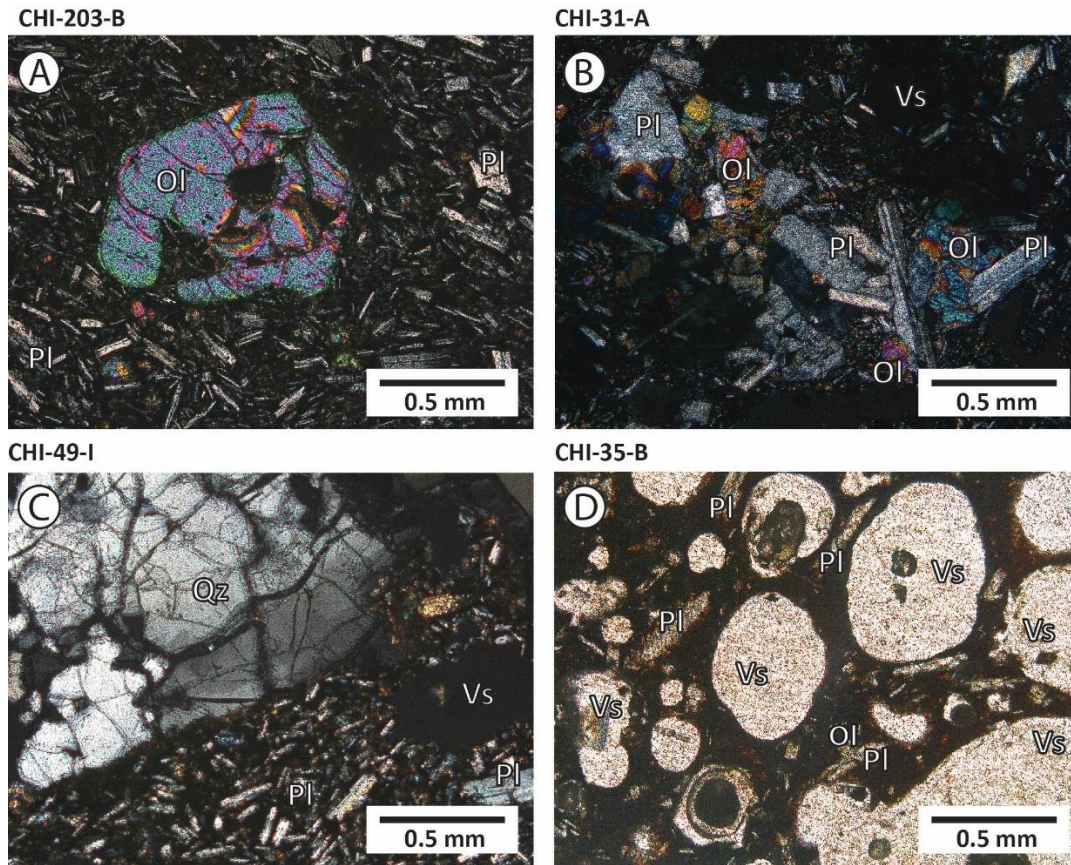


Figura 38. Fotomicrografías de los productos del volcán Yololica: A. Lava con fenocristal de olivino con disolución interna y en bahía, en una masa fundamental compuesta principalmente por cristales de plagioclasa y olivino (fotomicrografía con nícoles cruzados de la muestra CHI-203-B). B. Lava con glomero-cristales de plagioclasa y olivino, en matriz de cristales de plagioclasa y opacos (fotomicrografía con nícoles cruzados de la muestra CHI-31-A). C. Lava con xenocrystal de cuarzo en contacto microcristalino con la masa fundamental compuesta por cristales de plagioclasa (fotomicrografía con nícoles cruzados de la muestra CHI-49-I). D. Bomba formada principalmente por vidrio, con microfenocristales de plagioclasa y olivino (fotomicrografía con nícoles paralelos de la muestra CHI-35-B).

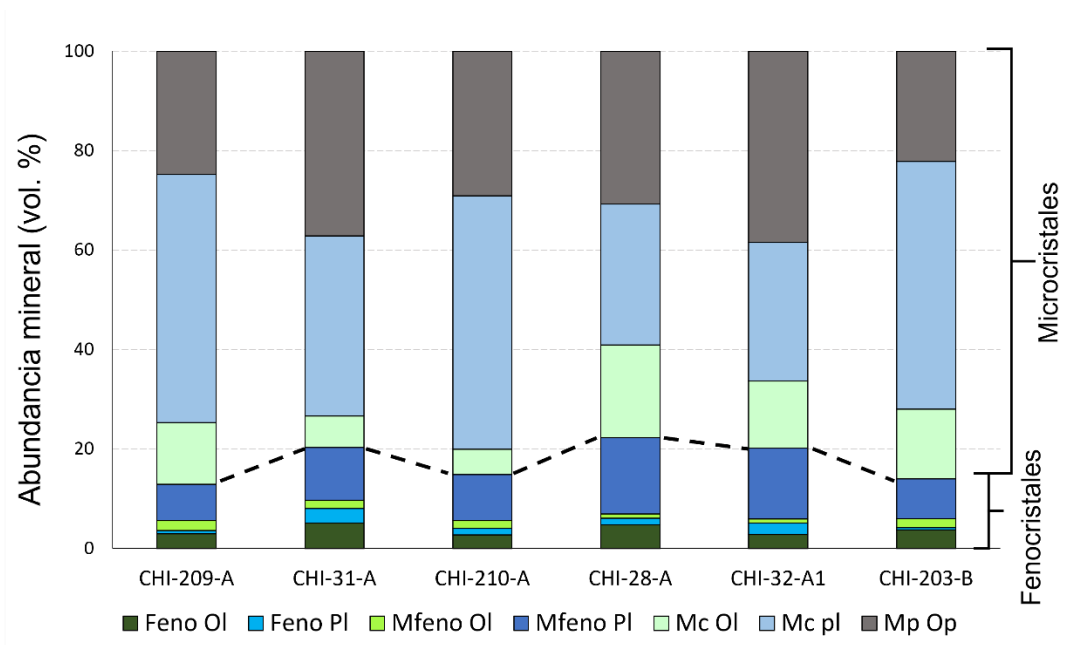


Figura 39. Abundancia de minerales (en roca densa) de los flujos de lava del volcán Yololica. Feno-fenocristales, Mfeno-microfenocristales, Mc- microcristales, Ol- olivino, Op- minerales opacos, Pl- plagioclasa.

Tabla 5. Abundancia mineral en los flujos de lava del volcán Yololica. *Bomba del volcan Yololica.

Muestra	Vesicularidad	Mineralogía (% en roca densa)						Cristales (%)	Masa Fundamental (% en roca densa)		
		Ol			Pl				Fn+Mfn	Mc opacos	Vidrio
		Fn	Mfn	Mc	Fn	Mfn	Mc				
CHI-28-A	31.9	4.8	0.9	18.6	1.3	15.3	28.4	22.3	47	30.7	-
CHI-31-A	6	5.1	1.7	6.3	2.9	10.6	36.2	20.3	42.5	37.1	-
CHI-32-A1	19	2.8	0.8	13.5	2.3	14.3	27.9	20.2	41.4	38.5	-
CHI-203-B	1.6	3.8	1.9	14.1	0.4	8	49.8	14.1	63.9	22.2	-
CHI-209-A	9.4	3	2	12.4	0.6	7.3	49.8	12.9	62.2	24.8	-
CHI-210-A	10.8	2.8	1.6	5	1.3	9.3	51	15	56	29.1	-
CHI-35-A	74.5	2.1	1.8	1.1	3.2	9.3	11.8	16.4	12.9	1.8	68.9

Abreviaciones: Fn- fenocristal, Mfn- microfenocristal, Mc- microcristal, Ol- olivino, Pl- plagioclasa.

4.7. Geoquímica

Se analizó la composición química y mineralógica de los diferentes productos del área de estudio (El Arenal, Yololica, y Magdalena) y de posibles fuentes para el Arenal (Pelado, Xitle, Pómez Tutti Frutti) para caracterizar la diversidad composicional en el área, además de constreñir el origen de las cenizas del Arenal. Los limitantes de estos análisis de química total para la ceniza del Arenal, que contiene líticos, serán considerados en la sección de discusión.

Los productos del área presentan una variación composicional significativa en roca total en el diagrama TAS (Figura 40). La ceniza del Arenal muestreada en el Ecoparque (CHI-100) y en el sitio más distal (CHI-203-A) tienen una composición total andesítica muy similar. Por otra parte, las lavas y la tefra del Volcán Yololica son de composición andesita basáltica y la lava del Cerro Magdalena es de composición dacítica. Los productos del Volcán Xitle presentan un rango composicional amplio, entre basalto, andesita basáltica, traqui-basalto y traqui-andesita basáltica (Figura 40). La composición de los productos del Volcán Pelado se distingue en basaltos y andesitas basálticas para la tefra inferior, andesita basáltica y andesítica para las lavas, y andesítica a dacítica para la tefra superior (Figura 40). La pómez Tutti Frutti es de composición andesítica (Figura 40).

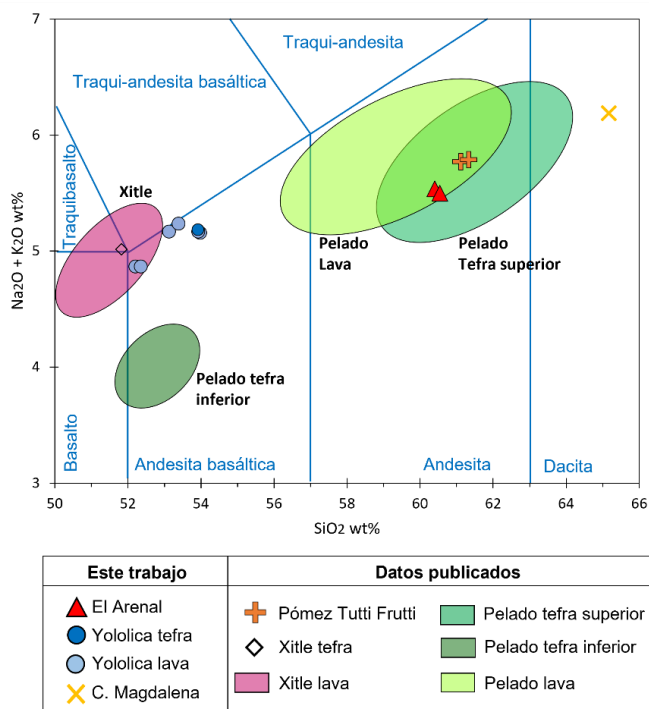


Figura 40. Diagrama de álcalis (Na_2O+K_2O) vs sílice (SiO_2) de Le Bas et al. (1986) para la clasificación química de los productos volcánicos del área de estudio. Los polígonos corresponden a rangos de la composición de los productos de la lava del volcán Xitle de Boland (1996), la de los productos del volcán Pelado de Lorenzo-Merino (2016) y Siebe et al. (2003), la composición de la pómez Tutti Frutti de Sosa-Ceballos et al. (2012), y la de la tefra del volcán Xitle de Guilbaud (Comunicación personal, 2023).

En cuanto a otros elementos mayores, los productos del volcán Yololica y del volcán Xitle tienen un contenido similar (Figura 41, Tabla 6). La tefra inferior del volcán Pelado tiene contenidos relativamente bajos de FeO, P₂O₅, K₂O, y TiO₂. La lava del Cerro Magdalena, las lavas y la tefra superior del volcán Pelado tienen altos contenidos de K₂O. Por su parte, la pómez Tutti Frutti tiene bajo contenido en FeO y TiO₂, y medio en CaO, MgO y K₂O. Las cenizas del Arenal tienen una composición similar a la pómez Tutti Frutti, y a la tefra superior del volcán Pelado (Figura 41).

Tabla 6. Composición geoquímica de los productos volcánicos estudiados.

Producto	Yololica lava						Yololica tefra	C. Magdalena	Ceniza Arenal	
Muestra	CHI-28-D	CHI-203-B	CHI-209-A	CHI-210-A	CHI-31-C	CHI-49-I	CHI-49-E	CHI-38-B	CHI-100-A	CHI-203-A
Oxidos mayores (porcentaje en peso)										
SiO ₂	53.82	53.77	52.97	53.23	52.05	52.20	53.75	64.97	60.22	60.36
Al ₂ O ₃	16.69	16.45	16.14	16.56	16.27	16.62	16.24	16.92	16.51	16.26
FeO	8.59	8.65	8.58	8.67	8.75	8.85	8.16	3.28	5.66	5.67
MnO	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.14	0.06	0.10	0.10
MgO	5.97	6.08	6.07	5.83	6.70	6.79	5.90	1.26	4.67	4.72
CaO	7.04	7.06	7.01	7.11	7.60	7.66	7.26	3.62	5.30	5.27
Na ₂ O	3.64	3.69	3.72	3.68	3.63	3.61	3.78	4.05	3.90	3.87
K ₂ O	1.50	1.46	1.43	1.54	1.22	1.24	1.39	2.12	1.62	1.61
TiO ₂	1.71	1.69	1.76	1.72	1.74	1.70	1.72	0.51	0.96	0.96
P ₂ O ₅	0.59	0.61	0.62	0.63	0.52	0.52	0.61	0.15	0.26	0.24
Total	99.70	99.60	98.45	99.13	98.62	99.34	98.96	96.95	99.20	99.06
Elementos traza (ppm)										
Au	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Ag	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	0.7	< 0.5	< 0.5	< 0.5
As	2	< 1	< 1	2	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Ba	475	470	465	504	354	364	459	456	506	502
Be	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Bi	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.2	< 0.1	< 0.1
Br	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Cd	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Co	29	28.2	27.6	27.5	32	31	28.2	7.4	20.4	20.2
Cr	173	175	173	168	203	196	191	13.3	173	177
Cs	1	1	1	1	0.9	0.9	0.9	2.4	1.2	1.3
Cu	26	25	25	24	29	29	27	11	18	23
Ga	19	18	20	19	18	18	18	19	18	18
Ge	1.3	1.2	1.4	1.3	1.4	1.2	1.8	1	1.1	1.2
Hf	6.3	5.8	6.2	6	5.3	5.1	5.3	3.4	4.3	4.3
Hg	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
In	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	< 0.0	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Ir	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 0	< 1	< 1	< 1

Mo	2	2	2	2	2	<2	<1	<2	<2	<2
Nb	21.8	21.1	22	21.9	18.3	17.6	20.9	3.6	8.8	8.3
Ni	86	87	88	74	99	102	86	9	87	89
Pb	6	6	8	7	<5	6	<5	8	10	10
Rb	31	30	29	31	25	25	28	44	36	36
S	0.006	0.008	0.005	0.004	0.01	0.007	-	0.003	0.003	0.003
Sb	0.3	0.3	0.4	<0.1	0.6	<0.1	-	0.4	0.3	0.2
Sc	21.6	21.3	21	21.9	23.7	22.9	19.3	6.19	14	14.1
Se	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Sn	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1
Sr	512	499	504	510	476	481	501	468	485	482
Ta	1.28	1.21	1.36	1.21	1.18	1.02	1.33	0.32	0.53	0.56
Th	3.2	3.06	3.19	3.27	2.6	2.52	3.19	4.04	3.67	3.64
U	1.02	1	0.98	1.04	0.8	0.84	1.06	1.35	1.16	1.15
V	152	150	157	152	168	163	164	46	98	97
W	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Y	31	31	29	33	29	29	30	13	18	18
Zn	94	93	94	95	88	92	80	64	82	80
Zr	317	310	305	333	258	272	276	159	205	202
La	30.9	30.5	30.3	32.5	24.2	25	27.9	16.2	21.3	21.2
Ce	66.3	65.3	65	68.6	52.8	53.8	59.5	32.6	43.3	43.7
Pr	8.31	8.19	8.22	8.52	6.75	6.89	7.53	3.99	5.39	5.32
Nd	36.5	34.3	34.9	36.6	29	30.3	30.7	16.7	21.8	22.4
Sm	7.25	7.19	7.29	7.36	6.36	6.4	6.46	3.24	4.46	4.32
Eu	2.2	2.13	2.27	2.18	1.97	1.92	1.99	0.885	1.26	1.3
Gd	6.75	6.33	6.8	6.54	5.99	5.82	5.94	2.63	3.92	3.83
Tb	1.05	1.04	1.02	1.06	0.94	0.94	0.95	0.43	0.58	0.58
Dy	6.24	5.92	6.36	6.1	5.81	5.54	5.49	2.35	3.52	3.38
Ho	1.19	1.14	1.19	1.15	1.09	1.04	-	0.45	0.65	0.66
Er	3.39	3.26	3.3	3.24	3.13	2.96	2.94	1.27	1.8	1.85
Tl	0.09	0.15	0.11	0.11	0.05	0.12	0.17	0.39	0.22	0.2
Tm	0.474	0.436	0.461	0.452	0.43	0.425	0.444	0.184	0.254	0.255
Yb	2.98	2.94	3	2.99	2.85	2.59	2.9	1.19	1.65	1.57
Lu	0.468	0.463	0.458	0.471	0.469	0.389	0.457	0.175	0.253	0.252

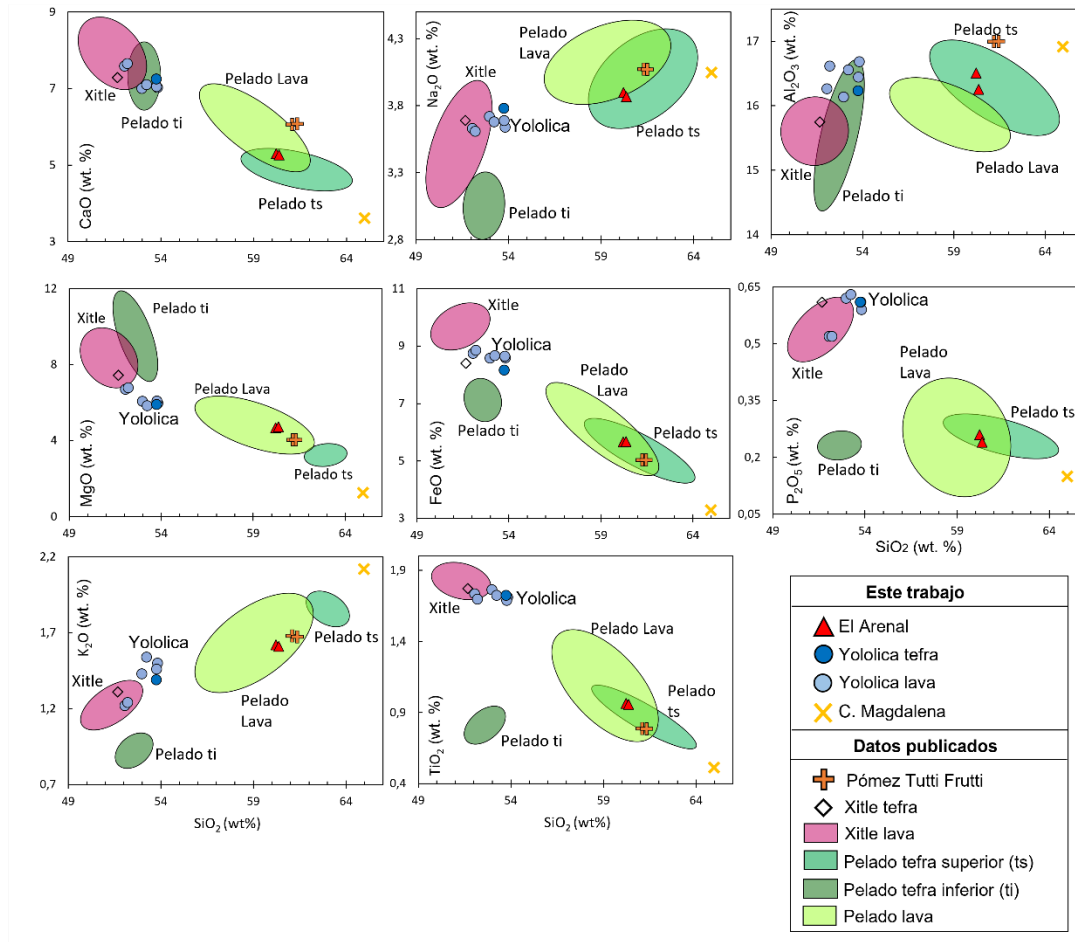


Figura 41. Diagramas de variación de SiO_2 vs óxidos mayores en los productos volcánicos del área de estudio.

De forma general para la composición de elementos traza (Tabla 6), los productos analizados en el área de estudio presentan enriquecimiento en elementos litófilos de ion grande (LILES: Cs, Rb, Ba, Th, U, Sr, Pb, La, Ce) en comparación con los valores del manto primitivo (McDonough & Sun, 1995). Particularmente sobresalen anomalías negativas de Nb, Ta, P y Ti en la ceniza del arenal, la lava del Cerro Magdalena y las tefras del Pelado, y positivas de Pb en la ceniza del Arenal, los productos del Pelado, la lava del Cerro Magdalena y la lava Yololica, a la vez que resalta la anomalía negativa de Pb en la tefra Yololica (Figura 42).

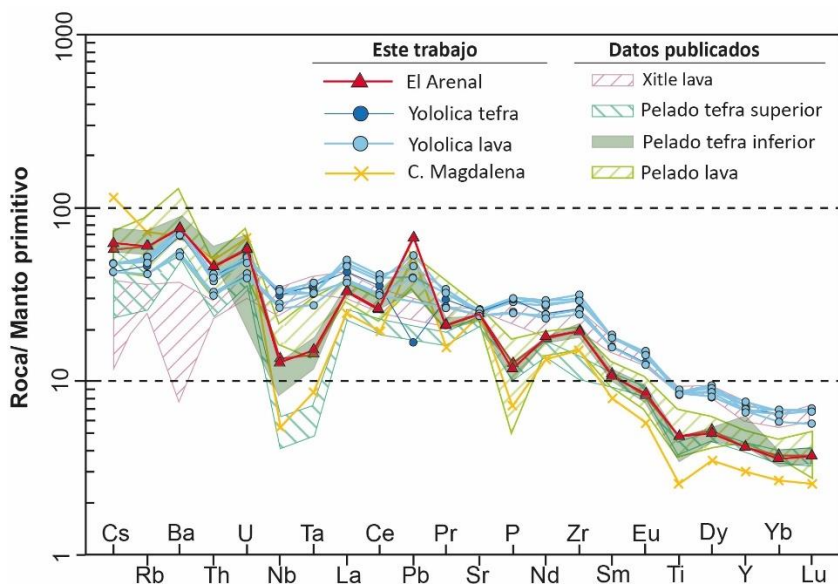


Figura 42. Diagrama de la abundancia de elementos traza normalizados a los valores de composición del manto primitivo (McDonough & Sun, 1995).

Los productos del área se distinguen en los diagramas binarios de Yb vs Ba, Nd vs Ni, Eu vs Zr y Dy vs Cr (Figura 43). Los productos de los volcanes Xitle y Yololica tienen altos contenidos relativos de Yb, Nd, Eu y Dy. Las cenizas del Arenal tienen bajos contenidos de Yb y Dy, al igual que la tefra Pelado superior (Figura 43). La tefra inferior se distingue por un mayor contenido de Ni y Cr.

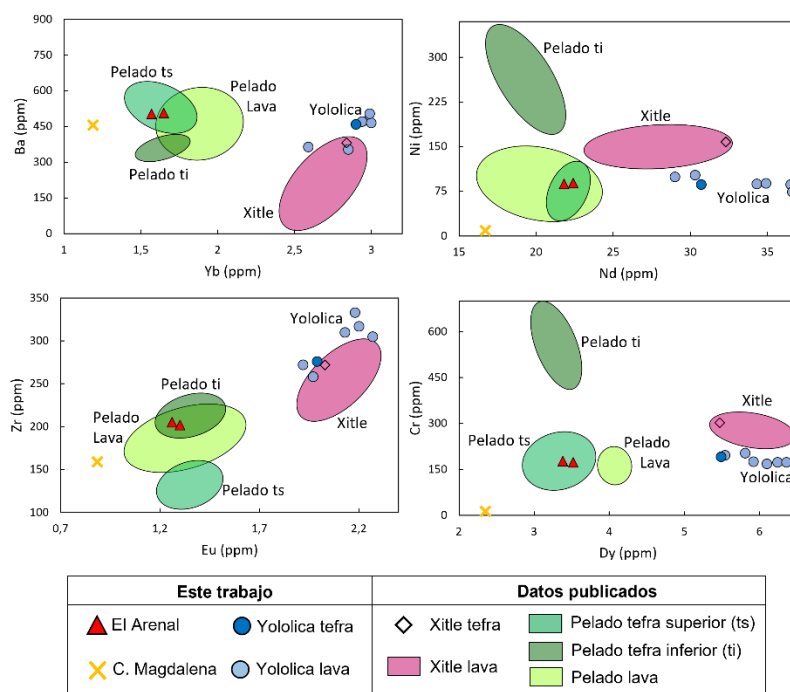


Figura 43. Contenido de elementos traza (Yb vs Ba, Nd vs Ni, Eu vs Zr, Dy vs Cr) en los productos volcánicos del área de estudio.

4.8. Química mineral

Para aportar otros elementos en la comparación entre los productos del área de estudio y considerando la posible contaminación de la ceniza del Ecoparque por líticos (el cual afectaría su composición total), realizamos el análisis de algunas fases de minerales presentes en los productos.

Olivino

El olivino es la fase en común entre los productos del área de estudio, por lo cual es particularmente útil su análisis. Se obtuvo que los olivinos de la lava Yololica son los que tienen los menores contenidos de forsterita (Fo57 - Fo79), mientras que aquellos contenidos en la ceniza del Arenal tienen entre Fo78-79, lo que coincide con el rango de forsterita de los olivinos de la tefra Yololica (Fo73 - Fo80), y la tefra Pelado superior (Fo72 - Fo79) (Figura 44). En contraste, los olivinos de las tefras Xitle y Pelado inferior tienen mayores contenidos de forsterita, con Fo81-87 y Fo85-89, respectivamente, algunos de estos cristales exhiben zonación normal levemente desarrollada, marcada por mayor contenido de Mg y por lo tanto mayor Fo%.

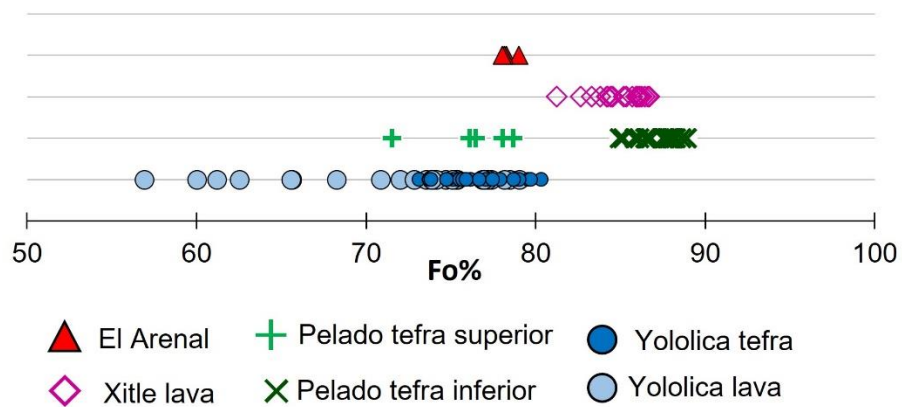


Figura 44. Composición de los cristales de olivino contenidos en los productos volcánicos del área de estudio. A. Contenido de forsterita.

Dada la similitud en la composición total así como en los olivinos en la ceniza del Arenal y la tefra Pelado superior, se analizó la composición de los cristales de plagioclasa y piroxeno que son los minerales más abundantes en ambos depósitos, con el fin de comprobar la afinidad entre ambos productos.

Plagioclasa

La composición mineral de los cristales de plagioclasa en la ceniza del Arenal y la tefra Pelado superior corresponde principalmente a labradorita, con rangos de An43-63 y An49-63, respectivamente (Figura 45). En ambos depósitos, las mediciones realizadas en centro y borde indican una composición homogénea en los cristales, careciendo de zonación.

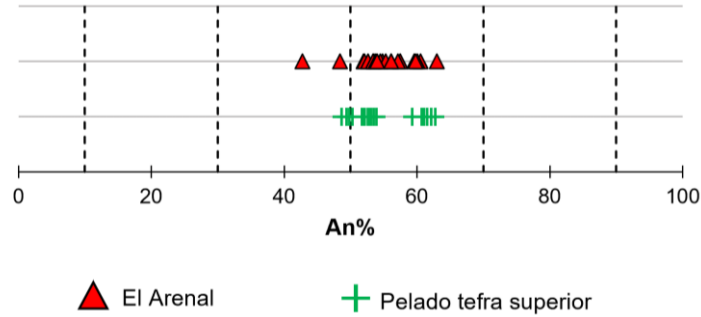


Figura 45. Contenido de anortita en los cristales de plagioclase contenidos en las cenizas del Arenal y la tefra superior del volcán Pelado.

Piroxeno

Los cristales de piroxeno en ambos depósitos son ortopiroxenos tipo enstatita. Cubren un rango composicional similar con valores de Mg# de 73-83 para el Arenal y de 71-81 para la unidad Pelado tefra superior (Figura 46). Algunos de los cristales analizados en ambos depósitos de tefra presentan un patrón de zonación similar, caracterizado en la imagen de electrones retrodispersados por 3 zonas de coloración diferente y con transición difusa entre ellas (Figura 47). Estos cristales contienen un núcleo interno de forma irregular y de coloración clara en la imagen, con relativamente bajo Mg# que fue medido a 77 en un cristal de la unidad Pelado tefra superior, 2) una zona media de color más oscuro, con Mg# medido en 82 para el Arenal y 80 para la tefra superior, y 3) un borde de color claro que fue medido con un Mg# de 77 en ceniza del Arenal, en donde su grosor es mayor que para la unidad Pelado tefra superior.

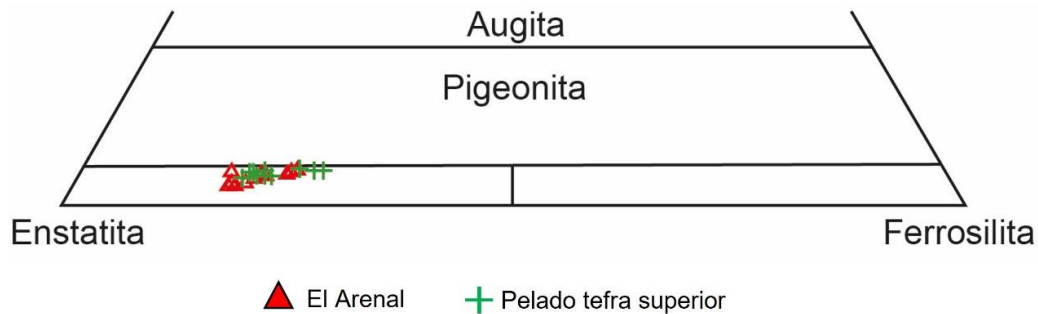


Figura 46. A. Clasificación de los cristales de piroxeno contenidos en las cenizas del Arenal y la tefra superior del volcán Pelado.

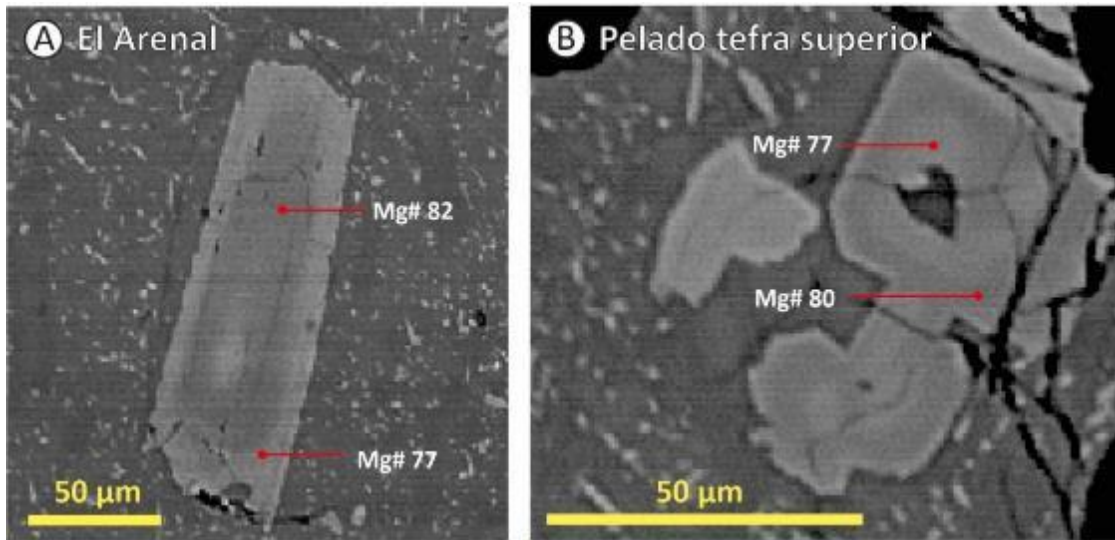


Figura 47. Fotomicrografías por difracción de electrones de retrodispersión de los cristales de piroxeno con zonación. A. Ceniza del Arenal (muestra CHI-100-B). B. Tefra superior del volcán Pelado (muestra CHI-25-C).

5. Discusión

5.1. Origen del depósito El Arenal

Los estudios geológicos presentados muestran que la ceniza presente en el Ecoparque tiene un origen y modo de deposición que son sumamente más complejos que los que se habían considerados en trabajos previos. Los resultados indican que estos depósitos ocupan un área relativamente amplia, que abarca desde el Ecoparque hasta una distancia de 1 km al norte del Cerro Magdalena (Figuras 6, 7), y que topográficamente se ubican bajo este. Es importante mencionar que en una última salida de campo realizada se encontraron depósitos similares, ca. 4 km al sur del Ecoparque, suprayaciendo flujos de lava del volcán Pelado (Figura 6), lo que sugiere que deben tener una distribución aún más amplia, lo cual debería ser considerado para trabajos posteriores.

Los análisis sedimentológicos confirman la buena clasificación del depósito de ceniza (Figura 26), así como su homogeneidad en cuanto a su granulometría y composicional (Figuras 26 y 31). Además, no existen cambios significativos en secciones verticales en el depósito (Figuras 8-14, Figura 25), lo cual implica que estos productos deben haberse depositado durante un periodo de tiempo continuo, y lo más probable es que tengan un origen único. Ahora bien, mediante el análisis de componentes se determinó que la ceniza del Ecoparque esta compuesta por dos tipos de fragmentos según su origen (Figura 34). El componente principal es de naturaleza juvenil (clastos frescos) y esta compuesto por sideromelana y taquilita, ambos con una composición mineralógica similar, que deben provenir de la erupción de un volcán de tipo cono de escoria. La frescura de los clastos sugiere que fueron removilizados poco después de su formación. El segundo componente es de

naturaleza lítica, dada la redondez y grado de alteración de los clastos, y está compuesto por pómez y líticos densos graníticos, lo cual sugiere que proviene de un depósito más antiguo producido por la erupción de un estratovolcán. Con base en la mezcla homogénea de estos dos componentes, se infiere que estos productos fueron mezclados durante su transporte, para luego ser depositado juntos. El relativo grosor y espesor de los depósitos indica que la fuente de ambos componentes debe ubicarse en proximidad del Ecoparque, es decir hasta unos kilómetros de este. En lo siguiente, se discute en primera instancia el origen del componente juvenil principal del depósito antes de discutir lo del origen del componente lítico.

5.1.1. Fuente del componente juvenil

El Volcán Yololica es considerado por Cervantes y Molinero (1995) como la fuente de la ceniza del Ecoparque, debido a la cercanía de éste al volcán y a la aparente similitud entre la tefra del Yololica y la ceniza del Arenal. A pesar de esto, es posible descartar que el componente juvenil de la ceniza del Ecoparque provenga del volcán Yololica, en principio debido a que la granulometría de la ceniza es más homogénea, con mejor clasificación que la tefra Yololica, además de la diferencia en los fragmentos que componen los depósitos, dado que la ceniza del Ecoparque contiene una proporción importante de fragmentos juveniles densos (taquilita densa) que no han sido observados en la tefra Yololica. Además, los fragmentos de esta tefra contienen una proporción considerable de olivinos que son escasos en el Arenal mientras este último contiene piroxenos que son ausentes en la tefra Yololica.

El Volcán Xitle es considerado por la comunidad (según los blogs y videoblogs, Figura 2) como la fuente de la ceniza del Arenal, probablemente por ser el más conocido en la zona. Sin embargo, las características de la tefra del Volcán Xitle, tanto en su composición de roca total significativamente más máfica que el Arenal (Figura 41) como en su composición mineralógica dominada por olivinos con alto Fo%, permiten descartar esta hipótesis (Figura 44). Cabe notar que la composición total del Arenal sin duda debe de estar afectada por la ocurrencia de líticos, sin embargo, el contenido relativamente bajo de ellos (< 20 wt%) significa que la modificación en composición que estos implican es relativamente baja y puede ser descartada en una primera aproximación.

Luego de descartar el volcán tipo de escoria más cercano al Ecoparque (Yololica) y el volcán más reciente al área y más cercano (Xitle), se consideró el Volcán Pelado como posible fuente, por ser el segundo volcán más joven en el área, y debido a la observación de depósitos de caída de este volcán en el área cercana (Figura 28), lo cual confirma el eje de dispersión de sus productos hacia el área del Ecoparque (Lorenzo-Merino et al. 2018, Figura 6). El Volcán Pelado produjo una secuencia importante de depósitos de cenizas de caída durante su erupción. La primera parte (tefra Pelado inferior) fue producida por un evento inicial de la erupción y es relativamente pequeña en su espesor y volumen estimado (Lorenzo-Merino et al. 2018). Sus características son

bastante máficas, con una composición básaltica, abundancia de sideromelana y olivinos, y más parecidas a los productos del Xitle y del Yololica (aunque se diferencian en composición total de elementos menores y traza - Figuras 34, 40, 41, 43, 44), por lo cual se descarta que pueda ser la que formó la ceniza del Ecoparque.

En contraste con lo anterior, la tefra superior del volcán Pelado presenta múltiples similitudes con el componente juvenil de la ceniza del Arenal. Los fragmentos juveniles de ambos depósitos tienen una composición mineralógica de olivino, piroxeno y plagioclasa muy similar, con cristales con texturas y rangos de composición muy parecidos (Figura 44, 45, 46). La componentría de estos depósitos también es similar, teniendo en cuenta que Lorenzo-Merino et al (2018) describe la tefra Pelado superior como ceniza media a fina con buena clasificación, compuesta principalmente por taquilita y fragmentos densos, y en menor proporción sideromelana, similar a lo observado para el componente juvenil del Arenal (Figuras 30 y 31). Es notable que la tefra Pelado superior forma una secuencia muy espesa de depósitos, mucho más importante que la tefra inferior, y que éstos presentan una notable homogeneidad y bajo grado de endurecimiento que les hace particularmente susceptible a ser removilizados. Todo esto permite interpretar que la fuente del componente juvenil de los depósitos de ceniza corresponde al volcán Pelado, específicamente la tefra superior.

5.1.2 Fuente del componente lítico de la ceniza del Ecoparque

El componente lítico de la ceniza del Ecoparque es relativamente menor (Figura 11) pero destacable. Éste se compone por fragmentos redondeados y alterados de pómez y líticos densos graníticos, que son productos típicamente asociados a estratovolcanes, además de cristales sueltos de anfíbol que están escasos en los volcanes monogénicos de la Sierra Chichinautzin. Dado el tamaño de los fragmentos, se puede pensar que su fuente es poco lejana y que depósitos de caída similares deben estar presentes en el área aledaña. Los depósitos de Pómez Tutti Frutti presentan características similares, en cuanto al aspecto de los fragmentos, y han sido encontrados en toda la Sierra Chichinautzin, además estos fueron identificados en una sección cerca del Ecoparque (Figura 23A, Figura 27), por lo cual se propone que representan el componente lítico de la ceniza del Arenal.

En resumen, los resultados de este estudio apuntan a que el Arenal es una mezcla de fragmentos de ceniza de la tefra superior del volcán Pelado, con fragmentos de pómez Tutti Frutti del volcán Popocatepetl. Cabe notar que esta interpretación es coherente con la composición total de la ceniza del Arenal que se asemeja a la de sus dos componentes principales, la tefra Pelado superior y la pómez Tutti Frutti. Aunque, es posible que la ceniza del Ecoparque incorporó fragmentos de otros depósitos pero éstos estarían en proporción menores.

5.2. Procesos de deposición

Inicialmente se compararon las características observadas en los arenales con depósitos de caída, determinando que no corresponden a estos, ya que los depósitos de caída se caracterizan por presentar horizontalidad, continuidad lateral, disminución del espesor con el aumento de la distancia a la fuente, y suelen tener agradación en función de la deposición (Valentine & Fisher, 2000; Cas & Wright, 2012). A diferencia de esto, el Arenal es discontinuo lateralmente, su espesor varía sin relación a la distancia al volcán Pelado, y su estratificación presenta inclinación en dirección de la pendiente. Estos aspectos, así como la variación en la estratificación entre ausente, tabular y cruzada, la predominancia de una buena clasificación de partículas con tamaño medio-fino (1 – 4 phi), y la presencia de líticos accidentales asociados a una fuente volcánica lejana (i.e. Volcán Popocatepetl), implican la acción de procesos de removilización en la formación de los depósitos de ceniza (Smith & Katzman, 1991; Németh & Cronin, 2007; Domínguez et al., 2020). En un principio se consideró que los depósitos de ceniza podrían haberse originado por el deslizamiento de depósitos de caída dispuestos sobre la parte alta de la ladera del Cerro Magdalena, pero la eficiente mezcla entre los componentes juveniles y líticos, así como la diferencia de tamaño de grano entre el componente principal juvenil del depósito y de los depósitos de caída encontrados en un corte (sección CHI-208) cerca a la base del Cerro Magdalena, sugiere que los depósitos tienen una fuente distinta y procesos de removilización que implican eventos recurrentes de transporte, dado que presentan laminación, tienen buena clasificación y sus fragmentos presentan cierto grado de redondez.

Los depósitos de removilización syn- y post-eruptivos de ceniza pueden resultar de la erosión por medio de procesos eólicos o hídricos. Ambos tipos de procesos han sido observados en conos de escoria. Por ejemplo, durante la erupción del volcán Parícutín se documentaron procesos de erosión (Segerstrom, 1950) que generaron depósitos removilizados interestratificados con capas de caída de ceniza primarias, tanto eólicos con estratificación cruzada y formación de dunas, como hídricos con desarrollo de canales (Bolós et al., 2021). Asimismo, en el Volcán Las Cabras en Michoacán se encontraron depósitos endurecidos, con estructuras en canales, que sugieren principalmente procesos de re-deposición hídrica (Guilbaud et al., 2021a). En el caso del Arenal, la estratificación cruzada observada en los depósitos (Figuras 11 y 12), la predominancia de depósitos clasto-soportados con buena clasificación (Figura 26), compuestos por partículas finas, y la morfología de dunas observada en fotografías aéreas antiguas (Figura 15) indican principalmente procesos de transporte eólico. Además, la ubicación del Arenal en la pendiente pronunciada del Cerro Magdalena, la ausencia de estructuras en canales y la falta de matriz en los depósitos permite descartar que el agente principal de deposición fuera el agua.

Es conveniente discutir el mecanismo de transporte eólico. Se distinguen tres tipos: 1) suspensión, las partículas más finas (> 4 phi) se mantienen suspendidas en la parte alta por grandes distancias; 2) saltación, las partículas

de tamaño medio ($4 - 1 \phi$) que rebotan o saltan en superficie siguiendo trayectorias parabólicas largas, durante el rebote pueden alcanzar alturas suficientes para ser acelerados de nuevo por el viento; 3) reptación, las partículas de mayor tamaño ($> 1 \phi$) ruedan por empuje en contacto permanente con la superficie, porque su peso les impide ser levantadas por el viento (Nickling & Neuman, 2009). En contextos volcánicos, el transporte y deposición eólico son procesos intermitentes, dominados por saltación de partículas de ceniza, cuya duración depende de la disponibilidad de material suelto acumulado, la densidad, tamaño y forma de las partículas, las propiedades topográficas y las condiciones meteorológicas (Domínguez et al., 2020). Estas últimas están determinadas por vientos superficiales fuertes que permitan levantar y transportar las partículas, así como baja precipitación y variación en la temperatura superficial diurna, donde la radiación solar disminuye la humedad del suelo (Shao, 2008; Jarvis et al., 2020). El principal medio de transporte eólico que permite grandes tasas de erosión y deposición son las tormentas de ceniza (Domínguez et al., 2020), eventos de re-suspensión y removilización de ceniza que ocurren por condiciones específicas de vientos fuertes, baja humedad del suelo y falta de vegetación (Forte et al., 2018). Este tipo de tormentas han sido registradas durante varios eventos eruptivos, como la erupción del volcán Parícutín en 1943 en México (Bolós et al., 2021), la del Mt. Hudson en 1995 en Chile (Bitschene, 1991), y la del volcán Eyjafjallajökull de 2010 en Islandia (Arnalds et al., 2013), para esta última, caracterizada por la emisión de 0.27 km^3 de tefra, se estimó una tasa de transporte de material cercana a $11,800 \text{ kg/m}$ durante los 5 meses posteriores a la erupción, con vientos de hasta 38.7 m/s y episodios de hasta 6.5 horas (Arnalds et al., 2013).

En la zona de estudio, la removilización de las partículas se habría dado principalmente por saltación durante tormentas de ceniza, evidenciado en el tamaño medio de la ceniza de los depósitos, sin embargo, no se descarta que también se removilizaran partículas en suspensión durante estos eventos, pero debido a que la presencia de partículas de tamaño muy fino ($> 4 \phi$) en los depósitos es menor al 5%, esta fracción pudo haberse erosionado con gran facilidad, o su deposición pudo haberse concentrado en zonas más distales. La formación de tormentas de ceniza se habría favorecido por altas velocidades del viento, generadas localmente en zonas montañosas o de topografía compleja, que permiten la dispersión de material a mayores distancias de su fuente (Arnalds et al., 2013, Watt et al., 2015). La configuración topográfica del área se caracteriza por cambios en cortas distancias, marcados por una zona de valle entre el volcán Pelado y el volcán Oyameyo que está interrumpida por los edificios del volcán Yololica y el Cerro Magdalena hacia el norte (Figura 48). Estos últimos funcionan como barreras que pueden generar ondas de gravedad, caracterizadas por un flujo turbulento de viento, que al intentar atravesar estructuras aisladas se divide en zonas de estancamiento, aceleración, desaceleración, con erosión en los laterales del obstáculo, y deposición en el barlovento y sotavento (Figura 49), formándose dunas eco (*echo dunes*) y dunas sombra (*shadow dunes*), respectivamente (Tsoar, 2001; Poulidis et al., 2017; Zhao & Gao, 2021). El modelo de formación de una duna sombra explica la formación del Arenal, teniendo en cuenta que el material fue transportado desde el volcán Pelado, lo que implica una dirección del viento norte o noroeste

que al intentar atravesar el relieve del Cerro Magdalena, causa la acumulación de ceniza en su ladera sotavento. En cuanto a las condiciones de superficie previo a la erupción del volcán Pelado, Guilbaud et al. (2022) interpretan la predominancia de terreno descubierto con escasa vegetación, debido a la presencia de paleosuelos erosionados y con poca materia orgánica, condiciones que no fueron modificadas por la erupción, así como un clima frío y seco en el Valle de México, lo cual es consistente con la ocurrencia de vientos fuertes y eventos erosivos de removilización, dada también la disponibilidad y acumulación de ceniza en superficie durante y después de la erupción.

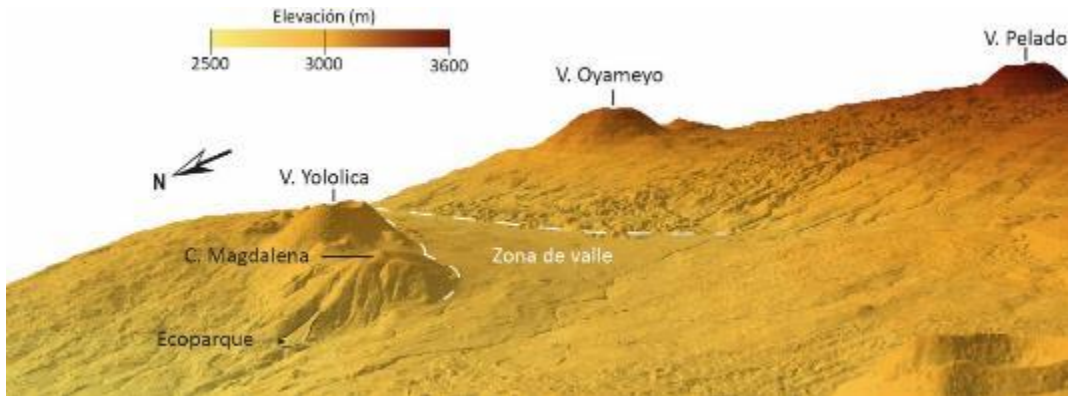


Figura 48. Modelo 3D de la topografía de la zona a partir del modelo digital de elevación obtenido de imágenes Lidar (Fuente: INEGI), con exageración vertical de 1.5.

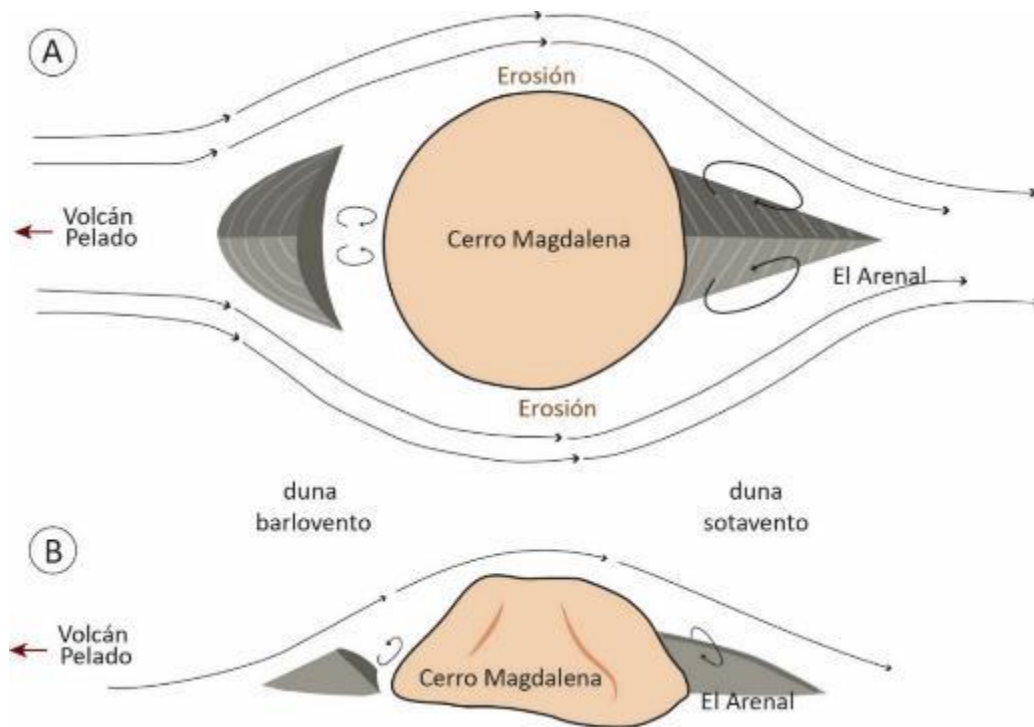


Figura 49. Modelo de formación de dunas en el barlovento y sotavento de obstáculos topográficos adecuado a la formación del Arenal en el sotavento del Cerro Magdalena. A. Vista superior. B. Vista de perfil. Tomado y modificado de Tsoar 2001 y Zhao & Gao, 2021.

5.2.1. Edad

Dado que la ceniza del Arenal contiene fragmentos de la tefra superior del volcán Pelado, este depósito se debió haber formado después de esta erupción, es decir hace menos de 12,000 años cal AP (Siebe et al., 2004b; Guilbaud et al., 2022). Además, se observó que las lavas del volcán Xitle cubren depósitos del Arenal, lo que indica que su deposición ocurrió antes de 1,700 años cal AP (Siebe, 2000). Sin embargo, es más probable que los procesos de erosión y removilización hayan empezado justo después de la erupción, antes del desarrollo de la vegetación en la zona, y que continúan hasta la fecha.

5.3. Historia vulcanológica de la zona

De acuerdo con las relaciones estratigráficas y la cartografía de los productos volcánicos de la zona de estudio, se reconstruye la evolución vulcanológica (Figura 50):

I. El primer evento corresponde a la formación y extrusión del domo Magdalena, cuya edad se desconoce, pero podría estar relacionada al vulcanismo que dio origen a los domos cercanos, tanto a los domos de la ciclopista, cuya edad también es desconocida, como a los domos Xochitepec y Santa Mónica, de edades 1.23 y 1.66 Ma (Arce et al., 2015). Teniendo en cuenta que el Magdalena se encuentra menos erosionado que los dos últimos domos mencionados, se infiere que tiene una edad menor, aproximada a 1 Ma, sin embargo, para tener un dato más preciso se sugiere realizar estudios más detallados de fechamiento de esta unidad mediante métodos analíticos.

II. Erupción y formación del volcán Yololica. Los montículos observados a la base del cono podrían haberse formado por el colapso de su flanco sureste, causado por inestabilidad gravitacional o por rafting, el cual ocurre cuando algunos segmentos del cono son arancados y transportados por flujos de lava en emisión (Valentine & Gregg, 2008). La presencia de aglomerados de escoria (spatter) y bloques de lava en estos depósitos (Figuras 17 y 22C) indican un episodio de crecimiento del cono predominantemente por actividad efusiva y de baja explosividad, probablemente con la formación de una fuente de lava. No se observó la relación entre los depósitos de bloques y los flujos de lava sobre los que se encuentran estos, por lo cual no se pudo comprobar si se formaron por rafting o por un evento de avalancha, sugerido por la presencia de estructuras en rompecabeza. Este episodio puede asemejarse a la fase inicial de la erupción de Cumbre Vieja 2021, en la que se observaron altas tasas de emisión de lava y tefra, permitiendo una construcción rápida del cono, el cual colapsó menos de una semana después de su formación, por inestabilidad en el edificio asociada a una alta tasa eruptiva y al rápido crecimiento (Romero et al., 2022). La presencia de una capa basal de lapilli, bajo flujos de lava (Sección CHI-200, Figura 20) de la zona media-distal, podría indicar un episodio inicial explosivo, pero dado que no se observó la misma relación estratigráfica en otras zonas, esto podría deberse a que el flujo de lava tipo 'A' tardó más en llegar a la parte

media-distal, permitiendo que el lapilli, aunque se emitiera simultáneamente o después, se depositara justo antes del flujo de lava. El final de la erupción estuvo marcado por la emisión de tefra, concentrada hacia el noroeste, interpretado por la alternancia entre capas de lapilli y ceniza en la parte superior de la secuencia, sobre flujos de lava (secciones CHI-31 y CHI-49, Figura 22A, B). Esta emisión de tefra permitiría la reconstrucción del cono, parcialmente destruido por el colapso, lo que explica que en la actualidad presente una forma casi simétrica y sin cicatriz de colapso (Figura 17A).

Para este evento se estima una edad mínima aproximada de 22,000 años cal AP, obtenida mediante datación por C^{14} de una muestra de paleosuelo y una muestra de fragmentos de carbón contenidos en dicho paleosuelo bajo la tefra Yololica. Cabe mencionar que también se obtuvo una edad de aproximadamente 9000 años cal AP en un paleosuelo bajo la capa de ceniza basal del Yololica, que está cubierta por un flujo de lava, pero se descartó este dato, ya que la relación estratigráfica observada en la sección CHI-208 indica que la erupción del Yololica ocurrió antes que la erupción Tutti Frutti, es decir que es menor a 17,000 años cal AP.

III. Caída de ceniza de la erupción pliniana Tutti Frutti del volcán Popocatepetl, ocurrida hace aproximadamente 17,000 años cal AP, caracterizada por una fase inicial con erupciones cortas e intermitentes de ceniza gris y una fase principal posterior, con la emisión de pómez y líticos graníticos y metamórficos (Siebe et al., 1999; Sosa-Ceballos et al., 2012). Para dicha fase principal, Sosa-Ceballos et al. (2012) estiman un volumen emitido de 2.8 km^3 de tefra, con una altura de columna eruptiva de entre 37 y 44 km, que permitió la dispersión de tefra hacia el noreste, alcanzando distancias de 63 km del volcán, y formando depósitos de caída de entre 10 y 15 cm de espesor en la zona que hoy corresponde al sur de la Ciudad de México.

IV. Erupción y formación del volcán Pelado. Lorenzo-Merino et al. (2018) caracterizaron esta erupción como estromboliana violenta, con tres estadios, uno inicial con actividad explosiva que produjo los depósitos de caída de la tefra inferior, los cuales alcanzaron las laderas norte y este del Cerro Magdalena, evidenciado en las capas de 0.4 cm de este material en las secciones CHI-205 y CHI-208 (Figura 23). Seguido por un estadio intermedio en el cual se dio la emisión de lava de manera simultánea con actividad explosiva de mayor energía y fragmentación, con la formación de depósitos de ceniza de tamaño más fino respecto a la tefra inferior. La erupción culminó con un estadio marcado por actividad explosiva, que generó los depósitos de la tefra superior que alcanzaron a depositarse también en la zona norte y este del domo, como se observó en los depósitos de caída de 80 cm en las secciones ya mencionadas, y finalizando con actividad efusiva. La edad de este evento se ha estimado en 12,000 años cal AP (Siebe et al., 2004b; Guilbaud et al., 2022).

V. Formación del Arenal. Posterior a la última etapa explosiva del volcán Pelado, ocurrió el transporte de la ceniza en superficie por episodios de tormentas de ceniza, favorecidas por vientos fuertes en dirección norte o noreste, baja humedad en el suelo y falta de vegetación. La ocurrencia de tormentas sucesivas en un período corto de tiempo (< 6 meses?), sumado a la presencia del Cerro Magdalena como obstáculo topográfico, permitió la acumulación de ceniza en el sotavento del domo y la formación de una duna sombra en este. También se dio la formación de dunas de tipo linear y en barján (Figura 15), relacionadas a un régimen de viento unidireccional en terreno abierto (Zhao & Gao, 2021).

VI. Formación de los arenales distales (deslizamientos, viento y agua). En tiempos más recientes, se darían colapsos locales de la duna, posiblemente asociados a saturación superficial de agua en época de lluvias, como se ha descrito para dunas de arena (Stewart, 2020), este colapso es interpretado por los escarpes y las depresiones en corona observados en el Arenal de la foto aérea de 1973 (Figura 15). El colapso o múltiples colapsos causarían movimientos de remoción en escala local, con el deslizamiento de la ceniza en el sentido de la pendiente, y que ha sido y sigue siendo transportado por viento y agua, lo que explica el alcance y la acumulación de ceniza en diferentes zonas hacia el norte, con espesores menores que los depósitos de las zonas proximales al Ecoparque.

VII. Formación del volcán Xitle. Esta erupción, datada en 1,700 años cal AP, comenzó con actividad explosiva que formó el cono, seguida por una fase efusiva, con el flujo de lavas predominantemente hacia el noreste, aunque una parte se extendió hacia el sureste (Delgado et al., 1998; Siebe, 2000; Guilbaud et al., 2021b), donde cubrió una parte de los depósitos distales de los arenales, lo que se evidencia en la sección CHI-219 (Figura 13).

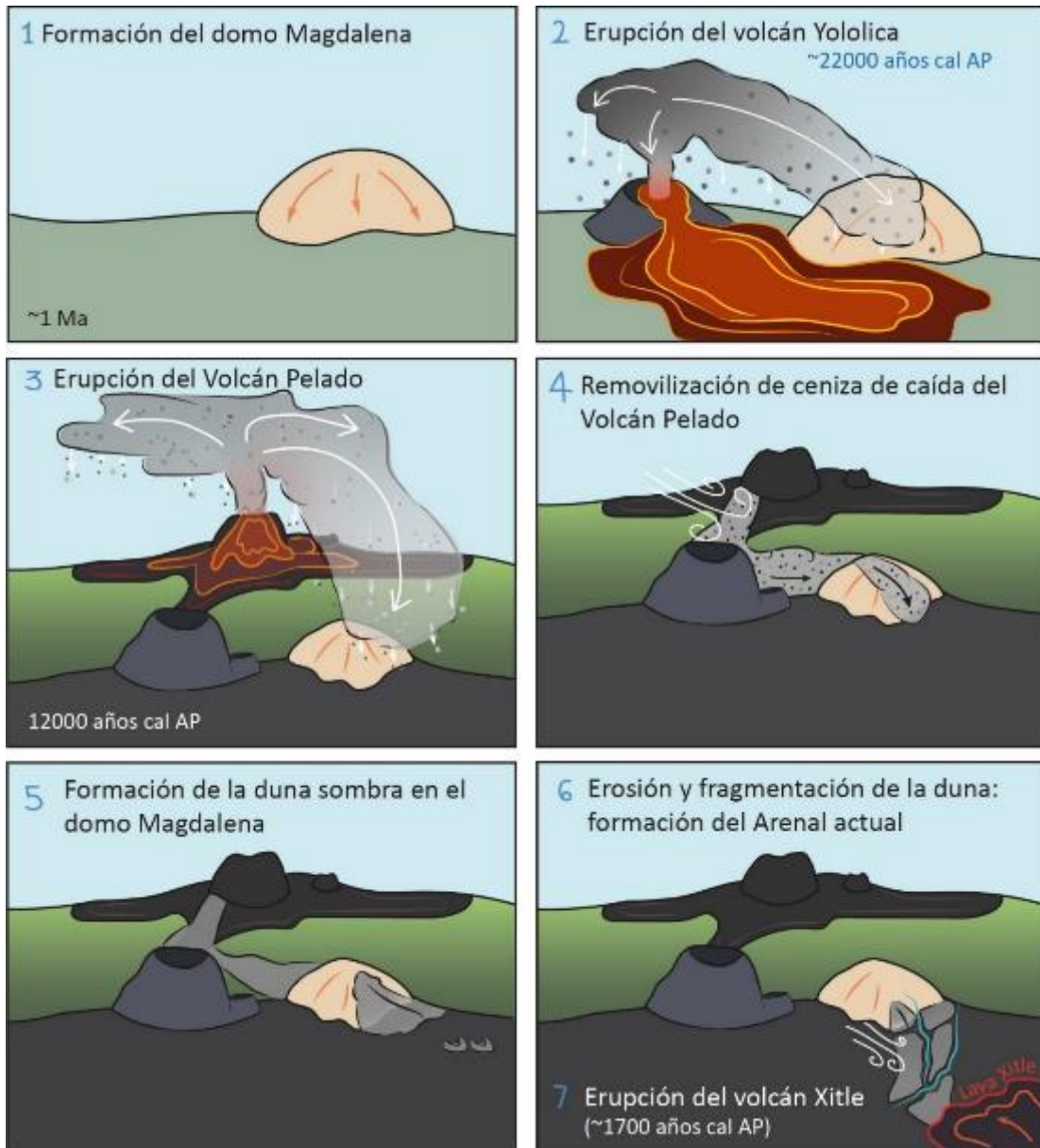


Figura 50. Modelo evolutivo del área de estudio.

CAPITULO 2: GEOPATRIMONIO EN EL ARENAL Y SU ÁREA ALEDAÑA

1. Marco teórico

Geopatrimonio y geoturismo

El término “**geodiversidad**” ha sido adoptado para referirse a la variedad de componentes abióticos en la naturaleza, equivalente al término “biodiversidad”, en un intento de la comunidad científica por promover la preservación de la diversidad geológica (Gray, 2004). Por otra parte, el término “**geopatrimonio**” hace referencia a sitios (geositios) y áreas en los cuales la geodiversidad tiene un valor científico destacado, asociado a un valor social y cultural que surge de la relación entre el paisaje y la historia de una comunidad que obtiene bienes y servicios de los elementos geológicos (Brilha, 2016; Gravis et al., 2020). El geopatrimonio se categoriza como urbano cuando los elementos geológicos sobresalientes se ubican en zonas urbanas o aledañas a centros urbanos, ubicación que conlleva al riesgo de degradación por actividad humana, que resulta en la modificación y destrucción de los valores bióticos y abióticos, dada la disminución de áreas naturales o seminaturales impactadas por la actividad humana, y que resulta en un gran reto de manejo, promoción y conservación (Reynard & Brilha, 2017; Vereb et al., 2020).

El riesgo de degradación antrópica de elementos geológicos está determinado por la combinación de dos tipos de factores, según Carcavilla et al. (2009) y García-Ortiz et al. (2014):

I) Vulnerabilidad o fragilidad, siendo la susceptibilidad de un elemento geológico a sufrir cambios debido a sus características intrínsecas, como su composición o textura (litología), por ejemplo, si el geositio tiene materiales atractivos para la población en general, como contenido fósil o minerales destacados, será más susceptible a la extracción de éste al ser visitado y por tanto a sufrir degradación.

II) Factores externos relacionados a la existencia de amenazas o estrés sobre los elementos geológicos, esto puede darse por modificaciones del estado del lugar por desarrollo local, con aspectos como la proximidad a poblaciones y/o sitios con actividades industriales o turísticas, el estado de protección o régimen de propiedad del lugar y la facilidad de acceso a este.

Como parte de las medidas de conservación se realiza el inventario y evaluación del geopatrimonio, con el fin de identificar los sitios vulnerables a la alteración o destrucción por acción humana. De forma general, estas medidas consisten en determinar el valor turístico, científico y educativo, para definir el uso potencial de los elementos geológicos que lo componen, y de esta forma poder adoptar una estrategia adecuada de manejo, protección y mejoría sobre el uso del geopatrimonio, así como la ejecución de actividades de promoción y concientización acerca de su valor geológico, turístico y/o cultural (Prosser, 2013; Brilha, 2016).

El concepto de “**geoturismo**” ha sido definido como un tipo de turismo de áreas en principio naturales, pero que pueden haber sido modificadas por la actividad humana, con elementos geológicos y/o geográficos de

diversos tamaños o escalas, con factores determinantes como su ambiente, cultura, estética del paisaje, patrimonio y bienestar de sus residentes (Newsome & Dowling, 2006). El geoturismo surge de la interacción entre tres elementos interpretativos: 1) Abióticos, tales como la geología y el clima, 2) Bióticos, conformados por la fauna y flora, la cual se desarrolla por los elementos abióticos, y 3) Culturales, dados los componentes humanos del pasado y presente (Dowling, 2013; Dowling & Newsome, 2018). La interpretación de los elementos geológicos ocurre desde el relieve y el paisaje, sus procesos de origen y el tiempo asociado a estos, lo cual le permite al residente o turista establecer una conexión con el ambiente y el entendimiento de la dimensión geológica del lugar (Dowling & Newsome, 2018). Este tipo de turismo puede llevarse a cabo mediante visitas independientes o guiadas a los lugares, y por lo tanto incluye varios aspectos claves para su desarrollo, como el transporte, acceso, acomodación, servicio, recreación, entrenamiento de personal, planeación y manejo, y aspectos que son determinantes para el crecimiento socioeconómico de las poblaciones ubicadas cerca o dentro del sitio geológico (Dowling, 2013). Los ingresos percibidos por la actividad turística deben promover la conservación tanto del sitio, como de la cultura e historia asociada a este, lo que se puede lograr con prácticas de manejo sustentable a través de la planeación, protección, conservación, interpretación interactiva, satisfacción del turista y el beneficio a la comunidad (Dowling & Newsome, 2018).

De esta manera, el geoturismo es una herramienta útil para promover la geoconservación y geoeducación, con el fin de proteger el geopatrimonio, pero también contribuye al desarrollo local sustentable, trayendo consigo beneficios económicos y sociales a nivel local, con la implementación de estrategias y programas que cuenten con apoyo y coordinación regional, incluyendo un monitoreo del impacto ambiental que trae la actividad turística en la zona (Gravis et al., 2020).

Dentro del turismo natural, los relieves y paisajes volcánicos son atracciones destacadas, dado el interés de las personas por estar cerca al poder de la naturaleza, siendo este uno de los beneficios que representan para la sociedad, además del desarrollo de actividades agrícolas, geotérmicas y mineras (Dóniz-Páez et al., 2014). El turismo volcánico involucra la visita no solo a volcanes activos, sino también a regiones volcánicas inactivas, las cuales permiten apreciar una perspectiva distinta de las sucesiones volcánicas y la transformación del relieve por procesos erosivos, convirtiendo estas zonas en un medio educativo excepcional para la divulgación del entendimiento actual de distintos tipos de procesos volcánicos syn-eruptivos y geomorfológicos post-eruptivos (Migoñ & Pijet-Migoñ, 2016; Németh et al., 2017; Szepesi et al., 2017).

Un ejemplo de lo anterior es el volcán Xitle, un cono monogenético ubicado al suroeste de la Ciudad de México, que junto a algunos puntos asociados a sus productos han sido propuestos como geositios urbanos por Guilbaud et al. (2021b). Estos sitios representan valores científicos, turísticos y educativos en los aspectos vulcanológico, pedológico, biológico, ecológico y arqueológico. Entre estos geositios sobresalen la reserva ecológica Pedregal de San Ángel, declarada zona de conservación (Palacio-Prieto & Guilbaud, 2015), y el Geopedregal, ambos

sitios localizados en el campus de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). En el volcán Xitle y sus cuevas de lava se realizan actividades turísticas, y en el Geopedregal se desarrollan actividades educativas y culturales para visibilizar y promover la apreciación y conservación de los productos volcánicos (Guilbaud et al., 2021).

2. Contexto socioambiental: factores de vulnerabilidad

La interacción entre las actividades humanas y el entorno social, económico y ambiental es un factor determinante en la construcción de riesgo de una comunidad, de manera que cambios en el entorno debido a dicha interacción pueden generar nuevas situaciones de peligro (García, 2005). Por esto es importante establecer el contexto socioambiental en el área de estudio, para entender los procesos antrópicos que pueden modificar el paisaje y como consecuencia crear nuevos escenarios de riesgo los cuales pueden ser abordados en actividades educativas para promover la percepción y cultura de prevención de riesgo de desastres, así como la resiliencia ante la ocurrencia de estos.

El Ecoparque, el Cerro Magdalena, y el volcán Yololica se encuentran ubicados en el sur de la Ciudad de México, dentro de la Alcaldía Tlalpan (Figura 51A), en los pueblos originarios Magdalena Petlascalco, San Miguel Xicalco y San Miguel Ajusco (Figura 51B). Estos corresponden a pueblos indígenas, que según el artículo 2do de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos: “son aquellos que descienden de poblaciones que habitaban el territorio actual del México al iniciarse la colonización y que conservan sus propias instituciones sociales, económicas, culturales y políticas, o parte de ellas”.

En términos socioeconómicos, datos de CONEVAL (2021) para el período 2010-2020 posicionan a Tlalpan como la alcaldía con la mayor tasa de desigualdad social según el índice GINI, que representa la distribución de los ingresos de los habitantes y la inequidad entre estos, con una medida de 0.441 en una escala de 0 a 1, siendo 0 el estado de mayor equidad entre los habitantes. Además, estos datos ubican al 30.3% de la población de Tlalpan en situación de pobreza moderada, y el 1.79% en situación de pobreza extrema, determinando el acceso a la seguridad social, servicios de salud y alimentación como las principales carencias sociales en esta alcaldía. En materia de vivienda, el Inventario Nacional de Viviendas del INEGI (2015), entre los años 2010 y 2015 se reporta una población de 6,699 habitantes en Magdalena Petlascalco, con 1,614 viviendas construidas, de las cuales el 98.5% de las tienen acceso a electricidad, el 94.4% a sistemas de drenaje, y el 68.2% cuenta con servicio de agua; San Miguel Xicalco tiene una población de 13,406 habitantes, con 3,335 viviendas, 74.5% con acceso a electricidad, 96.4% a sistema de drenaje, y el 38% con acceso a agua; al sur del volcán Yololica se encuentra la colonia Jardines de San Juan, la cual se estableció como asentamiento irregular por el fraccionamiento de suelo agrícola en San Miguel Ajusco (Mollá Ruiz-Gómez, 2006), constituido por 3,591

habitantes, con 1,271 viviendas construidas, 92.5% con acceso a electricidad, 90.4% a sistemas de drenaje, y el 12.7% cuenta con servicio de agua.

En términos ambientales, la zona de estudio se ubica dentro de la delimitación del suelo de conservación de la Ciudad de México (Figura 51A), definido en el Acuerdo No. 1689 Tomo II como suelo proveedor de servicios ecológicos ambientales que son indispensables para el desarrollo y mantenimiento de la calidad de vida de los habitantes de la Ciudad de México. Estos suelos ofrecen diversos servicios como: 1) recarga del acuífero de la zona metropolitana de la ciudad, con un volumen de recarga promedio anual de 151.4 mm³ que corresponde al 41% del agua que se consume en la ciudad; 2) la estabilización de suelos y retención de agua; 3) reducción de contaminación y regulación del clima; 4) reservorio de biodiversidad; y 5) espacio de recreación y mantenimiento de valores escénicos y culturales (Acuerdo No. 1689 Tomo II).

El Acuerdo No. 1689 Tomo II aborda la problemática de degradación y cambio de uso de suelo en las zonas de conservación por pérdida de cubierta forestal, asociada principalmente a la expansión de la zona urbana y de la frontera agrícola, así como la fragmentación del bosque por extracción ilegal de madera, los incendios forestales, el desecho de cascajo, el desarrollo de asentamientos humanos irregulares, y los delitos ambientales como la extracción de fauna y flora, contaminación de suelo y barrancas por aguas residuales y residuos sólidos. En este acuerdo se contempla la implementación de programas y acciones como medidas para la conservación del suelo, tal como: 1) el Programa General de Ordenamiento Ecológico del Distrito Federal, cuyo objetivo es regular los usos del suelo y las actividades productivas; 2) el Programa de Retribución por la Conservación de los Servicios Ambientales, que consiste en un pago por servicios ambientales que es invertido en varios núcleos agrarios; 3) el Programa de Fondos de Apoyo para la Conservación y Restauración de los Ecosistemas a través de la Participación Social; 4) la reforestación y reconversión productiva mediante la plantación de árboles y arbustos para lograr la reconversión de suelos con uso agrícola y pecuario por plantaciones agroforestales; y 5) la producción de plantas en viveros como apoyo en las acciones de reforestación.

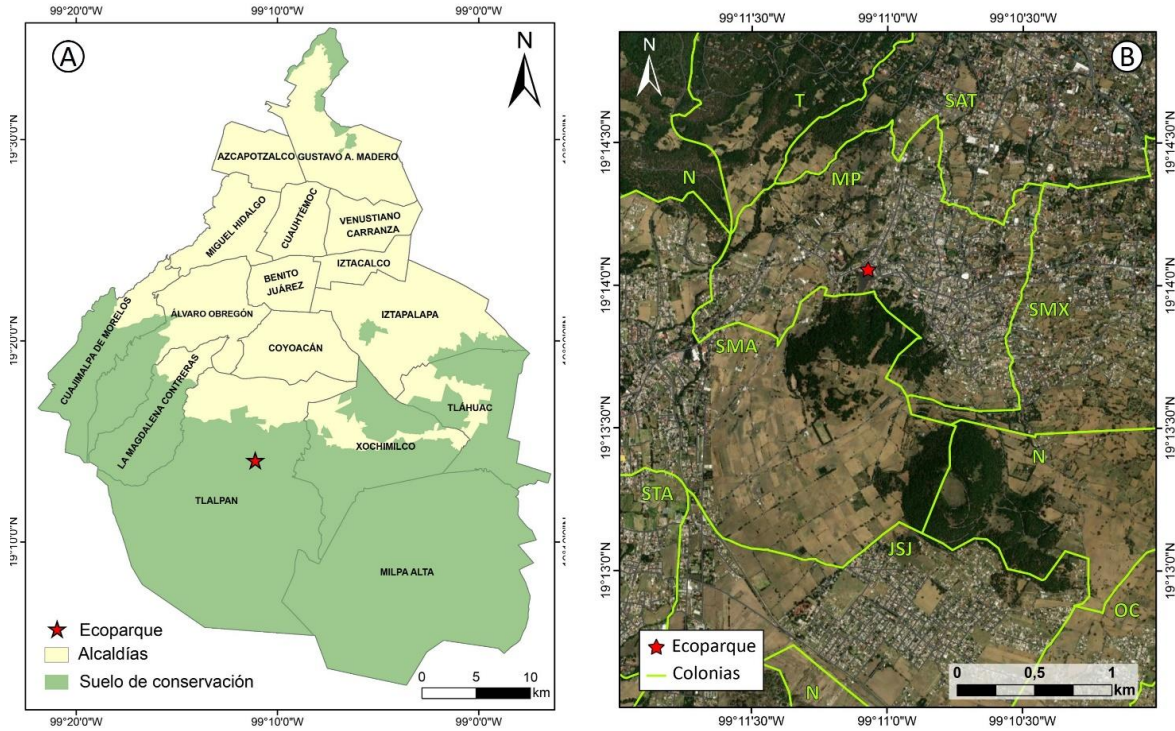


Figura 51. A. Ubicación del Ecoparque dentro de la Ciudad de México. B. Mapa geográfico de la delimitación de las colonias en la zona aledaña al Ecoparque. Colonias: JSJ- Jardines de San Juan, MP- Magdalena Petlalcalco, OC- Ocotla Chico, SAT- San Andrés Totoltepec, SMA- San Miguel Ajusco, SMX- San Miguel Xicalco, STA- Santo Tomás Ajusco, T- Tlalpuente, N- zona sin delimitación. (Imagen base de 2022, Fuentes: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, USDA FSA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community).

3. Métodos

3.1. Identificación y evaluación de geositos potenciales

Para realizar el inventario de geositos, se seleccionaron sitios visitados en la etapa de campo, cuyas características geológicas hayan sido estudiadas y se consideraran destacadas, con buen estado de exposición y accesibilidad. En el inventario se determinaron los elementos geológicos de interés de cada geosito y el proceso geológico que representa, así como la rareza de los elementos, es decir si son comunes a otros afloramientos del área de estudio, el estado de conocimiento de estos, su integridad y uso actual.

Para la evaluación cuantitativa del potencial de los geositos se consideraron las metodologías de Brilha (2016) y de Kubalíková et al. (2021); comparando los resultados entre ambas para tener un panorama complementario de los criterios que le dan el valor, y disminuir la subjetividad de la evaluación. La metodología de Brilha (2016) evalúa el potencial de uso científico, educativo y turístico, mediante el uso de entre 7 y 13 criterios, cada uno con puntajes entre 0 (muy bajo valor) y 4 (muy alto valor), que se convierten finalmente a porcentajes

(Anexos 8 y 9); para el caso del valor científico no se asigna el puntaje de 3, para distinguir de forma más clara los sitios con puntaje de 4. El 25% del peso de los criterios en la evaluación del valor científico corresponde al reconocimiento actual del elemento geológico del sitio, aun cuando en ambas metodologías se resalta que la ausencia de estos no significa que un sitio carezca de este valor, pero si implica la disminución de este en el resultado de la evaluación.

El criterio de densidad de población, aplicado en el valor turístico, fue modificado teniendo en cuenta el contexto urbano de la Ciudad de México, y que es una de las ciudades más pobladas del mundo, con una densidad de población mínima por alcaldía de 462 y máxima de 16,162 hab/km² (INEGI, 2016), en contraste con la metodología original que utiliza valores límite entre 100 y 1,000 hab/km². De igual forma, el criterio de nivel económico fue modificado de acuerdo a la información sobre ingresos y pobreza disponible para el área de estudio, ya que originalmente se consideran los ingresos por hogar en la localidad del sitio, en relación al promedio nacional, pero en este estudio se tomó en cuenta el nivel de pobreza promedio de la alcaldía en la que se ubica el sitio, en comparación al promedio nacional (datos de la medición multidimensional de la pobreza en México 2018 – 2020, CONEVAL 2021).

Por su parte, la metodología de Kubalíková et al. (2021) utiliza de 3 a 5 criterios para la evaluación de los diversos valores: científico, educativo, turístico, valores adicionales en referencia a aspectos ecológicos, estéticos y escénicos, y valor de conservación, asignando puntajes de 0 a 1 para cada uno. En esta metodología el valor científico se evalúa por las características geológicas del sitio y la producción científica actual sobre los elementos. En cuanto al valor de conservación, se mide por dos criterios, 1) amenaza actual del sitio, y 2) protección legislativa, considerando originalmente si el sitio hace parte de la base de datos de geositorios del país (en el trabajo original de la República Checa), para adaptarlo al contexto local, en este trabajo se consideran las figuras de protección ambiental (Anexo 10).

Debido a que las escalas de los valores resultantes en las dos metodologías son distintas, 0 – 400 para Brilha (2016), y 0 – 1 Kubalíková et al. (2021), se normalizaron los valores obtenidos para la primera metodología, con el fin de poder comparar los resultados entre ambas y establecer rangos de evaluación del potencial de los geositorios, determinados según los cuartiles obtenidos a partir de la distribución de los datos, donde: valor bajo < 0.3, medio entre 0.3 y 0.5, medio alto entre 0.5 y 0.65, y alto >0.65.

3.2. Riesgo de degradación antrópica

Se utilizó la metodología propuesta por Brilha (2016) para desarrollar un modelo SIG en el *software* ArcGis, que permitió obtener un mapa de riesgo de degradación antrópica en la zona. Esta metodología consiste en un método cuantitativo para la evaluación de riesgo de degradación del patrimonio geológico, mediante la suma de la vulnerabilidad y los factores de amenaza. La estimación se realiza mediante un sistema de puntos de 0 a

4 para 5 criterios, cada uno con un peso asignado según el grado de probabilidad de deterioro que representan respecto a los demás criterios. Originalmente, Brilha (2016) utilizan los criterios: A) vulnerabilidad intrínseca, B) proximidad a áreas o actividades con potencial de causar degradación, C) protección legal, D) accesibilidad al elemento geológico, y E) densidad de población de la zona cercana al elemento geológico. Teniendo en cuenta el contexto geológico y geográfico del área de estudio, se adaptó el criterio de vulnerabilidad (A), medido según la cantidad de elementos con posibilidad de deterioro, al tipo de litología y la cobertura vegetal de esta. También se reemplazó el criterio de protección legal (C), que incluye la ubicación en zonas delimitadas de protección ambiental, así como el control de acceso a los elementos geológicos, ya que el estudio abarca un área en vez de un sitio puntual, y toda el área hace parte de la delimitación de suelo de conservación de la ciudad de México. Por esta razón, el valor sería uniforme para toda la zona, lo que implica que el criterio no sería significativo en el cálculo final de riesgo de degradación. Teniendo en cuenta que el área corresponde a una zona en desarrollo urbano, se consideró el cambio de uso de suelo como un parámetro importante a incluir en el modelo, reemplazando al criterio de protección legal.

A pesar de haber modificado los criterios A y C, los factores de peso se mantuvieron de la ecuación original para la estimación de riesgo de deterioro, la cual es definida por Brilha (2016) como:

RD (riesgo de degradación) = (A*35) + (B*20) + (C*20) + (D*15) + (E*10), cuyos resultados se clasifican en riesgo bajo si $RD < 200$, riesgo moderado para valores de RD entre 201 y 300, y riesgo alto para RD entre 301 y 400.

Los criterios utilizados para estimar el riesgo de degradación se definieron de la siguiente manera:

A. La vulnerabilidad intrínseca de los elementos geológicos que hace referencia a la posibilidad de estos de ser degradados por actividad humana en función de sus características. Para este criterio se utilizó la litología y la cobertura vegetal como factores determinantes. De acuerdo a las unidades descritas en el capítulo 1, en la zona predominan depósitos de tefra y cuerpos de lava, por lo cual se asignan altos valores de vulnerabilidad a los depósitos de tefra, dado que al componerse de material suelto pueden ser deteriorados con mayor facilidad por el pisoteo o el paso de vehículos sobre estos, así como la extracción, en comparación con los cuerpos de lava que tienen menor vulnerabilidad, pues su deterioro sería causado por el fracturamiento para extracción de roca con fines de construcción. Sumado a esto, la cobertura vegetal modifica la vulnerabilidad en el caso de los depósitos de tefra, pues son más estables si tienen vegetación y por lo tanto desarrollo de suelo. Para las lavas, se asigna un valor mayor de vulnerabilidad para los domos, debido a que se observó que presentan alteración y fracturamiento, lo que los hace más susceptibles a la degradación en comparación con los flujos de lava y los depósitos compuestos por bloques de lava. (Tabla 1).

Tabla 7. Asignación de valores para el criterio de deterioro de elementos geológicos según su vulnerabilidad intrínseca.

A. Deterioro de elementos geológicos según su litología	Valor
Tefra descubierta- Posibilidad de deterioro muy alta	4 pts
Tefra cubierta- Posibilidad de deterioro alta	3 pts
Domos de lava- Posibilidad de deterioro media	2 pts
Flujos de lava y depósitos de bloque de lava-Posibilidad de deterioro baja	1 pto

B. La proximidad a áreas o actividades con potencial de causar degradación se midió según la distancia a zonas recreativas o turísticas y zonas urbanas (Tabla 2). Esta información se obtuvo del conjunto de datos vectoriales de información topográfica escala 1:50.000 de la Ciudad de México (2019), disponible en el portal web del INEGI.

Tabla 8. Sistema de asignación de valores para el criterio de deterioro de proximidad a áreas o actividades con potencial de causar degradación.

B. Proximidad a áreas o actividades con potencial de causar degradación	Valor
< 50 m	4 pts
50 – 200 m	3 pts
200 – 500 m	2 pts
>500 m	1 pto

C. El cambio de uso de suelo se determinó mediante un análisis multitemporal de uso de suelo entre los años 1985 y 2020. Para esto se utilizaron dos imágenes satelitales tomadas en época de invierno, la primera del satélite Landsat 5, del sensor *Thematic Mapper*, correspondiente al año 1985, y la segunda del satélite Landsat 8, del sensor OLI, correspondiente al año 2020 (Tabla 3).

Tabla 9. Características de las imágenes satelitales utilizadas para el análisis de cambio de uso de suelo.

Fecha de adquisición	Enero 31 de 1985	Febrero 17 de 2020
Satélite y sensor	Landsat 5-TM	Landsat 8-OLI
Resolución espectral	B1- Azul 0.45-0.52 μm B2- Verde 0.52-0.60 μm B3- Rojo 0.63-0.69 μm B4- NIR 0.76-0.90 μm B5- SWIR1 1.55-1.75 μm B7- SWIR 2 2.08-2.35 μm B6-TIR 10.4-12.5 μm	B1- Coastal/ aerosol 0.433-0.452 μm B2- Azul 0.450-0.515 μm B3- Verde 0.525-0.600 μm B4-Rojo 0.630-0.680 μm B5- NIR 0.845-0.885 μm B6- SWIR1 1.560-1.660 μm B7- SWIR 2 1.100-2.300 μm B8- Pancromático 0.50-0.68 μm B9- Cirrus 0.136-0.139 μm
Resolución espacial	30 m (120 m TIR)	30 m (pancromático 15 m)
Resolución radiométrica	8 bit	12 bit
Resolución temporal	16 días	16 días

El pre-procesamiento y procesamiento de las imágenes fue realizado en el *software* Envi. Se aplicó la corrección radiométrica y posteriormente el modelo de corrección atmosférica Flaash, con el fin de eliminar el efecto de dispersión causado principalmente por albedo y aerosoles. Entre los parámetros seleccionados para realizar la corrección, y dada la ubicación de la zona de estudio (Latitud 19°N), se determinó el modelo de atmósfera de categoría tropical, definido para la época de enero-marzo entre las latitudes 10 y 20°N, y el modelo de aerosol urbano, dado que el área de estudio tiene una densidad urbana significativa.

Para obtener los mapas de uso de suelo de 1985 y 2020 se identificaron tres materiales principales en la zona, correspondientes a vegetación, suelo volcánico y construcción de concreto, cada uno relacionado a un tipo de uso de suelo. Esto se realizó con base en la información de uso de suelo y vegetación del suelo de conservación de la Ciudad de México (2013), disponible en el portal web del INEGI. Para el análisis de los materiales se determinaron los picos de reflectancia y absorción de su firma espectral según Kala et al. (2018), Nichol (2009), y Escribano et al. (2010) (Tabla 4, Figura 52). Cabe resaltar que la época en que se adquirieron las imágenes corresponde al invierno, lo que implica la escasez de vegetación correspondiente a agricultura temporal, por lo cual el material presente y expuesto en estas zonas corresponde principalmente a suelo volcánico.

Se aplicaron dos composiciones para el realce espectral con el fin de visualizar e identificar la distribución de los materiales seleccionados. Inicialmente se realizó una composición a falso color RGB = NIR, R, G (Figura 53), correspondiente a b4, b3, b2 para la imagen Landsat 5TM, y b5, b4, b3 para la imagen Landsat 8OLI. Para identificar de forma más exacta la distribución de los materiales, se aplicaron composiciones RGB, con cocientes (Figura 54), correspondientes a b3/b1, b2/b4, b4/b3 para la imagen Landsat 5TM, y b4/b2, b3/b5, b5/b4 para la imagen Landsat 8Oli.

Tabla 10. Características de la firma espectral de los materiales presentes en la zona de estudio.

Material	Uso de suelo según INEGI	Pico de reflectancia	Pico de absorción	Cocientes
Vegetación	Bosque Encino	NIR (b4 TM, b5 OLI)	Rojo (b3 TM, b4 OLI)	NIR/ Rojo (b4 TM/ b3 TM; b5 OLI/ b4 OLI)
Suelo de material volcánico	Agricultura temporal	Rojo (b3 TM, B4 OLI)	Azul (b1 TM, b2 OLI)	Rojo/ Azul (b3 TM/ b1 TM; b4 OLI/ b2 OLI)
Construcciones de concreto	Urbano	Verde (b2 TM, b3 OLI)	NIR (b4 TM, b5 OLI)	Verde/ NIR (b2 TM/ b4 TM; b3 OLI/ b5 OLI)

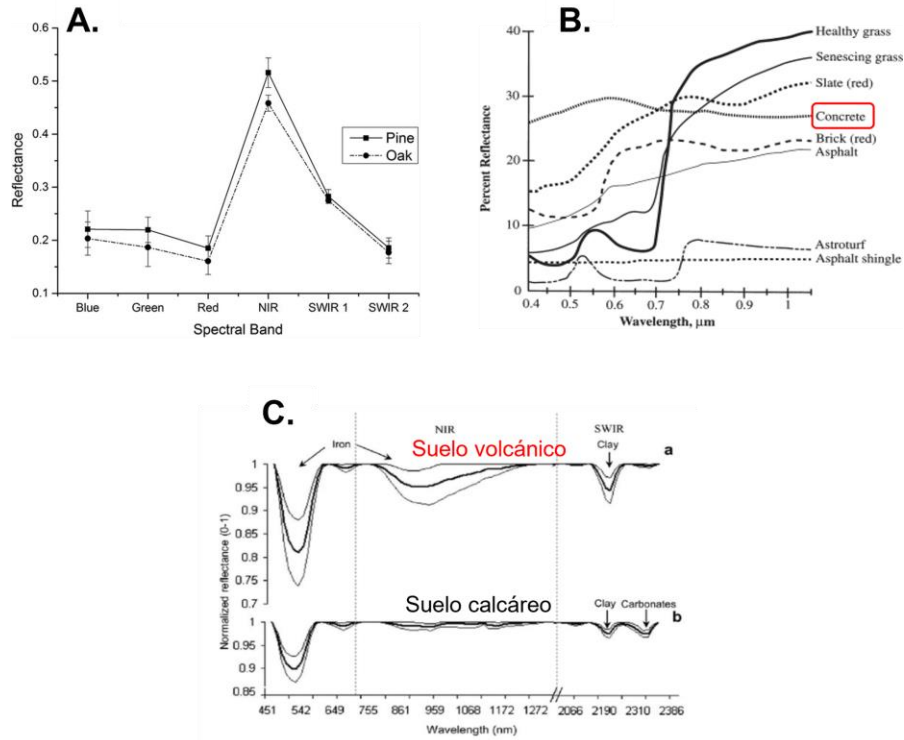


Figura 52. A. Firma espectral de la vegetación tipo encino, tomado de Kala et al. (2018). B. Firma espectral de materiales de construcción y vegetación, tomado de Nichol (2009). C. Firma espectral del suelo volcánico, tomado de Escribano et al. (2010).

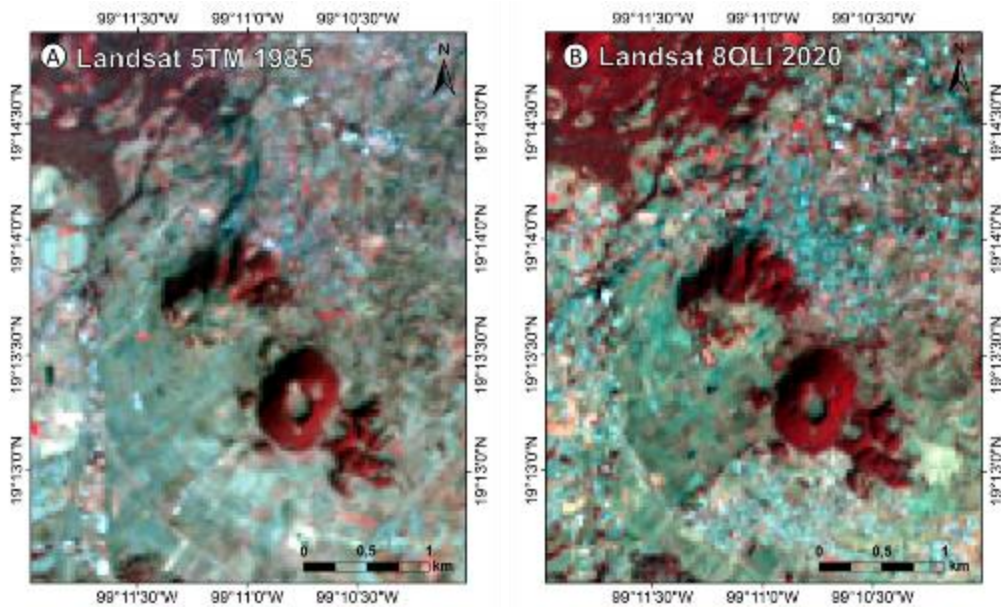


Figura 53. Composición a falso color RGB NIR, R, G: A. Imagen Landsat 5TM 1985, combinación de bandas b1, b3, b2. B. Imagen Landsat 8OLI 2020, combinación de bandas b5, b4, b3.

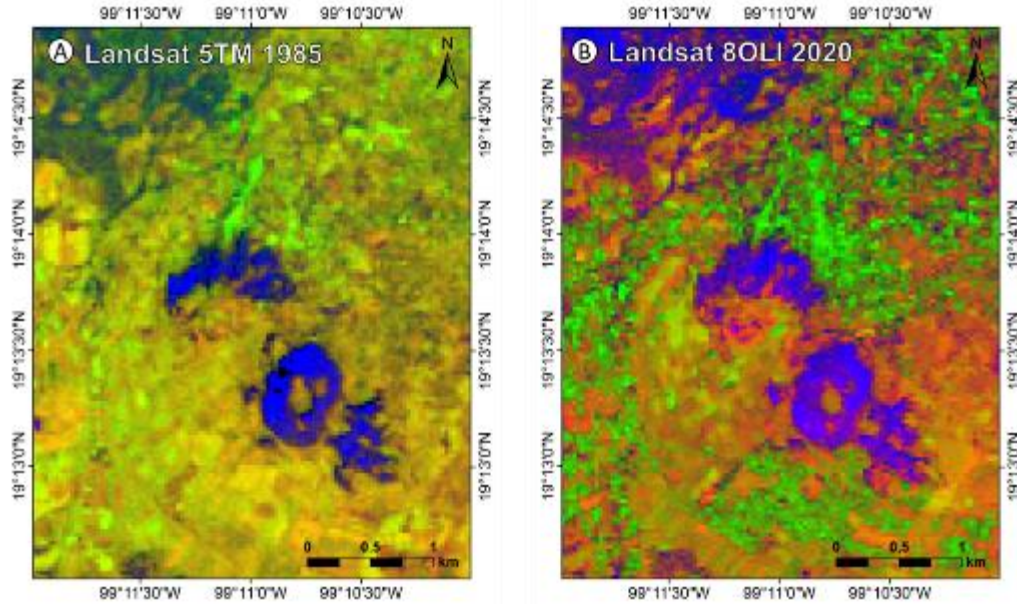


Figura 54. Composición RGB por cocientes: A. Imagen Landsat 5TM 1985, combinación de cocientes $b3/b1$, $b2/b4$, $b4/b3$. B. Imagen Landsat 8OLI 2020, combinación de cocientes $b4/b2$, $b3/b5$, $b5/b4$.

A partir de la identificación de los tres tipos de uso de suelo en la zona: bosque encino, agricultura temporal y uso urbano, se realizó la clasificación de uso de suelo supervisada por el método de máxima probabilidad. Mediante polígonos de entrenamiento se aseguró una separabilidad espectral entre los materiales mayor a 1.9 según el índice de distancia de Jeffries, el cual representa la distancia promedio entre dos funciones de densidad de clase. Para estimar el error de clasificación se utilizó un muestreo de 50 puntos por clase (Figura 55), tomando como referencia imágenes aéreas de 1973 y 1983 obtenidas del INEGI, para comparar el uso de suelo en 1985, así como imágenes satelitales de Google Earth Pro, correspondientes a abril del 2019, y datos de campo para comparar el uso de suelo en 2020. Posteriormente se calculó la matriz de error, con el error promedio, de comisión y omisión, así como la exactitud del usuario y productor, y el coeficiente Kappa, para evaluar la validez de la clasificación.

Finalmente se obtuvo el mapa de cambio de uso de suelo mediante la comparación de los mapas de uso de suelo de 1985 y 2020, y a partir de esto se asignaron valores de potencial de degradación.

Tabla 11. Sistema de asignación de valores para el criterio de cambio de uso de suelo.

C. Cambio de uso de suelo	Valor
Bosque encino a uso urbano	4 pts
Agricultura temporal a uso urbano	3 pts
Bosque encino a Agricultura temporal	2 pts
Zona urbana sin cambio	1 pto

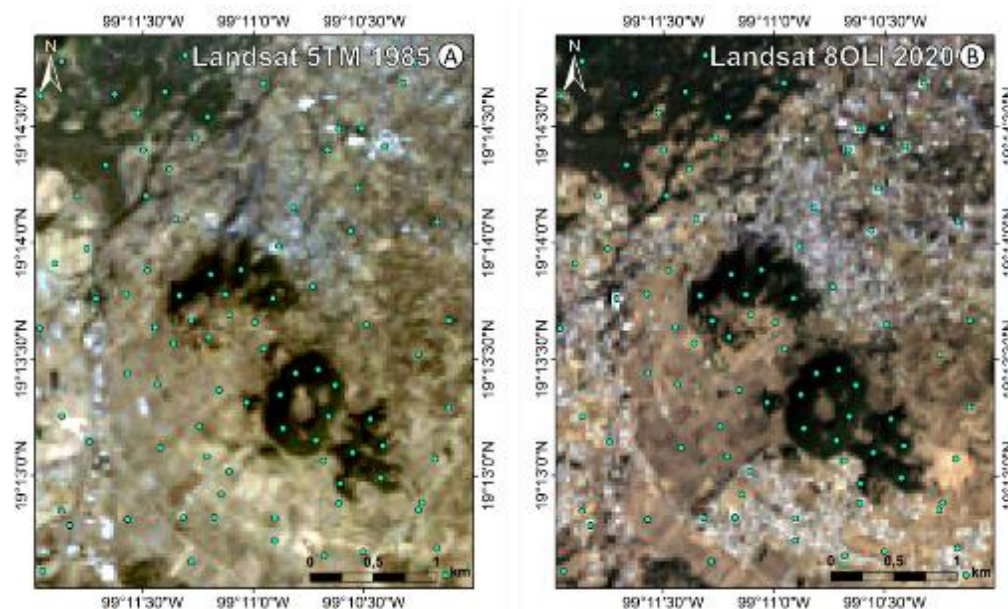


Figura 55. Puntos de muestreo para la estimación de error de la clasificación de uso de suelo: A. Imagen Landsat 5TM 1985. B. Imagen Landsat 8OLI 2020.

D. La accesibilidad refleja la facilidad de acceso a los elementos geológicos según la distancia de estos a las vías principales, información obtenida del Conjunto de datos vectoriales de información topográfica de la carta E14A49 a escala 1:50 000, 2019 del portal de datos del INEGI.

Tabla 12. Sistema de asignación de valores para el criterio de accesibilidad por vías pavimentadas.

D. Accesibilidad por vías pavimentadas	Valor
<100 m	4 pts
100 – 500 m	3 pts
500 – 1,000 m	2 pts
>1000 m	1 pts

E. La densidad de población de la zona (colonia o pueblo) en la que se encuentran los elementos geológicos, en este caso se consideraron los pueblos Magdalena Petlactalco, San Miguel Xicalco, y San Miguel Ajusco, así como la colonia Jardines de San Juan. Las cifras de densidad poblacional fueron obtenidas del inventario nacional de viviendas 2016 de la Ciudad de México del portal de datos del INEGI.

Tabla 13. Sistema de asignación de valores para el criterio de densidad de población.

E. Densidad de población	Valor
> 10,000 habitantes/km ²	4 pts
5,000 – 10.000 habitantes/km ²	3 pts
2500 – 5000 habitantes/km ²	2 pts
< 2500 habitantes/km ²	1 pto

4. Resultados

4.1. Inventario de sitios geológicos en el área de estudio

Se identificaron ocho sitios con interés geológico en el área de estudio, incluido el Ecoparque El Arenal, para los cuales se realizó el inventario de sus características geológicas, la representatividad, rareza e integridad, así como la accesibilidad al sitio (Figura 56, anexo 11).

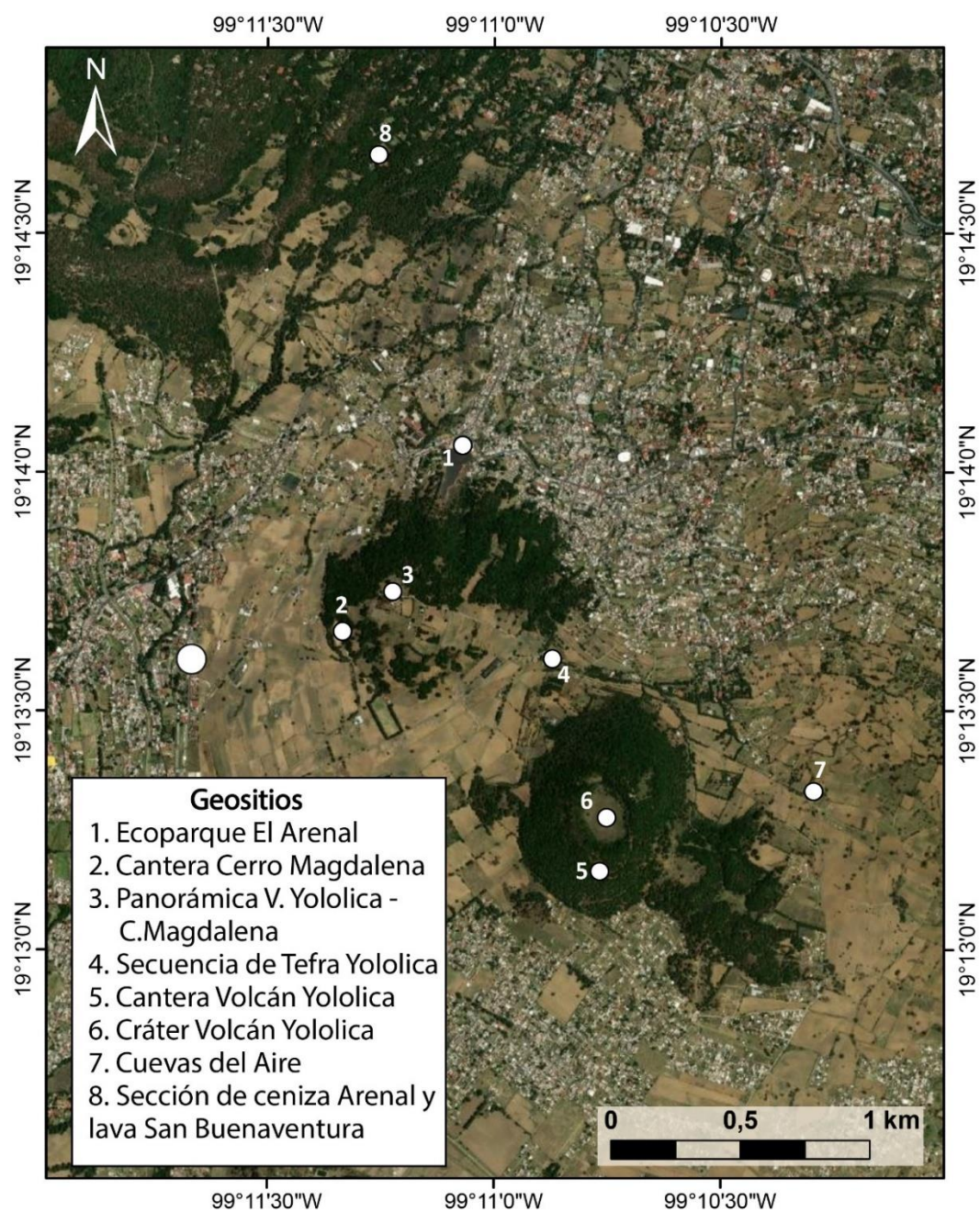


Figura 56. Mapa de los geositos inventariados.

Geositio 1: Depósito de ceniza del Ecomparque El Arenal

El atractivo de este sitio es una duna de ceniza (Figura 57A), la cual representa procesos de removilización eólica y acumulación de ceniza volcánica, además de procesos de deslizamiento a pequeña escala. Mediante la observación de la ceniza con lupa se pueden distinguir partículas de diferentes colores y propiedades, así como minerales que sobresalen por su brillo (piroxeno, anfíbol, plagioclasa y olivino). Debido a que está ubicada dentro de un Ecomparque establecido en el año 2015 y dirigido desde entonces por un grupo local (Comunidad de Magdalena Petlacalco), en este se desarrollan actividades turísticas (Figura 57B, C). La parte baja de la duna se encuentra intervenida por una pared de concreto y una malla, cuya finalidad es impedir que la ceniza llene las instalaciones del Ecomparque; por esta razón, semanalmente se realiza la remoción de ceniza con pala por parte de brigadistas del CORENADR (Figura 58).



Figura 57. A. Vista del depósito de ceniza desde la entrada del Ecomparque. B. Actividades permitidas y realizadas en el Ecomparque. C. Reglamento del Ecomparque.



Figura 58. Labores de reacomodo de la ceniza, para la contención del material del Arenal de manera que las instalaciones del Ecoparque no se llenen de este, estas labores son realizadas por los brigadistas CORENADR de la zona de conservación de Magdalena Petlalcalco.

Geositio 2: Cantera Cerro Magdalena

Esta cantera se encuentra al este del cerro, compuesta por roca dacítica del domo volcánico Cerro Magdalena (Figura 59A). La roca es masiva y exhibe textura porfirítica (Figura 59B) con varios tipos de minerales distinguibles a simple vista (plagioclasa, anfíbol y biotita), y textura fluidal marcada por la orientación de cristales de plagioclasa.

Este punto es de acceso libre por una vía carretable que de la vía principal conduce a la parte alta del Cerro Magdalena. Esta cantera se encuentra abandonada, por lo cual hay gran cantidad de material suelto, la roca se encuentra meteorizada, con desarrollo de suelo en la parte superior, y cuenta con alto fracturamiento, lo cual es un factor de riesgo a considerar. Como valor adicional, desde este punto es posible tener una vista del volcán Oyameyo y el complejo volcánico Ajusco, ambos hacia el suroeste (Figura 59).

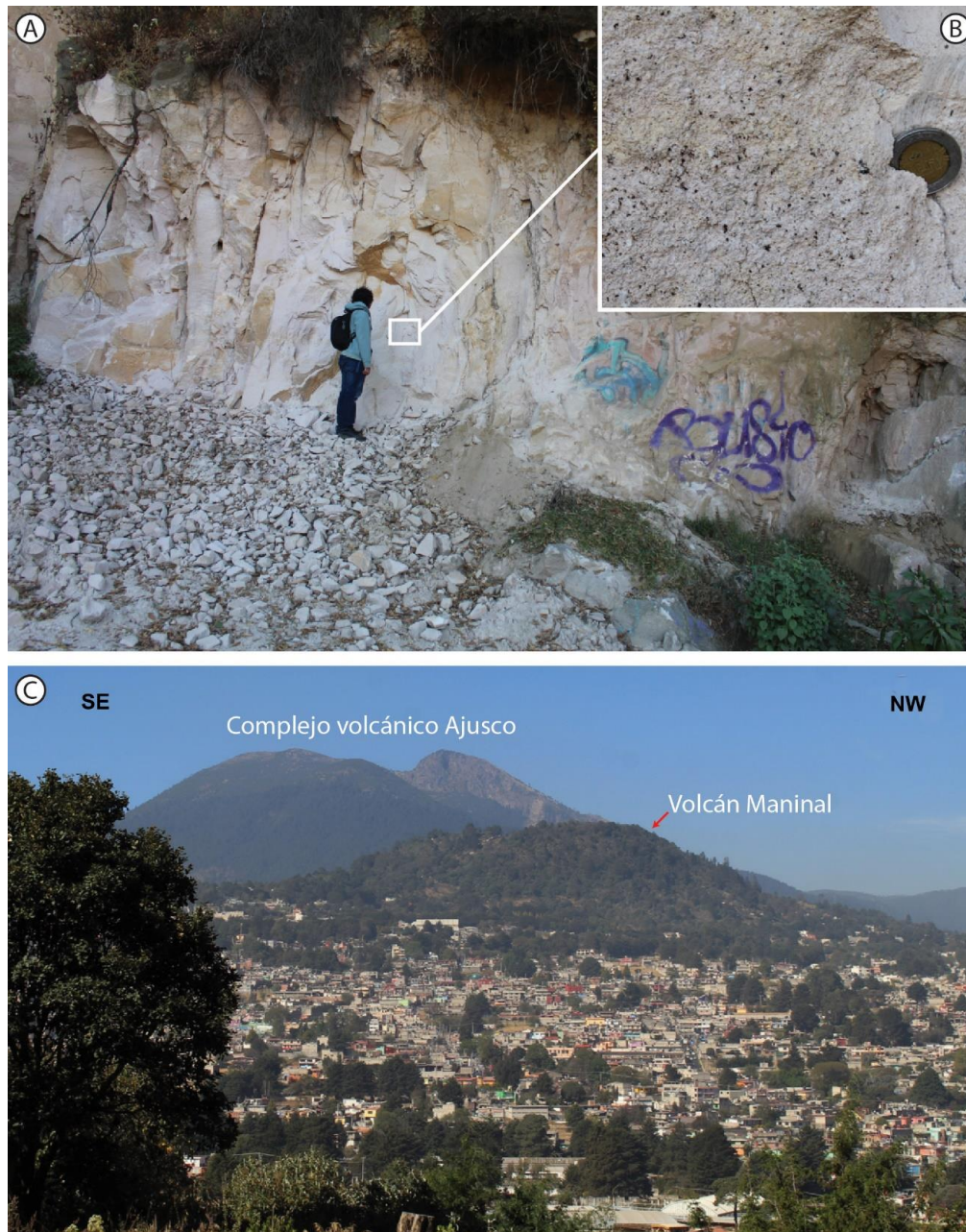


Figura 59. A. Afloramiento de la roca ácida que compone al Cerro Magdalena. Nótese la cantidad de roca suelta en la base del afloramiento, producto de la erosión y anterior actividad de extracción. B. Textura de la roca observable a simple vista. C. Vista desde el afloramiento al suroeste, se observan el volcán Maninal y el Complejo Volcánico Ajusco.

Este punto es de acceso libre por una vía carretable que de la vía principal conduce a la parte alta del Cerro Magdalena. Esta cantera se encuentra abandonada, por lo cual hay gran cantidad de material suelto, la roca se encuentra meteorizada, con desarrollo de suelo en la parte superior, y cuenta con alto fracturamiento, lo cual es un factor de riesgo a considerar. Como valor adicional, desde este punto es posible tener una vista del volcán Maninal y el complejo volcánico Ajusco, ambos hacia el suroeste (Figura 59).

Geositio 3: Panorámica Cerro Magdalena

Este sitio se encuentra en la cumbre del cerro y constituye un buen lugar para observar de forma panorámica varios volcanes ubicados al sur de la Ciudad de México, hacia el noreste los volcanes Cuatztontle y Xitle (Figura 60A), hacia el sur el volcán Pelado (Figura 60B), y hacia el sureste los volcanes Yololica y Oyameyo (Figura 60C). Estos elementos son evidencia de la recurrente actividad volcánica en la zona y de los procesos geomorfológicos asociados a esta, así como la biodiversidad presente en la zona y el impacto del desarrollo urbano en esta.

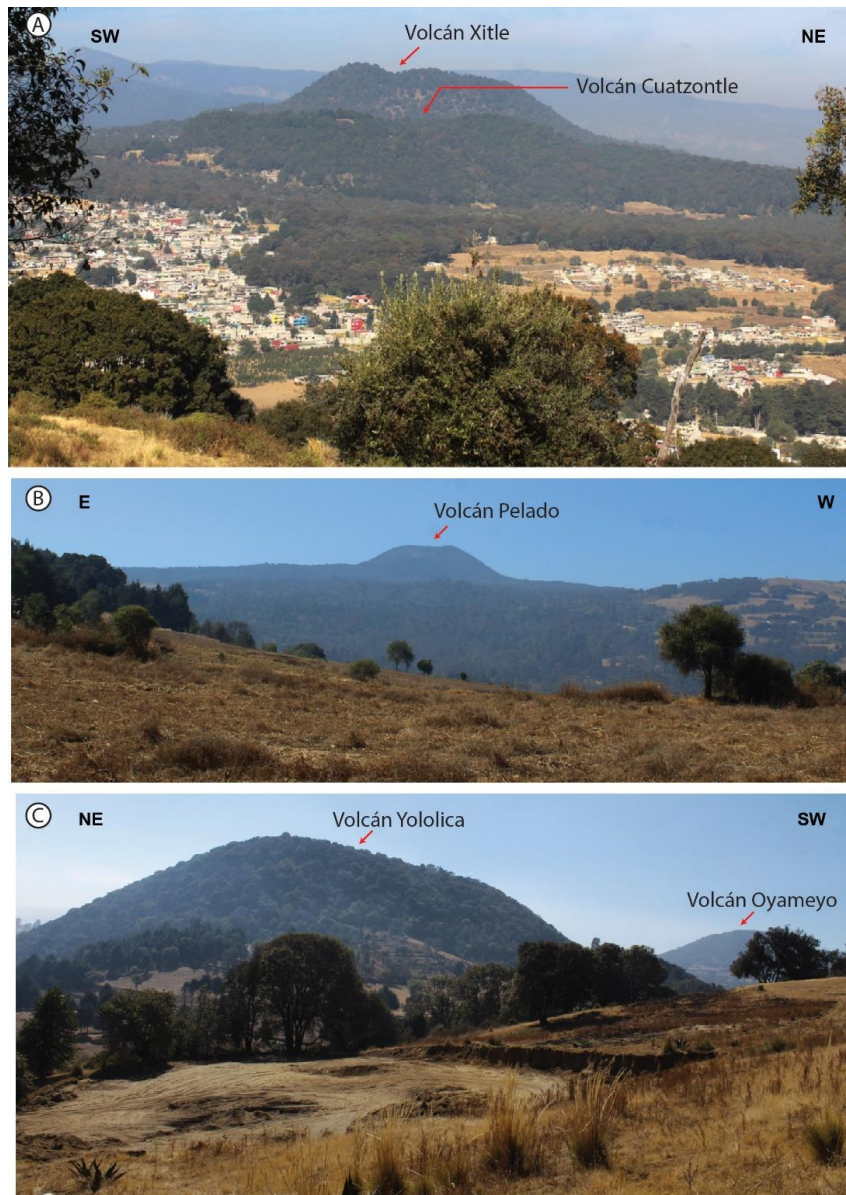


Figura 60. Volcanes observados en distintas direcciones desde el punto panorámico. A. Volcanes Cuatztontle y Xitle observados desde el sureste. B. Volcán Pelado observado desde el norte. C. Volcanes Yololica y Oyameyo observados desde el noroeste.

Geosítio 4: **Secuencia de tefra Yololica**

Este sitio se encuentra en la base externa del cono parásito del volcán Yololica, en la cual se encuentra una secuencia estratificada moderadamente endurecida, compuesta por tefra con variación en el tamaño de partículas entre ceniza fina y lapilli medio, con bloques balísticos (Figura 61A, B), sobre un flujo de lava del volcán Yololica, que permiten apreciar evidencias de procesos de caída de tefra. Parte de las capas menos endurecidas se han derrumbado y acumulado a la base del afloramiento, donde también se observa disposición de desechos. Como valor adicional se tiene una vista de la Ciudad de México hacia el norte (Figura 61C).



Figura 61. A. Afloramiento de la secuencia de tefra del volcán Yololica, parcialmente cubierto por material suelto y algunos desechos. Sobresale la presencia de un bloque balístico de gran tamaño. B. Secuencia de lapilli y ceniza interestratificada, con presencia de bloques de impacto. C. Vista de la Ciudad de México desde el sur, debido a las condiciones climáticas de la época en que se tomó la foto (febrero de 2023), se observa la nube de contaminación que cubre la ciudad.

Geosítio 5: **Cantera del volcán Yololica**

Este sitio se ubica al sur del cráter, en el flanco sur del cono. Allí se encuentra una secuencia de tefra estratificada que sobresale por su color rojo debido a procesos syn-eruptivos de oxidación, además de un arenal producido por la erosión del material estratificado (Figura 62). De esta manera, esta secuencia es evidencia de las dinámicas de construcción de los conos de escoria, así como de procesos de alteración simultáneos, como la alteración de la tefra por oxidación del hierro en condiciones de altas temperaturas, que producen el color rojo, dada la ubicación del depósito en el margen del cráter donde se mantienen altas temperaturas por la emisión de material y circulación de fluidos calientes. Este punto es accesible por una vía carretable y es monitoreada por la brigada de incendios forestales de la alcaldía de Tlalpan.

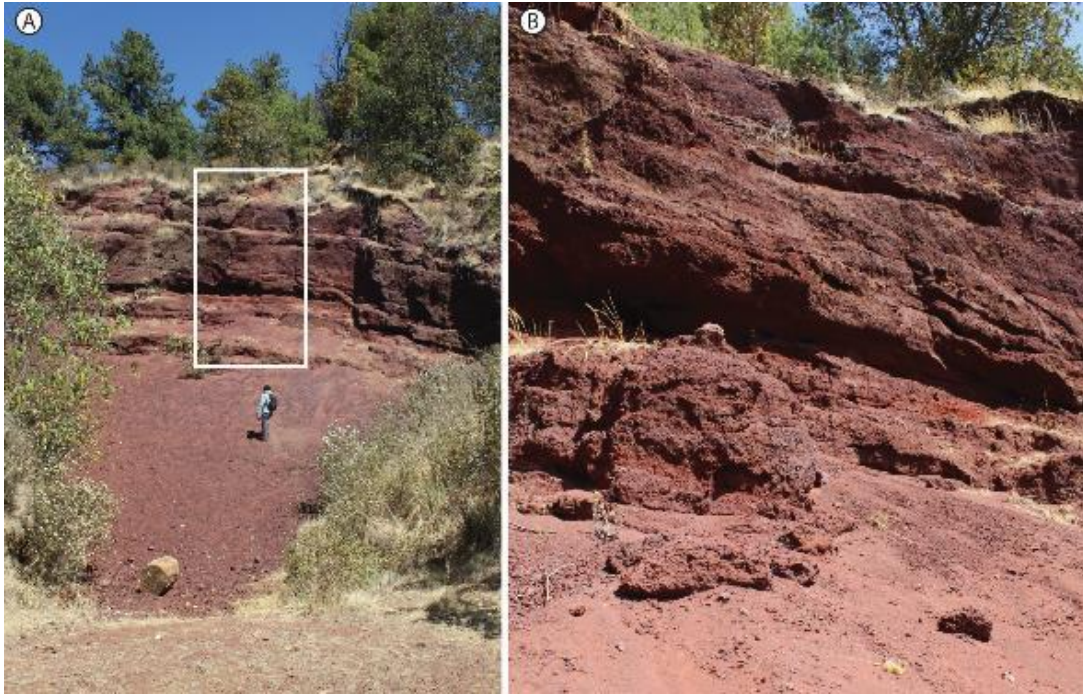


Figura 62. Cantera del volcán Yololica formada por tefra rojiza producto de la oxidación durante la erupción del material. A. Vista del arenal rojo desde el camino por el que se accede a la cantera. B. Acercamiento a la cantera, donde se observan las capas de tefra.

Geosítio 6: Cráter Yololica

Este sitio se encuentra dentro del cráter del cono Yololica y permite apreciar su relleno parcial por material erosionado de las paredes después a la erupción, y su recubrimiento por vegetación (Figura 62A).. Este sitio es de fácil acceso por un camino que se encuentra a menos de 300 m de una vía carretable, por lo cual es visitado para actividades como senderismo, recorridos en bicicleta y camping (Figura 62B), aunque estas actividades representan un riesgo de incendio por el uso de fogatas y materiales inflamables. Este sitio presenta un valor adicional ecológico, por albergar al menos 56 especies de fauna y flora, entre ellas aves, flores, reptiles, árboles, entre estos se destaca la presencia de águilas y del conejo del volcán (*Romerolagus diazi*), declarado en peligro de extinción (SEMARNAT, 2010), y cuyo linaje amarillo es endémico de los volcanes Yololica, Tláloc y Cilcuayo (Osuna et al., 2020).



Figura 63. A. Cráter del volcán Yololica, se aprecia cubierto de vegetación aún en temporada seca (foto tomada en febrero de 2023). B. Evidencia del desarrollo de actividades turísticas en el cráter, como land art y camping.

Geositio 7: Cuevas del aire

Este sitio se ubica al este del cono Yololica. En él se encuentra la entrada a túneles de lava (Figura 64), los cuales tienen aproximadamente 1 km de largo y 90 m de profundidad (Figura 65A). Las lavas de las paredes son de composición básica, y es posible apreciar estructuras que indican procesos de la dinámica de flujos de lava, como la presencia de estalactitas de lava (Figura 65B), formadas por el escurrimiento o goteo de la lava residual del techo, que se encuentra en estado plástico cuando cesa el desplazamiento de la lava por el tubo. Las estalactitas de las paredes en la entrada de la cueva se encuentran alterados por grafitis, y la cueva se encuentra deteriorada, presentando mal olor debido a la interacción entre los residuos (orgánicos e inorgánicos) que son desechados en su interior (Figura 65C) y el agua de infiltración de lluvia, lo que ocasiona el flujo de lixiviados. Este sitio cuenta con un valor cultural, pues según las leyendas de los pueblos originarios, estas y otras cuevas de la zona han sido utilizadas desde la antigüedad para llevar a cabo el ritual Ixtlahuich, que consiste en ofrendar alimentos, bebidas y prendas de vestir dentro de las cuevas, para pedir

favores a los dioses, como sanación, buenas cosechas, fertilidad, lluvias, entre otros (Delegación de Tlalpan, 2015).



Figura 64. Vista externa del acceso a la cueva del Aire. B. Vista interior del acceso a la cueva.

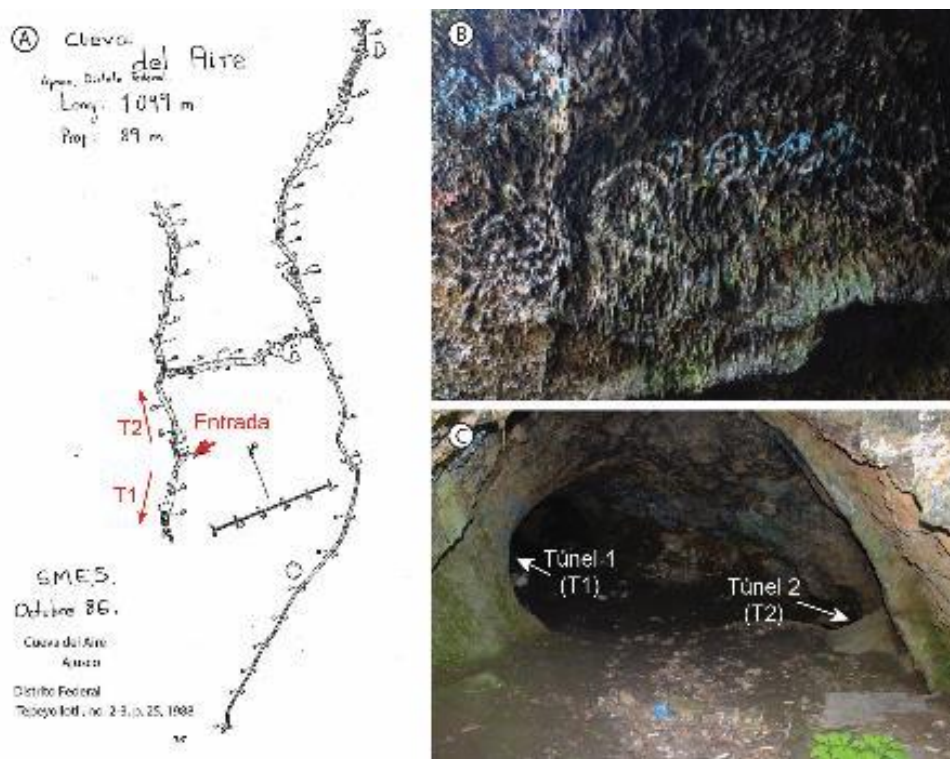


Figura 65. A. Mapa de las cuevas del aire, disponible en el sitio web <http://www.mexicancaves.org/>. B. Grafitis sobre los espeleotemas de las paredes de la cueva. C. Cámara principal de la cueva, en estado de deterioro por la disposición de desechos, desde la cual se puede acceder a dos túneles en direcciones opuestas.

Geositio 8: Sección de ceniza Arenal y lava San Buenaventura

Este sitio se ubica 1 km al noroeste del Ecoparque El Arenal, siendo un depósito de ceniza distal, con un espesor < 2 m (Figura 66A), en una zona local de conservación ecológica (Figura 66B). Bajo este depósito, en una barranca, están expuestos flujos distales de lava con zonas de brechamiento (Figura 66C) correspondientes al volcán Yololica. Estos elementos representan procesos de removilización eólica y acumulación de ceniza volcánica, así como las dinámicas de flujos de lava (viscosidad, enfriamiento, desgasificación y movimiento de la lava). Esta zona se encuentra protegida por la Asociación de Colonos de San Buenaventura, y hace parte de un condominio residencial, por lo cual su acceso es privado.



Figura 66. A. Área de ceniza descubierta de vegetación en San Buenaventura. B. Cartel informativo sobre la zona de conservación. C. Secuencia de flujos de lava con zonas brechadas, bajo la ceniza, expuesta en una barranca a menos de 5 m del área de ceniza descubierta.

4.2. Evaluación de los geositios

En la Tabla 8 se presenta la evaluación de geositios realizada mediante la metodología de (A) Brilha (2016), y en la Tabla 9 la evaluación realizada mediante la metodología de (B) Kubalíková et al. (2021). Estas se compararon mediante la normalización de los valores de (A), de manera que ambas tienen valores en una escala de 0 a 1, con rangos de evaluación bajo < 0.3 , medio entre 0.3 y 0.5, medio alto entre 0.5 y 0.65, y alto > 0.65 .

Tabla 14. Evaluación cuantitativa del valor científico, educativo y turístico de los geositios, según la metodología de Brilha (2016). Abreviaciones: PE- potencial educativo, PT- potencial turístico. Geositios: 1. Depósito de ceniza del Ecoparque El Arenal. 2. Cantera Cerro Magdalena. 3. Panorámica Cerro Magdalena. 4. Secuencia de tefra Yololica. 5. Cantera del Yololica. 6. Cráter del volcán Yololica. 7. Cuevas del aire. 8. Sección de ceniza y lava San Buenaventura.

Criterio	Peso (%)	Geositios								
		1	2	3	4	5	6	7	8	
Representatividad	30	4	4	2	4	4	4	4	2	
Localidad clave	20	0	0	0	0	0	0	0	0	
Conocimiento científico	5	0	0	0	0	0	2	0	0	
Integridad	15	1	2	4	4	2	4	2	2	
Diversidad geológica	5	1	0	1	1	1	0	0	1	
Rareza	15	4	2	2	2	4	4	4	2	
Limitación de uso	10	2	4	4	4	4	4	1	2	
Valor científico		220	220	195	255	255	290	220	145	
Valor científico normalizado		0.55	0.55	0.49	0.64	0.64	0.73	0.55	0.36	
		PE	PT	Potencial de uso educativo y turístico						
Vulnerabilidad	10	10	1	1	4	3	4	4	2	
Accesibilidad	10	10	4	2	2	1	1	1	3	
Limitación de uso	5	5	4	4	4	4	4	4	2	
Seguridad	10	10	4	2	2	2	2	2	2	
Logística	5	5	4	4	4	4	4	4	4	
Densidad poblacional*	5	5	2	2	2	2	1	1	3	
Asociación a otros valores	5	5	4	4	4	4	4	4	4	
Paisaje	5	15	2	0	0	0	0	0	0	
Unicidad (singularidad)	5	10	4	3	2	2	3	3	4	
Condiciones de observación	10	5	4	3	4	4	4	4	4	
Potencial didáctico	20	N/A	4	1	4	1	1	1	4	
Diversidad geológica	10	N/A	4	3	4	2	3	3	4	
Potencial interpretativo	N/A	10	4	2	4	3	3	3	4	
Nivel económico*	N/A	5	3	3	3	3	3	3	3	
Proximidad a áreas recreativas	N/A	5	4	4	4	4	4	4	4	
Valor educativo			360	225	330	230	240	240	310	
Valor educativo normalizado			0.90	0.56	0.83	0.58	0.60	0.60	0.78	
Valor turístico			335	230	275	245	250	250	265	
Valor turístico normalizado			0.84	0.58	0.69	0.61	0.63	0.63	0.65	

Tabla 15. Evaluación cuantitativa de los valores científico, educativo, turístico, valores adicionales y de conservación de los geositios, según la metodología de Kubalíková et al. (2021). Geositios: 1. Depósito de ceniza del Ecoparque El Arenal. 2. Cantera Domo Magdalena. 3. Panorámica Cerro Magdalena. 4. Secuencia de tefra Yololica. 5. Cráter Yololica. 6. Cantera del volcán Yololica. 7. Cuevas del aire. 8. Sección de ceniza y lava San Buenaventura.

Criterio	Geositios							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Integridad y estado actual del sitio	0.50	0.50	0.75	0.75	0.75	0.75	0.25	0.75
Rareza	1.00	0.50	0.50	0.50	1.00	1.00	1.00	0.50
Diversidad de las características de las ciencias de la tierra	0.25	0.00	0.25	0.25	0.25	0.00	0.00	0.25
Conocimiento científico	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00
Significancia paleogeográfica	0.50	0.50	0.00	0.50	0.00	0.50	0.50	0.00
Valor científico	0.45	0.30	0.30	0.40	0.40	0.55	0.35	0.30
Representatividad	1.00	0.50	1.00	1.00	0.50	1.00	1.00	0.50
Potencial didáctico e interpretativo	1.00	0.25	1.00	0.75	0.50	1.00	1.00	0.75
Material interpretativo existente	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Valor educativo	0.75	0.25	0.67	0.58	0.33	0.67	0.67	0.42
Visibilidad	1.00	0.50	0.75	0.50	0.75	1.00	0.25	0.50
Accesibilidad	1.00	0.25	0.25	0.75	0.25	0.25	0.50	0.25
Seguridad	1.00	0.50	1.00	1.00	0.75	1.00	0.25	0.75
Infraestructura e instalaciones	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00
Valor turístico	1.00	0.31	0.50	0.56	0.44	0.63	0.25	0.38
Aspecto ecológico	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	1.00	0.00
Aspecto estético	1.00	0.50	1.00	0.25	0.75	1.00	1.00	0.50
Aspecto cultural	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00
Valor adicional	0.33	0.17	0.33	0.08	0.25	0.50	0.75	0.17
Amenaza actual	0.50	0.00	0.00	0.00	0.50	0.25	0.00	0.25
Protección legislativa	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Valor conservación	0.38	0.13	0.13	0.13	0.38	0.25	0.13	0.25

A partir de la comparación entre los resultados obtenidos en las dos evaluaciones, se observa lo siguiente (Figura 67):

- I. El depósito de ceniza del Ecoparque el Arenal presenta resultados de los valores principales (científico, turístico, educativo) similares en ambas metodologías de evaluación, un valor científico medio alto en la metodología A, y medio en la metodología B, con valores educativo y turístico alto en ambas metodologías, así como valores adicionales y de conservación medios.
- II. La cantera Cerro Magdalena tiene valores principales medios según la metodología A, y valores bajos científico y educativo, así como valor turístico medio según la metodología B.

- III. El punto de observación panorámica del paisaje en el Cerro Magdalena tiene valor científico medio alto, valores educativo y turístico altos en la metodología A, pero valor científico bajo, educativo alto y turístico medio alto en la metodología B, con valor adicional medio y de conservación bajo.
- IV. El sitio de la secuencia de tefra Yololica tiene valores principales medio alto según la metodología A, valor científico medio, y educativo y turístico medio-alto según la metodología B, así como valor adicional y de conservación bajos.
- V. La cantera del volcán Yololica tiene valores principales medio alto según la metodología A, y medio según la metodología B. Con valor adicional bajo y de conservación medio.
- VI. El cráter del volcán Yololica tiene valores principales altos en la metodología A, con valores científico y turístico medio alto. En la metodología B se obtiene alto valor educativo y valor adicional medio alto, que corresponden particularmente a los aspectos ecológico y estético, y cuenta con valor de conservación bajo.
- VII. El sitio de las Cuevas del Aire tiene valores científico y turístico medio alto, y educativo alto según la metodología A, pero valor científico medio, educativo alto y turístico bajo según la metodología B. El valor de conservación es bajo y el valor adicional es alto, correspondiente a una alta importancia de aspectos ecológicos y estéticos, así como un aspecto cultural presente, aunque de menor relevancia.
- VIII. La sección de ceniza y lava San Buenaventura presenta medio valor científico con ambas metodologías, valor educativo y turístico alto en la metodología A, y medio en la metodología B, con valores adicional y de conservación bajos.

De forma general, al tener en cuenta los resultados de las dos metodologías utilizadas, el mayor valor científico se obtuvo para el cráter del volcán Yololica, en cuanto al valor educativo, sobresalen el depósito de ceniza del Ecoparque El Arenal, la panorámica del Cerro Magdalena, el cráter del volcán Yololica y las cuevas del Aire, todos con valor alto en ambas metodologías. Al comparar el valor turístico, el depósito de ceniza del Ecoparque El Arenal es el de mayor valor en las dos metodologías utilizadas, y el cráter del volcán Yololica sobresale con valor alto y medio-alto en las metodologías A y B, respectivamente. Los sitios con mayor valor de conservación (medio) son la cantera del volcán Yololica y el depósito del Ecoparque El Arenal, y entre los valores adicional sobresale un valor alto para las cuevas del Aire y medio alto para el cráter del volcán Yololica.

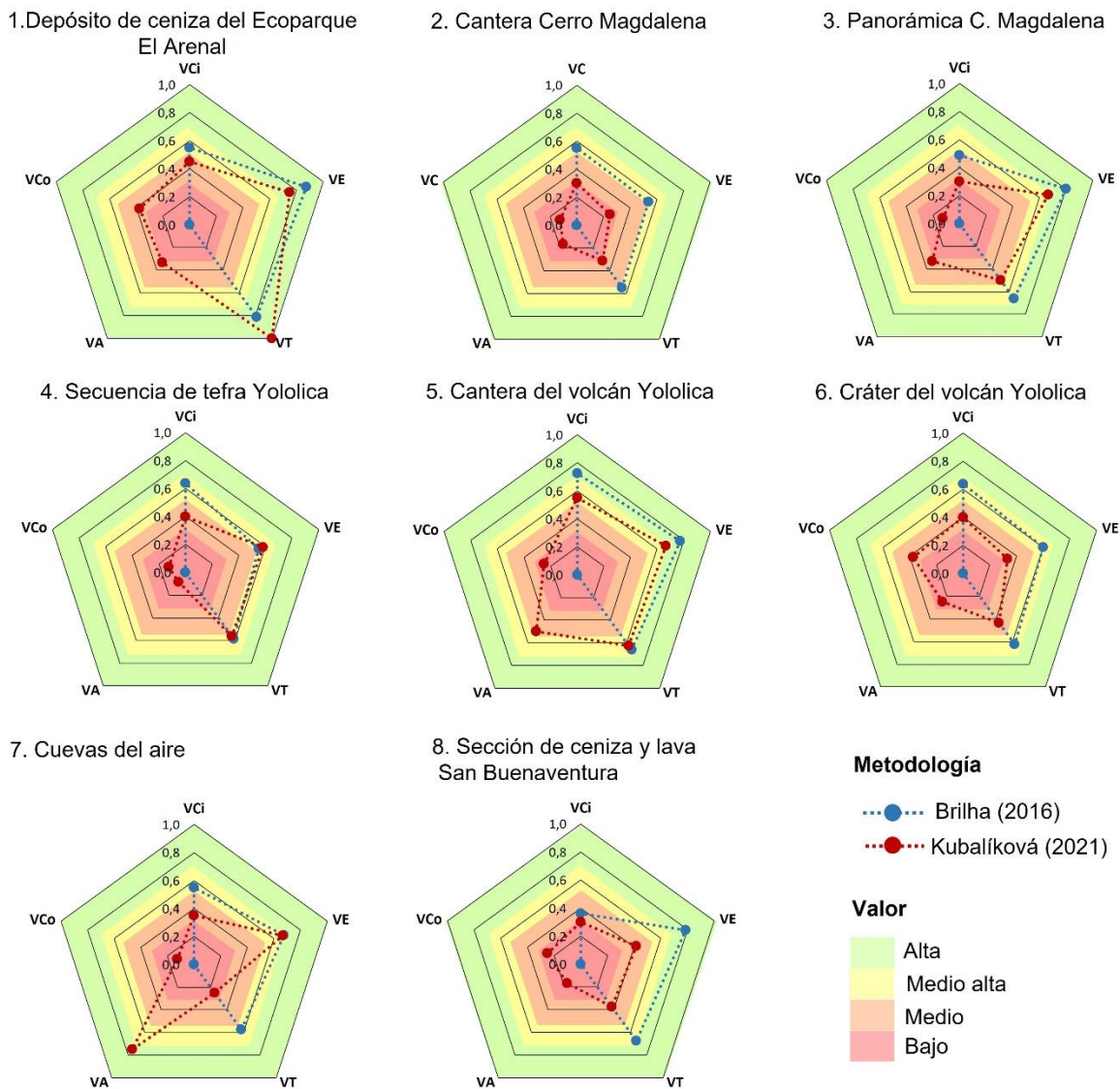


Figura 67. Evaluación de los geositios inventariados, utilizando las metodologías de Brilha (2016) y Kubalíková et al. (2021). Abreviaciones: VCI- valor científico, VE- valor educativo, VT- valor turístico, VA- valor adicional, VCo- valor de conservación.

4.3. Evaluación del riesgo de degradación antrópica

Para la estimación del riesgo de degradación en el área de estudio se obtuvieron los siguientes resultados para la probabilidad de degradación en los geositios inventariado y evaluados según cada criterio o variable:

A. Vulnerabilidad intrínseca de los elementos geológicos: mediante el mapeo de esta variable (Figura 68A) se determina una muy alta probabilidad de deterioro en la zona correspondiente a ceniza tanto dentro como fuera del Arenal, una probabilidad alta de deterioro en el cono principal del volcán Yololica, probabilidad

media en el Cerro Magdalena y baja para la zona que rodea dichos edificios, correspondiente a los flujos de lava y los depósitos de bloques de lava del volcán Yololica. De esta manera, dos de los geosítios propuestos se encuentran en zona de muy alta probabilidad de deterioro, siendo el Ecoparque uno de estos, dos geosítios estarían en zona de alta probabilidad, dos en zona de media y dos en zona de baja probabilidad de degradación.

B. Proximidad a áreas o actividades con potencial de causar degradación: con el mapeo de este criterio se identifica una zona de alta y muy alta probabilidad de degradación al rededor del Ecoparque. Gran parte de la zona se encuentra en probabilidad alta de degradación, dada su proximidad o inclusión en zonas urbanas, con cuatro geosítios dentro de esta zona, y tres geosítios en zona de media probabilidad de degradación (Figura 68B).

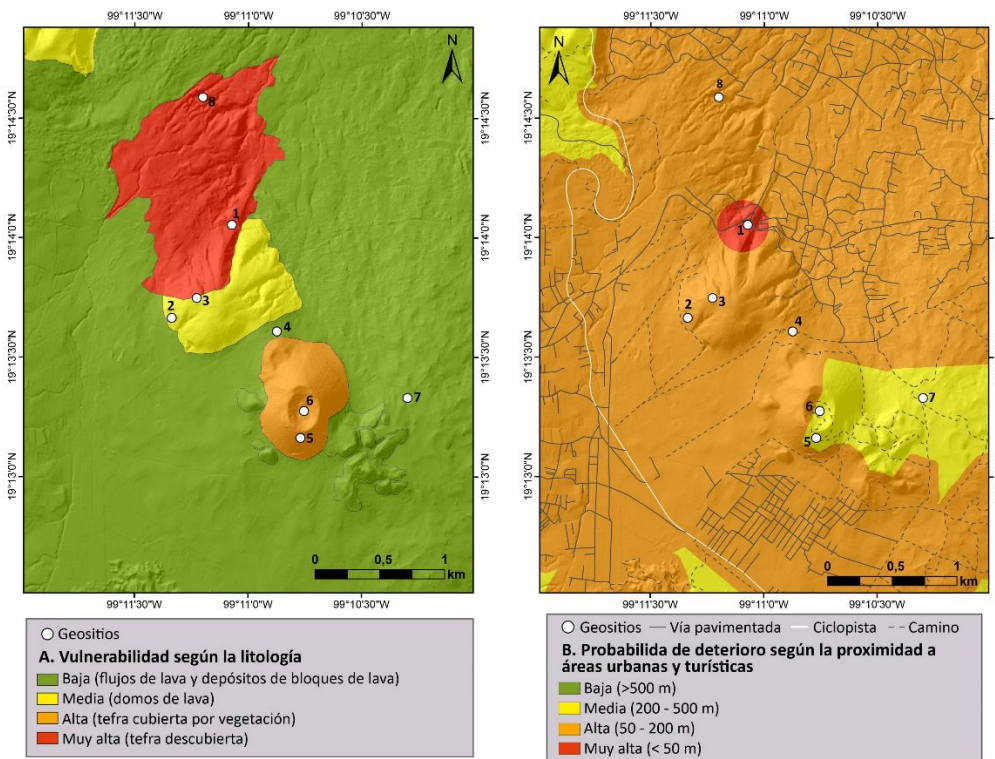


Figura 68. A. Mapa de vulnerabilidad la litología. B. Mapa de probabilidad de deterioro según el criterio de proximidad a áreas urbanas y turísticas. Geosítios: 1. Depósito de ceniza del Ecoparque El Arenal. 2. Cantera Cerro Magdalena. 3. Panorámica Cerro Magdalena. 4. Secuencia de tefra Yololica. 5. Cantera del Yololica. 6. Cráter del volcán Yololica. 7. Cuevas del aire. 8. Sección de ceniza y lava San Buenaventura. (Mapa base de sombras a partir de imágenes Lidar obtenidas del INEGI).

C. Cambio de uso de suelo

Los mapas de uso de suelo obtenidos muestran una predominancia de zona de agricultura temporal en 1985, y una predominancia de zona urbana en 2020 (Figura 69). Al realizar el muestreo y la matriz de error se determinó una exactitud general de 0.81 (81%) y un coeficiente Kappa de 0.97, y sobresale un error de omisión de 34% para la clase de agricultura temporal, y 22% para la clase de bosque Encino, con errores de comisión de 25% para las clases de uso de agricultura temporal y urbano en la clasificación de uso de suelo de 1985 (Tabla 10). De igual manera, se encontró una exactitud general de 0.93 (93%) y un coeficiente Kappa de 0.96, con un error de omisión de 20% para la clase de agricultura temporal, y 22% para la clase de bosque Encino, y de comisión de 17% para las clases de uso urbano en la clasificación de uso de suelo de 2020 (Tabla 11).

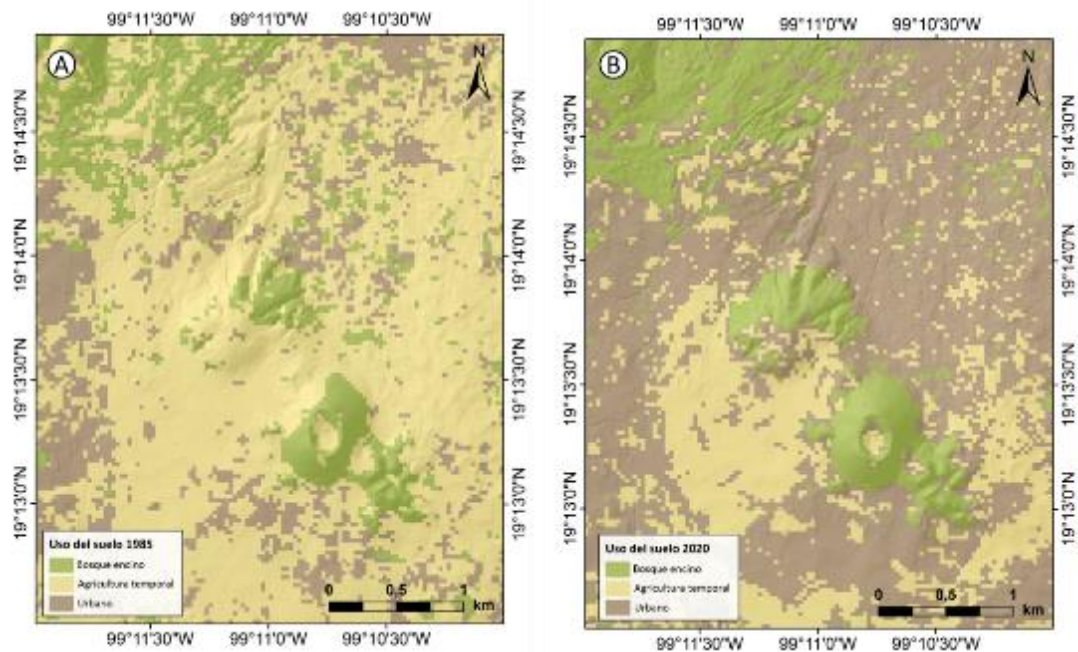


Figura 69. Mapa de clasificación de uso de suelo obtenido mediante imágenes satelitales: A. Imagen Landsat 5TM 1985. B. imagen Landsat 8OLI 2020. (Mapa base de sombras a partir de imágenes Lidar obtenidas del INEGI).

El análisis de cambio de uso de suelo permitió identificar una disminución de 6.27 km² en el área de agricultura temporal y un aumento de 5.84 km² en uso de suelo urbano para 2020, así como un área de 0.43 km² correspondiente al aumento en el uso de suelo de bosque encino a agricultura temporal (Figura 70; Tabla 12 y Tabla 13). De manera que la mayor parte del área de estudio tenía uso agrícola en 1985, pasando de 66% en 1985 a 26% en 2020. Para el año 2020 predominó el uso urbano (Figura 71A), que pasó de 18% en 1985 a 56%. El uso de suelo de bosque encino en cambio, aumentó a penas un 3%, de 15 a 18% durante esos 35 años, lo cual se debe a programas de reforestación en el área.

Tabla 16. Matriz de error del muestreo para la clasificación del uso de suelo de 1985.

Clasificación 1985	Puntos de muestreo			Total	Comisión	Exactitud del usuario
	Bosque	Agricultura	Urbano			
Bosque Encino	39	0	0	39	0	1
Agricultura Temporal	11	33	0	44	0.25	0.75
Urbano	0	17	50	67	0.25	0.75
Total	50	50	50	150		
Omisión	0.22	0.34	0			
Exactitud del productor	0.78	0.66	1			
Exactitud general	0.81					
Kappa	0.97					

Tabla 17. Matriz de error del muestreo para la clasificación del uso de suelo de 2020.

Clasificación 2020	Puntos de muestreo			Total	Comisión	Exactitud del usuario
	Bosque	Agricultura	Urbano			
Bosque Encino	50	0	0	50	0	1
Agricultura Temporal	0	40	0	40	0	1
Urbano	0	10	50	60	0.17	0.83
Total	50	50	50	150		
Omisión	0	0.2	0			
Exactitud del productor	1	0.8	1			
Exactitud general	0.93					
Coefficiente Kappa	0.96					

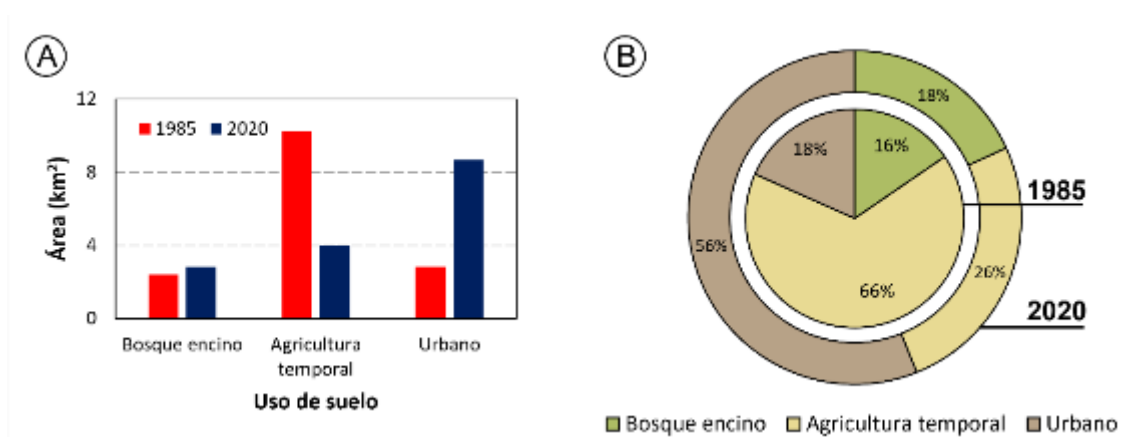


Figura 70. Cambio de uso de suelo en el área de estudio, entre los años 1985 y 2020. A. Área de cambio de uso de suelo. B. Porcentaje del cambio de uso de suelo.

Tabla 18. Áreas y porcentajes de uso de suelo estimados para 1985 y 2020.

Uso de suelo	Área 1985 (km ²)	%	Área 2020 (km ²)	%
Bosque encino	2.39	15	2.82	18
Agricultura temporal	10.26	66	3.99	26
Urbano	2.85	18	8.69	56
Total	15.50	100	15.50	100

Tabla 19. Estimación del área de cambio de uso de suelo entre 1985 y 2020 en el área de estudio.

Cambio de uso de suelo (1985-2020)	Área de cambio (km ²)
Agricultura temporal- Bosque Encino	0.88
Urbano- Bosque Encino	0.03
Bosque Encino- Agricultura temporal	0.03
Bosque Encino- Urbano	0.43
Agricultura temporal - Urbano	6.60
Urbano-Agricultura temporal	0.27

A partir de la asignación de valores de probabilidad de degradación según el cambio de uso de suelo se obtiene el mapa de este criterio (Figura 71B), determinando la ubicación de tres geositios en zona sin probabilidad de degradación asociada al cambio de uso de suelo, cuatro geositios en zonas de probabilidad alta, y el Ecoparque se encuentra entre dos zonas, la parte alta del Arenal está en zona de alta probabilidad de degradación, y la zona baja del depósito en zona baja de degradación.

D. Accesibilidad: mediante este criterio se determina la ubicación del Ecoparque en zona de muy alta probabilidad de degradación debido a que se encuentran junto a una vía pavimentada principal, tres geositios están en zona de alta probabilidad de degradación, y tres se encuentran entre zonas de media probabilidad de degradación (Figura 72A).

E. Densidad de población: con este criterio se determina que cuatro geositios se ubican en zonas de media probabilidad de degradación, ya que están dentro del desarrollo urbano del pueblo Magdalena Petlacalco, incluyendo el Ecoparque y en la zona este del pueblo San Miguel Ajusco. El geositio 8 (Sección de ceniza y lava San Buenaventura) se encuentra en zona de alta probabilidad de deterioro, y los tres geositios restantes están en zona de baja densidad poblacional con probabilidad baja de degradación (Figura 72B).

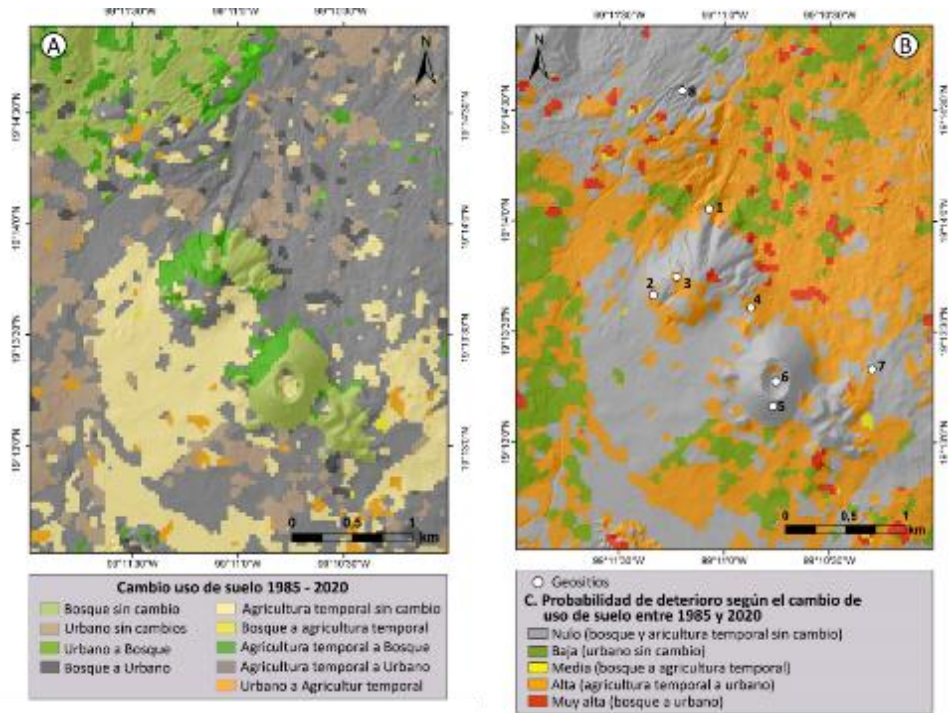


Figura 71. A. Mapa de cambio de uso de suelo entre los años 1985 y 2020. B. Mapa de probabilidad de deterioro según el criterio de cambio de uso de suelo (1985-2020). Lista de geositos en la Figura 67. (Mapa base de sombras a partir de imágenes Lidar obtenidas del INEGI).

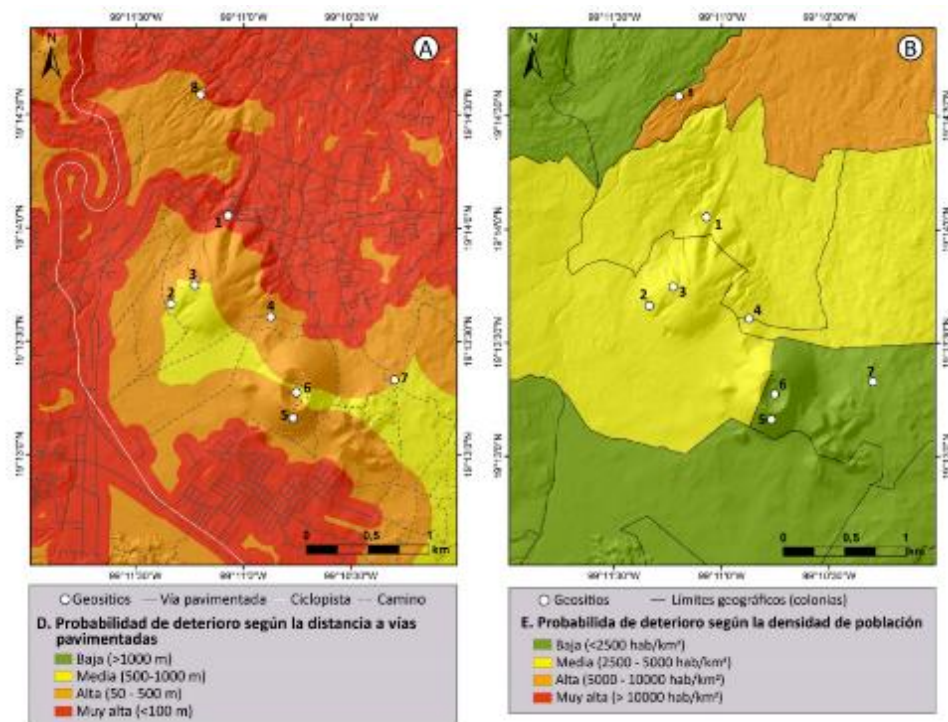


Figura 72. A. Mapa de probabilidad de deterioro según el criterio de la distancia a vías pavimentadas. B. Mapa de probabilidad de deterioro según el criterio de densidad de población. Lista de geositos en la Figura 67. (Mapa base de sombras a partir de imágenes Lidar obtenidas del INEGI).

A partir de estos resultados se obtiene el mapa de riesgo de degradación total por factores antrópicos (Figura 73), donde se observa la predominancia de zonas en riesgo de degradación alta al noreste del Cerro Magdalena, y de riesgo medio en el volcán Yololica y al norte de este, así como en su cono principal y en la parte norte del Cerro Magdalena. El Ecoparque se encuentra en zona de alto riesgo de degradación, el geositio 5 (Panorámica Cerro Magdalena) está en zona entre medio y alto riesgo, los sitios 4, 5 y 8 están en zona de riesgo medio, los sitios 2 y 6 se encuentran en riesgo entre bajo y medio, y el geositio 7 (Cuevas del Aire) está en zona de bajo riesgo de degradación. Cabe destacar que para los sitios que se encuentran entre dos zonas de riesgo de degradación, se debe tomar en cuenta el de mayor índice de riesgo, aun cuando sea menor el área que representa el alto riesgo.

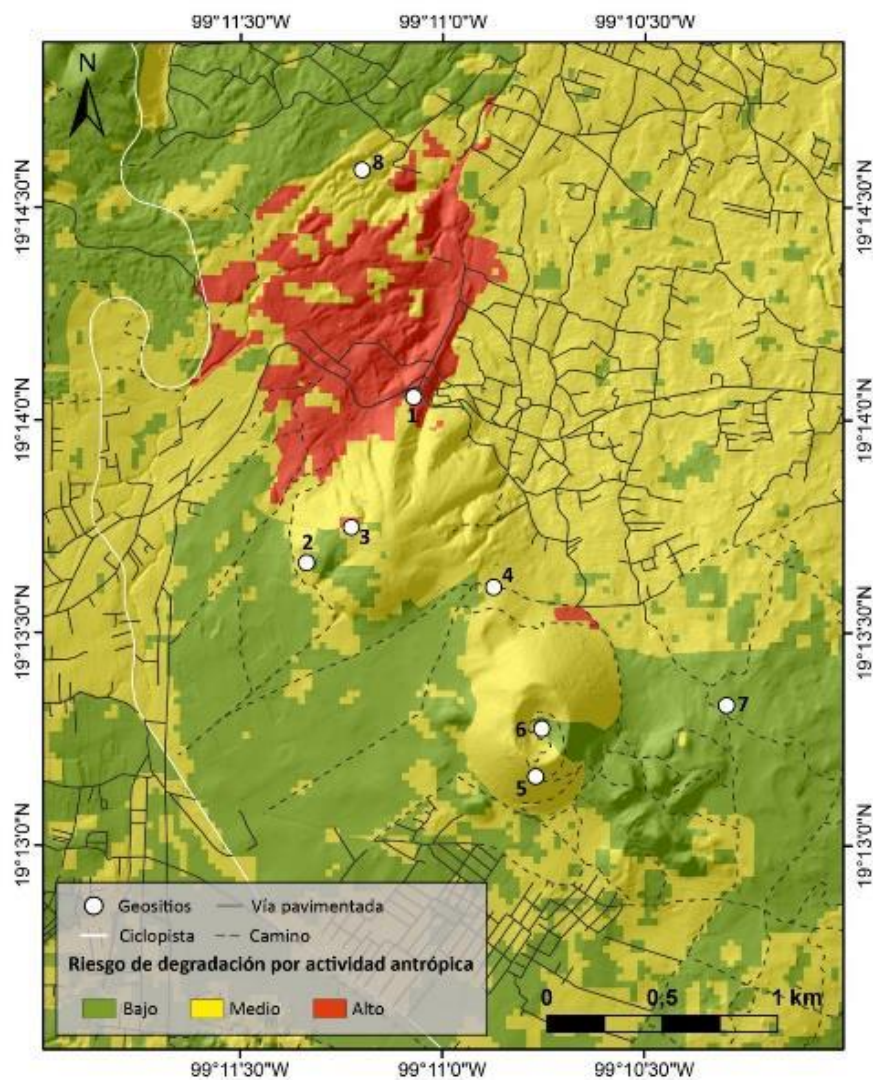


Figura 73. Mapa de probabilidad de Riesgo de degradación por actividad antrópica. Lista de geositios en la Figura 67. (Mapa base de sombras a partir de imágenes Lidar obtenidas del INEGI).

4.4. Zonas de disposición de residuos

Se identificaron cinco zonas de disposición de residuos en cercanías a los geositios (Figura 74). Estos se clasificaron de acuerdo con el tipo de residuo según los criterios de la SEMARNAT (2003). Tres de estas zonas corresponden a acumulación de residuos sólidos urbanos inorgánicos, con materiales generados en actividades domésticas como productos de consumo, envases y empaques. Estos sitios están ubicados en cercanías a los geositios de la secuencia de tefra Yololica (Figura 75A), la Cantera del Cerro Magdalena (Figura 75B), y las Cuevas del Aire, tanto en la zona externa (Figura 76A), como en el interior de estas. Dos otras zonas corresponden a acumulación de residuos de manejo especial, generados en procesos productivos que no pueden ser considerados residuos urbanos o peligrosos. Estas zonas se ubican a menos de 5 m de dos de los geositios ya mencionados, una junto a la entrada de las Cuevas del Aire, en donde hay disposición de llantas, y quema de residuos urbanos (Figura 76B), y otra en la cantera del Cerro Magdalena donde hay acumulación de rocas (Figura 77), distintas a las que componen el cerro y que probablemente correspondan a material de construcción. La presencia de zonas de disposición de residuos o, dicho de manera más simple, basureros al aire libre, puede ser considerado como evidencia de la transformación urbana del área.

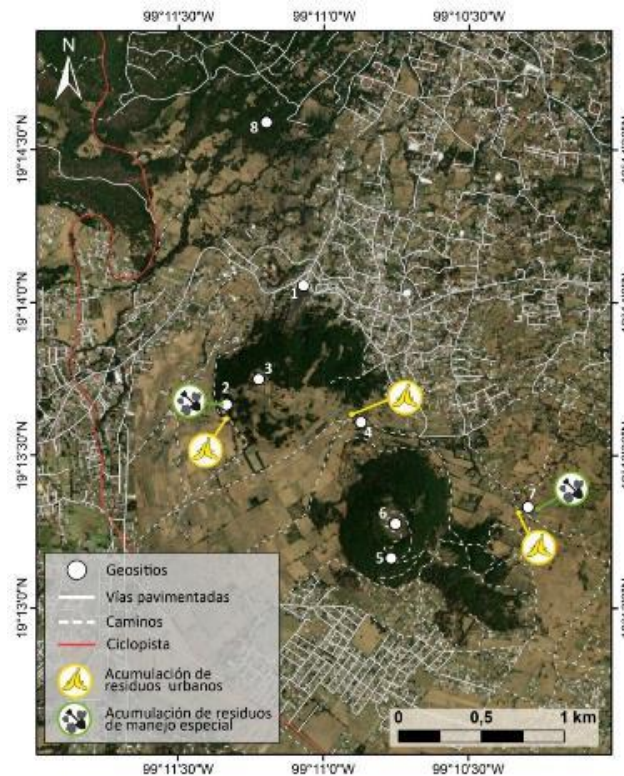


Figura 74. Mapa de las zonas de acumulación de residuos en la zona de estudio. Lista de geositios en la Figura 67. (Imagen base de 2022, Fuentes: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, USDA FSA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community).



Figura 75. Zonas de acumulación de residuos urbanos. A. Zona cercana al geositio 4. Secuencia de tefra Yololica. B. Zona cercana al geositio 2. Cantera del Cerro Magdalena.



Figura 76. Zonas de acumulación de residuos en cercanía al geositio 7. Cuevas del Aire. A. Acumulación de residuos sólidos urbanos. B. Acumulación de residuos de manejo especial (llantas) y quema de residuos sólidos urbanos.



Figura 77. Zona de acumulación de residuos especiales (roca) en cercanía al geositio 2. Cantera del Cerro Magdalena.

5. Discusión

5.1. Diagnóstico del estado y uso de los geositios

El uso turístico de los geositios puede traer beneficios económicos para la comunidad local y fomentar la conservación de la geodiversidad, pero si no se realiza un manejo adecuado y efectivo, la presión ejercida por la visita constante a los sitios puede ser una amenaza para los elementos geológicos (Herrera-Franco et al., 2022), que pueden degradarse por la disposición de residuos, el paso de automóviles y motocicletas, además de generar impacto en la fauna y flora presente. Por lo tanto, es necesario establecer planes de desarrollo turístico en la zona para determinar el manejo de residuos, así como la adecuación de infraestructura turística en los geositios (barandales, bancas, escaleras, señalización, barreras, caminos, etc.), para minimizar su degradación y garantizar la seguridad de los visitantes (Dowling & Newsome, 2018).

Los geositios evaluados pueden ser utilizados con fines turísticos y/o educativos, pero teniendo en cuenta sus características particulares y la zona de riesgo de degradación antrópica en el que se ubican, algunos deberían ser adecuados en cuanto a infraestructura, por lo cual se plantea la necesidad de desarrollar planes de manejo para su conservación, o en los casos en que ya se encuentran con cierto grado de afectación es necesario establecer un plan o actividades para su recuperación parcial o completa.

El Ecoparque (geositio 1) cuenta con el valor turístico y educativo más alto, lo que confirma que este es un sitio ideal para promover el conocimiento sobre procesos geológicos, y que con cierto grado de adecuación podría consolidarse como centro de visitantes, donde se expongan los temas educativos sobre los elementos y procesos geológicos, la importancia de la conservación de estos, y los riesgos asociados. A pesar de esto, el Ecoparque se encuentra en zona de alto riesgo de degradación por actividad antrópica, asociado a su acceso directo por vía principal pavimentada y su ubicación en la zona urbana de Magdalena Petlacalco, así como el estado no-consolidado de la duna, propensa a sufrir erosión natural por el desplazamiento de ceniza en dirección de la pendiente. Desafortunadamente, su manejo es difícil de abordar, ya que la actividad turística implica también que por el peso de los visitantes y que estos caminen, rueden, remuevan ceniza para realizar castillos de arena etc., facilita el avance y erosión de la ceniza.

Para establecer un plan de manejo y monitoreo del Arenal sería necesario realizar una evaluación integral de la vulnerabilidad de la duna, teniendo en cuenta factores como los que se aplican en el estudio de sistemas de dunas costeras (e.g. Williams et al., 2001), que consisten en estimar la erosión, aporte y retención de ceniza, así como la distribución de la cubierta vegetal y la degradación por uso antrópico. Dicha evaluación sirve para identificar las causas principales que amenazan la integridad de la duna, para así implementar las técnicas de intervención y manejo correcto, entre las cuales están el trasplante de vegetación, el uso de cercas o vallas para

atrapar la arena, caminos elevados e implementación de infraestructura informativa de uso turístico (Gómez-Pina et al., 2002; Doody, 2012).

La cantera del Cerro Magdalena (geositio 2) tiene valores científico y educativo medio-bajo asociados a que el elemento geológico (roca dacítica) y el proceso que representa (extrusión de domos de lava) no son de fácil comprensión para personas sin formación en ciencias de la Tierra, relacionado a la textura de la roca y sus minerales. Por esto, el sitio debe adecuarse para realizar actividades educativas, mediante la instalación de material explicativo que sea de fácil comprensión, aun cuando los visitantes asistan por su cuenta, sin guías que cuenten con conocimiento geológico. Sin embargo, este tipo de elemento representa condiciones de formación diferentes a los de los conos de escoria, abundantes en la zona, por condiciones de mayor viscosidad, cristalinidad y contenido de gases disueltos, así como un escenario de peligro por colapso de domo durante o después de su formación, con posible generación de avalancha de escombros y/o flujos piroclásticos, información de alto interés educativo que puede abordarse en el geositio. Al encontrarse en zona de riesgo medio de degradación por acción antrópica, cerca de zonas de disposición de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, es necesario definir un plan de manejo para el uso turístico y educativo, y el manejo y control de disposición de residuos. Adicionalmente, se necesitan adecuaciones para garantizar la seguridad de los visitantes, debido al peligro de caída de roca asociado a la pendiente casi vertical del afloramiento y el alto fracturamiento de la roca.

La panorámica del Cerro Magdalena (geositio 3) tiene potencial de uso educativo y turístico, pero al ubicarse en un espacio abierto en el sendero y estar rodeado de zonas privadas de cultivo, no está adecuado para grupos grandes (> 15 personas), por lo que su uso debe hacerse en grupos pequeños y podría adecuarse con infraestructura de descanso, ya que su acceso caminando es por una pendiente pronunciada, además de que podría implementarse señalética que explique la presencia de varios volcanes en la zona, siendo la oportunidad de introducir la noción sobre la actividad volcánica reciente en la Sierra Chichinautzin. Dado que este sitio no contiene un elemento geológico expuesto, el riesgo de degradación por actividad antrópica estaría asociado únicamente a la presión que ejercerían los visitantes sobre el suelo, aunque los elementos geológicos expuestos en la ruta para llegar al sitio si pudieran verse afectados.

La secuencia de tefra Yololica (geositio 4) cuenta con valores científico, educativo y turístico medio, pero ha sufrido erosión natural por la poca consolidación del material que se encuentra en la parte superior del afloramiento. Este elemento ha sufrido erosión natural, con acumulación de tefra en la parte inferior, lo que dificulta la observación de la secuencia eruptiva. Esto, sumado a su ubicación en zona de riesgo de degradación antrópica media, implica que para su uso se debe realizar un manejo para estabilizar la parte superior, con un monitoreo continuo del estado del sitio y de la afectación provocada por el paso de vehículos junto a este, así como el manejo y control de los residuos sólidos acumulados a pocos metros del lugar.

La cantera del volcán Yololica (geositio 5) tiene potencial de uso científico, educativo y turístico entre medio y medio-alto, pero considerando que parte del sitio se compone por material suelto, sería necesario su monitoreo para evitar la extracción de tefra roja, conocida como tezontle, que es usada como material de ornamentación en jardinería y de construcción.

En el cráter del volcán Yololica (geositio 6) se puede apreciar la morfología de cráter, este sitio es complementario al geositio 5, que exhibe la secuencia y los materiales que componen al cono, por lo que lo sería ideal conectar la visita de ambos geositios mediante señalización. El cráter tiene un alto potencial educativo, es de fácil acceso caminando y está en zona de bajo a medio riesgo de degradación por actividad antrópica, pero su valor ecológico, asociado a la presencia de diferentes especies de fauna, debe ser tenido en cuenta para considerar su uso, siendo necesario establecer un plan de protección y posible afectación de las especies que se encuentran allí; esta información, así como la importancia ecológica que tienen esta clase de relieves, podría ser brindada a los visitantes en diversos tipos de materiales de divulgación.

Las cuevas del Aire (geositio 7), por su parte, tiene alto potencial educativo pero el menor valor turístico entre los geositios evaluados, ya que no es de acceso fácil y podría no ser seguro para todos los visitantes, pues es necesario acceder con equipo espeleológico (linterna, casco, cuerdas de seguridad, etc.) y con un guía para recorrer las cámaras, además de ser el único sitio evaluado con alto valor adicional, debido al valor cultural asociado. Este sitio, a pesar de estar en zona de bajo riesgo de degradación antrópica, corresponde a un sitio con disposición de residuos urbanos sólidos, los cuales se van desplazando hacia la zona norte de los túneles, con la escorrentía de agua en época de lluvias, por lo cual deben hacerse jornadas de limpieza, además de establecer controles de ingreso para garantizarse la seguridad al acceder a la cueva.

La sección de lava y ceniza de San Buenaventura, a pesar de su valor turístico medio a medio-alto, no podría desarrollarse para uso turístico debido a su ubicación dentro de una unidad residencial, sin embargo, esta condición de acceso privado puede resultar útil para la conservación del sitio, teniendo en cuenta que está en zona de riesgo medio de degradación por actividad antrópica, con la posibilidad de realizar actividades educativas dirigidas a los residentes de la zona.

Los resultados de la evaluación de valores científico, turístico y educativo pueden compararse a la evaluación de los geositios asociados al volcán Xitle, presentada por Guilbaud et al. (2021b), quienes también utilizan la metodología de Brilha (2016), teniendo en cuenta la cercanía de estos sitios con los del presente estudio. Al comparar el valor científico, los geositios asociados al volcán Xitle tienen índices más altos de conocimiento científico, ya que han sido más estudiados, y también índices más altos de diversidad geológica, pues cada sitio representa varios procesos geológicos, mientras que en los sitios cercanos al Ecoparque El Arenal, cada uno representa un proceso geológico particular. En cuanto a los valores turístico y educativo, de forma general,

tanto los geosítios relacionados al Xitle, como los relacionados al Ecoparque presentan índices similares, siendo diferentes en la accesibilidad, debido a que los sitios propuestos para el Xitle tienen en su mayoría control de acceso. De lo expuesto anteriormente sobresale el hecho de que los geosítios asociados al Xitle tienen alto conocimiento geológico, sumado a esto, en ellos actualmente se realizan actividades educativas y turísticas, lo que implica que a partir de la divulgación de los datos geológicos de la zona del Ecoparque, presentados en el capítulo 1, el valor científico aumentará en los geosítios y permitirá tener más información disponible para las actividades que se pudieran realizar en un futuro.

5.2. Propuesta de uso de los geosítios

La urbanización en zonas de suelo de conservación conlleva a la destrucción de los valores ecológicos y culturales, como se ha evidenciado en otras zonas de la Ciudad de México, por ejemplo, en Xochimilco (al noreste del área de estudio), donde el desarrollo urbano irregular ha causado la disminución de las zonas agrícolas, desaparición de fauna, contaminación y sobreexplotación de acuíferos, así como la disminución del valor cultural asociado a sus pueblos originarios (Corona, 2017). La zona de estudio se encuentra en un escenario comparable con el de Xochimilco, pues, aunque hace parte del suelo de conservación, ha sufrido un alto nivel de urbanización, y a pesar de que el área de bosque se ha mantenido casi constante durante los últimos 30 años gracias a programas de reforestación del CORENADR, el área agrícola ha disminuido considerablemente. El desarrollo urbano se ha dado principalmente mediante la formación de asentamientos irregulares, que carecen de algunos de los servicios básicos de agua, luz y drenaje, y que se ubican en una zona con rutas de transporte limitadas hacia el área metropolitana de la ciudad, lo que resulta en un alto grado de marginalización de las poblaciones e implica una mayor vulnerabilidad de estas ante eventos de riesgos de desastres.

Tomando en cuenta la situación socioambiental de la zona, el uso de los geosítios propuestos con fines educativos para promover la apreciación y entendimiento de la importancia de estos como elementos formadores del paisaje, así como de los beneficios y de los riesgos asociados a ellos, podría ser una herramienta para desarrollar una cultura de resiliencia ante la ocurrencia de desastres por fenómenos naturales, a la vez que se promueve la conservación de los elementos geológicos. En la Tabla 14 se plantean los temas geoeducativos que podrían abordarse en la visita de cada geosítio de acuerdo con el nivel educativo de los visitantes.

En los últimos años, el uso de georutas como estrategia de enseñanza sobre ciencias de la Tierra se ha vuelto más común (e.g. Burek & Hope, 2006, Alberico et al., 2023, Arenas-Martija et al., 2021, Herrera-Franco et al., 2022), desarrolladas en conjunto con la participación de la comunidad local, frecuentemente con actividades propias de la cultura local (e.g. talleres de cocina, talleres de cerámica, actividades de danza etc.) que permitan establecer la conexión entre los habitantes y visitantes con el lugar en cuestión (Migoñ, P & Pijet-Migoñ, 2019).

Para el desarrollo de este tipo de rutas es necesario diseñar materiales como paneles informativos, guías explicativas o material digital que permita la interpretación autoguiada de los sitios (Carrión-Mero et al., 2021).

A partir de los resultados de la evaluación del potencial educativo y turístico de los geositorios, así como el riesgo de degradación antrópico en estos, se sugiere la implementación de una georuta turística (Figura 78) que incluya siete de los ocho geositorios inventariados. Se excluye el geositorio 8 de la sección de ceniza y lava San Buenaventura, debido a la limitación de uso turístico por su acceso privado. La georuta propuesta sigue un camino de aproximadamente 5 km, que en algunas zonas está construido por piedra y en otras está descubierto, lo que implica que puede ser transitado por automóviles, motos y bicicletas, al igual que puede realizarse caminando.

Tabla 20. Temas propuestos para abordar en actividades geoducativas en la georuta.

Geositorio	Temas para abordar en actividades geoducativas	
	Público con conocimientos en ciencias de la Tierra	Público general
1. Depósito de ceniza del Ecoparque El Arenal	Procesos eólicos de erosión y re-deposición de ceniza.	¿De qué está compuesta la ceniza volcánica? Riesgos asociados a la acumulación de ceniza.
2. Cantera Cerro Magdalena	Domos de lava: temperatura, viscosidad, cristalinidad, texturas de enfriamiento.	¿Qué es un domo de lava y qué tipo de minerales contiene?
3. Panorámica Cerro Magdalena	Geomorfología en zonas volcánicas.	¿Qué es un campo volcánico: ¿por qué hay tantos volcanes en la Sierra Chichinautzin?
4. Secuencia de tefra Yololica	Características de los depósitos de caída. Tipos de piroclastos: ceniza, lapilli, bloques. Cambios de energía en las erupciones.	¿Cómo se ven las partículas que expulsan los volcanes?
5. Cráter Yololica	Evolución geomorfológica de los conos de escoria.	¿Por qué los volcanes tienen cráteres? Los volcanes como hábitat de fauna y flora.
6. Cantera del volcán Yololica	Procesos syn-eruptivos de oxidación en conos volcánicos.	¿De qué está formado un cono volcánico?
7. Cuevas del aire	Dinámicas de los flujos de lava: temperatura, viscosidad, contenido de volátiles.	¿Cómo se forma un tubo de lava? Temperaturas de los flujos de lava. Importancia de los tubos de lava como zonas de recarga de agua.
8. Sección de ceniza y lava San Buenaventura	Procesos eólicos de erosión y re-deposición de ceniza. Dinámicas de los flujos de lava: temperatura, viscosidad, desgasificación.	¿De qué está compuesta la ceniza volcánica? ¿Cómo se desplazan los flujos de lava? Riesgos asociados a la acumulación de ceniza y a los flujos de lava.

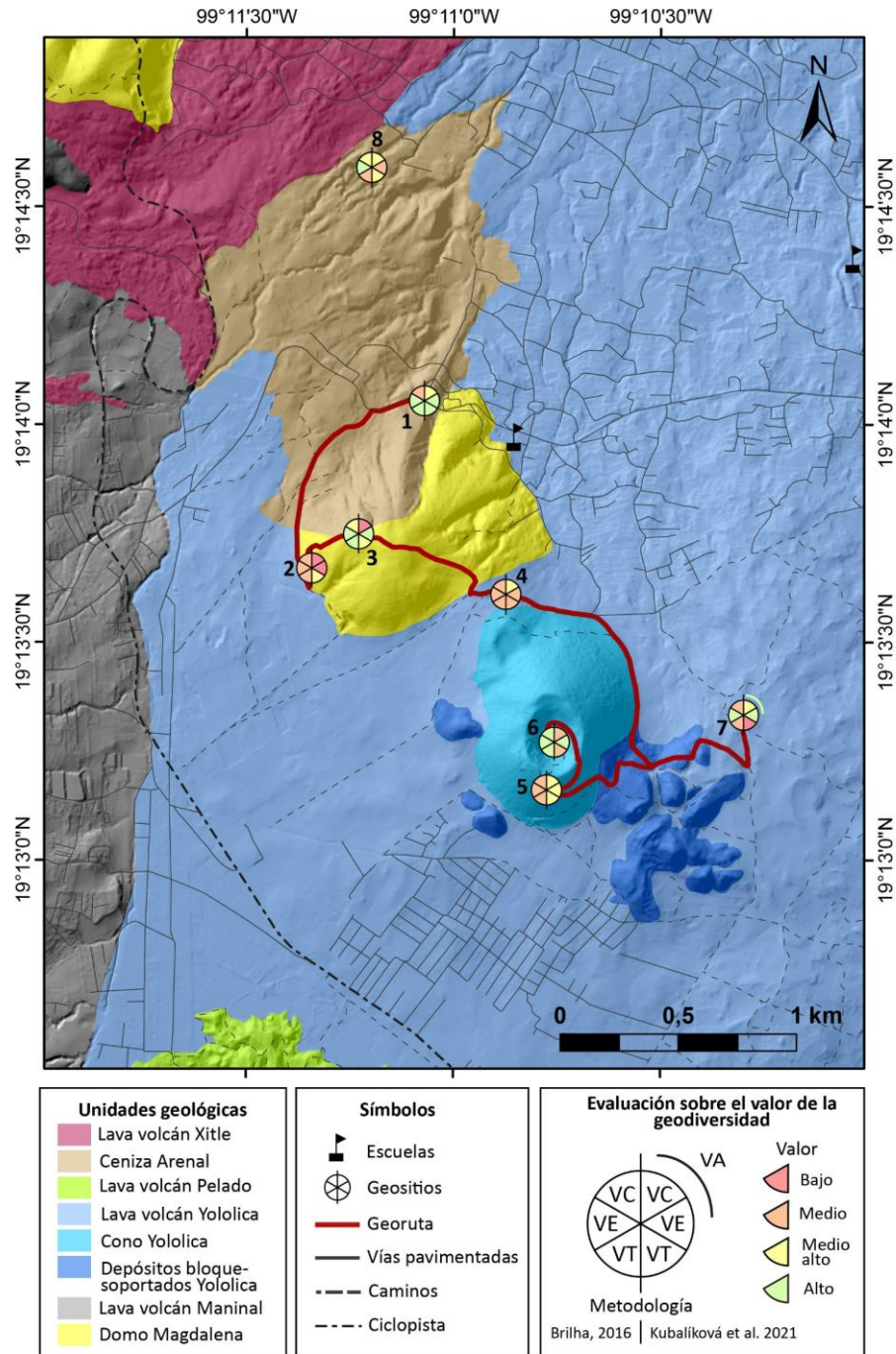


Figura 78. Mapa de la georuta turística planteada y la evaluación sobre el valor de la geodiversidad de los geositos propuestos. Abreviaciones: VC- valor científico, VE- valor educativo, VT- valor turístico, VA- valor adicional (ecológico y de conservación). Lista de geositos en la Figura 67. Geositos: 1. Depósito de ceniza del Ecomuseo El Arenal. 2. Cantera Cerro Magdalena. 3. Panorámica Cerro Magdalena. 4. Secuencia de tefra Yololica. 5. Cantera del Yololica. 6. Cráter del volcán Yololica. 7. Cuevas del aire. 8. Sección de ceniza y lava San Buenaventura. (Mapa base de sombras a partir de imágenes Lidar obtenidas del INEGI).

Para promover el establecimiento de la georuta y la coordinación de actividades turísticas y educativas en esta, se deben establecer vínculos con diferentes asociaciones de la sociedad civil como los ejidos de Magdalena Petlacalco y San Miguel Xicalco, comunidad de Magdalena Petlacalco, la Asociación de Colonos San Buenaventura, así como con instancias del gobierno local como la Alcaldía de Tlalpan, específicamente la Dirección general de medio ambiente, desarrollo sustentable y fomento económico, y la CORENADR (Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural).

Para impulsar la creación de estos vínculos, se realizó un taller en mayo de 2023, con brigadistas del CORENADR de la zona de suelo de conservación de Magdalena Petlacalco, la mayoría de ellos habitantes del pueblo. Esta actividad se organizó como un primer acercamiento a la comunidad en colaboración con los encargados del Ecoparque, que hacen parte de la junta del ejido de Magdalena Petlacalco. El taller consistió en una charla sobre el contexto volcánico en México, el campo volcánico Sierra Chichinautzin y los volcanes del sur de la Ciudad de México, seguida por una caminata, visitando cinco de los geositios (1, 2, 3, 5 y 6, Figura 79), y dos afloramientos adicionales ubicados a 35 y 300 m del Ecoparque, con el fin de reconocer las unidades geológicas expuestas en la zona. El taller estuvo dirigido a un grupo de 30 personas, con una duración en el recorrido de aproximadamente cinco horas. Mediante la interacción con los brigadistas se comprobó que existe interés por aprender sobre los recursos geológicos y cómo estos se relacionan con las actividades agrícolas y la productividad de las cosechas de la zona, así como la preocupación por una reactivación de la actividad en los edificios volcánicos cercanos. Esto último implica que es necesario crear conciencia sobre la posibilidad del nacimiento de un nuevo volcán en el sur de la Ciudad de México, posibilidad que no estaría relacionada directamente a los edificios volcánicos preexistentes. Es necesario realizar un estudio más profundo con la comunidad, para determinar las preocupaciones asociadas a procesos de riesgo que deban abordarse específicamente en las actividades y materiales de divulgación, como talleres acerca del uso del suelo y las prácticas que puedan mejorar la producción agrícola local y la disposición de residuos, aunque en este estudio no se determinó si las zonas de acumulación de residuos responden a problemas en el sistema de recolección, ni si estos son desechados por personas de la comunidad o externas a esta, factores importantes para abordar esta problemática.

Se podría plantear otro proyecto, específicamente educativo, dirigido a estudiantes de escuelas de nivel básico, mediante la visita a los geositios 1, 3 y 6, que cuentan con alto valor educativo y son de acceso fácil y seguro, se excluye al sitio 7 con alto valor educativo, debido a que para este se necesita equipo especial para el ingreso a las cuevas y debe contarse con un guía para actividades de espeleología. El desarrollo de actividades educativas serviría para familiarizar a los estudiantes con el entorno que los rodea, afianzando algunos conceptos sobre las ciencias de la Tierra a partir de la interacción con la naturaleza (incluyendo los elementos abióticos), para transmitir la importancia de su conservación. El desarrollo de este tipo de actividades debe ser

planeado cuidadosamente con docentes de escuelas, contemplando el transporte, el tiempo, los materiales a utilizar y la forma de garantizar la seguridad de los alumnos.

Finalmente, la promoción de la ruta y las actividades educativas puede realizarse en el Ecoparque mediante el diseño e instalación de material gráfico en este, como el mapa con la ruta e información sencilla acerca de los elementos geológicos, dirigida a público con todo tipo de escolaridad, y los valores ecológicos y culturales asociados a estos. Esto complementado por la instalación de señalética que indique la dirección para recorrer el camino e información sobre cada geositio.



Figura 79. Recorrido geológico con brigadistas del CORENADR de la zona de suelo de conservación de Magdalena Petlacalco realizado en colaboración con el Ecoparque. A. Charla sobre el contexto volcánico de México. B. Visita a la sección CHI-208, donde se explicó la secuencia de eventos volcánicos en la zona de Magdalena Petlacalco. C. Observación de la ceniza del Arenal. D. Caminata hacia el volcán Yololica. E. Observación de un bloque oxidado proveniente del volcán Yololica en la cantera de este (geositio 6).

CONCLUSIONES

El Ecoparque El Arenal es un sitio turístico importante para los habitantes del pueblo Magdalena Petlacalco, y es un ejemplo del turismo basado en elementos geológicos, ubicado en una zona en proceso de desarrollo urbano. Este trabajo aporta información relevante sobre varios aspectos del Ecoparque y su área aledaña, como la caracterización y reconstrucción de su historia geológica y sus valores científicos, turísticos y educativos, que podrían permitir el desarrollo de geositios para diversas actividades turísticas y educativas. Específicamente, los resultados presentados podrán ser utilizados para la difusión en el Ecoparque y su comunidad, con el fin de fomentar la educación y el sentido de pertenencia sobre el territorio y la geodiversidad local, lo que implica conocer los beneficios económicos y ambientales, así como el peligro por fenómenos geológicos, lo cual aportaría al desarrollo de una cultura de conservación y resiliencia.

Primero, el trabajo vulcanológico permite constreñir el origen del Arenal y subraya la importancia de fenómenos de removilización de depósitos de ceniza en campos monogenéticos. Se determinó que el Arenal está conformado por ceniza volcánica que se originó por la removilización eólica de depósitos de caída proveniente principalmente de la erupción del volcán Pelado, mezclada con productos de caída de la erupción Tutti Frutti del volcán Popocatepetl. La removilización se dio por episodios continuos de tormentas de ceniza en un período de tiempo corto (meses o años), y cuya deposición ocurrió por desaceleración del viento en el sotavento del Cerro Magdalena, que funcionó como obstáculo, permitiendo el desarrollo de una duna sombra o sotavento. Los procesos de deposición probablemente ocurrieron poco después de la erupción del volcán Pelado, inicialmente con mayor intensidad, dada la acción de vientos fuertes favorecidos por condiciones climáticas secas, de baja humedad y escasez de vegetación, y que continúan ocurriendo con menor intensidad hasta el presente. Este tipo de depósitos constituyen una evidencia de procesos secundarios asociados a erupciones monogenéticas de tipo estromboliana violenta, con la removilización y acumulación de grandes cantidades de ceniza, lo cual representa un escenario de peligro durante y después de la erupción, que debe ser especialmente considerado en la gestión de riesgo en zonas densamente pobladas que se ubican en o cerca a campos volcánicos monogenéticos, como la Ciudad de México.

La información vulcanológica también aporta a la reconstrucción de la historia vulcanológica en el área. En la zona aledaña al Ecoparque se identificaron seis eventos principales, en orden cronológico: 1) formación del domo dacítico Magdalena (Cerro Magdalena). 2) Erupción del volcán Yololica, datada en 22,000 años cal. AP, caracterizada por actividad efusiva y explosiva, así como por el colapso y reconstrucción de su cono eruptivo principal. 3) Deposición distal de pómez de caída de la erupción Tutti Frutti del volcán Popocatepetl, de edad 17,000 años cal. AP. 4) Deposición distal de capas de caída del volcán Pelado, durante la erupción de edad 13,000 años cal AP. 5) Removilización de la ceniza del volcán Pelado y la capa Tutti Frutti y formación de la

duna del Arenal. 6) Erupción del volcán Xitle, de edad 1,700 años cal. AP, que cubrió la parte más distal de los depósitos de ceniza Arenal.

En el tema de la vulcanología, se sugiere que para trabajos futuros se investigue un área más extensa, fuera del Ecoparque, para determinar si la distribución de los depósitos asociados con la removilización de las cenizas de caída del Volcán Pelado es más amplia, y re-evaluar la importancia de estos procesos. También se sugiere realizar estudios más detallados sobre el domo Magdalena, para estimar su edad y establecer sus condiciones eruptivas, así como determinar la similitud o relación entre este y los domos Xochitepec, Santa Mónica, y los domos de la ciclopista, que se encuentran cerca y tienen composiciones similares pero mayor grado de erosión.

En cuanto a temas de geopatrimonio, esta investigación demuestra la presencia de una alta diversidad geológica, asociada principalmente a procesos volcánicos, así como el carácter único de la duna del Ecoparque y la ubicación de estos en un área de desarrollo urbano le otorgan un alto potencial geoturístico y geoes educativo a la zona. Por esto, se proponen ocho geositorios con el desarrollo de una ruta geoturística que recorra siete de ellos, complementada por el desarrollo de actividades educativas; esto con el fin de promover la apreciación y conservación de los elementos geológicos, así como la concientización respecto a peligros geológicos, tomando como centro de visitantes y punto de partida al Ecoparque, cuya infraestructura fue construida y actualmente es manejada por la junta comunal de Magdalena Petlacalco. El desarrollo de actividades turísticas y educativas en los geositorios propuestos debe acompañarse por planes de manejo y monitoreo, así como por un plan de manejo de residuos, problemática que fue identificada en la zona, al igual que la adecuación de algunos sitios con infraestructura como barandales, bancas y señalética informativa que permita la divulgación de la información geológica, y los valores ecológicos y culturales asociados a estos elementos.

REFERENCIAS

- Alberico, I., Alessio, G., Fagnano, M., & Petrosino, P. (2023). The Effectiveness of Geotrails to Support Sustainable Development in the Campi Flegrei Active Volcanic Area. *Geoheritage*, 15(1), 15.
- Álvarez, G. M., Miranda, C. C., Fucugauchi, J. U., & Uchiumi, S. (1991). Southward migration of volcanic activity in the Sierra de Las Cruces, basin of Mexico? -a preliminary K-Ar dating and palaeomagnetic study. *Geofísica Internacional*, 30(2), 61-70.
- Arce, J. L., Layer, P. W., Lassiter, J. C., Benowitz, J. A., Macías, J. L., & Ramírez-Espinosa, J. (2013). 40 Ar/39 Ar dating, geochemistry, and isotopic analyses of the quaternary Chichinautzin volcanic field, south of Mexico City: implications for timing, eruption rate, and distribution of volcanism. *Bulletin of Volcanology*, 75(12), 1-25.
- Arce, J. L., Layer, P. W., Macías, J. L., Morales-Casique, E., García-Palomo, A., Jiménez-Domínguez, F. J., Benowitz, J. & Vásquez-Serrano, A. (2019). Geology and stratigraphy of the Mexico basin (Mexico city), central trans-Mexican volcanic belt. *Journal of Maps*, 15(2), 320-332.
- Arenas-Martija, A., Orrego-Araya, J., Ortiz-Pavéz, C., Gajardo-Tapia, C., Zanetta-Colombo, N., Inzunza-López, K., Cisternas-Silva, N., Córdova-See, C., Goehler-Marchant, A. M., Baéz-Córdova, N., Bistamante-Bernal, V., Galleguillos-Bustamante, X., Gavilán-Maturana, K., Gómez-Miqueles, M., Iturrieta-Ortiz, C., Nilo-Fuentes, J., Baéz-Donoso, C., Chacana-Faras, I. C., & Rivera-Silva, X. (2021). Collaborative Creation of Educational Geo Routes: A Strategy for Teaching and Learning Sciences and Geography, Puchuncaví, Chile. *Global Geographical Heritage, Geoparks and Geotourism: Geoconservation and Development*, 449-483.
- Arnalds, O., Thorarinsdottir, E. F., Thorsson, J., Waldhauserova, P. D., & Agustsdottir, A. M. (2013). An extreme wind erosion event of the fresh Eyjafjallajökull 2010 volcanic ash. *Scientific reports*, 3(1), 1257.
- Ávila, A. (2021). Conoce la “duna chilanga” en el parque El Arenal. *El Universal*. <https://www.eluniversal.com.mx/destinos/parque-ecoturistico-el-arenal-deslizate-en-la-duna-chilanga>
- Bernal, J. (2021). Parque Ecoturístico El Arenal: practicar sandboarding en la CDMX. *Mexico Travel Channel*. <https://mexicotravelchannel.com.mx/ecoturismo/20210508/parque-ecoturistico-el-arenal-ajusco-sandboarding-cdmx/>
- Bitschene, P. R. (1991). Environmental impact and hazard assessment of the August 1991 eruption of Mt. Hudson (Patagonian Andes). *The August*, 2-15.
- Boland, K. A. (1996). The petrogenesis of andesites produced during regional extension: examples from the northern McCullough Range, NV and Xitle Volcano, Mexico [Tesis de doctorado, University of Nevada, Las Vegas]. <https://digitalscholarship.unlv.edu/thesedissertations/1440/>
- Bolós, X., Macias, J. L., Ocampo-Díaz, Y. Z. E., & Tinoco, C. (2021). Implications of reworking processes on tephra distribution during volcanic eruptions: The case of Parícutin (1943–1952, western Mexico). *Earth Surface Processes and Landforms*, 46(15), 3143-3157.
- Brilha, J. (2016). Inventory and quantitative assessment of geosites and geodiversity sites: a review. *Geoheritage*, 8(2), 119-134.
- Burek, C. & Hope, M. (2006). The use of town trails in raising awareness of urban geodiversity. In *The Geological Society of London*, (Vol. 15, pp. 1-7). The Geological Society.

- Canal Azteca Noticias, (10 de abril de 2015). El Arenal, lugar de esparcimiento para los capitalinos Noticias. [Archivo de video]. Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=o2sqwBCgBII&ab_channel=AztecaNoticias
- Canal Dominguez Gonzalez. (17 de febrero de 2013). El arenal en San Miguel Ajusco o en Magdalena Petlacalco. [Archivo de video]. Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=0L_YICYGzKE&ab_channel=DominguezGonzalez
- Canal R. Paris. (23 de agosto de 2014). Aprendiendo Sandboarding en el arenal del Ajusco. [Archivo de video]. Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=xU_byC886Gc&ab_channel=R.Paris
- Canal Sin Nombre //Marlon Salgado. (20 de febrero de 2021). De visita por El Parque Ecoturístico El Arenal. [Archivo de video]. Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=0r0pNL3i8nw&ab_channel=SinNombre%2F%2FMarlonSalgado
- Canal Felix and Derek. (8 de abril de 2021). El Arenal, Ajusco. [Archivo de video]. Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=hB-yiIaesIs&t=426s&ab_channel=F%C3%A9lixandDerek
- Carcavilla, L., Durán, J. J., García-Cortés, Á., & López-Martínez, J. (2009). Geological heritage and geoconservation in Spain: past, present, and future. *Geoheritage*, 1, 75-91.
- 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.
- Cas, R., & Wright, J. (2012). Volcanic successions modern and ancient: A geological approach to processes, products and successions. Springer Science & Business Media.
- Casanova, D. A., Suárez, G., Cabral-Cano, E., Fernández-Torres, E. A., Fuentes-Mariles, O. A., Havazli, E., Jaimes, M. A., López-Espinoza, E. D., Del Pozzo, A. L. M., Morales-Barrera, W. V., Morales-Rodríguez, H. L., Nieto-Torres, A., Rodríguez-Elizarrás, S. R., Solano-Rojas, D., & Velasco-Herrera, V. M. (2021). The Risk Atlas of Mexico City, Mexico: a tool for decision-making and disaster prevention. *Natural Hazards*, 1-27.
- Cervantes, P., y Molinero, R. (1995). Eventos volcánicos al sur de la Ciudad de México: Ciudad de México [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México].
- Chylińska, D., & Kołodziejczyk, K. (2018). Geotourism in an urban space?. *Open Geosciences*, 10(1), 297-310.
- CONAPO. (2020). Índice de marginación Urbana 2020.
- CONEVAL. (2021). Comunicado No. 09, Ciudad de México, 5 de agosto de 2021. Dirección de información y comunicación social. 40 p.
- Coratza, P., & De Waele, J. (2012). Geomorphosites and natural hazards: teaching the importance of geomorphology in society. *Geoheritage*, 4, 195-203.
- Corona, J. P. (2017). URBANIZACIÓN Y CONFLICTOS AMBIENTALES EN SUELO DE CONSERVACIÓN DE XOCHIMILCO, CIUDAD DE MÉXICO. *Crece empresarial journal of management and development*, (1).
- Cortés, J. A. (2022). "CFU-PINGU," <https://theghub.org/resources/cfupingu>.

- Delegación de Tlalpan. (2015). 9 pueblos originarios de Tlalpan: Mitos y leyendas. Voces de Cultura. https://issuu.com/dianaluzreyes/docs/1-mitos_y_leyendas-tlalpan.
- Delgado, H., & Del Pozzo, A. L. M. (1993). Pliocene to Holocene volcanic geology at the junction of Las Cruces, Chichinautzin and Ajusco ranges, southwest of Mexico City. *Geofísica Internacional*, 32(3), 511-522.
- Delgado, H., Molinero, R., Cervantes, P., Nieto-Obregón, J., Lozano-Santa Cruz, R., Macías-González, H. L., Medoza-Rosales, C., & Silva-Romo, G. (1998). Geology of Xitle volcano in southern Mexico City—a 2000-year-old monogenetic volcano in an urban area. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 15(2), 115-131.
- Del Lama, E. A., De La Corte Bacci, D., Martins, L., da Glória Motta Garcia, M., & Dehira, L. K. (2015). Urban geotourism and the old centre of São Paulo City, Brazil. *Geoheritage*, 7, 147-164.
- Demant, A. (1978). Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 2(2), 172-187.
- Dominguez, L., Bonadonna, C., Forte, P., Jarvis, P. A., Cioni, R., Mingari, L., Bran, D., & Panebianco, J. E. (2020). Aeolian remobilisation of the 2011-Cordón Caulle tephra-fallout deposit: example of an important process in the life cycle of volcanic ash. *Frontiers in Earth Science*, 7, 343.
- Dóniz-Páez, F. J. (2014). Reflexiones en torno al turismo volcánico. El caso de Islas Canarias, España. *PASOS Revista de Turismo y Patrimonio Cultural*, 12(2), 467-478.
- Doody, J. P. (2012). Sand dune conservation, management and restoration (Vol. 4). Springer Science & Business Media.
- Dowling, R. K. (2013). Global geotourism—an emerging form of sustainable tourism. *Czech journal of tourism*, 2(2), 59-79.
- Dowling, R., & Newsome, D. (2018). Geotourism: definition, characteristics and international perspectives. *Handbook of geotourism*, 1-22.
- Escribano, P., Palacios-Orueta, A., Oyonarte, C., & Chabrilat, S. (2010). Spectral properties and sources of variability of ecosystem components in a Mediterranean semiarid environment. *Journal of Arid Environments*, 74(9), 1041-1051.
- Fepuleai, A., Németh, K., & Muliaina, T. (2021). Geopark impact for the resilience of communities in Samoa, SW Pacific. *Geoheritage*, 13(3), 50.
- 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, 122-149.
- Forte, P., Domínguez, L., Bonadonna, C., Gregg, C. E., Bran, D., Bird, D., et al. (2018). Ash resuspension related to the 2011-2012 Cordón Caulle eruption, Chile, in a rural community of Patagonia, Argentina. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 350, 18–32.
- Francis, P. W. (1993). *Volcanoes, A Planetary Perspective*. Clarendon Press, Oxford.
- García, A. V. (2005). El riesgo como construcción social y la construcción social de riesgos. *Desacatos. Revista de Ciencias Sociales*, (19), 11-24.

- García-Ortiz, E., Fuertes-Gutiérrez, I., & Fernández-Martínez, E. (2014). Concepts and terminology for the risk of degradation of geological heritage sites: fragility and natural vulnerability, a case study. *Proceedings of the Geologists' Association*, 125(4), 463-479.
- Gómez-Pina, G., Muñoz-Pérez, J. J., Ramírez, J. L., & Ley, C. (2002). Sand dune management problems and techniques, Spain. *Journal of Coastal Research*, (36), 325-332.
- Gonzalez, S., Pastrana, A., Siebe, C., & Duller, G. (2000). Timing of the prehistoric eruption of Xitle Volcano and the abandonment of Cuicuilco Pyramid, Southern Basin of Mexico. *Geological Society, London, Special Publications*, 171(1), 205-224.
- González, P.D. (2008). Textura de los cuerpos ígneos. En: E. J. Llambías (Ed.). *Geología de los Cuerpos Ígneos* (pp. 171-197). Buenos Aires.
- Gravis, I., Németh, K., Twemlow, C., & Németh, B. (2020). The Case for Community-Led Geoheritage and Geoconservation Ventures in Māngere, South Auckland, and Central Otago, New Zealand. *Geoheritage*, 12(1), 1-24.
- Gray, M. (2004). *Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature*. John Wiley & Sons.
- Guilbaud, M. N., Alcalá-Reygosa, J., Schimmelpfennig, I., Arce, J. L., & ASTER Team. (2022). Testing less-conventional methods to date a late-pleistocene to Holocene eruption: Radiocarbon dating of paleosols and ³⁶Cl exposure ages at Pelado volcano, Sierra Chichinautzin, Central Mexico. *Quaternary Geochronology*, 68, 101252.
- Guilbaud, M. N., Jiménez, A. H., Siebe-Grabach, C., & Salinas, S. (2021a). Volcán Las Cabras, Campo Volcánico Michoacán Guanajuato, México: controles topográficos, climático y magmáticos superficiales en erupciones de conos de escoria. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 38(2), 101-121.
- Guilbaud, M. N., Ortega-Larrocea, M. D. P., Cram, S., & van Wyk de Vries, B. (2021b). Xitle Volcano Geoheritage, Mexico City: Raising awareness of natural hazards and environmental sustainability in active volcanic areas. *Geoheritage*, 13(1), 1-27.
- Hadley, D., Hufford, G. L., & Simpson, J. J. (2004). Resuspension of relic volcanic ash and dust from Katmai: still an aviation hazard. *Weather and forecasting*, 19(5), 829-840.
- Herrera-Franco, G., Mora-Frank, C., Kovács, T., & Berrezueta, E. (2022). Georoutes as a basis for territorial development of the Pacific Coast of South America: A case study. *Geoheritage*, 14(3), 78.
- Houghton, B., & Carey, R. J. (2015). Pyroclastic fall deposits. In *The encyclopedia of volcanoes* (pp. 599-616). Academic Press.
- INEGI. (2016). Encuesta Intercensal (2015). Panorama sociodemográfico de Ciudad de México 2015. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México: INEGI. 51 p. ISBN 978-607-739-846-2.
- INEGI. (2023). Censo de Población y Vivienda. Principales resultados del Censo de Población y vivienda 2020: Ciudad de México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México: INEGI. 146 p.
- Irvine, T. N., & Baragar, W. R. A. (1971). A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian journal of earth sciences*, 8(5), 523-548.

- Jaimes-Viera, M. D. C., Del Pozzo, A. M., Layer, P. W., Benowitz, J. A., & Nieto-Torres, A. (2018). Timing the evolution of a monogenetic volcanic field: Sierra Chichinautzin, Central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 356, 225-242.
- Jarvis, P. A., Bonadonna, C., Dominguez, L., Forte, P., Frischknecht, C., Bran, D., Aguilar, R., Becket, F., Elissondo, M., Gillies, J., Kueppets, U., Merrison, J., Varley, N., & Wallace, K. L. (2020). Aeolian remobilisation of volcanic ash: outcomes of a workshop in the Argentinian Patagonia. *Frontiers in Earth Science*, 569.
- Kala, R., Bhavsar, D., Kumar, A., Roy, A., & Rawat, L. (2018). Quantification of potential area of incursion of pine in oak forest in western Himalaya using fuzzy classification technique. *Journal of Applied Remote Sensing*, 12(2), 026032-026032.
- Kandlbauer, J., Carey, S. N., & Sparks, R. S. J. (2013). The 1815 Tambora ash fall: implications for transport and deposition of distal ash on land and in the deep sea. *Bulletin of volcanology*, 75, 1-11.
- Kubalíková, L., Drápela, E., Kirchner, K., Bajer, A., Balková, M., & Kuda, F. (2021). Urban geotourism development and geoconservation: Is it possible to find a balance?. *Environmental Science & Policy*, 121, 1-10.
- Le Bas, M., Maitre, R. L., Streckeisen, A., Zanettin, B., & IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. (1986). A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of petrology*, 27(3), 745-750.
- Lorenzo-Merino, A. (2016). *Historia eruptiva del Volcán Pelado (Sierra Chichinautzin, México)* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]
- Lorenzo-Merino, A., Guilbaud, M. N., & Roberge, J. (2018). The violent Strombolian eruption of 10 ka Pelado shield volcano, Sierra Chichinautzin, Central Mexico. *Bulletin of Volcanology*, 80(3), 1-17.
- Márquez, A., Verma, S. P., Anguita, F., Oyarzun, R., & Brandle, J. L. (1999). Tectonics and volcanism of Sierra Chichinautzin: extension at the front of the Central Trans-Mexican Volcanic belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 93(1-2), 125-150.
- Mexicocity. (2021). Magdalena Petlalcalco. Mexico City. <https://mexicocity.cdmx.gob.mx/venues/magdalenapetlalcalco-church-and-town/?lang=es>
- Migoń, P., & Pijet-Migoń, E. (2016). Overlooked geomorphological component of volcanic geoheritage—Diversity and perspectives for tourism industry, Pogórze Kaczawskie region, SW Poland. *Geoheritage*, 8(4), 333-350.
- Migoń, P., & Pijet-Migoń, E. (2019). Natural disasters, geotourism, and geo-interpretation. *Geoheritage*, 11(2), 629-640.
- Mollá Ruíz-Gómez, M. (2006). El crecimiento de los asentamientos irregulares en áreas protegidas. La delegación Tlalpan. *Investigaciones geográficas*, (60), 83-109.
- Murcia, H. F., Borrero, C. A., Pardo, N., Alvarado, G. E., Arnosio, M., & Scolamacchia, T. (2013). Depósitos volcánoclasticos: Términos y conceptos para una clasificación en español. *Revista Geológica de América Central*, (48), 15-39.

- Németh, K. (2016). Updates in Volcanology: From Volcano Modelling to Volcano Geology. BoD–Books on Demand.
- Németh, K. (2010). Monogenetic volcanic fields: Origin, sedimentary record, and relationship with polygenetic volcanism. In *What Is a Volcano?* GSA Special Paper (Vol. 470, p. 43).
- Németh, K., & Cronin, S. J. (2009). Phreatomagmatic volcanic hazards where rift-systems meet the sea, a study from Ambae Island, Vanuatu. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 180(2-4), 246-258.
- Németh, K., & Kereszturi, G. (2015). Monogenetic volcanism: personal views and discussion. *International Journal of Earth Sciences*, 104(8), 2131-2146.
- Németh, K., Casadevall, T., Moufti, M. R., & Marti, J. (2017). Volcanic geoheritage. *Geoheritage*, 9(3), 251-254.
- Németh, K., Gravis, I., & Németh, B. (2021). Dilemma of geoconservation of monogenetic volcanic sites under fast urbanization and infrastructure developments with special relevance to the Auckland volcanic field, New Zealand. *Sustainability*, 13(12), 6549.
- Newsome, D., & Dowling, R. (2006). The scope and nature of geotourism. In *Geotourism* (pp. 3-25). Routledge.
- Nichol, J. (2009). Remote sensing of urban areas. *The Sage Handbook of Remote Sensing*, 423-436.
- Nickling, W. G., & Neuman, C. M. (2009). Aeolian sediment transport. *Geomorphology of desert environments*, 517-555.
- Nieto-Torres, A., & Del Pozzo, A. L. M. (2019). Spatio-temporal hazard assessment of a monogenetic volcanic field, near México City. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 371, 46-58.
- Nieto-Torres, A., Del Pozzo, A. L. M., Groppelli, G., & Viera, M. D. C. J. (2023). Risk scenarios for a future eruption in the Chichinautzin monogenetic volcanic field, South México City. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 433, 107733.
- Osuna, F., González, D., de los Monteros, A.E. Phylogeography of the Volcano Rabbit (*Romerolagus diazi*): the Evolutionary History of a Mountain Specialist Molded by the Climatic-Volcanism Interaction in the Central Mexican Highlands. *J Mammal Evol* 27, 745–757 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10914-019-09493-6>
- Palacio Prieto, J. L., & Guilbaud, M. N. (2015). Patrimonio natural de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel y áreas cercanas: sitios de interés geológico y geomorfológico al sur de la Cuenca de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(2), 227-244.
- Poulidis, A. P., Takemi, T., Iguchi, M., & Renfrew, I. A. (2017). Orographic effects on the transport and deposition of volcanic ash: A case study of Mount Sakurajima, Japan. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(17), 9332-9350.
- Prosser, C. D. (2013). Our rich and varied geoconservation portfolio: the foundation for the future. *Proceedings of the Geologists' Association*, 124(4), 568-580.
- Pyle, D. M. (1989). The thickness, volume and grainsize of tephra fall deposits. *Bulletin of Volcanology*, 51, 1-15.

Reyes, D. (2012). El Arenal, Eco-turismo en Tlalpan. Así es Tlalpan. <https://tlalpancasaenventa.blogspot.com/2012/03/el-arenal-eco-turismo-en-tlalpan.html>

Reynard, E., & Brilha, J. (2017). *Geoheritage: assessment, protection, and management*. Elsevier.

Romero, J. E., Burton, M., Cáceres, F., Taddeucci, J., Civico, R., Ricci, T., Pankhurst, M. J., Hernpandez, P. A., Bonadonna, C., Llewelin, E. W., Pistolesi, M., Polacci, M., Solana, C., D'Auria, L., Arzilli, F., Andronico, D., Rodríguez, F., Asensio-Ramos, M., Martín-Lorenzo, A., Hayer, C., Scarlato, P., & Perez, N. M. (2022). The initial phase of the 2021 Cumbre Vieja ridge eruption (Canary Islands): Products and dynamics controlling edifice growth and collapse. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 431, 107642.

Rose, W. I., & Durant, A. J. (2009). Fine ash content of explosive eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 186(1-2), 32-39.

Salazar, C. L. A., Manrique, N., Aguilar, R., & de Vries, B. V. W. (2021). *Geosite assessment in Arequipa City-Peru: UNESCO IGCP 692 project 'Geoheritage for Geohazard Resilience'* (No. EGU21-8355). Copernicus Meetings.

Schlaepfer, C. J. (1968). Hoja México 14Q-h (5), con resumen de la geología de la hoja México. Distrito Federal, Estado de México y Morelos: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Carta Geológica de México, Serie de, 1(100,000), 1.

SEMARNAT. (2003). Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos. Diario Oficial de la federación.

SEMARNAT. (2010). Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT- 2010. Protección ambiental - especies nativas de flora y fauna silvestres, categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio – Lista de especies en riesgo. Diario Oficial de la Federación 30 de Diciembre del 2010, segunda sección. Ciudad de México

Seegerstrom, K. K. (1950). *Erosion studies at Paricutin, state of Michoacan, Mexico* (No. 965-A).

Seegerstrom, K. K. (1960). Erosion and related phenomena at Paricutin in 1957 (No. 1104-A). US Govt. Print. Off.

Shao, Y. (2008). *Physics and modelling of wind erosion*. Dordrecht: Springer Netherlands.

SIDESO. (2003). Delegación Tlalpan Unidades Territoriales. Programa Integrado Territorial para el desarrollo social. Coordinación de planeación del desarrollo territorial. Distrito Federal, México.

Siebe, C. (2000). Age and archaeological implications of Xitle volcano, southwestern Basin of Mexico-City. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 104(1-4), 45-64.

Siebe, C., Rodríguez-Lara, V., Schaaf, P., & Abrams, M. (2004a). Geochemistry, Sr-Nd isotope composition, and tectonic setting of Holocene Pelado, Guespalapa and Chichinautzin scoria cones, south of Mexico City. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 130(3-4), 197-226.

Siebe, C., Rodríguez-Lara, V., Schaaf, P., & Abrams, M. (2004b). Radiocarbon ages of Holocene Pelado, Guespalapa, and Chichinautzin scoria cones, south of Mexico City: implications for archaeology and future hazards. *Bulletin of Volcanology*, 66(3), 203-225.

- Siebe, C., Schaaf, P., & Urrutia-Fucugauchi, J. (1999). Mammoth bones embedded in a late Pleistocene lahar from Popocatepetl volcano, near Tocuila, central Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 111(10), 1550-1562.
- Smith, G. A., & Katzman, D. (1991). Discrimination of eolian and pyroclastic-surge processes in the generation of cross-bedded tuffs, Jemez Mountains volcanic field, New Mexico. *Geology*, 19(5), 465-468.
- Sohn, C., & Sohn, Y. K. (2019). Distinguishing between primary and secondary volcanoclastic deposits. *Scientific Reports*, 9(1), 1-7.
- Sosa-Ceballos, G., Gardner, J. E., Siebe, C., & Macías, J. L. (2012). A caldera-forming eruption~ 14,100 14C yr BP at Popocatepetl volcano, México: Insights from eruption dynamics and magma mixing. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 213, 27-40.
- Stewart, S. A. (2020). Rain-induced planar collapse of eolian dune slipfaces. *Geomorphology*, 368, 107350.
- Szepesi, J., Harangi, S., Ésik, Z., Novák, T. J., Lukács, R., & Soós, I. (2017). Volcanic geoheritage and geotourism perspectives in Hungary: A case of an UNESCO world heritage site, Tokaj wine region historic cultural landscape, Hungary. *Geoheritage*, 9, 329-349.
- Takada, A. (1994). The influence of regional stress and magmatic input on styles of monogenetic and polygenetic volcanism. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B7), 13563-13573.
- Tsoar, H. (2001). Types of aeolian sand dunes and their formation. In *Geomorphological fluid mechanics* (pp. 403-429). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Valentine, G.A., and Fisher, R.V. (2000). Pyroclastic surges and blasts: in Sigurdsson, H., ed., *Encyclopedia of volcanoes*: San Diego, California, Academic Press, p. 571–580.
- Valentine, G. A., & Gregg, T. K. P. (2008). Continental basaltic volcanoes—processes and problems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177(4), 857-873.
- Vereb, V., de Vries, B. V. W., Guilbaud, M. N., & Karátson, D. (2020). The urban geoheritage of Clermont-Ferrand: from inventory to management. *Quaestiones Geographicae*, 39(3), 5-31.
- Walker, G.P. (2000). Basaltic Volcanoes and Volcanic Systems: in Sigurdsson, H., ed., *Encyclopedia of volcanoes*: San Diego, California, Academic Press, p. 283–289.
- Watt, S. F., Gilbert, J. S., Folch, A., Phillips, J. C., & Cai, X. M. (2015). An example of enhanced tephra deposition driven by topographically induced atmospheric turbulence. *Bulletin of Volcanology*, 77, 1-14.
- White, J. D. L., & Houghton, B. (2000). Surtseyan and related phreatomagmatic eruptions. *Encyclopedia of volcanoes*, 495-511.
- Williams, A. T., Alveirinho-Dias, J., Novo, F. G., Garcia-Mora, M. R., Curr, R., & Pereira, A. (2001). Integrated coastal dune management: checklists. *Continental shelf research*, 21(18-19), 1937-1960.
- Wilson, T. M., Cole, J. W., Stewart, C., Cronin, S. J., & Johnston, D. M. (2011). Ash storms: impacts of wind-remobilised volcanic ash on rural communities and agriculture following the 1991 Hudson eruption, southern Patagonia, Chile. *Bulletin of Volcanology*, 73, 223-239.
- Zhao, Y., & Gao, X. (2021). Morphodynamics of shadow dunes. *Earth-Science Reviews*, 222, 103840.

ANEXOS

Anexo 2. Composición química de los cristales de olivino analizados en la lava del volcán Yololica.

Código	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeOt	MnO	MgO	NiO	CaO	Total	Fo	Si	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ca	suma
Porcentaje en peso de óxidos mayores												Cationes por unidad de fórmula con base en 4 átomos de oxígeno						
												%						
CHI-203-B-1-OI1	39.13	0.00	0.02	0.01	28.69	0.35	31.11	0.11	0.15	99.6	66	1.05	0.00	0.64	0.01	1.24	0.00	2.95
CHI-203-B-1-OI2	39.73	0.01	0.02	0.01	18.83	0.28	39.09	0.09	0.14	98.2	78	1.03	0.00	0.41	0.01	1.51	0.00	2.97
CHI-203-B-1-OI4	39.70	0.01	0.04	0.02	20.25	0.27	38.48	0.16	0.16	99.1	77	1.03	0.00	0.44	0.01	1.49	0.00	2.97
CHI-203-B-1-OI5	39.94	0.01	0.03	0.00	19.20	0.27	39.06	0.18	0.15	98.8	78	1.03	0.00	0.41	0.01	1.50	0.00	2.97
CHI-203-B-1-OI6	39.80	0.00	0.05	0.01	19.85	0.27	38.61	0.11	0.15	98.9	77	1.03	0.00	0.43	0.01	1.49	0.00	2.97
CHI-203-B-1-OI7	38.54	0.02	0.01	0.00	32.02	0.42	28.72	0.07	0.19	100.0	61	1.05	0.00	0.73	0.01	1.16	0.01	2.95
CHI-203-B-1-OI8	38.46	0.00	0.02	0.01	32.83	0.43	28.01	0.08	0.19	100.0	60	1.05	0.00	0.75	0.01	1.14	0.01	2.95
CHI-203-B-2-OI1	38.19	0.03	0.00	0.00	29.75	0.43	32.26	0.08	0.25	101.0	66	1.02	0.00	0.66	0.01	1.28	0.01	2.98
CHI-203-B-2-OI2	38.04	0.03	0.03	0.00	35.52	0.48	26.67	0.08	0.22	101.1	57	1.04	0.00	0.81	0.01	1.09	0.01	2.96
CHI-203-B-2-OI3	39.63	0.01	0.02	0.00	20.21	0.27	38.83	0.06	0.15	99.2	77	1.03	0.00	0.44	0.01	1.50	0.00	2.97
CHI-203-B-2-OI4	39.10	0.02	0.04	0.00	24.44	0.36	35.81	0.10	0.22	100.1	72	1.02	0.00	0.54	0.01	1.40	0.01	2.98
CHI-203-B-2-OI5	39.86	0.03	0.04	0.00	20.42	0.28	38.54	0.10	0.17	99.4	77	1.03	0.00	0.44	0.01	1.48	0.00	2.97
CHI-203-B-2-OI7	39.56	0.00	0.02	0.01	21.83	0.33	37.92	0.07	0.17	99.9	75	1.02	0.00	0.47	0.01	1.46	0.00	2.98
CHI-203-B-2-OI8	39.28	0.00	0.01	0.00	21.97	0.31	36.86	0.07	0.18	98.7	75	1.03	0.00	0.48	0.01	1.44	0.00	2.97
CHI-203-B-2-OI9	39.22	0.01	0.02	0.02	22.74	0.31	36.78	0.06	0.21	99.4	74	1.03	0.00	0.50	0.01	1.43	0.01	2.97
CHI-203-B-2-OI10	39.60	0.00	0.03	0.00	21.88	0.31	37.51	0.09	0.18	99.6	75	1.03	0.00	0.48	0.01	1.45	0.01	2.97
CHI-203-B-2-OI11	38.22	0.03	0.03	0.00	27.35	0.42	33.49	0.03	0.20	99.8	68	1.02	0.00	0.61	0.01	1.33	0.01	2.98
CHI-203-B-2-OI12	39.83	0.02	0.01	0.01	20.49	0.28	38.88	0.08	0.16	99.8	77	1.03	0.00	0.44	0.01	1.49	0.00	2.97
CHI-203-B-2-OI13	39.67	0.00	0.03	0.00	20.42	0.30	38.78	0.07	0.17	99.4	77	1.03	0.00	0.44	0.01	1.49	0.00	2.97
CHI-203-B-2-OI14	39.61	0.00	0.02	0.00	23.27	0.32	37.40	0.10	0.23	100.9	74	1.02	0.00	0.50	0.01	1.44	0.01	2.98
CHI-203-B-3-OI1	38.17	0.00	0.05	0.02	25.71	0.35	35.52	0.10	0.16	100.1	71	1.01	0.00	0.57	0.01	1.40	0.00	2.99
CHI-203-B-3-OI2	40.17	0.00	0.04	0.00	19.13	0.28	41.04	0.10	0.16	100.9	79	1.02	0.00	0.40	0.01	1.55	0.00	2.98
CHI-203-B-3-OI4	39.82	0.03	0.04	0.00	23.08	0.26	35.10	0.10	0.16	98.6	73	1.05	0.00	0.51	0.01	1.38	0.00	2.95
CHI-203-B-3-OI5	38.68	0.00	0.01	0.01	32.10	0.42	30.45	0.07	0.20	101.9	63	1.03	0.00	0.71	0.01	1.21	0.01	2.97
CHI-203-B-3-OI6	39.83	0.00	0.03	0.00	22.38	0.28	35.31	0.10	0.14	98.1	74	1.05	0.00	0.49	0.01	1.39	0.00	2.95
CHI-203-B-3-OI7	39.76	0.01	0.03	0.01	22.09	0.21	35.86	0.12	0.15	98.2	74	1.05	0.00	0.49	0.00	1.41	0.00	2.95
CHI-203-B-3-OI8	39.83	0.01	0.04	0.00	22.22	0.24	35.61	0.10	0.15	98.2	74	1.05	0.00	0.49	0.01	1.40	0.00	2.95

Anexo 3. Composición química de los cristales de olivino analizados en la tefra del volcán Yololica.

Código	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeOt	MnO	MgO	NiO	CaO	Total	Fo	Si	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ca	suma
Porcentaje en peso de óxidos mayores												Cationes por unidad de fórmula con base en 4 átomos de oxígeno						
												%						
CHI-49-E-1-O11	40.22	0.00	0.03	0.00	19.33	0.27	40.91	0.07	0.15	101.0	79	1.02	0.00	0.41	0.01	1.54	0.00	2.98
CHI-49-E-1-O12	40.32	0.01	0.03	0.02	18.61	0.25	41.23	0.13	0.16	100.8	80	1.02	0.00	0.39	0.01	1.55	0.00	2.98
CHI-49-E-1-O13	40.36	0.01	0.04	0.00	18.13	0.25	42.12	0.15	0.16	101.2	80	1.01	0.00	0.38	0.01	1.58	0.00	2.99
CHI-49-E-1-O14	40.18	0.01	0.04	0.00	18.68	0.26	41.78	0.11	0.16	101.2	80	1.01	0.00	0.39	0.01	1.57	0.00	2.99
CHI-49-E-1-O15	40.12	0.00	0.03	0.00	19.39	0.30	41.64	0.10	0.18	101.8	79	1.01	0.00	0.41	0.01	1.56	0.00	2.99
CHI-49-E-1-O18	39.59	0.01	0.03	0.01	22.81	0.26	35.21	0.11	0.15	98.2	73	1.05	0.00	0.50	0.01	1.39	0.00	2.95
CHI-49-E-1-O19	39.98	0.00	0.03	0.00	22.44	0.26	35.71	0.10	0.16	98.7	74	1.05	0.00	0.49	0.01	1.40	0.00	2.95
CHI-49-E-1-O110	39.73	0.02	0.03	0.00	22.66	0.27	36.14	0.09	0.16	99.1	74	1.04	0.00	0.50	0.01	1.41	0.00	2.96
CHI-49-E-1-O111	39.60	0.00	0.03	0.01	22.51	0.28	36.10	0.09	0.18	98.8	74	1.04	0.00	0.49	0.01	1.41	0.01	2.96
CHI-49-E-2-O11	39.98	0.00	0.01	0.00	21.29	0.24	37.01	0.12	0.14	98.8	75	1.04	0.00	0.46	0.01	1.44	0.00	2.96
CHI-49-E-2-O12	40.00	0.00	0.04	0.03	19.16	0.22	38.35	0.22	0.15	98.2	78	1.04	0.00	0.42	0.00	1.49	0.00	2.96
CHI-49-E-2-O13	40.03	0.00	0.04	0.02	18.73	0.22	39.33	0.23	0.16	98.8	79	1.03	0.00	0.40	0.00	1.51	0.00	2.97
CHI-49-E-2-O14	39.62	0.01	0.02	0.03	20.41	0.24	39.65	0.17	0.15	100.3	77	1.02	0.00	0.44	0.01	1.52	0.00	2.98
CHI-49-E-2-O15	39.59	0.00	0.02	0.00	20.86	0.26	38.91	0.17	0.17	100.0	77	1.02	0.00	0.45	0.01	1.49	0.00	2.98
CHI-49-E-2-O16	40.27	0.01	0.03	0.02	20.16	0.25	38.58	0.19	0.14	99.7	77	1.04	0.00	0.43	0.01	1.48	0.00	2.96
CHI-49-E-2-O17	40.00	0.01	0.03	0.00	21.33	0.22	37.41	0.08	0.18	99.3	76	1.04	0.00	0.46	0.00	1.45	0.01	2.96
CHI-49-E-2-O18	39.87	0.03	0.03	0.00	21.33	0.26	38.69	0.11	0.15	100.5	76	1.02	0.00	0.46	0.01	1.48	0.00	2.98
CHI-49-E-2-O19	40.01	0.00	0.03	0.02	20.55	0.26	39.23	0.21	0.17	100.5	77	1.02	0.00	0.44	0.01	1.50	0.00	2.98
CHI-49-E-2-O110	39.77	0.03	0.05	0.00	20.91	0.23	39.01	0.19	0.14	100.3	77	1.02	0.00	0.45	0.00	1.49	0.00	2.98
CHI-49-E-2-O111	39.85	0.01	0.03	0.00	21.99	0.31	37.79	0.13	0.17	100.3	75	1.03	0.00	0.47	0.01	1.45	0.00	2.97
CHI-49-E-2-O112	39.23	0.01	0.04	0.02	22.01	0.24	36.96	0.10	0.16	98.8	75	1.03	0.00	0.48	0.01	1.45	0.00	2.97
CHI-49-E-2-O113	39.77	0.00	0.04	0.00	21.10	0.25	37.49	0.15	0.16	99.0	76	1.04	0.00	0.46	0.01	1.45	0.00	2.96
CHI-49-E-2-O114	39.89	0.00	0.05	0.04	21.99	0.27	37.07	0.10	0.16	99.6	75	1.04	0.00	0.48	0.01	1.44	0.00	2.96
CHI-49-E-3-O11	40.02	0.00	0.03	0.01	21.65	0.24	38.10	0.04	0.15	100.2	76	1.03	0.00	0.47	0.01	1.46	0.00	2.97
CHI-49-E-3-O12	40.16	0.02	0.04	0.02	21.51	0.25	37.67	0.08	0.17	99.9	76	1.04	0.00	0.46	0.01	1.45	0.00	2.96
CHI-49-E-3-O13	40.02	0.02	0.02	0.02	22.00	0.27	37.00	0.08	0.15	99.6	75	1.04	0.00	0.48	0.01	1.43	0.00	2.96
CHI-49-E-3-O14	39.60	0.02	0.02	0.01	21.90	0.24	38.72	0.10	0.17	100.8	76	1.02	0.00	0.47	0.01	1.48	0.00	2.98
CHI-49-E-3-O15	39.85	0.00	0.03	0.02	20.23	0.23	39.46	0.22	0.16	100.2	77	1.02	0.00	0.43	0.01	1.51	0.00	2.98
CHI-49-E-3-O16	39.95	0.00	0.03	0.00	21.50	0.24	38.44	0.09	0.17	100.4	76	1.03	0.00	0.46	0.01	1.47	0.00	2.97

Anexo 4. Composición química de los cristales de olivino analizados en la tefra del volcán Xitle (X1O) y en la ceniza del Arenal (CHI-100).

Código	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeOt	MnO	MgO	NiO	CaO	Total	Fo	Si	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ni	Ca	suma
	Porcentaje en peso de óxidos mayores											Cationes por unidad de fórmula con base en 4 átomos de oxígeno							
												%							
X1O-1-O11	39.91	0.02	0.04	0.04	13.12	0.17	45.68	0.32	0.13	99.4	86	1.00	0.00	0.28	0.00	1.71	0.01	0.00	3.00
X1O-1-O12	39.87	0.00	0.03	0.02	13.02	0.17	45.68	0.35	0.14	99.3	86	1.00	0.00	0.27	0.00	1.71	0.01	0.00	3.00
X1O-1-O13	39.92	0.00	0.05	0.02	13.19	0.17	45.83	0.35	0.14	99.7	86	1.00	0.00	0.28	0.00	1.71	0.01	0.00	3.00
X1O-1-O14	39.63	0.02	0.02	0.01	14.44	0.17	44.69	0.22	0.13	99.3	85	1.00	0.00	0.30	0.00	1.68	0.00	0.00	3.00
X1O-1-O15	40.26	0.00	0.04	0.04	12.74	0.19	46.24	0.44	0.11	100.1	86	1.00	0.00	0.26	0.00	1.71	0.01	0.00	3.00
X1O-1-O16	39.90	0.03	0.04	0.00	12.41	0.17	46.00	0.43	0.13	99.1	87	1.00	0.00	0.26	0.00	1.72	0.01	0.00	3.00
X1O-1-O17	40.12	0.00	0.04	0.01	12.88	0.20	45.59	0.37	0.14	99.4	86	1.01	0.00	0.27	0.00	1.70	0.01	0.00	2.99
X1O-1-O18	39.84	0.00	0.02	0.01	15.40	0.24	43.80	0.15	0.17	99.6	83	1.01	0.00	0.33	0.01	1.65	0.00	0.00	2.99
X1O-1-O19	40.28	0.01	0.03	0.02	13.32	0.20	45.42	0.34	0.16	99.8	86	1.01	0.00	0.28	0.00	1.69	0.01	0.00	2.99
X1O-1-O110	40.18	0.00	0.04	0.02	12.77	0.18	45.62	0.40	0.14	99.3	86	1.01	0.00	0.27	0.00	1.70	0.01	0.00	2.99
X1O-1-O111	40.05	0.00	0.05	0.02	12.49	0.18	46.03	0.37	0.15	99.4	87	1.00	0.00	0.26	0.00	1.72	0.01	0.00	3.00
X1O-1-O112	40.03	0.03	0.03	0.02	15.12	0.21	44.48	0.18	0.17	100.3	84	1.00	0.00	0.32	0.00	1.66	0.00	0.00	3.00
X1O-2-O11	39.17	0.02	0.00	0.00	17.21	0.27	42.45	0.15	0.19	99.5	81	1.00	0.00	0.37	0.01	1.62	0.00	0.01	3.00
X1O-2-O12	39.72	0.01	0.02	0.01	13.53	0.19	44.82	0.35	0.13	98.8	85	1.00	0.00	0.29	0.00	1.69	0.01	0.00	3.00
X1O-2-O13	39.15	0.02	0.04	0.04	15.88	0.24	43.11	0.16	0.18	98.8	83	1.00	0.00	0.34	0.01	1.64	0.00	0.00	3.00
X1O-2-O14	39.89	0.00	0.01	0.01	13.60	0.16	44.95	0.30	0.14	99.1	85	1.01	0.00	0.29	0.00	1.69	0.01	0.00	2.99
X1O-2-O15	39.43	0.01	0.01	0.00	14.54	0.21	44.26	0.20	0.12	98.8	84	1.00	0.00	0.31	0.00	1.68	0.00	0.00	3.00
X1O-2-O16	40.15	0.00	0.02	0.00	14.81	0.20	44.86	0.20	0.15	100.4	84	1.00	0.00	0.31	0.00	1.67	0.00	0.00	3.00
X1O-2-O17	40.64	0.02	0.06	0.00	13.30	0.16	46.31	0.40	0.14	101.0	86	1.00	0.00	0.27	0.00	1.70	0.01	0.00	3.00
X1O-2-O18	40.34	0.00	0.02	0.01	14.60	0.20	44.99	0.23	0.16	100.5	84	1.01	0.00	0.30	0.00	1.67	0.00	0.00	2.99
X1O-2-O19	40.82	0.00	0.04	0.02	14.66	0.20	45.60	0.29	0.15	101.8	85	1.00	0.00	0.30	0.00	1.67	0.01	0.00	2.99
X1O-2-O110	40.52	0.00	0.04	0.01	13.25	0.18	46.05	0.39	0.13	100.6	86	1.00	0.00	0.27	0.00	1.70	0.01	0.00	3.00
X1O-2-O111	40.08	0.00	0.04	0.03	13.91	0.21	45.57	0.32	0.14	100.3	85	1.00	0.00	0.29	0.00	1.69	0.01	0.00	3.00
CHI-100-C-2-O12	38.72	0.00	0.11	0.03	20.00	0.30	41.06	0.02	0.31	100.6	78	0.99	0.00	0.43	0.01	1.57	0.00	0.01	3.01
CHI-100-C-3-O11	38.83	0.00	0.09	0.04	19.36	0.28	41.47	0.02	0.30	100.4	79	0.99	0.00	0.41	0.01	1.58	0.00	0.01	3.01
CHI-100-C-3-O12	38.55	0.00	0.10	0.04	20.12	0.35	41.04	0.05	0.32	100.6	78	0.99	0.00	0.43	0.01	1.57	0.00	0.01	3.01
CHI-100-C-3-O13	38.86	0.00	0.08	0.04	20.21	0.32	40.87	0.02	0.34	100.7	78	0.99	0.00	0.43	0.01	1.56	0.00	0.01	3.00

Anexo 5. Composición química de los cristales de olivino analizados en la tefra inferior (CHI-25-B) y superior (CHI-25-C) del volcán Pelado.

Código	SiO2	TiO2	Al2O3	Cr2O3	FeOt	MnO	MgO	NiO	CaO	Total	Fo	Si	Fe3+	Fe2+	Mn	Mg	Ni	Ca	suma
Porcentaje en peso de óxidos mayores											Cationes por unidad de fórmula con base en 4 átomos de oxígeno								
											%								
CHI-25-B-1-O11	41.11	0.00	0.05	0.00	10.87	0.15	48.01	0.43	0.15	100.8	89	1.01	0.00	0.22	0.00	1.75	0.01	0.00	2.99
CHI-25-B-1-O12	40.97	0.00	0.04	0.01	10.58	0.16	48.28	0.47	0.16	100.7	89	1.00	0.00	0.22	0.00	1.76	0.01	0.00	3.00
CHI-25-B-1-O13	40.86	0.00	0.04	0.03	12.85	0.17	46.82	0.21	0.16	101.1	87	1.00	0.00	0.26	0.00	1.71	0.00	0.00	3.00
CHI-25-B-1-O14	40.72	0.02	0.00	0.00	14.31	0.20	45.98	0.20	0.19	101.6	85	1.00	0.00	0.29	0.00	1.69	0.00	0.01	3.00
CHI-25-B-1-O15	40.64	0.02	0.04	0.00	14.13	0.19	46.10	0.18	0.15	101.5	85	1.00	0.00	0.29	0.00	1.69	0.00	0.00	3.00
CHI-25-B-1-O16	41.31	0.00	0.03	0.00	11.39	0.14	47.95	0.38	0.14	101.3	88	1.01	0.00	0.23	0.00	1.74	0.01	0.00	2.99
CHI-25-B-1-O17	40.83	0.01	0.01	0.01	13.43	0.19	46.40	0.19	0.18	101.3	86	1.00	0.00	0.28	0.00	1.70	0.00	0.00	3.00
CHI-25-B-1-O18	41.30	0.02	0.04	0.02	10.63	0.14	48.31	0.49	0.14	101.1	89	1.01	0.00	0.22	0.00	1.75	0.01	0.00	2.99
CHI-25-B-1-O19	41.00	0.01	0.06	0.02	11.42	0.14	47.89	0.36	0.15	101.1	88	1.00	0.00	0.23	0.00	1.75	0.01	0.00	3.00
CHI-25-B-1-O110	40.72	0.00	0.04	0.01	13.19	0.19	46.54	0.23	0.17	101.1	86	1.00	0.00	0.27	0.00	1.71	0.00	0.00	3.00
CHI-25-B-1-O111	41.02	0.00	0.03	0.02	12.69	0.21	46.82	0.26	0.17	101.2	87	1.01	0.00	0.26	0.00	1.71	0.01	0.00	2.99
CHI-25-B-1-O112	41.28	0.00	0.04	0.01	11.34	0.15	47.91	0.35	0.15	101.2	88	1.01	0.00	0.23	0.00	1.74	0.01	0.00	2.99
CHI-25-B-1-O113	41.29	0.01	0.03	0.02	11.59	0.19	47.89	0.37	0.16	101.5	88	1.00	0.00	0.24	0.00	1.74	0.01	0.00	2.99
CHI-25-B-1-O114	41.12	0.01	0.02	0.04	12.95	0.19	47.09	0.23	0.16	101.8	86	1.00	0.00	0.26	0.00	1.71	0.00	0.00	3.00
CHI-25-B-2-O11	40.90	0.00	0.04	0.00	11.89	0.19	47.51	0.27	0.16	101.0	88	1.00	0.00	0.24	0.00	1.74	0.01	0.00	3.00
CHI-25-B-2-O12	40.98	0.01	0.03	0.02	11.79	0.17	47.24	0.29	0.13	100.7	88	1.01	0.00	0.24	0.00	1.73	0.01	0.00	2.99
CHI-25-B-2-O13	41.01	0.00	0.04	0.04	11.79	0.18	47.31	0.31	0.14	100.8	88	1.01	0.00	0.24	0.00	1.73	0.01	0.00	2.99
CHI-25-B-2-O14	41.05	0.01	0.02	0.00	11.60	0.14	47.37	0.29	0.15	100.6	88	1.01	0.00	0.24	0.00	1.73	0.01	0.00	2.99
CHI-25-B-2-O15	41.03	0.00	0.02	0.02	11.60	0.16	47.68	0.38	0.13	101.0	88	1.00	0.00	0.24	0.00	1.74	0.01	0.00	3.00
CHI-25-B-2-O16	41.02	0.00	0.05	0.01	11.25	0.15	48.05	0.44	0.15	101.1	88	1.00	0.00	0.23	0.00	1.75	0.01	0.00	3.00
CHI-25-B-2-O17	40.88	0.00	0.04	0.00	12.63	0.20	46.84	0.26	0.17	101.0	87	1.00	0.00	0.26	0.00	1.72	0.01	0.00	2.99
CHI-25-B-2-O18	41.05	0.01	0.03	0.00	12.78	0.18	46.76	0.25	0.17	101.2	87	1.01	0.00	0.26	0.00	1.71	0.00	0.00	2.99
CHI-25-B-2-O19	40.86	0.02	0.03	0.01	12.79	0.16	46.82	0.27	0.15	101.1	87	1.00	0.00	0.26	0.00	1.71	0.01	0.00	3.00
CHI-25-B-2-O110	40.47	0.01	0.04	0.06	12.57	0.17	46.97	0.30	0.15	100.7	87	1.00	0.00	0.26	0.00	1.73	0.01	0.00	3.00
CHI-25-C-2-O11	37.74	0.01	0.03	0.04	25.54	0.41	36.57	0.07	0.31	100.7	72	0.99	0.00	0.56	0.01	1.43	0.00	0.01	3.01
CHI-25-C-2-O12	38.98	0.01	0.08	0.03	21.65	0.33	40.04	0.02	0.28	101.4	76	1.00	0.00	0.46	0.01	1.53	0.00	0.01	3.00
CHI-25-C-2-O13	38.36	0.00	0.05	0.03	21.98	0.35	39.91	0.05	0.27	101.0	76	0.99	0.00	0.47	0.01	1.53	0.00	0.01	3.01
CHI-25-C-4-O11	39.29	0.02	0.04	0.00	19.49	0.27	40.90	0.05	0.24	100.3	79	1.00	0.00	0.42	0.01	1.56	0.00	0.01	3.00
CHI-25-C-4-O12	39.08	0.01	0.04	0.04	20.02	0.30	40.54	0.07	0.28	100.4	78	1.00	0.00	0.43	0.01	1.55	0.00	0.01	3.00
CHI-25-C-4-O13	39.50	0.01	0.03	0.02	19.46	0.29	40.86	0.10	0.27	100.5	79	1.01	0.00	0.41	0.01	1.55	0.00	0.01	2.99

Anexo 6. Composición química de los cristales de plagioclasa analizados en la tefra superior del volcán Pelado.

Código	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeOt	BaO	SrO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	An	Si	Ti	Al	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mg	Ca	Na	K	suma
Porcentaje en peso de óxidos mayores												Cationes por unidad de fórmula con base en 8 átomos de oxígeno										
												%										
CHI-25-C-1-P11	53.08	0.03	29.42	0.43	0.09	0.04	0.24	12.22	4.51	0.12	100.2	60	2.41	0.00	1.57	0.00	0.02	0.02	0.59	0.40	0.01	5.01
CHI-25-C-1-P12	54.36	0.05	29.15	0.44	0.02	0.04	0.24	12.14	4.29	0.13	100.8	61	2.44	0.00	1.54	0.00	0.02	0.02	0.58	0.37	0.01	4.98
CHI-25-C-1-P13	54.29	0.07	28.06	0.59	0.07	0.04	0.33	11.18	4.71	0.19	99.5	56	2.47	0.00	1.50	0.00	0.02	0.02	0.54	0.41	0.01	4.99
CHI-25-C-1-P14	54.74	0.08	27.80	0.90	0.00	0.06	0.20	11.10	5.11	0.34	100.3	53	2.48	0.00	1.48	0.00	0.03	0.01	0.54	0.45	0.02	5.01
CHI-25-C-1-P15	54.50	0.07	28.80	0.49	0.05	0.04	0.23	12.02	4.80	0.17	101.2	57	2.44	0.00	1.52	0.00	0.02	0.02	0.58	0.42	0.01	5.01
CHI-25-C-1-P16	54.31	0.08	28.62	0.46	0.00	0.04	0.19	11.74	4.70	0.15	100.3	57	2.45	0.00	1.52	0.00	0.02	0.01	0.57	0.41	0.01	4.99
CHI-25-C-1-P17	55.83	0.12	28.05	0.60	0.01	0.03	0.22	10.70	5.28	0.29	101.1	52	2.49	0.00	1.48	0.00	0.02	0.01	0.51	0.46	0.02	5.00
CHI-25-C-1-P18	57.98	0.70	24.09	2.03	0.11	0.04	0.79	8.44	5.81	0.66	100.7	43	2.61	0.02	1.28	0.00	0.08	0.05	0.41	0.51	0.04	5.00
CHI-25-C-1-P19	55.04	0.09	28.16	0.51	0.06	0.04	0.24	11.09	4.87	0.27	100.4	55	2.48	0.00	1.49	0.00	0.02	0.02	0.54	0.43	0.02	4.99
CHI-25-C-2-P11	54.13	0.06	28.96	0.43	0.00	0.04	0.24	11.71	4.21	0.15	100.0	60	2.45	0.00	1.54	0.00	0.02	0.02	0.57	0.37	0.01	4.97
CHI-25-C-2-P12	55.73	0.09	28.21	0.50	0.01	0.04	0.22	10.88	4.84	0.28	100.8	54	2.49	0.00	1.49	0.00	0.02	0.01	0.52	0.42	0.02	4.98
CHI-25-C-2-P13	53.20	0.07	29.55	0.44	0.09	0.04	0.25	12.41	3.93	0.16	100.1	63	2.41	0.00	1.58	0.00	0.02	0.02	0.60	0.34	0.01	4.98
CHI-25-C-2-P14	54.75	0.09	28.67	0.46	0.00	0.04	0.26	11.47	4.60	0.23	100.6	57	2.46	0.00	1.52	0.00	0.02	0.02	0.55	0.40	0.01	4.98
CHI-25-C-2-P15	54.90	0.13	28.10	0.50	0.09	0.04	0.21	10.92	4.69	0.30	99.9	55	2.48	0.00	1.50	0.00	0.02	0.01	0.53	0.41	0.02	4.98
CHI-25-C-2-P16	55.46	0.07	27.86	0.50	0.06	0.04	0.25	10.59	5.11	0.42	100.4	52	2.50	0.00	1.48	0.00	0.02	0.02	0.51	0.45	0.02	5.00
CHI-25-C-2-P17	54.64	0.10	28.53	0.49	0.06	0.04	0.22	11.46	4.78	0.26	100.6	56	2.46	0.00	1.51	0.00	0.02	0.01	0.55	0.42	0.01	5.00
CHI-25-C-2-P18	54.80	0.13	28.07	0.64	0.00	0.03	0.16	10.87	4.99	0.34	100.0	54	2.48	0.00	1.50	0.00	0.02	0.01	0.53	0.44	0.02	5.00
CHI-25-C-2-P19	56.64	0.16	26.84	0.80	0.00	0.04	0.24	9.78	5.52	0.36	100.4	48	2.54	0.01	1.42	0.00	0.03	0.02	0.47	0.48	0.02	4.99
CHI-25-C-2-P110	53.16	0.11	29.18	0.48	0.00	0.04	0.42	11.81	4.26	0.20	99.7	60	2.42	0.00	1.56	0.00	0.02	0.03	0.57	0.38	0.01	4.99
CHI-25-C-2-P111	56.24	0.15	27.90	0.53	0.00	0.03	0.26	10.59	5.07	0.31	101.1	53	2.51	0.00	1.47	0.00	0.02	0.02	0.51	0.44	0.02	4.98
CHI-25-C-2-P112	56.03	0.45	26.87	1.34	0.00	0.04	0.73	10.32	4.72	0.40	101.0	53	2.51	0.02	1.42	0.00	0.05	0.05	0.50	0.41	0.02	4.98
CHI-25-C-2-P113	55.96	0.10	28.02	0.64	0.04	0.04	0.13	10.87	4.93	0.34	101.1	54	2.50	0.00	1.48	0.00	0.02	0.01	0.52	0.43	0.02	4.98
CHI-25-C-2-P114	55.99	0.09	28.01	0.76	0.05	0.06	0.21	10.88	4.93	0.29	101.3	54	2.50	0.00	1.47	0.00	0.03	0.01	0.52	0.43	0.02	4.98

Anexo 7. Composición química de los cristales de plagioclasa analizados en la ceniza del Arenal.

Código	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeOt	BaO	SrO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	An	Si	Ti	Al	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mg	Ca	Na	K	suma
Porcentaje en peso de óxidos mayores													Cationes por unidad de fórmula con base en 8 átomos de oxígeno									
													%									
CHI-100-B-1-PI1	59.63	0.27	24.92	1.13	0.08	0.04	0.26	9.21	4.56	1.01	101.1	49	2.65	0.01	1.30	0.00	0.04	0.02	0.44	0.39	0.06	4.91
CHI-100-B-1-PI2	56.12	0.06	27.18	0.54	0.06	0.04	0.13	10.67	5.09	0.26	100.2	53	2.53	0.00	1.44	0.00	0.02	0.01	0.51	0.44	0.02	4.98
CHI-100-B-1-PI3	54.10	0.05	28.69	0.46	0.08	0.04	0.13	12.23	4.26	0.18	100.2	61	2.45	0.00	1.53	0.00	0.02	0.01	0.59	0.37	0.01	4.98
CHI-100-B-1-PI4	53.95	0.02	28.95	0.48	0.10	0.05	0.12	12.43	4.09	0.15	100.3	62	2.44	0.00	1.54	0.00	0.02	0.01	0.60	0.36	0.01	4.98
CHI-100-B-1-PI6	56.94	0.07	26.35	0.53	0.17	0.05	0.19	9.77	5.17	0.26	99.5	50	2.57	0.00	1.40	0.00	0.02	0.01	0.47	0.45	0.02	4.96
CHI-100-B-1-PI7	54.76	0.05	27.75	0.50	0.05	0.04	0.17	11.65	4.27	0.22	99.5	59	2.49	0.00	1.49	0.00	0.02	0.01	0.57	0.38	0.01	4.96
CHI-100-B-1-PI8	54.31	0.03	28.59	0.45	0.12	0.04	0.18	12.03	4.19	0.17	100.1	61	2.46	0.00	1.52	0.00	0.02	0.01	0.58	0.37	0.01	4.97
CHI-100-B-1-PI9	55.75	0.06	27.55	0.55	0.13	0.04	0.12	10.75	5.01	0.23	100.2	54	2.51	0.00	1.46	0.00	0.02	0.01	0.52	0.44	0.01	4.98
CHI-100-B-1-PI10	56.60	0.09	26.82	0.57	0.00	0.03	0.17	10.07	5.01	0.28	99.7	52	2.55	0.00	1.43	0.00	0.02	0.01	0.49	0.44	0.02	4.96
CHI-100-B-2-PI1	56.39	0.07	27.42	0.45	0.05	0.04	0.14	10.38	5.11	0.23	100.3	52	2.53	0.00	1.45	0.00	0.02	0.01	0.50	0.45	0.01	4.97
CHI-100-B-2-PI2	54.07	0.05	28.95	0.45	0.08	0.04	0.14	12.12	4.07	0.17	100.1	62	2.44	0.00	1.54	0.00	0.02	0.01	0.59	0.36	0.01	4.97
CHI-100-B-2-PI3	56.27	0.05	27.37	0.48	0.02	0.04	0.16	10.37	4.94	0.20	99.9	53	2.53	0.00	1.45	0.00	0.02	0.01	0.50	0.43	0.01	4.96
CHI-100-B-2-PI4	55.81	0.07	27.39	0.52	0.00	0.04	0.16	10.51	4.83	0.22	99.6	54	2.52	0.00	1.46	0.00	0.02	0.01	0.51	0.42	0.01	4.96
CHI-100-B-2-PI5	57.54	0.07	26.39	0.56	0.13	0.04	0.17	9.62	5.43	0.29	100.2	49	2.58	0.00	1.39	0.00	0.02	0.01	0.46	0.47	0.02	4.96
CHI-100-B-4-PI1	54.37	0.07	28.82	0.47	0.00	0.03	0.16	12.25	4.25	0.18	100.6	61	2.45	0.00	1.53	0.00	0.02	0.01	0.59	0.37	0.01	4.98
CHI-100-B-4-PI2	57.42	0.17	26.34	0.79	0.12	0.04	0.17	9.84	5.20	0.41	100.5	50	2.57	0.01	1.39	0.00	0.03	0.01	0.47	0.45	0.02	4.96
CHI-100-B-4-PI3	56.38	0.08	27.13	0.56	0.07	0.04	0.16	10.54	5.09	0.26	100.3	53	2.53	0.00	1.44	0.00	0.02	0.01	0.51	0.44	0.01	4.97
CHI-100-B-4-PI4	54.21	0.05	28.80	0.50	0.01	0.04	0.15	12.07	4.17	0.14	100.2	61	2.45	0.00	1.53	0.00	0.02	0.01	0.58	0.36	0.01	4.97
CHI-100-B-4-PI5	53.63	0.02	29.06	0.49	0.00	0.04	0.14	12.29	3.94	0.14	99.8	63	2.43	0.00	1.55	0.00	0.02	0.01	0.60	0.35	0.01	4.97
CHI-100-B-4-PI7	56.24	0.07	27.29	0.60	0.18	0.05	0.16	10.33	5.11	0.24	100.3	52	2.53	0.00	1.45	0.00	0.02	0.01	0.50	0.45	0.01	4.97

Anexo 8. Composición química de los cristales de piroxeno analizados en la ceniza del Arenal (CHI-100) y la tefra superior del volcán Pelado (CHI-25-C).

Código	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeOt	MnO	MgO	NiO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Mg#	Si	Ti	Al	Cr	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ca	Na	suma
Porcentaje en peso de óxidos mayores													Cationes por unidad de fórmula con base en 6 átomos de oxígeno											
CHI-100-B-1-Px1	54.65	0.19	1.68	0.68	11.30	0.23	29.22	0.09	1.12	0.03	0.02	99.2	81.9	1.95	0.01	0.07	0.02	0.00	0.34	0.01	1.56	0.04	0.00	4.00
CHI-100-B-1-Px2	55.10	0.18	0.83	0.21	12.87	0.30	28.28	0.06	1.65	0.03	0.01	99.5	79.3	1.98	0.00	0.03	0.01	0.00	0.39	0.01	1.51	0.06	0.00	4.00
CHI-100-B-1-Px3	54.42	0.22	1.87	0.46	12.23	0.27	28.30	0.09	1.35	0.03	0.02	99.3	80.1	1.95	0.01	0.08	0.01	0.00	0.37	0.01	1.51	0.05	0.00	4.00
CHI-100-B-1-Px4	54.28	0.17	1.73	0.66	11.68	0.26	28.82	0.06	1.18	0.04	0.03	98.9	81.2	1.95	0.00	0.07	0.02	0.00	0.35	0.01	1.54	0.05	0.00	4.00
CHI-100-B-1-Px5	53.39	0.32	1.88	0.18	15.02	0.35	26.09	0.06	1.86	0.05	0.03	99.2	75.5	1.95	0.01	0.08	0.01	0.01	0.45	0.01	1.42	0.07	0.00	4.01
CHI-100-B-1-Px6	54.73	0.15	1.76	0.55	11.64	0.23	29.10	0.09	1.14	0.07	0.01	99.5	81.4	1.95	0.00	0.07	0.02	0.00	0.35	0.01	1.55	0.04	0.00	4.00
CHI-100-B-1-Px7	54.65	0.14	1.92	0.31	11.81	0.22	28.81	0.09	1.64	0.05	0.03	99.7	81.3	1.95	0.00	0.08	0.01	0.01	0.34	0.01	1.53	0.06	0.00	4.00
CHI-100-B-1-Px8	54.99	0.14	1.56	0.56	11.65	0.24	29.52	0.09	1.08	0.03	0.01	99.9	81.8	1.95	0.00	0.07	0.02	0.01	0.34	0.01	1.56	0.04	0.00	4.00
CHI-100-B-2-Px1	53.53	0.34	1.82	0.07	14.78	0.33	25.67	0.05	2.04	0.02	0.03	98.7	75.2	1.96	0.01	0.08	0.00	0.00	0.45	0.01	1.40	0.08	0.00	3.99
CHI-100-B-2-Px2	54.88	0.11	1.72	0.55	11.82	0.25	29.34	0.08	1.13	0.04	0.02	99.9	81.5	1.95	0.00	0.07	0.02	0.01	0.34	0.01	1.55	0.04	0.00	4.00
CHI-100-B-2-Px3	54.49	0.13	2.19	0.70	11.34	0.22	28.99	0.11	1.23	0.05	0.02	99.5	81.7	1.94	0.00	0.09	0.02	0.00	0.34	0.01	1.54	0.05	0.00	4.00
CHI-100-B-2-Px4	56.18	0.24	0.78	0.01	15.37	0.34	25.84	0.05	2.19	0.04	0.02	101.1	74.6	2.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.46	0.01	1.37	0.08	0.00	3.98
CHI-100-C-1-px2	54.09	0.32	1.95	0.03	14.77	0.33	27.61	0.05	1.80	0.00	0.00	100.9	77.9	1.93	0.01	0.08	0.00	0.03	0.41	0.01	1.47	0.07	0.00	4.02
CHI-100-C-2-px1	54.11	0.32	1.99	0.00	14.39	0.33	27.79	0.05	1.91	0.00	0.00	100.9	78.5	1.93	0.01	0.08	0.00	0.04	0.39	0.01	1.48	0.07	0.00	4.02
CHI-100-C-3-px4	54.62	0.27	1.69	0.11	12.29	0.26	29.24	0.06	2.09	0.00	0.00	100.6	82.2	1.94	0.01	0.07	0.00	0.04	0.33	0.01	1.55	0.08	0.00	4.02
CHI-25-C-1-Px1	55.10	0.30	1.21	0.04	14.06	0.33	27.60	0.08	1.85	0.02	0.03	100.6	77.4	1.97	0.01	0.05	0.00	0.00	0.42	0.01	1.47	0.07	0.00	4.00
CHI-25-C-1-Px2	55.30	0.28	1.31	0.07	12.34	0.31	28.40	0.09	2.08	0.04	0.01	100.2	80.0	1.97	0.01	0.05	0.00	0.00	0.37	0.01	1.51	0.08	0.00	4.00
CHI-25-C-1-Px3	55.39	0.33	1.28	0.00	13.07	0.31	28.27	0.07	1.87	0.04	0.02	100.7	79.0	1.97	0.01	0.05	0.00	0.00	0.39	0.01	1.50	0.07	0.00	4.00
CHI-25-C-1-Px4	55.33	0.23	0.68	0.00	13.80	0.31	27.98	0.07	1.82	0.02	0.02	100.2	78.0	1.98	0.01	0.03	0.00	0.00	0.41	0.01	1.49	0.07	0.00	4.00
CHI-25-C-1-Px5	54.70	0.38	0.54	0.00	17.21	0.41	24.75	0.05	2.14	0.04	0.04	100.3	71.5	1.99	0.01	0.02	0.00	0.00	0.52	0.01	1.34	0.08	0.00	3.99
CHI-25-C-1-Px6	55.69	0.24	0.77	0.02	12.88	0.33	28.15	0.03	2.00	0.03	0.04	100.2	79.2	1.98	0.01	0.03	0.00	0.00	0.38	0.01	1.50	0.08	0.00	3.99
CHI-25-C-1-Px7	54.94	0.31	0.74	0.00	15.58	0.35	25.80	0.05	2.27	0.05	0.05	100.1	74.3	1.99	0.01	0.03	0.00	0.00	0.47	0.01	1.39	0.09	0.00	3.99
CHI-25-C-3-Px1	54.74	0.36	2.18	0.14	13.31	0.28	27.46	0.05	2.21	0.08	0.09	100.9	78.3	1.94	0.01	0.09	0.00	0.00	0.39	0.01	1.45	0.08	0.01	4.00
CHI-25-C-3-Px2	55.26	0.32	1.64	0.15	12.46	0.33	27.94	0.03	2.10	0.04	0.04	100.3	79.6	1.96	0.01	0.07	0.00	0.00	0.37	0.01	1.48	0.08	0.00	3.99

Anexo 9. Criterios e indicadores de la evaluación de Brilha (2016) del valor científico de geositios.

Valor/ Criterios	Peso	Puntaje	Indicador
Científico			
Representatividad	30%	4	El geositio es el mejor ejemplo en el área de estudio para ilustrar elementos o procesos relacionados con el marco geológico en consideración
		2	Buen ejemplo en el área para ilustrar elementos o procesos relacionados con el marco de estudio en consideración
		1	El geositio ilustra razonablemente elementos o procesos relacionados con el marco geológico en consideración
Localidad clave	20%	4	Geositio reconocido como GSSP o ASSP por el IUGS o es un sitio IMA de referencia
		2	Geositio utilizado por la comunidad científica internacional, relacionado directamente con el marco geológico en consideración
		1	Geositio utilizado por la comunidad científica nacional, relacionado directamente con el marco geológico en consideración
Conocimiento científico	5%	4	Hay artículos sobre el geositio en revistas científicas internacionales, directamente relacionado con el marco geológico en consideración
		2	Hay artículos sobre el geositio en revistas científicas nacionales, directamente relacionado con el marco geológico en consideración
		1	Hay resúmenes presentados en eventos científicos internacionales sobre el geositio, directamente relacionado con el marco geológico en consideración
Integridad	15%	4	Los elementos geológicos principales están bien preservados
		2	El geositio no está bien preservado, pero los elementos geológicos principales aún se preservan.
		1	Geositio con problemas de preservación y con los elementos geológicos principales alterados o modificados
Diversidad geológica	5%	4	Geositio con más de tres tipos distintos de características geológicas de relevancia científica
		2	Geositio con tres tipos distintos de características geológicas de relevancia científica
		1	Geositio con dos tipos distintos de características geológicas de relevancia científica
Rareza	15%	4	El geositio es la única ocurrencia de su tipo en el área de estudio
		2	En el área de estudio hay dos o tres ejemplos de geositios similares
		1	En el área de estudio hay entre cuatro y cinco ejemplos de geositios similares
Limitación de uso	10%	4	El geositio no tiene limitaciones (permisos legales, barreras físicas, etc....) para realizar trabajo de campo y recolectar muestras
		2	Es posible hacer trabajo de campo y recolectar muestras después de superar ciertas limitaciones
		1	El trabajo de campo y la recolección de muestras son difíciles de conseguir debido a limitaciones

Anexo 10. Criterios e indicadores de la evaluación de Brilha (2016) de valores educativo y turístico de geositios. * Parámetros e indicadores modificados de la metodología original.

Valor/ Criterios	PE	PT	Puntaje	Indicador
Educativo y turístico				
Vulnerabilidad	10%	10%	4	Los elementos geológicos del geositio no presentan posibilidad de deterioro por actividad antrópica
			3	Hay posibilidad de deterioro de elementos geológicos secundarios por actividad antrópica
			2	Hay posibilidad de deterioro de elementos geológicos primarios por actividad antrópica
			1	Hay posibilidad de deterioro de todos los elementos geológicos por actividad antrópica
Accesibilidad	10%	10%	4	Sitio ubicado a < 100 m de una vía pavimentada con estacionamiento de bus
			3	Sitio ubicado a < 500 m de una vía pavimentada
			2	Sitio accesible por bus a través de una vía carretable
			1	Sitio sin acceso directo por vía, pero ubicado a < 1 km de una vía accesible en bus
Limitaciones de uso	5%	5%	4	El sitio no tiene limitación de uso para estudiante y turistas
			3	El sitio puede ser usado por estudiantes y turistas ocasionalmente
			2	El sitio puede ser usado por estudiantes y turistas después de superar ciertas limitaciones (permisos, barreras físicas, etc.)
			1	El uso por estudiantes y turistas es difícil de lograr, debido a limitaciones (legales, permisos, barreras físicas, etc.)
Seguridad	10%	10%	4	Sitio con instalaciones de seguridad (barandales, escaleras, cercas, etc.), cobertura de celular y ubicado a < 5 km de servicios de emergencia
			3	Sitio con instalaciones de seguridad (barandales, escaleras, cercas, etc.), cobertura de celular y ubicado a < 25 km de servicios de emergencia
			2	Sitio sin instalaciones de seguridad, pero con cobertura de celular y ubicado a < 50 km de servicios de emergencia
			1	Sitio sin instalaciones de seguridad, sin cobertura de celular y ubicado a > 50 km de servicios de emergencia
Logística	5%	5%	4	Alojamiento y restaurante para grupos de 50 personas ubicados a < 15 km del sitio
			3	Alojamiento y restaurante para grupos de 50 personas ubicados a < 50 km del sitio
			2	Alojamiento y restaurante para grupos de 50 personas ubicados a < 100 km del sitio
			1	Alojamiento y restaurante para grupos de menos de 25 personas, ubicados a < 50 km del sitio
Densidad de población*	5%	5%	4	Sitio ubicado en una municipalidad con > 10000 habitantes/km ² *
			3	Sitio ubicado en una municipalidad con 5000 - 10000 habitantes/km ² *
			2	Sitio ubicado en una municipalidad con 2500 - 5000 habitantes/km ² *
			1	Sitio ubicado en una municipalidad con <2500 habitantes/km ² *
Asociación con otros valores	5%	5%	4	Ocurrencia de valores ecológico y culturales a < 5 km del sitio
			3	Ocurrencia de valores ecológico y culturales a < 10 km
			2	Ocurrencia de un valor ecológico y cultural a < 10 km
			1	Ocurrencia de un valor ecológico o cultural a < 10 km

Paisaje	5%	15%	4	Sitio actualmente usado como destino turístico nacional
			3	Sitio ocasionalmente usado como destino turístico nacional
			2	Sitio actualmente usado como destino turístico local
			1	Sitio ocasionalmente usado como destino turístico local
Singularidad	5%	10%	4	El sitio tiene características únicas y poco comunes considerando los países vecinos
			3	El sitio tiene características únicas en el país
			2	El sitio tiene características comunes en la región, pero poco comunes para otras regiones del país
			1	El sitio tiene características que son comunes en el país
Condiciones de observación	10%	5%	4	Todos los elementos geológicos se observan en buenas condiciones
			3	Hay algunos obstáculos que dificultan la observación de algunos elementos geológicos
			2	Hay algunos obstáculos que dificultan la observación de los elementos geológicos principales
			1	Hay algunos obstáculos que obstruyen la observación de los elementos geológicos principales
Potencial didáctico	20%	N/A	4	El sitio presenta elementos geológicos que son enseñados en todos los niveles de enseñanza
			3	El sitio presenta elementos geológicos que son enseñados en escuelas primarias
			2	El sitio presenta elementos geológicos que son enseñados en escuelas secundarias
			1	El sitio presenta elementos geológicos que son enseñados en universidad
Diversidad geológica	10%	N/A	4	En el sitio hay más de tres tipos de elementos de geodiversidad (mineralógica, paleontológica, geomorfológica, etc.)
			3	En el sitio hay tres tipos de elementos de geodiversidad
			2	En el sitio hay dos tipos de elementos de geodiversidad
			1	En el sitio hay solo un tipo de elementos de geodiversidad
Potencial interpretativo	N/A	10%	4	El sitio presenta elementos geológicos de forma clara para todo tipo de público
			3	El público necesita tener cierto conocimiento geológico para entender los elementos geológicos del sitio
			2	El público necesita tener conocimiento geológico sólido para entender los elementos geológicos del sitio
			1	El sitio presenta elementos geológicos que solo son comprensibles para expertos
Nivel económico*	N/A	5%	4	El sitio se ubica en una alcaldía cuyo nivel de pobreza moderada es menor a la mitad del promedio nacional*
			3	El sitio se ubica en una alcaldía cuyo nivel de pobreza moderada es menor al promedio nacional*
			2	El sitio se ubica en una alcaldía cuyo nivel de pobreza moderada es similar al promedio nacional*
			1	El sitio se ubica en una alcaldía cuyo nivel de pobreza moderada es mayor al promedio nacional*
Proximidad a áreas recreativas	N/A	5%	4	Sitio ubicado a < 5 km de un área recreativa o turística
			3	Sitio ubicado a < 10 km de un área recreativa o turística
			2	Sitio ubicado a < 15 km de un área recreativa o turística
			1	Sitio ubicado a < 20 km de un área recreativa o turística

Anexo 11. Criterios e indicadores de la evaluación de Kubalíková et al. (2021) para los valores científico, educativo, turístico, valores adicionales y de conservación de geositios.

Valor/ Criterios	Puntaje	Indicador
Científico		
Integridad y estatus actual del sitio	0	malas condiciones, sitio deteriorado
	0.25	malas condiciones, con posibilidad de recuperación
	0.5	promedio
	0.75	buena
	1	excelentes condiciones
Rareza (singularidad)	0	el fenómeno en el sitio no es raro
	0.5	hay varios sitios similares
	1	el sitio es único en el área de estudio
Diversidad de fenómenos representados	0	solo un fenómeno
	0.25	dos fenómenos diferentes
	0.5	tres fenómenos
	0.75	cuatro fenómenos
	1	cinco o más fenómenos
Conocimiento científico	0	sitio prácticamente desconocido para la comunidad geocientífica
	0.5	localmente conocido, reportado en publicaciones nacionales
	1	artículos científicos del sitio en publicaciones internacionales
Significado paleogeográfico	0	sin importancia o muy limitada
	0.5	importancia parcial para la investigación de ciencias de la tierra
	1	el sitio tiene valor paleogeográfico o se considera localidad clave
Educativo		
Representatividad	0	no representativo, difícil ver el fenómeno
	0,5	parcialmente representativo con ayuda de materiales interpretativos
	1	ocurrencia típica del fenómeno, alta representatividad
Potencial didáctico e interpretativo	0	prácticamente no es posible entender y reconocer el fenómeno
	0.25	entendible, con explicación de profesionales; adecuado para estudiantes
	0.5	posible de entender con una guía profesional
	0.75	posible de entender con un panfleto o panel informativo
	1	el fenómeno es fácil de entender y reconocer
Materiales interpretativos existentes	0	no hay materiales disponibles
	0.25	aspectos de geodiversidad mencionados, pero principalmente se enfoca en otros aspectos (e.g. culturales)
	0.5	existen materiales sobre aspectos de geodiversidad en la web
	0.75	panfletos apoyando material ex-situ
	1	la geodiversidad del sitio es bien promovida in-situ con paneles o rutas educativas
Adicionales		
Aspecto ecológico	0	la geodiversidad no tiene relación importante con aspectos ecológicos en el sitio
	0,5	hay especies protegidas u otro fenómeno ecológico
	1	la geodiversidad apoya la ocurrencia de especies protegidas o ecosistemas específicos
Aspecto estético	0	no interesante u oculto
	0.25	parcialmente interesante (e.g. colores o estructuras de las características de geodiversidad interesantes)
	0.5	interesante (contraste de colores o estructura interesante)
	0.75	valor estético (estructura interesante en el paisaje que lo rodea, contraste de colores)
	1	fascinante (gran contraste, arquitectura impresionante)
Aspectos culturales (e.g., histórico, arqueológico, arquitectónico, artístico)	0	no tiene aspectos culturales
	0.25	un aspecto cultural
	0.5	dos aspectos culturales distintos
	0.75	tres aspectos culturales
	1	cuatro o más aspectos culturales

Turístico		
Visibilidad	0 0.25 0.5 0.75 1	Nula o limitada (con equipo especializado) limitada observable desde un punto de vista las características de geodiversidad son observables desde dos puntos de vista muy buena visibilidad desde tres o más puntos de vista
Accesibilidad	0 0.25 0.5 0.75 1	> 1 km de un estacionamiento y parada de transporte público < 1 km de un sitio de estacionamiento, pero > 1 km de una parada de transporte público a 0.5 - 1 km de una parada de transporte público y/o estacionamiento a < 0.5 km de una parada de transporte público y/o estacionamiento < 200 m de una parada de transporte público y/o estacionamiento
Seguridad	0 0.25 0.5 0.75 1	fenómenos de peligro comprobados (caída de rocas, deslizamientos) que puedan poner en peligro a los visitantes. Acceso bajo su propio riesgo fenómenos de peligro existentes pero limitados fenómenos de peligro hipotéticos, pero si se respetan las reglas de seguridad es seguro para los visitantes el sitio es relativamente seguro el sitio es seguro para todos, no hay peligro al desplazarse en el sitio
Infraestructura e instalaciones	0 0.25 0.5 0.75 1	no hay instalaciones muy limitadas (caminos no marcados) caminos para turistas que marcan la ruta al sitio caminos marcados, zonas cubiertas y bancos infraestructura completa (caminos, zonas cubiertas, instalaciones para bebidas y comida o productos locales)
Conservación		
Amenazas actuales	0 0.25 0.5 0.75 1	procesos en curso que llevan a la destrucción del sitio, sin planes de recuperación sitio en peligro por actividades antrópicas, con planes para disminuir el impacto amenazas potenciales que son manejadas o que pueden reducirse si ocurren poca amenaza antrópica, con amenazas naturales bien manejadas el sitio no está amenazado por procesos naturales ni actividad humana
Protección legal	0 0.5 1	sin protección legal el sitio hace parte de una zona de conservación local el sitio está protegido como zona de reserva nacional

Anexo 12. Inventario de las características de los geositos seleccionados.

1. Depósito de ceniza del Ecoparque El Arenal	
Localización	Magdalena Petlacalco
Coordenadas	19° 13' 56.6" N - 99° 11' 6.9" W
Protección legal	Suelo de conservación de la Ciudad de México
Elemento geológico de interés	Depósito de ceniza de espesor variable (> 2 m), con morfología de duna, sobre la ladera del Domo Magdalena
Proceso geológico relacionado (Representatividad)	Removilización eólica y acumulación de ceniza volcánica; procesos de deslizamiento a pequeña escala
Rareza (singularidad)	En el área cercana se encuentran diversos depósitos de ceniza con evidencias de removilización, pero de menores dimensiones y morfología.
Integridad	Alterado por actividad antrópica y erosión natural (escorrentía superficial y erosión eólica). Es manejado por el Ecoparque
Accesibilidad	Acceso privado, controlado por el Ejido de Magdalena Petlacalco. Cobro de entrada. Ubicado a 0 m de una vía pavimentada, donde circula transporte público. Cuenta con estacionamiento para vehículos
Estado de conocimiento científico	Mencionado en Cervantes y Molinero, 1995. Estudiado en el presente trabajo
Uso actual	Turístico
2. Cantera Cerro Magdalena	
Localización	San Miguel Ajusco
Coordenadas	19°13'40.0" N - 99°11'20.2" W
Protección legal	Suelo de conservación de la Ciudad de México
Elemento geológico de interés	Dacita porfirítica con textura fluidal
Proceso geológico relacionado (Representatividad)	Vulcanismo monogenético de composición silícica y dinámicas de cristalización
Rareza	Es la estructura volcánica de composición silícica con mejor preservación geomorfológica en el área
Integridad	La roca expuesta ha sido pintada con grafiti, y está levemente alterada por intemperismo. La zona contiene gran cantidad de desechos de basura y material de construcción
Accesibilidad	Acceso sin restricción por vía de terracería. A < 2 km de vía pavimentada con circulación de transporte público
Estado de conocimiento científico	Mineralogía descrita por Cervantes & Molinero (1995). Estudiado en el presente trabajo
Uso actual	Ninguno
3. Panorámica volcán Yololica- Cerro Magdalena	
Localización	San Miguel Ajusco
Coordenadas	19°13'36.7" N - 99° 10' 57.6" W
Protección legal	Suelo de conservación de la Ciudad de México
Elemento geológico de interés	Panorámica de la Ciudad de México hacia el norte, y de varias estructuras volcánicas hacia el sur y el este.
Proceso geológico relacionado (Representatividad)	Geomorfología volcánica, e impacto del paisaje por urbanización
Rareza	Este es uno de los sitios con mejor vista de la Ciudad y las estructuras volcánicas en el área de estudio
Integridad	Buena
Accesibilidad	Acceso sin restricción por vía de terracería. A < 2 km de vía pavimentada con circulación de transporte público.
Estado de conocimiento científico	N/A
Uso actual	Ninguno
4. Secuencia de tefra Yololica	
Localización	Magdalena Petlacalco
Coordenadas	19°13'46.3" N - 99°10'47.2" W
Protección legal	Suelo de conservación de la Ciudad de México
Elemento geológico de interés	Secuencia estratificada de tefra con variación en el tamaño de partículas entre ceniza fina y lapilli medio, con bloques de impacto, sobre un flujo de lava del volcán Yololica

Proceso geológico relacionado (Representatividad)	Procesos de caída de tefra
Rareza	Aunque hay numerosos afloramientos de tefra en el área, esta es la que mejor expone la variación en las partículas según sus características y tamaño, con relación a los procesos de caída
Integridad	Los depósitos y el flujo de lava se encuentran bien conservados, afectados únicamente por intemperismo
Accesibilidad	Acceso sin restricción por vía de terracería. A < 500 m de vía pavimentada con circulación de transporte público.
Estado de conocimiento científico	Estudiado en el presente trabajo
Uso actual	Ninguno

5. Cantera del volcán Yololica

Localización	San Miguel Ajusco
Coordenadas	19° 13' 10.1" N - 99° 10' 45.7" W
Protección legal	Suelo de conservación de la Ciudad de México
Elemento geológico de interés	Tefra rojiza (oxidada)
Proceso geológico relacionado (Representatividad)	Construcción de conos de escoria y alteración syn-eruptiva
Rareza	Único
Integridad	Afectado por erosión del material
Accesibilidad	Acceso sin restricción por un sendero de caminata y bicicleta. A < 2 km de vía pavimentada con circulación de transporte público
Estado de conocimiento científico	Estudiado en el presente trabajo
Uso actual	Ninguno

6. Cráter Yololica

Localización	San Miguel Ajusco
Coordenadas	19° 13' 36.7" N - 99° 10' 45.1" W
Protección legal	Suelo de conservación de la Ciudad de México
Elemento geológico de interés	Cráter del cono de escoria Yololica cubierto por vegetación
Proceso geológico relacionado (Representatividad)	Geomorfología volcánica
Rareza	Es el único cráter del área de estudio
Integridad	Buena. La morfología está preservada por la cobertura vegetal
Accesibilidad	Acceso sin restricción por un sendero de caminata y bicicleta. A < 2 km de vía pavimentada con circulación de transporte público
Estado de conocimiento científico	El cono de escoria Yololica es mencionado en Cervantes & Molinero (1995). Estudiado en el presente trabajo
Uso actual	Ninguno
Características adicionales	En el cono del volcán Yololica se han encontrado aproximadamente 56 especies de fauna y flora, entre ellas aves, flores, reptiles, árboles, entre otros (https://www.inaturalist.org/projects/biodiversidad-yololica?tab=species). También se ha reportado la presencia del conejo del volcán (<i>Romerolagus diazi</i>), declarado en peligro de extinción (SMARNAT, 2010) cuyo linaje amarillo es endémico de los volcanes Yololica, Tláloc y Cilcuayo (Osuna et al., 2020)

7. Cuevas del Aire

Localización	San Miguel Xicalco
Coordenadas	19° 13' 18.8" N - 99° 10' 17.9" W
Protección legal	Suelo de conservación de la Ciudad de México
Elemento geológico de interés	Túneles de lava de andesita basáltica, de aproximadamente 1 km de largo y 90 m de profundidad
Proceso geológico relacionado (Representatividad)	Dinámica de flujos de lava

Rareza	En el área de estudio es el único acceso conocido a los túneles. Aproximadamente 5 km al noroeste se encuentran túneles de lava del volcán Xitle que actualmente tienen uso turístico
Integridad	Degradación antrópica, las lavas se encuentran pintadas con grafitis y en la zona de entrada hay gran acumulación de desechos. Degradación natural por erosión hídrica
Accesibilidad	Se requiere permiso de la Junta Comunal de San Miguel Xicalco. A 0 m de una vía de terracería. Cuenta con un espacio pequeño para el estacionamiento de vehículos
Estado de conocimiento científico	Estudiado en el presente trabajo
Uso actual	Turístico
Características adicionales	Estas cuevas han sido utilizadas desde la antigüedad para llevar a cabo el ritual <i>Ixtlahuich</i> , que consiste en ofrendar alimentos, bebidas y prendas de vestir dentro de las cuevas, para pedir favores a los dioses, como sanación, buenas cosechas, fertilidad, lluvias, entre otros (Delegación de Tlalpan, 2015)

8. Sección de ceniza y lava San Buenaventura

Localización	Condominio Cedral, San Andrés Totoltepec
Coordenadas	19° 14'34.8" N - 99° 11' 11.2" W
Propiedad	Privada. Condominio Cedral, Asociación de Colonos San Buenaventura
Protección legal	(parcial) Suelo de conservación de la Ciudad de México
Elemento geológico de interés	Depósito de ceniza de espesor < 2 m, sobre flujos distales de lava del volcán Yololica aflorantes en una barranca, con zonas de brechamiento.
Proceso geológico relacionado (Representatividad)	Removilización eólica y acumulación de ceniza volcánica; dinámicas de flujos de lava (viscosidad, enfriamiento, desgasificación y movimiento de la lava)
Rareza	En el área cercana se encuentran diversos depósitos de ceniza con evidencias de removilización, y flujos de lava, pero este depósito es el más distal, lo que da idea de las distancias que viajan las partículas de ceniza durante los procesos eólicos de removilización.
Integridad	Alterado por erosión natural (la ceniza está expuesta a erosión eólica, y los flujos de lava a erosión hídrica)
Accesibilidad	Acceso privado controlado por la Asociación de Colonos San Buenaventura. Ubicado a < 200 m de una vía pavimentada, a 2 km del paso de transporte público. Cuenta con estacionamiento para un vehículo.
Estado de conocimiento científico	Estudiado en el presente trabajo
Uso actual	Ninguno