



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Características petrológicas y geoquímicas  
de la lava del Xitle: Una contribución para la  
geoeducación y el monitoreo de erupciones  
basálticas futuras en la Sierra Chichinautzin,  
Ciudad de México**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniera Geofísica**

**P R E S E N T A**

Damaris Zavala Hernández

**DIRECTORA DE TESIS**

Dra. Marie-Noëlle Guilbaud



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025**



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y  
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL  
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado CARACTERISTICAS PETROLOGICAS Y GEOQUIMICAS DE LA LAVA DEL XITLÉ: UNA CONTRIBUCION PARA LA GEOEDUCACION Y EL MONITOREO DE ERUPCIONES BASALTICAS FUTURAS EN LA SIERRA CHICHINAUTZIN, CIUDAD DE MEXICO. que presenté para obtener el título de INGENIERO GEOFÍSICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

---

**DAMARIS ZAVALA HERNANDEZ**  
Número de cuenta: 317043880

## **Agradecimientos**

En primer lugar, agradezco a mis padres, cuyo esfuerzo y sacrificio me han permitido continuar mis estudios. Su apoyo incondicional, paciencia y, sobre todo, el amor que me han brindado me ha dado la fuerza para llegar hasta aquí. Gracias a ellos, soy quien soy.

A mis hermanos, les agradezco su infinita paciencia y comprensión. A pesar de las exigencias de la escuela, siempre estuvieron ahí para apoyarme y regalarme momentos de alegría, siendo un rayo de luz que me motivaba a seguir adelante.

También agradezco a mis familiares y amigos por su apoyo incondicional y por siempre creer en mí. Un especial agradecimiento a Clara, la cual siempre estuvo para impulsar mis sueños y apoyarme incondicionalmente.

A Kike, gracias por estar a mi lado las veinticuatro horas del día, por ser un pilar fundamental en mi vida y mi mayor apoyo en este camino.

A mi tutora, la Dra. Marie-Noëlle, le agradezco profundamente por darme la oportunidad de aprender de sus conocimientos, por brindarme su guía y acompañarme en este proceso. Gracias por su confianza, paciencia y enseñanza, sin las cuales este logro no habría sido posible.

A mis profesores, gracias por motivarme y enseñarme a amar lo que hago. Sin sus conocimientos y su pasión por la enseñanza, este logro no habría sido posible. Gracias por iluminar mi camino y por compartir su sabiduría con tanta dedicación.

Y por último, agradezco al "Programas de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica" (PAPIIT), proyecto no. IN111424 titulado "Volcanismo monogenético y sociedad: estudio de la actividad pasada, evaluación del peligro y geopatrimonio", y a la SECIHTI (anteriormente CONAHCYT), proyecto no. CBF-1049 titulado "Geocity: Geopatrimonio del sur de la Ciudad de México y su relación con aspectos biológicos y socioculturales" por haber brindado los apoyos financieros para la realización de este trabajo.

<b>Contenido</b>	
<b>Índice</b> .....	<b>1</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>4</b>
<b>Capítulo 1.- Introducción</b> .....	<b>5</b>
1.1 Marco geológico .....	5
1.2 Contexto cultural .....	7
1.3 Planteamiento del problema.....	7
1.4 Hipótesis .....	8
1.5 Objetivo general .....	8
1.6 Justificación y selección de sitios de estudio .....	8
<b>Capítulo 2.- Antecedentes</b> .....	<b>9</b>
2.1 Estudios petrológicos .....	9
2.2 Estudios estructurales y morfológicos .....	9
<b>Capítulo 3.- Fundamentos teóricos sobre los tipos de lava basáltica.....</b>	<b>11</b>
<b>Capítulo 4.- Metodología.....</b>	<b>14</b>
4.1 Glosario. ....	14
4.2 Cartografía de estructuras .....	14
4.2.1 Japón .....	14
4.2.2 Italia.....	15
4.3 Muestreo.....	16
4.4 Petrografía y análisis químico .....	16
<b>Capítulo 5.- Resultados.....</b>	<b>18</b>
5.1 Glosario de términos. ....	18
5.2 Cartografía y muestreo.....	18
5.2.1 Sitio Japón .....	19
5.2.2 Sitio Italia.....	24
5.3 Descripción de petrografía: Síntesis de descripciones de láminas.....	27
5.4 Porcentajes modales .....	31
5.5 Composición de roca total .....	36
5.6 Composición de vidrio y minerales.....	37
<b>Capítulo 6.- Discusión de resultados</b> .....	<b>39</b>
6.1 Modo de emplazamiento de lavas.....	39
6.2 Temperatura de la lava .....	40

6.3. Geopatrimonio .....	42
<b>7. Conclusiones.....</b>	<b>43</b>
<b>8. Recomendaciones para estudios posteriores .....</b>	<b>44</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>46</b>
<b>Anexos: .....</b>	<b>51</b>
Anexo 1: Descripción de láminas.....	51
Anexo 2: Tabla visual de porcentajes.....	57
Anexo 3: Composición del vidrio en muestras de Japón .....	58
Anexo 4: Glosario de términos vulcanológicos .....	60
Anexo 5: Mapa Japón .....	72
Anexo 6: Mapa Italia.....	74

## Figuras

Figura 1: Ubicación del volcán Xitle. ....	5
Figura 2: Estructuras de lava pāhoehoe.....	11
Figura 3: Fotografías de lavas de tipo pāhoehoe y 'a'ā. ....	13
Figura 4: Mapa del sitio de Japón. ....	19
Figura 5: Estructuras de Japón. ....	21
Figura 6: Perfiles de Japón.....	22
Figura 7: Mapa del sitio de Italia.....	24
Figura 8. Perfil en el corte artificial .....	26
Figura. 9: Estructuras Italia.....	27
Figura 10: Petrografía de láminas Japón. ....	30
Figura 11: Láminas Italia. ....	31
Figura 12: Análisis modal de las muestras de Japón. ....	34
Figura 13: Análisis modal de las muestras de Italia. ....	35
Figura 14: Diagrama Total Alkali Silica (Le Maitre, 1989). ....	36
Figura 15: Gráfica SiO <sub>2</sub> vs. MgO de las muestras de Japón. ....	37
Figura 16. Derrame lávico del Volcán Xitle .....	39
Figura 17. Galería de imágenes de las laminas observadas.....	56

## Tablas

Tabla 1. Conteo de puntos para el análisis modal, correspondiente al sitio de Japón. ....	32
Tabla 2. Conteo de puntos para el análisis modal, correspondiente al sitio de Italia. ....	35

## **Resumen**

El Volcán Xitle, ubicado en la Sierra Chichinautzin al sur de la Ciudad de México, es un volcán monogenético cuya erupción generó extensos flujos de lava que transformaron el paisaje y cubrieron zonas arqueológicas como Cuicuilco. Este estudio analiza las características morfológicas, petrológicas y geoquímicas de las lavas del Xitle en los sitios Japón e Italia, dentro del corredor escultural histórico de la Ruta de la Amistad, para comprender mejor el modo de emplazamiento de las lavas, los procesos asociados a erupciones monogenéticas, y el significado de estos sitios para el geopatrimonio de la Ciudad de México.

Los resultados muestran que las lavas presentan estructuras pāhoehoe bien conservadas, con evidencias de crecimiento por inflación, lo que sugiere un flujo de baja viscosidad. El análisis petrográfico identifica plagioclasa y olivino en una matriz predominantemente microcristalina a vítrea, con un aumento en la cristalinidad y decremento en la vesicularidad con la profundidad en las grietas, reflejando el enfriamiento paulatino y lento de la lava durante su emplazamiento.

Este estudio proporciona información clave sobre la actividad efusiva en volcanes monogenéticos y resalta la importancia de estos productos como geopatrimonio en la Ciudad de México, con aplicaciones en geoeducación y gestión de riesgos volcánicos.

## **Abstract**

The Xitle Volcano, located in the Sierra Chichinautzin in the southern part of Mexico City, is a monogenetic volcano whose eruption generated extensive lava flows that reshaped the landscape and covered archaeological structures such as Cuicuilco. This study analyzes the morphological, petrological, and geochemical characteristics of the Xitle lavas at the Japón and Italia sites, within the sculptural route of the Ruta de la Amistad, to better understand the emplacement mode of the lavas, the processes associated with monogenetic eruptions, and the relevance of those sites for the geoheritage in Mexico City.

The results show that the lavas exhibit well-preserved pāhoehoe structures, with evidence of growth by inflation, suggesting a low-viscosity flow. Petrographic analysis identifies plagioclase and olivine within a predominantly microcrystalline to vitreous matrix, with an increase in crystallinity and decrease in vesicularity with depth in the inflation clefts, reflecting slow internal cooling of the lava during its emplacement.

This study provides key insights into the effusive activity in monogenetic volcanoes and highlights the significance of these deposits as geoheritage in Mexico City, with applications in geoeducation and volcanic hazard management.

## Capítulo 1.- Introducción

### 1.1 Marco geológico

El Volcán Xitle se localiza en el sur de la Ciudad de México, en la delegación de Tlalpan. El Xitle es un volcán monogenético, que se formó a partir de una sola erupción continua, en contraste con los volcanes poligenéticos como el volcán Popocatepetl, que resultan de múltiples erupciones separadas por períodos de inactividad (Walker, 2000). Se encuentra en la Sierra Chichinautzin (Sch), un campo volcánico situado en la parte oriental del Cinturón Volcánico Transversal (CVT) (recuadro en Figura 1). El CVT tiene una orientación general de oeste a este y atraviesa México entre los 19° y 20° de latitud norte (recuadro en Figura 1). Es un arco volcánico asociado con la subducción de las placas de Cocos y Rivera bajo la placa de América del Norte a lo largo de la fosa de América Central (Demant, 1978).

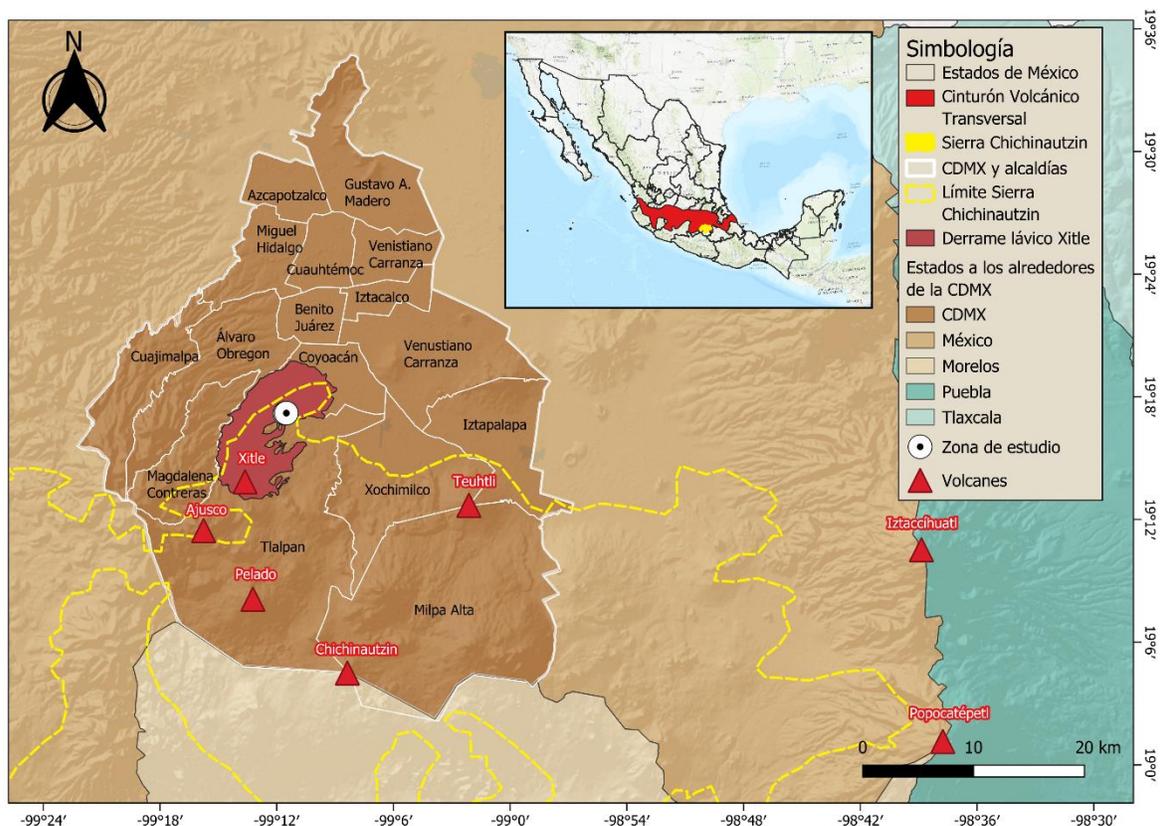


Figura 1: Ubicación del volcán Xitle y su respectivo derrame lávico, la zona de estudio, y otros volcanes dentro de la Ciudad de México (CDMX) y estados colindantes. Recuadro: Mapa de ubicación del Cinturón Volcánico Transversal y de la Sierra Chichinautzin dentro de la República Mexicana.

La Sch está compuesta por más de 220 edificios cuaternarios, la mayoría conos de escoria y flujos de lava, junto con secuencias de tefra y depósitos aluviales,

abarcando una extensión aproximada de 2,340 km<sup>2</sup> (Swinamer, 1989). El volcán Xitle se encuentra en la parte norte de la SCh, en la ladera noreste del estratovolcán Ajusco (Figura1). Es un cono de escoria que alcanza una altitud de 3,150 msnm, con una altura de 140 metros sobre el terreno circundante y un diámetro basal de 500 metros (Palacio y Guilbaud, 2015). El Xitle es considerado el volcán más joven dentro del Campo Volcánico Sierra del Chichinautzin (SCVF por sus siglas en inglés), con una edad aproximada de 1,670 años antes del presente que fue establecida mediante el fechamiento por radiocarbono de fragmentos de carbono dentro de cenizas del volcán mismo (Siebe, 2000).

Estudios previos han permitido establecer las características generales de la erupción del Volcán Xitle, las cuales se resumen a continuación. Siebe (2000) asignó un Índice de Explosividad Volcánica (IEV) de entre 2 y 3 para esta erupción. Cervantes y Wallace (2003) clasificaron la erupción como de estilo estromboliano, el cual consiste en una actividad explosiva con una intensidad moderada y controlada con la despresurización del magma y una expansión consecuente de gases en la parte alta del conducto (por ejemplo: Taddeucci et al., 2015). Cervantes y Molinero (1995) estimaron alturas de columnas eruptivas de hasta 11.2 km sobre el cráter y calcularon volúmenes totales de 0.96 km<sup>3</sup> de lava y 0.12 km<sup>3</sup> de ceniza, con una dispersión principal de la ceniza hacia el S y W. Los fragmentos más grandes de escoria (lapilli, bombas) cayeron más cercanos al conducto, construyendo el cono principal, mientras las cenizas recorrieron mayores distancias.

El cono principal del Xitle se formó en la parte inicial de la erupción y a medida que la proporción de gas disminuía en el magma, la erupción se tornó menos explosiva y más efusiva dando lugar al emplazamiento consecutivo de flujos de lava con baja viscosidad los cuales se iban sobreponiendo unos sobre otros (Siebe, 2009). Estos flujos se deslizaron por las laderas del estratovolcán Ajusco con dirección general hacia el norte, llegando a los 12 o 13 km de distancia del centro emisor y cubriendo una superficie total de 70 km<sup>2</sup> (Delgado et al., 1998; Siebe, 2009).

La erupción dejó una amplia área recubierta por una roca dura y estéril (Siebe, 2000). Las coladas lávicas enterraron prácticamente toda una ciudad prehispánica conocida como Cuicuilco, que posiblemente estaba deshabitada al momento de la erupción (Cummings, 1926). Este evento es un claro ejemplo de los riesgos a los cuales están expuestas las áreas urbanas asentadas en zonas volcánicas activas, tales como la Ciudad de México. Sin embargo, las lavas proveen diversos servicios ecosistémicos a la ciudad como son filtración y abastecimiento de los acuíferos, secuestro de carbono, conservación de nutrientes en los suelos, polinización y estabilización de suelos (Nava-López et al., 2009) y representan un geopatrimonio valioso (Guilbaud et al., 2021).

## **1.2 Contexto cultural**

Este trabajo de tesis aporta nuevos datos sobre las lavas del Volcán Xitle que fueron colectados en los sitios de Japón e Italia ubicados a lo largo de la Ruta de la Amistad.

La Ruta de la Amistad es un corredor escultórico de 17 kilómetros ubicado en el sur de la Ciudad de México, creado como parte del programa cultural de los Juegos Olímpicos de 1968. Compuesto por 22 esculturas monumentales de entre 7 y 26 metros de altura, el proyecto fue encabezado por el artista Mathias Goeritz y contó con el respaldo del arquitecto Pedro Ramírez Vázquez (Ferreiro et al., 2023)

Cada escultura fue diseñada por artistas de diferentes países, representando la diversidad cultural de los cinco continentes. Las obras, de estilo brutalista, se caracterizan por sus formas geométricas masivas y el uso de concreto expuesto, reflejando una estética cruda e imponente (Roy-Pinot et al., 2024).

El objetivo de la Ruta de la Amistad era simbolizar la unión de "todas las razas" y promover un mensaje de paz y fraternidad internacional, libre de nacionalismos (Ayala et al., 2017). Las esculturas se instalaron a lo largo del Anillo Periférico Sur, aproximadamente cada kilómetro y medio (Salvador, 2023), convirtiendo la vía en una galería de arte al aire libre.

Esta ruta, que estuvo en peligro de desaparecer por consecuencia de la urbanización del área y de la ausencia de medidas de protección y mantenimiento, fue rescatada gracias a la acción social de Luis Javier de la Torre, quien, junto con Javier Ramírez Campuzano, fundaron el Patronato Ruta de la Amistad A.C. (Ferreiro et al., 2023). Esta organización ha restaurado y conservado dichas obras, además de preservar y fomentar la restauración de los pedregales en esta área. El 12 de octubre del 2018, la Secretaría de Cultura CDMX declaró a la Ruta de la Amistad Patrimonio Cultural Tangible de la Ciudad de México (Salvador, 2023).

## **1.3 Planteamiento del problema**

El volcán Xitle, es uno de los volcanes monogenéticos mas recientes de la región, cuya erupción transformó significativamente el paisaje de la región y afecto directamente asentamientos prehispánicos. En la literatura se han documentado los aspectos generales de las lavas del Xitle (Walker, 1993; Siebe, 2000; Cervantes y Wallace, 2002), pero pocos estudios han integrado observaciones de campo, análisis petrográficos y geoquímicos en sitios bien conservados y accesibles. Esta falta de caracterización limita la comprensión de los procesos de emplazamiento de lavas de este tipo, que son fundamentales para evaluar el riesgo en zonas densamente pobladas como lo es la Ciudad de México.

## **1.4 Hipótesis**

Los afloramientos en la Ruta de la Amistad, restaurados recientemente, ofrecen una oportunidad única para investigar en detalle estructuras características de lavas pāhoehoe. Planteamos que un estudio detallado de estos sitios aportara datos útiles no solo para la investigación científica, sino también para fortalecer la gestión del riesgo y el reconocimiento del geopatrimonio. Así mismo se podrá evidenciar que las lavas distales del volcán Xitle exhiben características morfológicas, texturales y geoquímicas típicas de flujos de tipo pāhoehoe, asociados a condiciones de baja viscosidad y enfriamiento progresivo.

## **1.5 Objetivo general**

El presente trabajo tiene como objetivo determinar las características morfológicas, petrológicas y geoquímicas de la lava del Volcán Xitle, usando como caso de estudio los sitios de Japón e Italia, dentro de la Ruta de la Amistad, y aportando datos de interés vulcanológico, pero también para el geo patrimonio.

## **1.6 Justificación y selección de sitios de estudio**

La realización de este trabajo tiene gran importancia en diversos ámbitos, tanto científicos como socioculturales.

La Ciudad de México es una de las áreas urbanas más grandes del mundo que está localizada en un área volcánicamente activa, lo cual implica riesgos importantes para la sociedad. Por lo tanto, entender mejor una de las últimas erupciones que ocurrieron en el área beneficia a los habitantes de la Ciudad de México y del país completo, dada la importancia de los poderes económicos y políticos que se concentran en la capital del país. En particular, la comprensión de las características reológicas de las lavas del Xitle proporcionará datos valiosos sobre los procesos de emplazamiento de las lavas basálticas emitidas por erupciones monogenéticas. A más largo plazo, estos resultados podrían permitir mejorar los sistemas de monitoreo y prevención ante estas erupciones, minimizando así sus impactos.

En cuanto al ámbito cultural, la erupción del Xitle generó extensos flujos de lava que cubrieron una superficie considerable, incluyendo áreas que hoy forman parte del sur de la ciudad. Este evento tuvo un impacto significativo en las poblaciones prehispánicas, como Cuicuilco, y moldeó el paisaje actual. Desde los años 70, la urbanización acelerada de las coladas ha reducido significativamente los afloramientos visibles. Estos remanentes son cruciales para preservar la memoria de la erupción y mantener los ecosistemas asociados y por lo tanto son considerados geositios (Palacio y Guilbaud 2015; Guilbaud et al., 2021). La selección de sitios en Japón e Italia para este estudio se justifica por la excelente exposición de las superficies de lava allí, resultado de procesos de restauración que facilitan su análisis detallado. La información aportada por esta tesis contribuye al desarrollo de actividades de geoeeducación y a la conservación del patrimonio geológico de la región.

## **Capítulo 2.- Antecedentes**

Existen algunos estudios anteriores sobre las estructuras lávicas, la composición química, y la petrografía de las lavas del Volcán Xitle que están resumidos a continuación.

### **2.1 Estudios petrológicos**

Cervantes y Molinero (1995), retomado parcialmente por Delgado et al. (1998), hicieron un resumen exhaustivo de los estudios geológicos previamente realizados en el sur de la Cuenca de México. Según ellos, los primeros en reportar un análisis químico para las lavas del Xitle fueron Felix y Lenk (1890) quienes lo denominaron un basalto libre de hipersteno. Schmitter (1953) realizó estudios de petrología y geoquímica, en donde propone que las lavas del Xitle se clasifican como basalto con afinidad alcalina, derivados de un magma gabrodiorítico.

Notablemente, Gunn y Mooser (1971) realizaron un estudio exhaustivo comparativo de la geoquímica de los volcanes del centro de México, en las regiones de Guadalajara y el Valle de México. Para el Valle de México, reportaron elementos mayores ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Ti}_2\text{O}$ ) para 80 muestras y elementos traza (Cr, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Ba, Th, Pb) para 62 muestras, notando una mayor proporción de andesitas y dacitas con contenidos más bajos de potasio. Las lavas recientes del Xitle, con menos de 55 % de  $\text{SiO}_2$ , destacaron por ser andesitas basálticas enriquecidas en olivino y con texturas asociadas a procesos de rápida cristalización y extrusión. Estas lavas reflejan condiciones de generación magmática menos profundas y más cercanas al manto superior.

Wallace y Carmichael (1999) publicaron 91 análisis químicos totales realizados en muestras de lava y escoria recolectadas en 50 centros eruptivos del campo volcánico Chichinautzin. Con base en estos, establecieron que las lavas del Xitle son principalmente basaltos normativos hiperstenos y ligeramente nefelinos, y varían de alcalinas a transicionales en su composición total.

En cuanto a estudios posteriores, Siebe (2000) describió las lavas del Xitle como basalto gris oscuro que contiene plagioclasa y fenocristales de olivino.

Cervantes y Wallace (2002) presentaron datos de elementos traza en tres muestras de tefra recolectadas en varios niveles de un depósito piroclástico del Xitle, con base en los cuales discuten los procesos que dieron origen al magma que alimentó a la erupción.

### **2.2 Estudios estructurales y morfológicos**

En cuanto a las estructuras de las lavas (Figura 2), Cervantes y Molinero (1995) plantearon que la primera publicación al respecto fue por Ordoñez (1895) quien las describió según el mismo de manera superficial.

Waiz y Wittich (1910) hicieron una descripción más detallada de éstas, en especial en cuanto a los cortes expuestos en canteras, y describen “tubos de explosión” (Figura 2D) que son, según ellos, formados debido a explosiones freáticas,

provocadas cuando la lava en movimiento entró en contacto con suelo húmedo. Según ellos, este contacto generó una rápida evaporación del agua, causando una expansión violenta del vapor que perforó la lava aun parcialmente consolidada. Las paredes del tubo, desgarradas por la explosión y solidificadas rápidamente debido al enfriamiento causado por la expansión del vapor, hubieran quedado cubiertas de protuberancias porosas y ásperas que rellenaron el tubo. Cabe notar que la hipótesis de formación de estas estructuras por el involucramiento del agua fue rechazada por Walker (2009) (ver abajo).

Wittich (1919) describió otras estructuras en las lavas, como lo son vesículas, tubos de expulsión, cuevas y titipiles (hornitos). También indicó la presencia de cuarzo xenocrystalino en las lavas atribuyendo su origen a la incorporación de rocas basales durante el ascenso del magma.

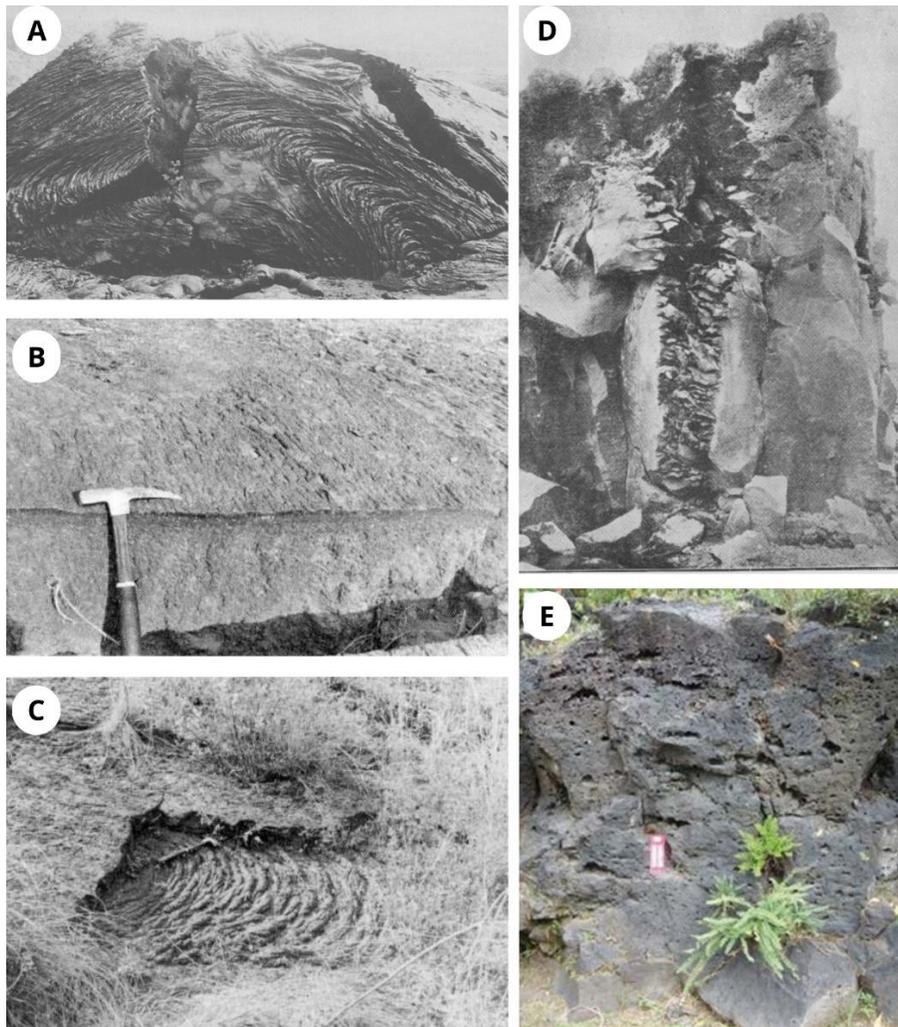
Badilla (1977) documentó lavas tipo pāhoehoe con superficies lisas, filamentos (Figura 2B) y arrugas (Figura 2C). Destaca estructuras como tubos de explosión, crestas de presión, túmulos y dedos de lava en frentes de flujo. Según él, la distribución de vesículas muestra tres zonas (Figura 2E): inferior (máximo 60 cm, vesículas alargadas orientadas al flujo), intermedia (mayor espesor, pocas vesículas esféricas e irregulares) y superior (abundantes vesículas alargadas según el flujo). Mencionó, además, que esta zonificación es exclusiva de lavas pāhoehoe.

Walker (1993) describió la estructura típica de flujos de lava del Xitle. Reportó varios tipos de vesículas (background vesicles, mega vesículas, vesículas de cuña lateral, vesículas de cúpula o belljar, vesículas cilíndricas, vesículas cónicas invertidas, cilindros de vesículas, vesículas globulares, venas de segregación) y precisa su origen y distribución. También mencionó que existe una foliación en gran parte de la lava, la cual se define por vesículas pequeñas aplanadas.

Con base a observaciones de campo, Siebe (2000) indicó que la lava del Xitle tenía una viscosidad baja. Menciona también que las unidades de flujo son altamente vesiculares en su tercio superior y casi no vesiculares en sus dos tercios inferiores, con una capa basal de 0.5-1.0 m que contiene vesículas tubulares. También observó que los flujos de lava muestran una morfología joven, con poca cobertura vegetal y estructuras de flujo bien conservadas. Destacó estructuras como canales de lava, crestas de presión y túmulos (Figura 2A).

Walker (2009) describe la morfología y la estructura interna de las lavas pāhoehoe del Xitle y, con base a una comparación con las del flujo de Mauna Loa en 1859, propuso que la lava era más viscosa, lo cual favoreció su crecimiento interno. Describe que la lava muestra estructuras de elevación ("lava rise" en inglés) comunes en campos de lava pāhoehoe, con bordes elevados que se expandieron debido a la inyección de lava desde el interior. Las unidades de flujo son estrechas y en muchos afloramientos observó secciones completas, con bordes inclinados y cuñas formadas por la inflación de la lava. Estas son las estructuras que habían sido interpretadas, erróneamente, como tubos de explosión por Waiz y Wittich (1910) y Wittich (1919).

En los artículos sobre el geopatrimonio de Palacio y Guilbaud (2015) y Guilbaud et al. (2021), se describió la morfología del cono y de lavas del Xitle en varios sitios claves que se distribuyen en varias partes del campo de lava. Allí se describen principalmente lavas de tipo pāhoehoe y sus estructuras asociadas (lavas cordadas, tumuli, lobulitos, grietas de inflación etc.).



*Figura 2: Estructuras de lava pāhoehoe. A, Tumulus, en el suelo de la caldera del Kilauea; La estructura cordada en la superficie de la corteza indica la dirección del flujo de lava antes de inclinarse, adicionalmente se pueden observar las grietas de inflación. Fotografía tomada de Walker, 1991. B, Filamentos de lava tipo pāhoehoe. Fotografía de Badilla, 1977. C, Pequeño flujo de lava con estructuras cordadas. Fotografía de Badilla, 1977. D, Tubo de explosión en la cantera de Huipulco. Fotografía de Waitz, 1911. E, Sección vertical a través de la lava que muestra el típico aumento ascendente en la densidad de vesículas y la disminución en el tamaño de las vesículas que se observa en las lavas pāhoehoe. Fotografía de Guilbaud et al. 2021.*

### **Capítulo 3.- Fundamentos teóricos sobre los tipos de lava basáltica**

El vulcanismo basáltico está ampliamente distribuido en la Tierra, representando más de la mitad de los volcanes del mundo, y está relacionado con diversos entornos tectónicos que incluyen límites de placas divergentes y convergentes (Walker, 1993). Este tipo de vulcanismo tiene como producto dos principales tipos de lava: pāhoehoe y 'a'ā los cuales están descritos a continuación.

Self et al. (1998) describió las lavas pāhoehoe como lavas de superficie lisa, onduladas o en forma de cuerdas también llamadas lavas cordadas (Figura 3A), que se forman a medida que la lava fluida se desplaza y solidifica lentamente al contacto con el ambiente. Las lavas pāhoehoe se distinguen debido a su proceso de inflación, en el cual el flujo de lava se expande internamente cuando el magma fresco se inyecta debajo de una capa solidificada.

Walker (1993) señaló que el proceso de inflación en los flujos de lava tipo pāhoehoe facilita la formación de grandes estructuras, como túmulos y tubos de lava que permiten el transporte de magma a lo largo de distancias significativas (Figura 3B). Estos tubos y caminos aislados de la superficie hacen que los flujos de lava pāhoehoe mantengan tasas de descarga bajas y, aun así, cubran áreas extensas. Internamente, los flujos inflados de pāhoehoe desarrollan estructuras vesiculares complejas. La parte superior suele estar llena de burbujas atrapadas, mientras que el núcleo tiende a tener menos vesículas y mayor cantidad de cristales. En el proceso de solidificación, los gases y elementos residuales forman estructuras como vesículas y cilindros de gas en la base. Además, la inflación produce túmulos y grietas horizontales en terrenos irregulares, permitiendo que el flujo se adapte a la topografía y expanda su cobertura (Self et al., 1988).

Por otro lado, la lava 'a'ā es más viscosa y tiende a formar superficies fragmentadas y rugosas (Figuras 3C y 3D). Este tipo de flujo avanza más rápidamente en comparación con el tipo pāhoehoe, y forma canales bien definidos en lugar de tubos. A medida que la lava 'a'ā avanza, su propia superficie se fragmenta y rompe, generando una textura áspera y bloques de lava afilados y fragmentados (Figura 3E).

El tipo de lava 'a'ā es común en erupciones más explosivas o en terrenos con pendientes pronunciadas, donde su mayor viscosidad y flujo más rápido no permiten la formación de una corteza inflada como en la del tipo pāhoehoe (Self et al., 1988). En tanto a su vesicularidad, Walker (1993) mencionó que, en el transcurso de su desplazamiento, la lava con una superficie 'a'ā pierde la mayor parte de su contenido de gas mediante la desgasificación de la parte interna del flujo debido a su exposición al aire y sin la formación de una corteza "sello", lo que da como resultados núcleos densos en las partes distales de las coladas.

Está marcada diferencia en la estructura y morfología del flujo entre pāhoehoe y 'a'ā resalta cómo la velocidad de flujo, la viscosidad y los patrones de enfriamiento influyen en las geofomas presentes en campos de lava basáltica.

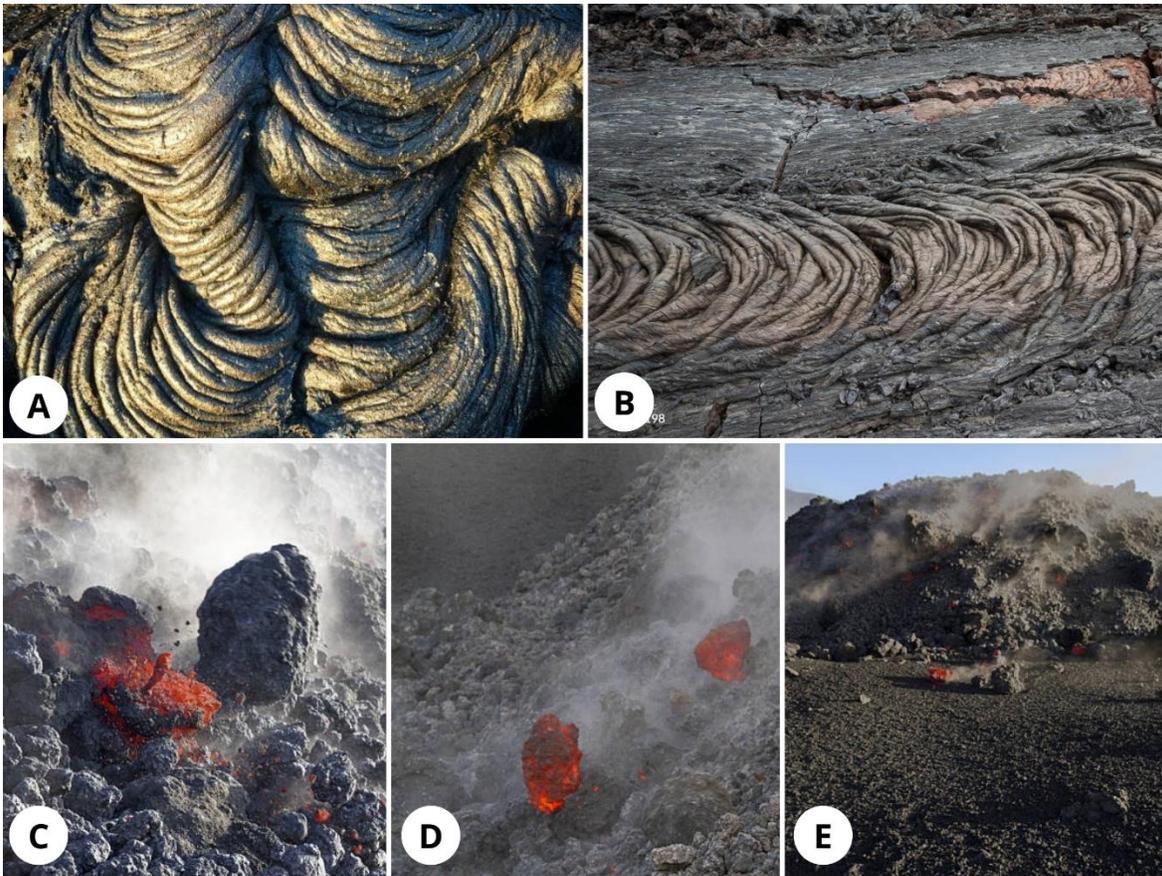


Figura 3: Fotografías de lavas de tipo pāhoehoe y 'a'ā. A, Roca de lava de pāhoehoe, patrón de basalto endurecido, volcán Kilauea, Hawái, Estados Unidos. Créditos: getty images, Kevin Schaler. B, Complejo Volcánico Tolbachik (pāhoehoe), Kamchatka Krai, Russia. Créditos: getty images, Richard Lanson. C, Flujo de lava ('a'ā) del Monte Etna en el "Valle del bovó". Créditos: iStock, etvulc. D y E, lava tipo 'a'ā, Monte Etna. Créditos: iStock, etvulc.

## **Capítulo 4.- Metodología.**

### **4.1 Glosario.**

Se realizó una extensa búsqueda bibliográfica en la cual se investigó la definición de un listado de términos vulcanológicos relacionados a los volcanes y las lavas basálticas (especialmente de tipo pāhoehoe), para apoyar la descripción de las estructuras presentes en los sitios de estudio con base a datos de campo.

Se buscó que este material fuera lo más estandarizado posible, es decir, se procuró que los términos estuvieran lo más cerca de su traducción sin cambiar el contexto, reduciendo la ambigüedad y haciendo más claras las definiciones en ambos idiomas. La falta de equivalentes directos para ciertos términos vulcanológicos en inglés obligó a generar un glosario que homologara los términos que pueden tener más de una traducción al español. La creación de este glosario ayudó a proponer traducciones adecuadas y más unificadas.

Las referencias utilizadas para crear este glosario provinieron de diversas fuentes que incluyen publicaciones científicas y libros de texto, así como artículos de revistas especializadas en vulcanología. También se consideraron glosarios y diccionarios especializados, tanto en inglés como en español, así como bases de datos y repositorios de investigación que cubren términos geológicos y vulcanológicos. En algunos casos fue necesario emplear directamente la herramienta de Google traductor y el traductor de la universidad de Cambridge, debido a la dificultad de encontrar los términos en español que tuvieran el mismo significado en inglés, siempre cuidando que la definición sea fidedigna.

### **4.2 Cartografía de estructuras**

Se hizo una primera visita de reconocimiento de los sitios de estudio el 22 de agosto de 2023. En esta ocasión, debido a la temporada de lluvias, el lugar se encontraba lleno de vegetación la cual obstruía a veces el paso o escondía las estructuras presentes en la zona.

En el mes de septiembre siguiente, se llevó a cabo un vuelo de dron para coleccionar imágenes aéreas de los sitios de estudio con el fin de facilitar la cartografía y permitir la georreferenciación de los elementos identificados. Estas imágenes también sirvieron para comparar el aspecto del área en las diferentes estaciones del año.

#### **4.2.1 Japón**

La cartografía de Japón se comenzó a realizar en septiembre de 2023 y se terminó hasta abril del 2024, realizando por lo menos 2 visitas a la semana. Se empezó con la realización de un boceto hecho a mano, en donde se tomó como referencia la escalera que baja hacia el sitio y de ahí se fueron mapeando las estructuras. Principalmente se comenzó a delimitar el sector más grande, y el más accesible (sector 1), mapeando las grietas más prominentes y delimitando su área de distribución. La metodología del mapeo fue seguir cada grieta e ir identificando las estructuras (conjunto de lavas cordadas, lavas densas) para reportarlas en el mapa.

En el caso de las grietas fue necesario medir las dimensiones del largo, ancho y profundidad. Para poder tener mayor referencia en el sitio se pusieron puntos de referencia espacial (arbusto, algún agave, un árbol, etc.). Todo esto se realizó en cada sector encontrado en el sitio. Como siguiente paso, se midieron las dimensiones de las áreas de cada sector, así como los ángulos de inclinación de la superficie, especialmente en los flancos de las unidades, esto con ayuda de la brújula. Debido a su complejidad no se hizo un mapeo detallado de las cuevas, pero su ubicación se marcó en los mapas.

En el mes de diciembre se comenzó a digitalizar la información en el software QGIS, con ayuda de una de las imágenes aéreas georreferenciada en el software, sobre la cual se graficaron todos los elementos mencionados anteriormente (sectores, grietas, puntos de control, inclinaciones, cuevas, estructuras distintivas y direcciones de emplazamiento).

En enero del 2024 se volvió a ir a la zona que, debido al clima seco, presentaba menos cobertura vegetal, lo cual permitió un análisis más detallado de las cuevas pertenecientes a los sectores 2 y 4, así como del sector 4 en su totalidad, ya que éste se encuentra cubierto de una cantidad importante de cascajo (Figura 4)

La última visita para afinar detalles se realizó el 17 de abril de 2024, en la cual se observó una intrusión vertical de lava del núcleo en medio de una grieta somera dentro del sector 4. Durante esta visita se ajustaron las ubicaciones de zonas relativamente planas, estructuras cordadas y se definieron las estructuras del sector 4.

#### **4.2.2 Italia**

La cartografía de Italia comenzó el 17 de enero y se extendió hasta el 29 de agosto de 2024, con visitas cada dos semanas. Este sitio resultó más complejo que el de Japón, por lo que el mapeo se realizó a partir de una fotografía aérea previamente tomada por un dron, sobre la cual se elaboró un boceto a mano para delimitar visualmente las tres unidades de lava presentes.

Con base en la fotografía, se dibujaron y destacaron los aspectos más sobresalientes de las unidades, como grietas prominentes, zonas planas, estructuras cordadas, delimitación del corte artificial, lóbulos y lenguas de lava, así como puntos de referencia (árboles, agaves, palo loco, etc.).

En visitas posteriores, se recorrió la zona y se observó que cada unidad se superponía a la otra, con límites mayormente marcados por desniveles. También se encontraron cuevas en los bordes de la unidad 3. Se ubicaron con mayor precisión las estructuras cordadas y las zonas planas, además de establecer la inclinación y la dirección del flujo de las unidades de lava. Dado que el área es bastante compleja, con numerosas grietas, solo se midieron las más prominentes, ubicadas dentro de la unidad 2 en el sector este del sitio. También se midió la profundidad del corte artificial, el cual expone el emplazamiento de las unidades 1, 2 y 3.

La digitalización del mapa de Italia se inició el 16 de mayo de 2024, utilizando la misma fotografía aérea empleada en el boceto a mano. La imagen fue georreferenciada en el software QGIS y en ella se graficaron todos los elementos mencionados anteriormente (unidades, grietas, puntos de control, cuevas y estructuras distintivas). En agosto, con el apoyo de estudiantes en geomática realizando una estancia de servicio social, se realizó una nueva versión del mapa de Italia, basada en un mosaico de fotos (ortofoto) del sitio que resaltó los aspectos más importantes. Esta ortofoto fue recortada según el área cubierta por el sitio y, de manera digital, se calculó su extensión total. Además, con la ayuda de las curvas de nivel, se delimitaron con mayor precisión los límites entre cada unidad, guiándose por las curvas más altas y bajas.

### **4.3 Muestreo**

El muestreo **en Japón** se llevó a cabo el 11 de enero de 2024, recolectando muestras pertenecientes a los diversos sectores de unidad y a muestras tanto de la corteza superior de la lava, así como de sus partes inferiores de las coladas. Se seleccionaron zonas donde la corteza superior de las rocas se encontraba sin evidencia de alteración, es decir, que estuvieran negras en color. En particular, se buscaron zonas en donde se pudiera tener acceso a muestras tanto de la corteza superior, así como su parte media-alta y la parte baja del mismo sector, por fines de comparación. Se extrajo la muestra, se embolso, se etiquetó y se tomó su ubicación en GPS. Antes de la extracción se tomó una foto de la zona, al igual que después de extraerla, para documentar el sitio de muestreo. Así mismo se hizo una descripción breve en campo sobre las muestras, destacando aspectos importantes y visibles al momento de la recolección.

En el sitio de Japón se identificaron intrusiones de lava densa dentro de la corteza superior, de las cuales también se tomaron muestras, tanto del interior de la intrusión como de la zona de contacto. De igual forma, se muestreo una cueva, extrayendo fragmentos de lajas sobresalientes, y se tomó una muestra de un sector de la lava con un aspecto parecido a lava de tipo “pillow”.

El muestreo **en Italia** se efectuó el 17 de enero del 2024, cuando se recolectaron muestras de las partes más superficiales de la roca (estructuras cordadas) correspondiendo a las diferentes unidades estratigráficas identificadas. Se siguió el mismo método de recolección implementado en Japón, se extrajo la muestra, se embolsó y etiquetó, se tomó su ubicación en GPS y se hizo una breve descripción de la muestra. También se realizó una lista de muestras extraídas.

### **4.4 Petrografía y análisis químico**

Para el análisis petrográfico, las muestras fueron enviadas al laboratorio “BRANDT” para la realización de láminas delgadas pulidas.

En primer lugar, se observaron las láminas en un microscopio petrográfico Olympus para realizar una descripción general y se estimaron porcentajes modales de cada componente con una tabla visual (anexos 1 y 2).

En segundo lugar, se hizo el conteo de puntos con el mismo microscopio con un aumento 4×, adaptando a este el contador de puntos PELCON y recabando la información en el software “Pelcon Point Counter 2.0”.

Como paso principal se establecieron los parámetros a utilizar, siendo el número de puntos a contar (mil puntos para cada lámina), el espaciado entre conteo y líneas, y el listado de los componentes a cuantificar. Se hicieron un total de 10 líneas en cada lámina, espaciadas a 4 mm cada una y con una distancia de 0.5 mm entre cada punto de observación. Se distinguieron entre fenocristales (> 3 mm) y microcristales (<3 mm).

El mecanismo del aparato utilizado funciona de manera automatizada. Los datos recabados fueron organizados, normalizados y ordenados en la Tabla 1, para el sitio de Japón y la Tabla 2 para el sitio de Italia.

También se hizo el análisis de roca total de una muestra de cada sitio usando un ICP OES, Agilent 5800, en el Laboratorio Magmas y Volcanes (LMV) de la Universidad Clermont-Auvergne (UCA) en Francia (resultados en tabla en el texto).

Para el sitio de Japón se analizaron tres muestras usando la microsonda electrónica del Laboratorio Universitario de Petrología (LUP) en el Instituto de Geofísica (UNAM) del Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía (LANGEM) para comprobar la identificación de minerales por medio óptico y realizar el análisis químico de vidrio (resultados en anexo 3). El vidrio de la matriz se analizó usando condiciones de 20 kV y 20 nA y se calibró usando un estándar de vidrio basáltico VG2 de la Smithsonian (NMNH111240-52). Se usó un tamaño de haz de 5 micras y tiempos de conteo de 10s para Na y K, y de 20s para los otros elementos.

## Capítulo 5.- Resultados.

### 5.1 Glosario de términos.

En el anexo 4 se presenta un glosario bilingüe con los términos más relevantes utilizados en la interpretación de procesos vulcanológicos. El glosario incluye 89 términos con su definición en inglés y en español, ordenados alfabéticamente. Este glosario es especialmente útil para garantizar la coherencia terminológica en la redacción de la presente tesis, así como para tener una idea más completa de los procesos vulcanológicos. Al final de cada definición se encuentra la referencia de donde fue obtenido. En el caso de los términos para los cuales no se encontró una definición en español, se optó por hacer una traducción a su definición en inglés.

### 5.2 Cartografía y muestreo

Los mapas de los sitios Japón e Italia, presentados en las figuras 4 y 7 y anexos 5 y 6, cubren áreas de 2758 m<sup>2</sup> y 2495 m<sup>2</sup>, respectivamente. En ambos casos, la morfología de la lava corresponde al tipo pāhoehoe, con superficies generalmente lisas, aunque localmente fracturadas.

El **Mapa Japón** (Figura 4, anexo 5) incluye una vista satelital de localización (cuadro A), donde se indica el área de estudio mediante un punto amarillo dentro del campo de lava del Xitle (resaltado en rojo), y un mapa geológico detallado (cuadro B). El afloramiento está dividido en cuatro sectores, delimitados según diferencias morfológicas y estructurales. Se representan direcciones y ángulos de inclinación de la colada con flechas rojas, además de la dirección de emplazamiento de los flujos. Se identifican grietas someras (<100 cm, triángulos azules) y profundas (>100 cm, triángulos rojos), así como otras estructuras tales como cordadas, cuevas y cascajo. También se marcan los puntos de muestreo, perfiles, vegetación típica (pirul, agave, Muhlenbergia robusta, palo loco), zonas de relleno antropogénico y el muro que rodea al pedregal. La escala del mapa es 1:250. Debido a lo pequeño que es el área del lugar, se utilizaron coordenadas UTM para representar su ubicación.

El **Mapa Italia** (Figura 7, anexo 6) incluye una imagen satelital (cuadro A) que localiza el sitio con un punto azul dentro del derrame lávico del Xitle, mientras que el mapa geológico (cuadro B) distingue tres unidades de lava: la Unidad 1 (rojo) al oeste, la Unidad 2 (amarillo) de forma discontinua al centro y este, y la Unidad 3 (azul) que domina la zona. Se incluyen direcciones de inclinación y emplazamiento de los flujos, estructuras como grietas, cordadas, cuevas, y los puntos de muestreo. También se representan elementos vegetales (pirul, palo loco, oreja de burro, agave), una pasarela, la escultura del sitio, un tubo de desagüe y un corte artificial en forma redonda. La escala del mapa es 1:500. Las coordenadas utilizadas aquí también son en UTM.

### 5.2.1 Sitio Japón

En este sitio, se identificaron cuatro sectores de lava que corresponden a partes de una misma colada que se emplazaron en diferentes momentos y presentan características morfológicas diferentes (Figura 4).

Se puede observar que el sitio de Japón se trata de un lóbulo de lava con morfologías características de “lava rise” (ver definición en anexo 3), en donde encontramos superficies de lava con una meseta relativamente plana, bandeada y con estrías, estructuras de lavas cordadas bien definidas (Figura 5A) y grietas tanto profundas (>100 cm de profundidad) como someras (<100 cm de profundidad) (Figura 5B). En los bordes de cada flanco se observan cuevas que contienen conjuntos de cuñas apiladas (Figura 5C).

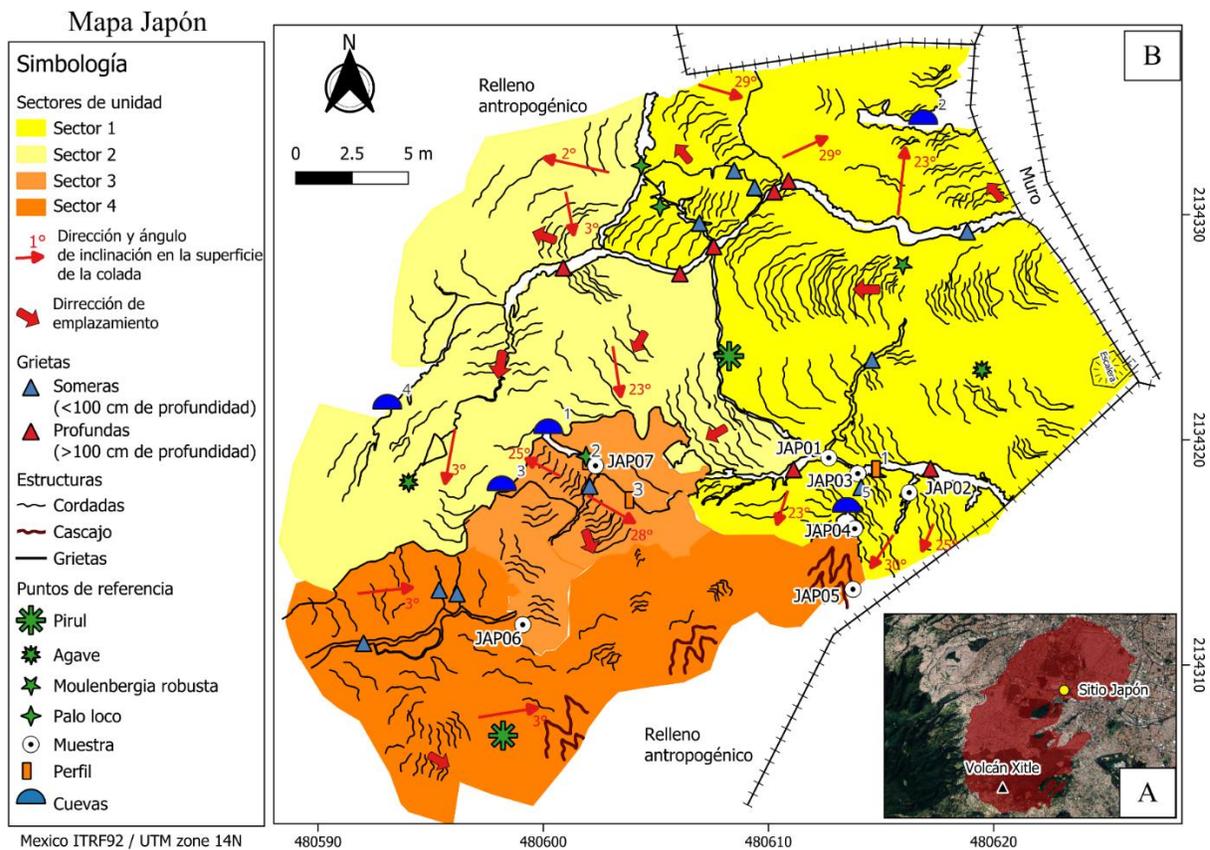


Figura 4: Mapa del sitio de Japón. A. Mapa de localización del sitio, dentro del flujo del Volcán Xitle, el sitio de Japón está representado por el punto amarillo. B. Cartografía estructural de la colada de Japón realizada con base a la ortofoto y observaciones de campo.

A continuación, se da una descripción detallada de cada sector de unidad encontrado en Japón.

**Sector 1:** Conformado por un área cubierta de roca de color negro, con una extensión de aproximadamente 363 m<sup>2</sup> que tiene forma característica de un lóbulo laminar o plano (“sheet lobe”) con una dirección principal de emplazamiento hacia el oeste. Consta de una parte axial con una superficie plana y estructuras cordadas bien definidas. En los flancos norte y sur del sector se observaron cuevas. Estas cuevas, situadas en los flancos inclinados, se caracterizan por la inclinación de las losas de corteza que se generan alrededor, formando voladizos que les otorgan su forma distintiva. Además, en su interior, se pueden observar cuñas apiladas (o lajas) con una costra superficial rugosa. Las losas en conjunto que rodean la entrada de la cueva tienen un espesor de 60 cm.

En este sector también se encontraron dos intrusiones de lava densa dentro de la corteza (Figura 5E), ubicados en los flancos del sector.

Este sector se caracteriza por contener una serie de grietas tanto someras como profundas que exponen la corteza superior del flujo. Las grietas profundas se separan entre la parte axial y los dos flancos inclinados mientras que las grietas someras tienen una distribución más aleatoria (Figura 4).

La corteza superior expuesta por las grietas presenta una variación en la vesicularidad con la profundidad que se caracteriza por un aumento del tamaño de vesículas y una disminución de su número por área (Figura 6A);

- En la parte alta de la corteza superior predominan abundantes microvesículas (<1 mm de diámetro).
- En la parte media-alta de la corteza superior (aproximadamente 15 cm de profundidad), las vesículas alcanzaron un tamaño promedio de 3 mm de diámetro. Estas vesículas son más espaciadas y suelen ser irregulares en forma, pero con tendencia a ser alargadas.
- En la parte baja de la corteza superior (35 cm de profundidad), las vesículas son mucho más espaciadas, revelando una roca más densa. Aunque las vesículas presentes fueron menos abundantes, su tamaño varió entre 1 y 5 cm de diámetro. En esta sección, es común encontrar vesículas más redondeadas, aunque predominan las de forma irregular y alargada.

En cuanto al color de la roca, se observa una graduación a lo alto del perfil, en donde la parte alta de la corteza superior (superficie de la lava) presenta un color negro, la parte media-alta de la corteza superior muestra un tono gris oscuro y la parte baja de la corteza superior tiene un color gris claro.

En la parte media-alta y en la baja también se aprecia el bandeamiento de la roca expuesta en la pared con tonos rojizos a marrones, probablemente causados por la oxidación de la roca al entrar en contacto con el aire cuando aún estaba caliente.

Por último, cabe destacar la presencia de una costra rugosa en la parte expuesta de la grieta, que se encuentra mayormente en la parte inferior.

Algo importante de mencionar es que una de las muestras correspondientes a la intrusión de lava densa “JAP03B” (parte interior de la intrusión), presenta pequeñas venas vesiculares, que son zonas de segregación vesicular, con pequeñas vesículas de 3 mm a 2 cm de diámetro (Figura 5D).

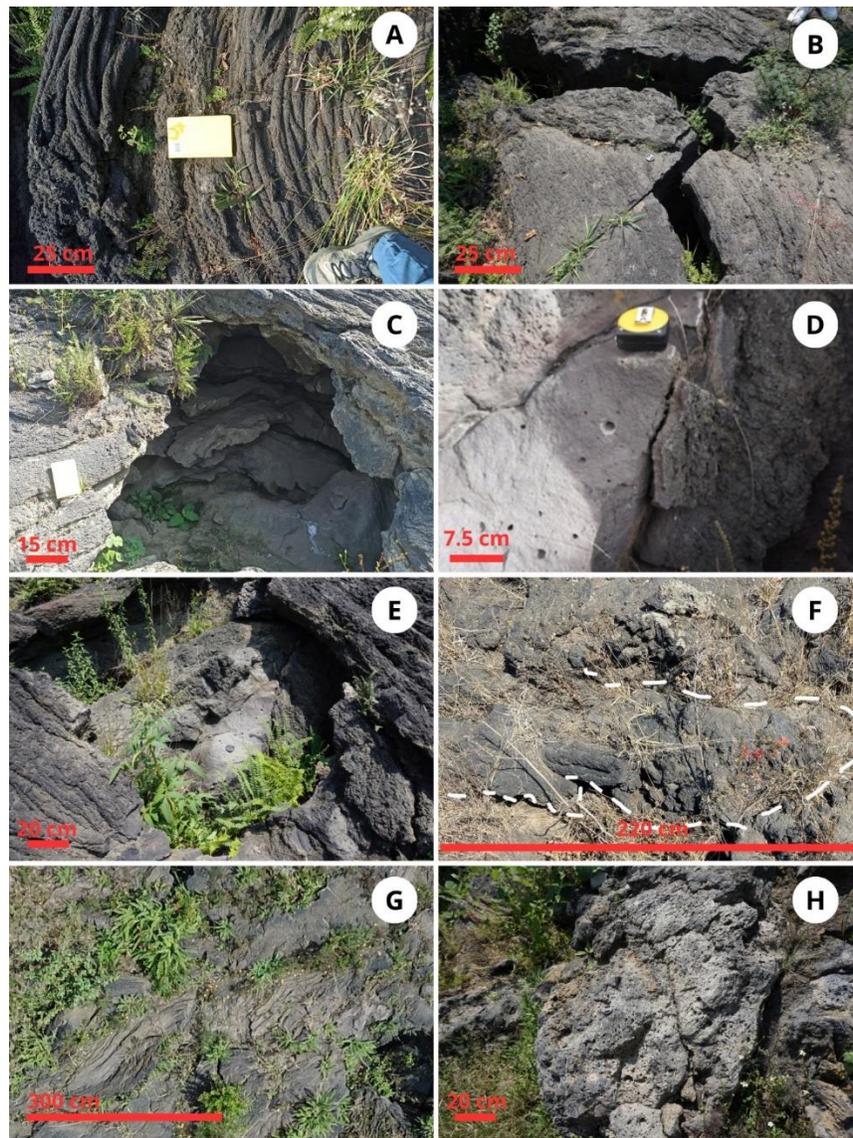


Figura 5: Estructuras de Japón. A. Superficie de lava cordada. B. Grieta de la unidad 1. C. Cueva con estructuras lajadas. D. Interior de lava densa, a un lado se observa una laja con la superficie rugosa. E. Intrusión lenticular de lava densa dentro de la corteza superior de la unidad 1. F. Intrusión de lava del sector 4. G. Lavas pāhoehoe con estructura irregular. H. Lava tipo “pillow”.

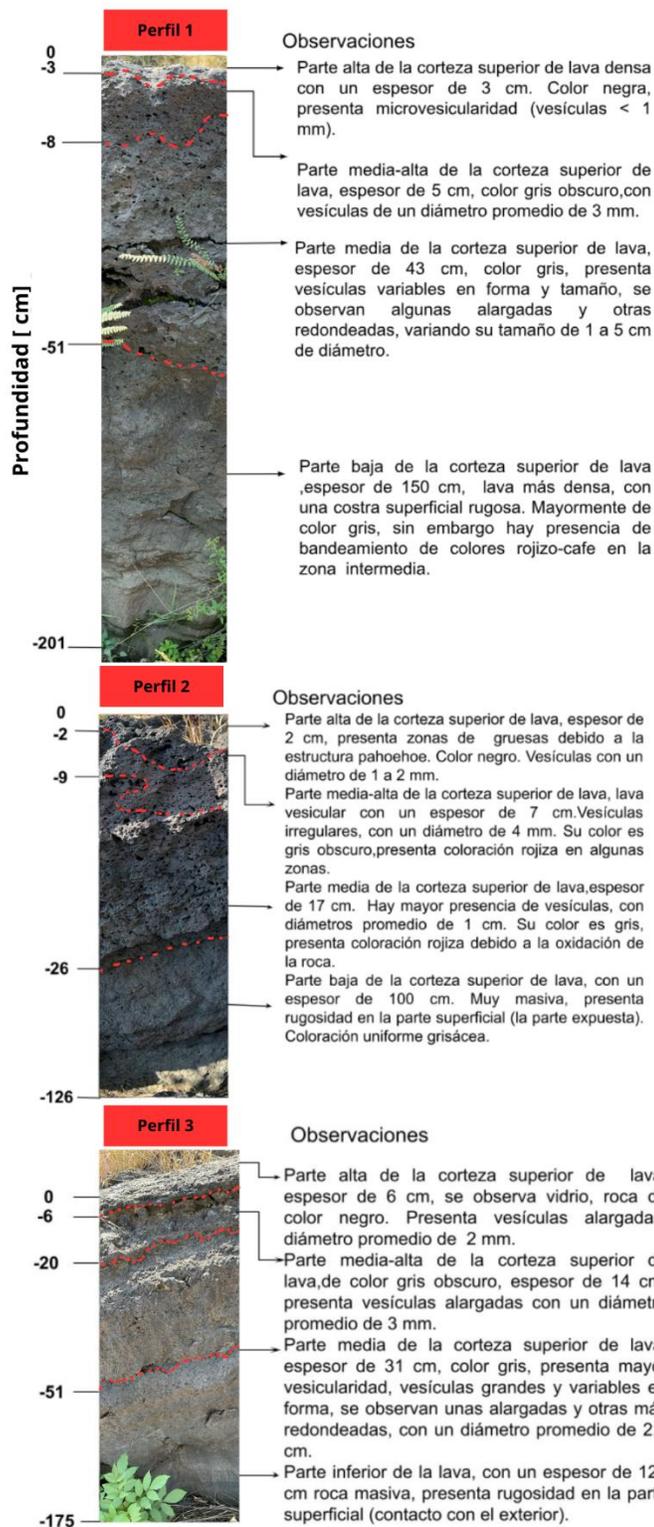


Figura 6: Perfiles de Japón. Perfil 1, correspondiente a la unidad 1. Perfil 2, correspondiente a la unidad 3. Perfil 3 correspondiente a la unidad 3.

**Sector 2:** Extensión del lóbulo plano del sector 1 con una dirección de emplazamiento hacia el SO que abarca un área de aproximadamente 118 m<sup>2</sup>. Presenta texturas cordadas bien definidas. En el flanco izquierdo, se observan lavas que tienen una superficie irregular (Figura 5G) que sin embargo no llega a presentar bloques sueltos de lava, por lo que sigue siendo lava pāhoehoe. La distinción se basa en la morfología: mientras que las lavas aa se caracterizan por bloques fragmentados y sueltos, las lavas pāhoehoe mantienen una superficie más continua y fluida.

En los bordes del lóbulo, aparecen cuevas que contienen cuñas deformadas por la plasticidad de la lava durante su proceso de enfriamiento.

**Sector 3:** Unidad con un área aproximada de 52 m<sup>2</sup> que se conforma de pequeños lóbulos de lava y textura cordada bien definida que provienen del interior de los sectores 2 y 4. Esta estructura también puede ser conocida como “breakout”.

En este sector se tomaron dos muestras pertenecientes a la parte alta y parte media-alta (de 11 a 22 cm de profundidad) de la corteza superior de las lavas, respectivamente. Se observó que, en la parte alta, el color de la roca es negro, mientras que, en la parte intermedia, el color cambia a un tono gris oscuro, como se observa en los perfiles 2 y 3.

La vesicularidad también presenta variaciones conforme se desciende en la colada, en la parte alta de la corteza superior, las vesículas tienen un diámetro que no supera los 2 mm, por otro lado, en la parte intermedia, el tamaño de las vesículas es más variable:

1. En la muestra JAP06B (75 cm de profundidad), las vesículas tienen diámetros entre 13 mm y 1 cm.
2. En la muestra JAP07B (56 cm de profundidad), los diámetros de las vesículas varían entre 1 mm y 3 mm.

**Sector 4:** Es el más alterado por material antropogénico (cascajo, cemento, tierra) debido a su cercanía al sector no restaurado del sitio. Abarca un área de aproximadamente 223 m<sup>2</sup>. Podemos identificar varias zonas con lavas cordadas, grietas someras y una estructura de intrusión densa, con una longitud de 220 cm (Figura 5F).

Algunos lóbulos emplazados en la pendiente directamente hacia el sur del sector 1 presentan una forma muy redonda parecida a “pillow lavas” (Figura 5H), que son características de ambientes acuáticos someros (lagos, costa marina) (Moore,1975), y podrían relacionarse con estructuras similares que se han observaron en el parque Peña Pobre, al sur de la zona de Cuicuilco (Palacio y Guilbaud 2015). Estos lóbulos contienen una alta proporción de vesículas grandes.

En este sector se tomaron 2 muestras, ambas pertenecientes a un lóbulo tipo "pillow lavas", correspondientes a las muestras JAP05A (interior del lóbulo) y JAP05B (superficie del lóbulo). La muestra presenta una coloración uniforme color gris claro, bastantes vesiculadas con vesículas variables en tamaño de 2 mm a 1 cm, en general.

### 5.2.2 Sitio Italia

En este sitio, se identificaron tres unidades de lava superpuestas, a diferencia del sitio en Japón donde se observó una única colada. La distinción de estas unidades se basó en criterios estratigráficos y morfológicos. Estratigráficamente, se observaron relaciones de superposición entre las unidades, evidenciando eventos eruptivos sucesivos. Morfológicamente, cada unidad presentaba estructuras con características distintas. Un corte artificial de forma redonda en el sector noroeste del sitio expone claramente las tres unidades, permitiendo observar la unidad más antigua en la base y facilitando el análisis de su estructura interna (Figura 7).

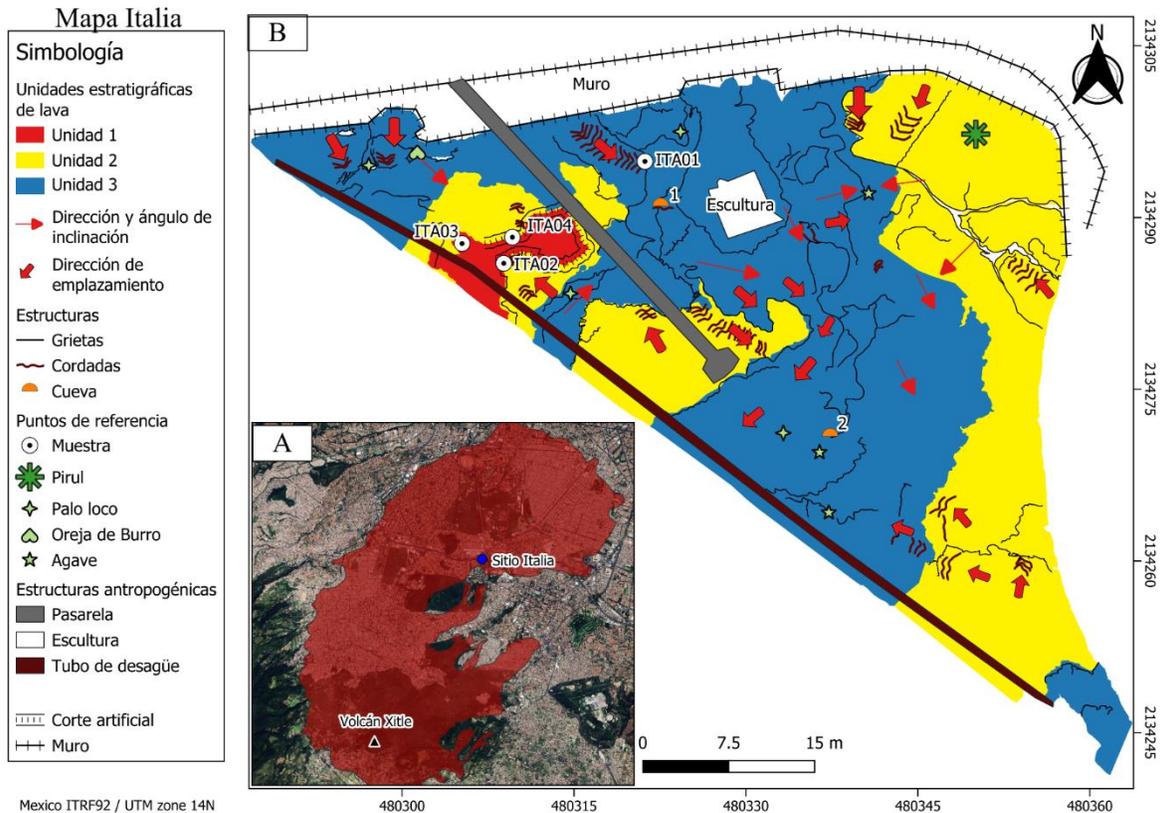


Figura 7: Mapa del sitio de Italia A. Mapa de localización del sitio, dentro del flujo del Volcán Xitle, el sitio de Italia está representado por el punto azul. B. Cartografía estructural de las coladas de lava de Italia realizada con base a la ortofoto y observaciones de campo.

**Unidad 1:** Primer flujo de lava que se encuentra por debajo de las unidades 2 y 3 (Figuras 8 y 9E). Esta unidad está expuesta en la base del corte artificial (Figura

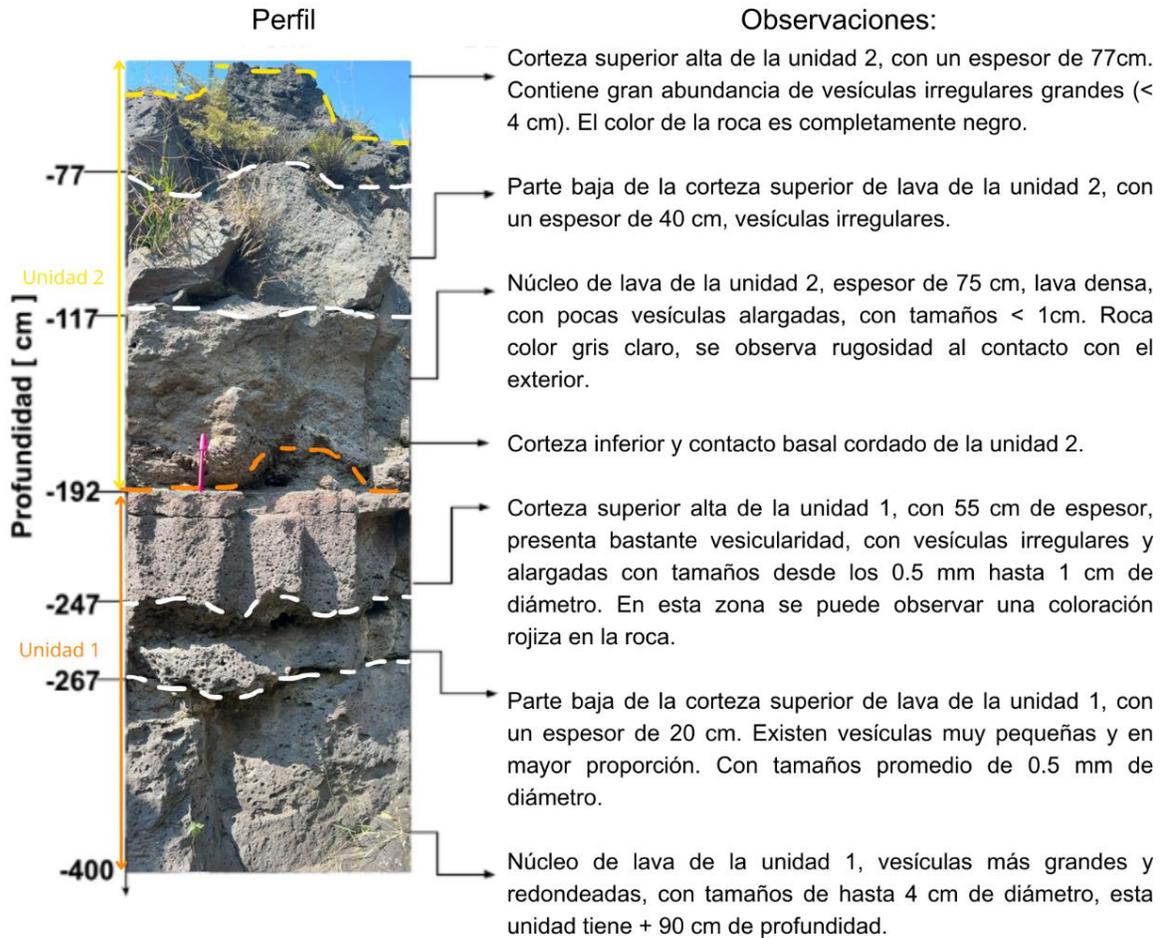
9A). Se realizó una columna en la cual se pudo observar el contacto entre unidades y su patrón de vesicularidad (Figura 8). Así mismo, se observa la variación de la vesicularidad dentro de las unidades, que viene caracterizada por un aumento del tamaño de vesículas y una disminución de su número por área, desde la superficie hacia el núcleo.

De esta unidad se recolectó 1 muestra (ITA04) de la corteza superior que presenta un color gris claro y donde los olivinos se observan oxidados.

**Unidad 2:** Estrato de lava que se encuentra arriba de la unidad 1 y por debajo de la unidad 3. Se caracteriza por ser dominado por superficies planas, con bandas y estrías, que presentan algunas estructuras de lavas cordadas bien definidas que marcan la dirección del flujo. En esta unidad podemos encontrar con orientación al NE un “sheet lobe”, con grietas de más de 3 m de profundidad (Figura 9F).

En esta unidad se tomaron dos muestras obtenidas de la superficie de una estructura cordada. Ambas (ITA02, ITA03) tienen un color gris claro, en la que los minerales predominantes son las plagioclasas y los olivinos. En ITA03, existen abundantes vesículas irregulares, con tamaño promedio de 5 mm.

**Unidad 3:** Es la unidad más expuesta, tratándose de varios lóbulos inflados, formando “tumuli” o “lava rises” alargados (Figura 9C y 9D), en los que predominan superficies irregulares (Figura 9B) y que presentan diversas direcciones de flujo. En esta unidad hay abundantes grietas de tamaños variables, no excedentes a los 50 cm de profundidad. En esta unidad se tomó una muestra (ITA01) desde una superficie cordada, la cual presentó un color gris oscuro con cristales de plagioclasa y olivinos grandes (diámetro aprox. de 3 mm).



*Figura 8. Perfil en el corte artificial, en donde se puede observar la estructura interna de las unidades 1 y 2 de lava en Italia. Las líneas blancas punteadas marcan las diferentes partes en cada unidad, mientras que la línea naranja muestra el contacto entre las dos unidades y la línea amarilla muestra la superficie de la unidad 2.*

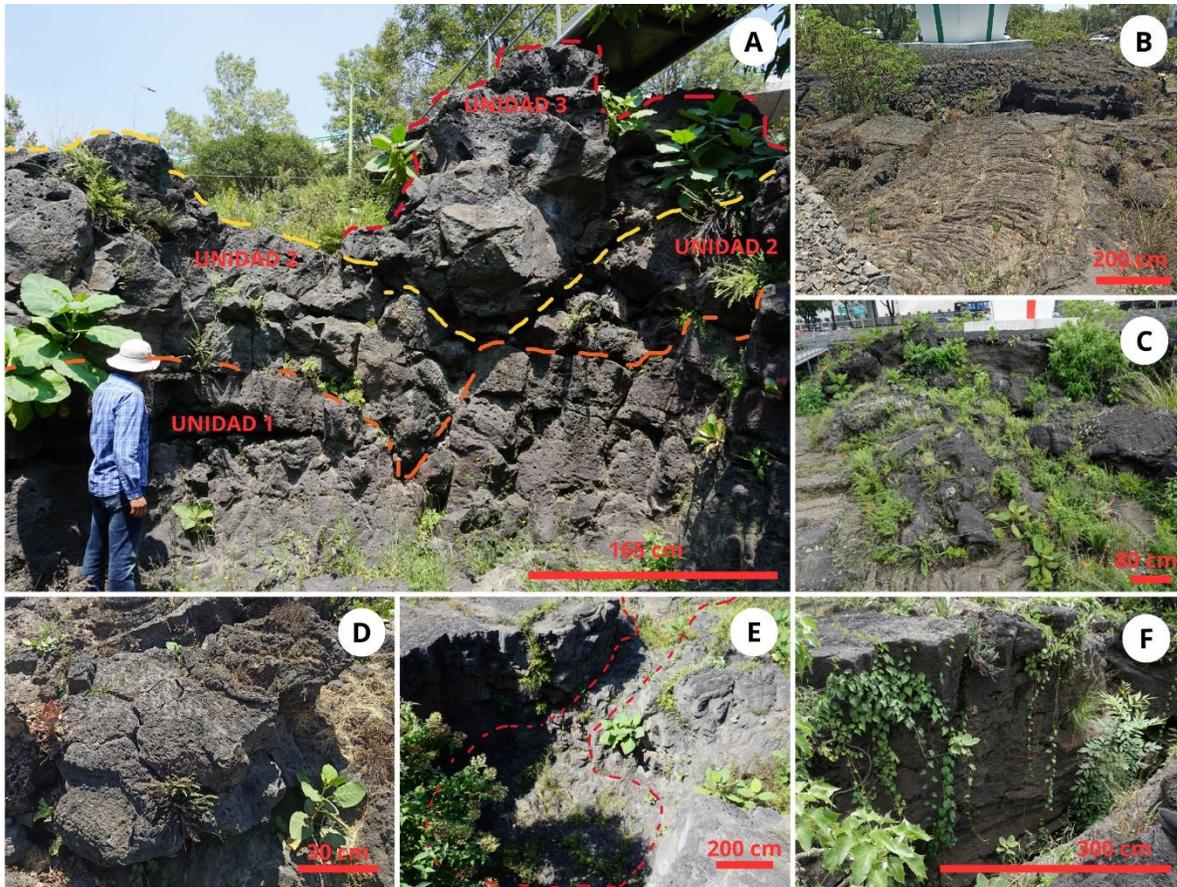


Figura. 9: Estructuras Italia. A. Corte superficial en el que se exponen las tres unidades de flujo, la línea naranja punteada marca el límite entre la unidad 1 y 2, la línea punteada amarilla marca el límite entre la unidad 2 y 3, la línea roja marca el borde de la unidad 3. B. Superficie plana con estructuras cordadas bien definidas (lóbulo en unidad 3). C. Estructuras de borde de inflación al pie de la escultura, se pueden observar también lóbulos delgados de lava, pertenecientes a la unidad 3. D. Lengua de lava, perteneciente a la unidad 3. E. Corte superficial visto desde arriba, dentro de la línea punteada roja se expone la unidad 1. F. Grieta de más de 3.35 m de profundidad, expuesta en un gran túmulo en la unidad 2.

### 5.3 Descripción de petrografía: Síntesis de descripciones de láminas

Cabe notar que para esta sección (5.3) los porcentajes de abundancia de minerales y vesículas reportados corresponden a estimaciones visuales. Los resultados del análisis cuantitativo se presentarán en la sección posterior (5.4).

**Para el sitio de Japón**, se estudiaron en el laboratorio un total de 14 láminas de muestras de roca colectadas en el sitio, pertenecientes a la corteza superior de las lavas y de las diferentes estructuras ya mencionadas (ubicación en Figura 4).

Las láminas de muestras pertenecientes a la superficie de la lava, la cual corresponde a la parte más alta de la corteza superior (JAP01A, JAP06A, JAP07A) presentan características petrográficas comunes en cuanto a su composición que consta de microcristales de olivino y plagioclasa, con texturas microlíticas y matrices

vítreas a microcristalinas. Las plagioclasas presentan estructuras tipo cola de golondrina (“swallow tail”) y los olivinos bordes dentrificados con estructuras esqueléticas.

Se observan diferencias notables:

- JAP01A destaca por contener fenocristales de olivino (3-4 mm) e inclusiones de vidrio y óxidos, así como una mayor proporción de vesículas (20%).
- JAP06A y JAP07A presentan zonas de matriz vítrea y microcristalina, pero JAP06A muestra una distribución mineral más dispersa (Figura 10A y 10B), mientras que JAP07A tiene una textura más homogénea con cristales de plagioclasa más aglomerados en la matriz vítrea.
- JAP01A tiene vesículas más grandes y variadas, mientras que en JAP06A y JAP07A son más pequeñas e irregulares, ocupando el 15% de la muestra.

Las muestras de una parte más interna, intermedia, de la corteza superior (JAP01B, JAP06B, JAP07B) comparten una composición similar a las de la superficie, sin embargo, no presentan matrices vítreas. Además, todas estas muestras incluyen vesículas irregulares, aunque estas varían en tamaño y proporción.

Las diferencias principales son:

- JAP01B contiene fenocristales de olivino (3-5 mm), ausentes en las otras muestras, y sus vesículas son más grandes (hasta 1.2 cm), con geometrías influenciadas por los cristales (Figura 10C).
- JAP06B tiene posible presencia de piroxeno, además de vesículas grandes de hasta 9 mm.
- JAP07B tiene menor proporción mineral (40%) y las vesículas, aunque similares en tamaño a las de JAP06B, son menos abundantes.

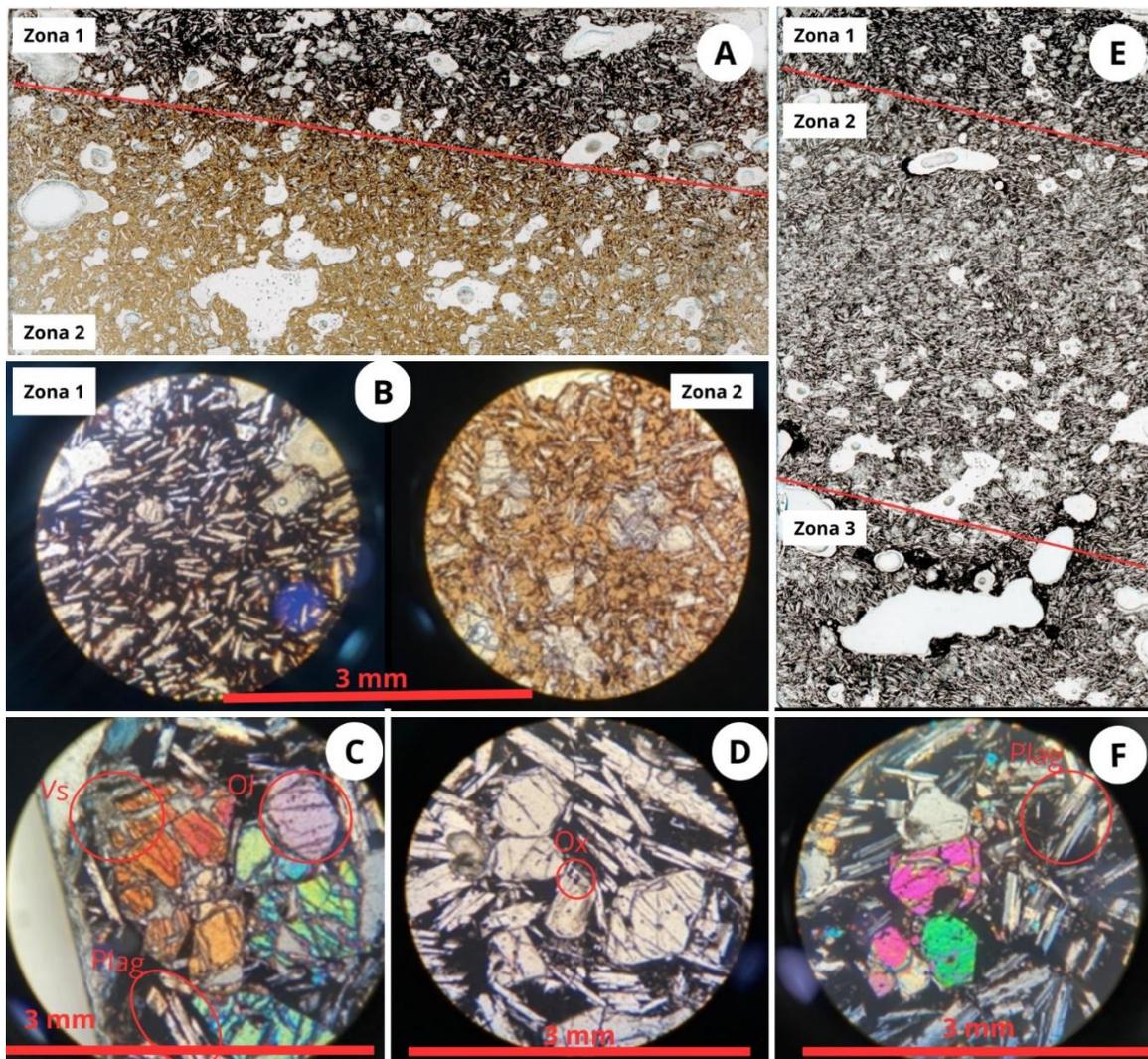
La muestra de la parte inferior de la corteza superior (JAP02A) de igual forma tiene una textura microlítica embebida en una matriz negra microcristalina, conformada por olivino y plagioclasa y presencia de óxidos dentro de los olivinos (Figura 10D), así como vesículas irregulares. Sin embargo, presenta diferencias particulares:

- Tiene un 40% de minerales, similar a las muestras superficiales y JAP07B (intermedia), pero menor que en JAP06B.
- Contiene fenocristales de olivino (3.5 mm), como en JAP01B (intermedia), pero ausentes en las muestras superficiales.
- Posee vesículas más pequeñas (1.2 mm promedio) comparadas con las de las zonas intermedia y superficial, donde pueden alcanzar tamaños mayores.

Por último, las láminas de estructuras especiales muestran la misma composición mineral, todas contienen olivino y plagioclasa, con bordes dentrificados y estructuras esqueléticas de swallow tail presentes en las plagioclasas (Figura 10F). JAP03B (interior de la intrusión de lava densa) tiene el mayor contenido mineral (60%), mientras que JAP03A (exterior de la intrusión de lava densa) tiene

el menor (25%). Los cristales están inmersos en una matriz predominantemente negra y microcristalina, a excepción de la muestra JAP03B, que presenta matriz vítrea a microcristalina. Se observaron pequeños óxidos en los olivinos en todas las muestras. Todas las muestras presentan vesículas, aunque varían en tamaño, cantidad y forma. Las diferencias más particulares son:

- JAP04A (Laja en una cueva) destaca por sus grandes vesículas (1.5-3 mm) y una proporción mineral intermedia (40%).
- JAP03B tiene una franja oscura distintiva con aglomerados de microcristales y óxidos, posiblemente indicando una intrusión.
- JAP05A (interior de un lóbulo tipo “pillow lava”) contiene los cristales de olivino y plagioclasa más grandes (hasta 4 mm en olivino y 3.6 mm en plagioclasa). Además, es única por sus tres zonas con variaciones en color (Figura 10E), proporción de minerales y tamaño de vesículas.
- JAP05B (exterior de un lóbulo tipo “pillow lava”) tiene los cristales más pequeños (olivino hasta 1.5 mm y plagioclasa hasta 1.2 mm).



*Figura 10: Petrografía de láminas Japón. A, escáner de la lámina JAP06A, en donde se identifican las dos zonas con diferente coloración de la matriz, la zona 1 con la matriz microcristalina negra es la de arriba en la imagen y la zona 2 con la matriz vítrea clara es la de abajo. B, fotografía de las dos zonas de la lámina JAP06A, realizada en el microscopio, la fotografía es con un polarizador normal. La fotografía de la izquierda pertenece a la matriz microcristalina, mientras que la de la derecha pertenece a una matriz vítrea. C, fotografía representativa de la textura de la lámina JAP01B, tomada con polarización cruzada que resalta a los olivinos (colores vivos). D, fotografía de la lámina JAP02A, con polarizador normal, en donde se observa la presencia de óxidos (cuadrados en los olivinos). E, escáner de la lámina JAP05A, en donde se identifican las tres zonas descritas, de abajo hacia arriba está la zona 1, zona 2 y zona 3. F, fotografía de la lámina JAP04A, con un polarizador normal. El círculo enmarca a las plagioclasas con las estructuras de "swallow tail", que son los picos a los extremos de las plagioclasas.*

**Para el sitio de Italia,** se estudiaron en el laboratorio tres láminas de cuatro muestras de roca colectadas en el sitio (ubicación en Figura 7), ya que la cuarta muestra (ITA04), presentó bastantes signos de alteración. Las cuatro muestras colectadas fueron tomadas de la superficie de la lava.

Las muestras ITA01A, ITA02A e ITA03A comparten una composición mineralógica basada en microcristales de olivino y plagioclasa, inmersos principalmente en una matriz negra microcristalina, con zonas de matriz vítrea en ITA02A (Figura 11B) e ITA03A. Todas tienen textura microlítica, con olivinos más grandes que las plagioclasas y sin presencia de fenocristales. Las vesículas son irregulares, aunque varían en proporción y tamaño entre muestras. Los olivinos presentan dentrificación con estructuras esqueléticas, mientras que las plagioclasas exhiben formas de "swallow tail" a los extremos de estas.

Las diferencias más notables son que, ITA01A tiene la menor vesicularidad (10%) y tamaños de vesículas más pequeños (0.15 - 6 mm), mientras que ITA02A e ITA03 tienen mayor vesicularidad (20%) y vesículas más grandes (1 - 8 mm). Por otro lado, ITA01A muestra cristales de plagioclasa con sobrecrecimientos de olivino, así como olivinos con de vidrio (Figura 11A). ITA03A destaca por tener una alineación preferencial de olivinos en una zona específica (Figura 11C).

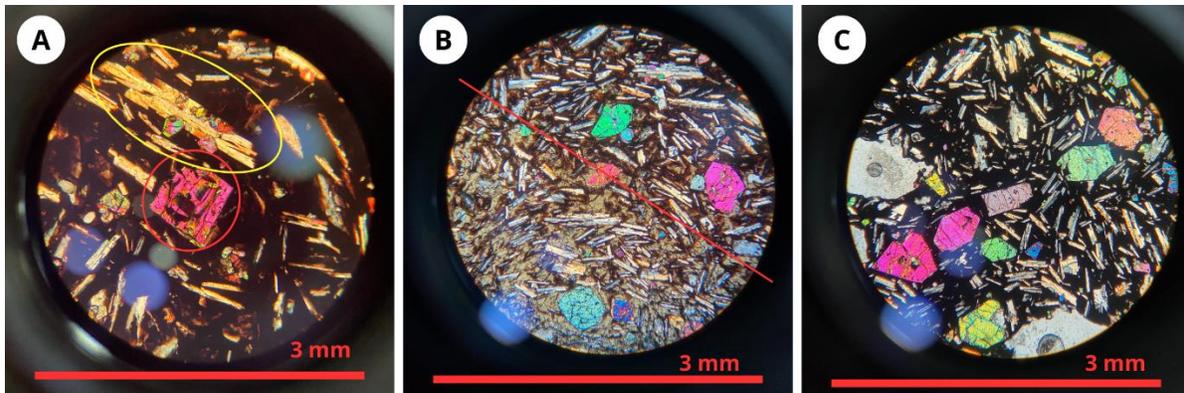


Figura 11: Láminas Italia. A, Fotografía de la lámina ITA01A, con polarización cruzada. Se marcan las zonas en donde se ve una plagioclasa con sobrecrecimiento de olivino (círculo amarillo) y los olivinos con inclusiones de vidrio (círculo rojo). B, Fotografía de la lámina ITA02A, con polarización cruzada. Se pueden observar las 2 zonas, matriz vítrea en el costado inferior izquierdo, matriz microcristalina costado superior derecho. C, Fotografía de la lámina ITA03A, con polarización cruzada. Se observan los olivinos alineados.

#### 5.4 Porcentajes modales

En la Tabla 1 se presentan los resultados del análisis modal para el **sitio de Japón**, realizado por medio de conteo de puntos. Se establece que la roca en general está compuesta por 40-60% de cristales, los cuales están embebidos en una matriz de color negro a gris (20-40% de la roca total) y contienen vesículas (10-20% de la roca total).

Las vesículas varían en abundancia y tamaño, siendo más abundantes en la parte superior de la corteza de lava (20% de la roca total) y con tamaños promedio de 2 mm, pasando a la parte media (15 cm de profundidad) con moderada vesicularidad (15 % de la roca total) y tamaños de entre 1 a 2 cm, finalmente para la parte baja se tienen muy pocas vesículas (10 % de la roca total) que van desde 2 mm a 1 cm en tamaño.

Los cristales están dominados por microcristales de plagioclasa (70% del total de cristales) seguidos por microcristales de olivino (25% del total de cristales), con una proporción menor de fenocristales de olivino (< 3% de la muestra total) y plagioclasa, así como óxidos (1% de la muestra total). Por último, se evidencia un mayor grado de oxidación de la lava en la superficie y menos alteración en las partes intermedias y bajas de la unidad de lava.

Guiándonos del análisis modal y en base a la gráfica de la Figura 12, podemos decir que las muestras recolectadas en la parte superior de la unidad de lava tienen una

composición similar en tanto a su contenido de minerales, en donde la matriz representa el 50-58%, la plagioclasa 32-37% y el olivino 10-13%.

Para la parte intermedia de la lava, las tres muestras tienen una composición mineralógica similar, con una matriz que va desde el 33 al 47%, plagioclasa 36 al 49% y olivino 14 al 20%.

En la parte inferior solo se analizó una muestra, la cual tiene una composición de 34% de matriz, 41% de plagioclasa y 20% de olivino.

Existe una variación en la proporción de la matriz, plagioclasa y olivino con la profundidad. En la superficie, la matriz es dominante (50-58%), mientras que en la parte intermedia disminuye (33-47%), con un incremento en las proporciones de plagioclasa y olivino. En la parte inferior, aunque solo hay una muestra analizada, la plagioclasa y olivino mantienen proporciones dentro del rango de la parte intermedia.

Para la muestra en la cueva, la proporción de matriz es del 38%, plagioclasa 42% y olivino 19%, lo cual es similar como en la parte intermedia y baja de la lava expuesta en grietas.

En las muestras de la intrusión de lava densa (JAP03A y JAP03B), sí se observó una notable diferencia entre las composiciones de las muestras, específicamente en el contenido de matriz y olivino. En la que su composición varía de un porcentaje de matriz del 53 al 25% respectivamente, plagioclasa 34 y 39% y olivino de 12 a 34%.

En el lóbulo de pillow lava (JAP05A y JAP05B), también hay una notable diferencia entre la matriz con un porcentaje del 36 al 50% respectivamente, al igual que la plagioclasa de 34 al 46% respectivamente, y el olivino se mantiene casi igual, no variando mucho de 16 a 18%. No se observó presencia de fenocristales.

**Tabla 1.** *Conteo de puntos para el análisis modal, correspondiente al sitio de Japón.*

Muestra	FCX plg	MCX plg	Matriz	FCX ol	MCX ol	Ox. ol	Ox. matriz
JAP01A- parte marron	0%	32%	54%	1%	13%	0%	1%
JAP01A- parte negra	0%	29%	61%	0%	9%	0%	0%
JAP01B	1%	49%	33%	2%	14%	1%	0%
JAP02A	0%	41%	34%	3%	20%	1%	0%
JAP03A	0%	34%	53%	0%	12%	0%	0%
JAP03B	0%	39%	25%	3%	32%	1%	0%
JAP04A	0%	42%	38%	0%	19%	1%	0%
JAP05A	0%	46%	36%	0%	18%	0%	0%
JAP05B	0%	34%	50%	0%	16%	0%	0%
JAP06A- parte negra	1%	31%	58%	1%	10%	0%	0%
JAP06A- parte marrón	0%	30%	57%	0%	11%	0%	1%
JAP06B	0%	43%	36%	0%	20%	1%	0%
JAP07A- parte marrón	0%	37%	51%	0%	11%	1%	0%
JAP07A- parte negra	0%	31%	57%	0%	10%	0%	0%
JAP07B	0%	36%	47%	0%	16%	0%	0%

*FCX: fenocristales, MCX: microcristales, plg: plagioclasa, ol: olivino, Ox ol: inclusión de óxido en olivino, Ox. matriz: óxido en matriz.*

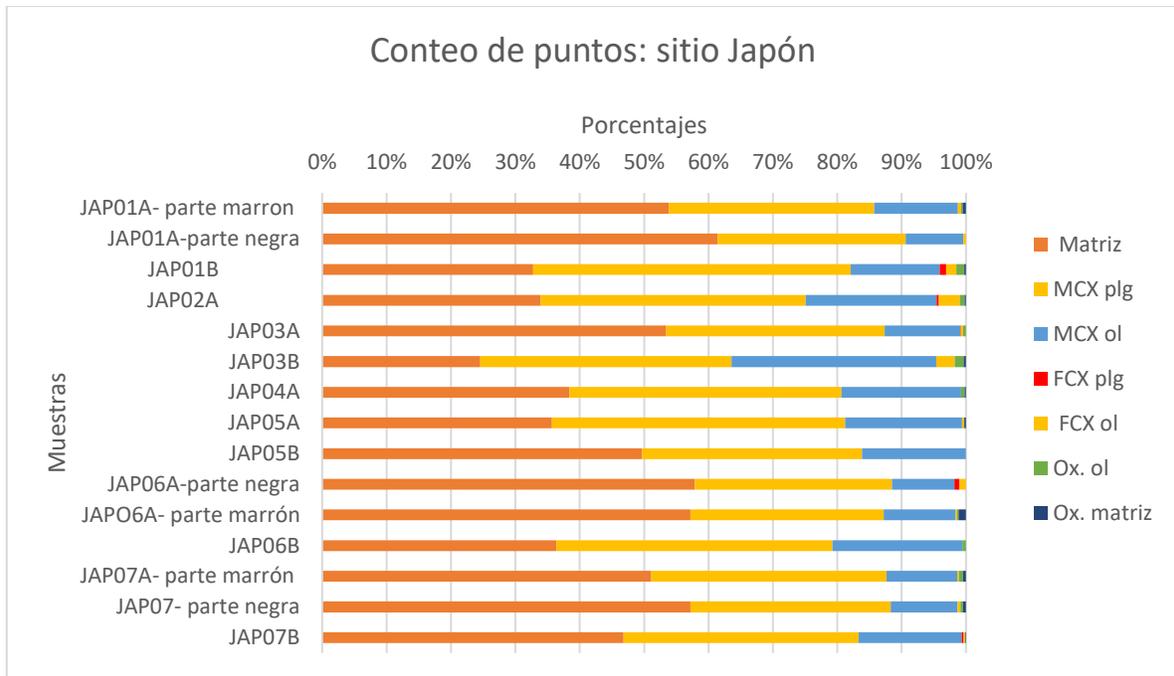


Figura 12: Análisis modal de las muestras de Japón. Se muestra la representación gráfica del conteo de puntos para el análisis modal de las muestras de Japón. FCX: fenocristales, MCX: microcristales, plg: plagioclasa, ol: olivino, Ox. ol: inclusión de óxido en olivino, Ox. matriz: óxido en matriz.

Las rocas presentes en el **sitio de Italia** son muy similares a las de Japón. De acuerdo con la Tabla 3, que representa el análisis modal por medio de conteo de puntos, se establece que los cristales representan 35-45% de la roca total en área, están embebidos en una matriz de color negro (45-65 % de la roca total) y contienen vesículas (10-20% de la roca total).

Las vesículas varían en abundancia y tamaño, siendo más abundantes en la superficie (20% de la roca total) y con tamaños promedio de 2 mm a 1 cm, mientras que las muestras de la parte media presentan microvesicularidad (10 % de la roca total).

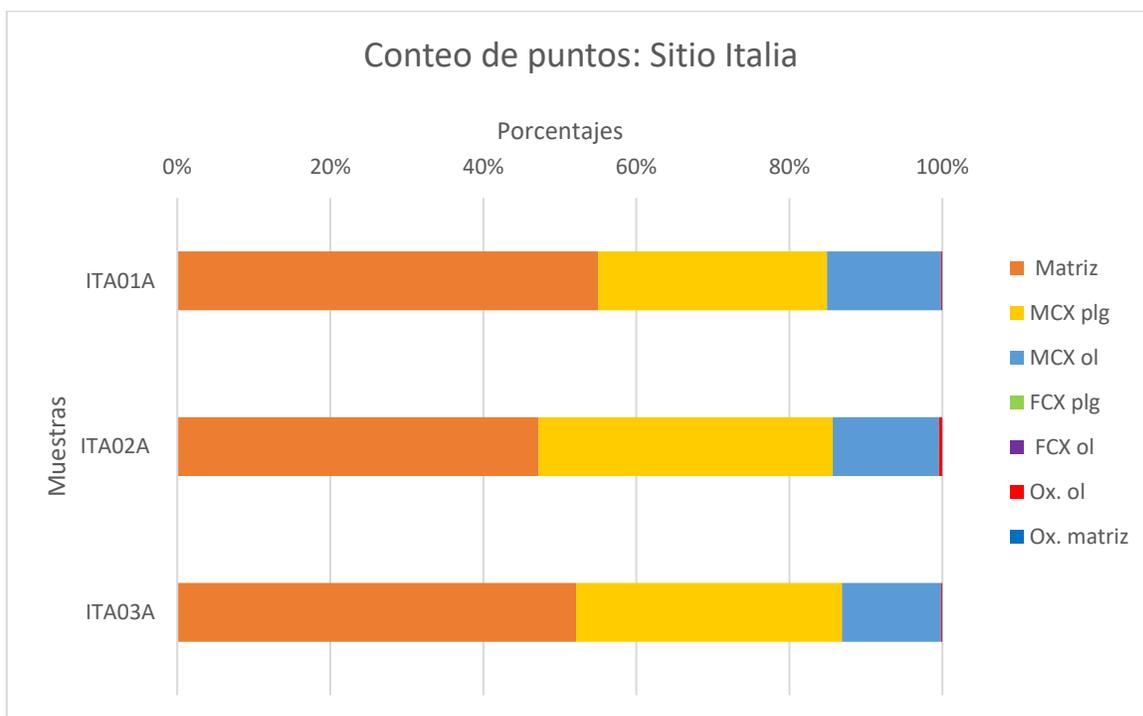
Los cristales están dominados por microcristales de plagioclasa (75% del total de cristales) seguidos por microcristales de olivino (25% del total de cristales), sin presencia de fenocristales ni de óxidos.

Tal cómo podemos observar en la gráfica de la Figura 13, las tres muestras de este sitio tienen una composición similar en tanto a su contenido de minerales, en donde la matriz está entre los rangos del 47 al 55%, siendo bastante parecido en abundancia. Por otro lado, la plagioclasa se encuentra en el rango de 30 a 38% y el olivino de 13-15%.

**Tabla 2.** Conteo de puntos para el análisis modal, correspondiente al sitio de Italia.

Muestra	ITA01A	ITA02A	ITA03A
FCX plg	0%	0%	0%
MCX plg	30%	38%	35%
Matriz	55%	47%	52%
FCX ol	0%	0%	0%
MCX ol	15%	14%	13%
Ox. ol	0.1%	0.4%	0.1%
Ox. matriz	0.0%	0.0%	0.0%

FCX: fenocristales, MCX: microcristales, plg: plagioclasa, ol: olivino, Ox. ol: inclusión de óxido en olivino, Ox. matriz: óxido en matriz



**Figura 13:** Análisis modal de las muestras de Italia. Se muestra la representación gráfica del conteo de puntos para el análisis modal de las muestras de Italia. FCX: fenocristales, MCX: microcristales, plg: plagioclasa, ol: olivino, Ox. ol: inclusión de óxido en olivino, Ox. matriz: óxido en matriz

Con base en lo mencionado anteriormente y gracias a las observaciones en el laboratorio, se puede decir que la roca que encontramos en ambos sitios está compuesta por microcristales de plagioclasa y olivino inmersos en una matriz microcristalina a vitrea. En el sitio de Japón, se encontraron óxidos en los olivinos, además de que hubo presencia de fenocristales, mientras estos están ausentes en Italia donde los cristales presentes son más pequeños.

## 5.5 Composición de roca total

Un aporte significativo a este estudio fue el análisis de roca total de una muestra de Japón (JAP08A), una muestra de Italia (ITA04A) y, para comparar, una muestra de lava recolectada cerca del Instituto de Geofísica (IGF). Resultó que las rocas encontradas en los tres sitios tienen una composición total muy parecida y caen en el campo del basalto en un diagrama TAS (Total Alkali Silica) (Figura 14). Con fines de comparación, se graficaron otros datos de roca total publicados para lavas del Xitle. De igual forma, todos caen en el campo de los basaltos, sin embargo, se nota el alto contenido en álcalis en los análisis de Wallace y Carmichael (1999) que es anómalo en comparación con los otros análisis y podría ser relacionado al método analítico.

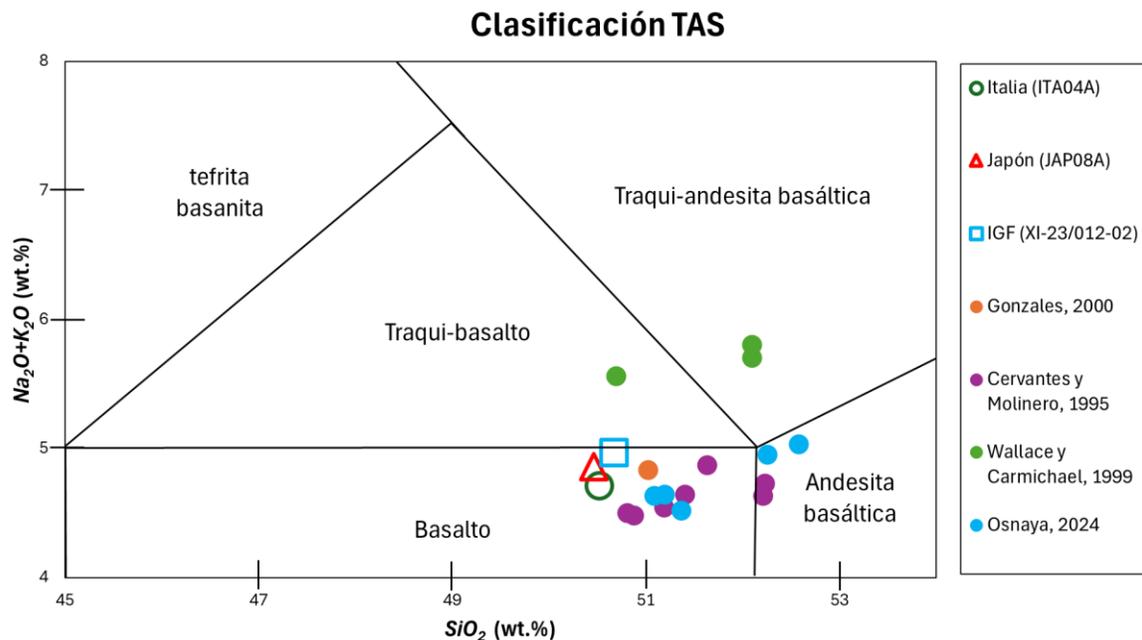


Figura 14: Diagrama Total Alkali Silica (Le Maitre, 1989). Se muestra la clasificación de rocas de acuerdo con el contenido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y álcalis ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ). La muestra ITA04A (círculo verde), la muestra JAP08A (triángulo rojo) y la muestra IGF (cuadro azul) se clasifican como basaltos. Para comparación, se incluyen datos de lavas del Xitle reportados por Gonzales (2000) (punto naranja), Cervantes y Molinero (1995) (puntos morados) y Osnaya (2024) (puntos azules) también dentro del campo de los basaltos. Las muestras de Wallace y Carmichael (1999) (círculo verde oscuro), por su mayor contenido en álcalis, se clasifican como traqui-basalto y Traqui-andesita basáltica.

## 5.6 Composición de vidrio y minerales

De acuerdo con el análisis en la microsonda realizado para las tres muestras de Japón (JAP01A, JAP06A y JAP07A), se obtuvo la composición del vidrio, la cual se reporta en el anexo 3. Al inicio de cada corrida, se analizó un estándar de vidrio como desconocido para poder estimar la reproducibilidad del análisis.

En base a la tabla A del anexo 3 se hizo una gráfica de  $\text{SiO}_2$  vs.  $\text{MgO}$ , para evaluar la variabilidad que existe en los análisis y posteriormente estimar la temperatura de la lava al momento de su solidificación rápida a la superficie.

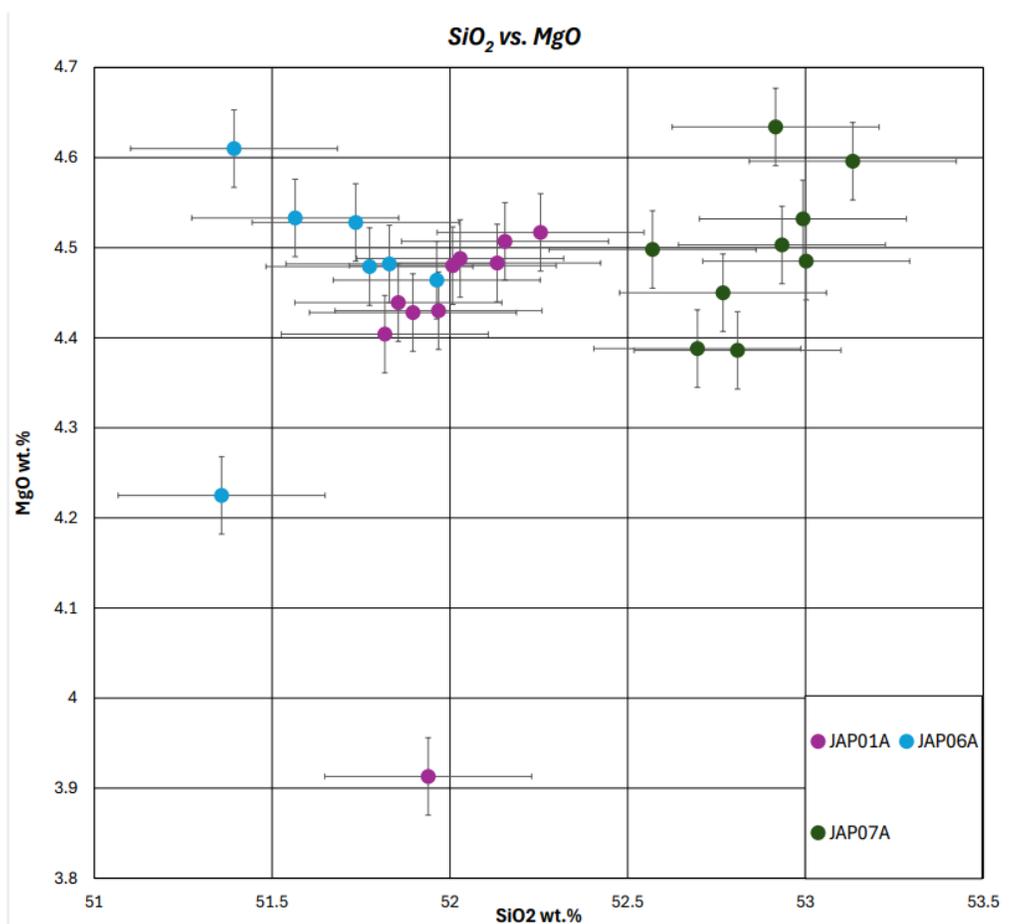


Figura 15: Gráfica  $\text{SiO}_2$  vs.  $\text{MgO}$  de las muestras de Japón. Las barras de error representan la desviación estándar del análisis de las muestras estándar.

Se observa que en la Figura 15, las muestras varían en un rango de  $\text{SiO}_2$  entre aproximadamente 51.3 wt.% y 53.1 wt.%, lo que indica un rango composicional relativamente limitado en términos de contenido de sílice. Se nota sin embargo algunas diferencias entre las tres muestras. En cuanto al contenido de  $\text{MgO}$ , se puede decir que las muestras tienen un contenido similar, a excepción de dos análisis anómalos que están por debajo del valor de 4.3 wt.%  $\text{MgO}$ . El tamaño de las barras de error (calculadas a partir de variabilidad de análisis de estándares de vidrio basáltico durante las corridas) indica que las mediciones son confiables.

La elección del contenido de MgO como geotermómetro para estimar temperaturas en vidrios volcánicos se fundamenta del trabajo realizado por Helz y Thornber (1987) con base en su estudio sobre el lago de lava Kilauea Iki, Hawái.

Helz y Thornber (1987) llevaron a cabo experimentos controlados en laboratorio con vidrios provenientes de Kilauea Iki. Estos experimentos revelaron que el contenido de MgO en el vidrio disminuye linealmente con la temperatura dentro de un rango amplio (1060 °C a 1260 °C). A partir de estos datos, desarrollaron una ecuación empírica basada en regresión lineal que relaciona directamente el contenido de MgO del vidrio con la temperatura de la lava:

$$T = 20.1 \times MgO + 1014$$

En donde, T representa la temperatura en °C, y MgO el contenido de MgO en el vidrio expresado en porcentaje en peso.

Para aplicar esta ecuación en nuestros resultados de MgO, se calculó un promedio de contenido de MgO para cada muestra, dando como resultado las siguientes temperaturas:

JAP01A

$$T = 20.1 \times 4.409 + 1014 = 1102$$

JAP06A

$$T = 20.1 \times 4.474 + 1014 = 1104$$

JAP07A:

$$T = 20.1 \times 4.497 + 1014 = 1104$$

Dado los errores en los análisis de MgO (Figura 15) y en el mismo geotermómetro (10°C, Helz and Thornber, 1987), se deduce que las lavas muestreadas tenían una temperatura similar (1100°C±10°C) al momento de su emplazamiento.

## Capítulo 6.- Discusión de resultados

### 6.1 Modo de emplazamiento de lavas

Las morfologías y estructuras observadas en los sitios estudiados en detalle en este trabajo proporcionan valiosa información sobre la reología del magma y la dinámica de los flujos basálticos en el contexto de erupciones monogenéticas.

La erupción del Volcán Xitle es un ejemplo típico de un volcán monogenético, que se distingue por producir una única erupción, y en el caso de erupciones efusivas, donde el área afectada está controlada principalmente por la viscosidad de la lava, la topografía del terreno y el caudal eruptivo. Clasificada como estromboliana (Cervantes y Wallace, 2003), la erupción tuvo una fase inicial explosiva, seguida de una fase efusiva dominante. La fase explosiva formó columnas eruptivas que dispersaron cenizas y escoria a cortas distancias hacia el sur y oeste del cráter, mientras que la fase efusiva permitió que la lava fluyera en coladas de baja viscosidad que se extendieron hasta 12-13 km desde el cráter hacia el norte (Delgado et al., 1998; Siebe, 2009), donde aflora en los sitios de estudio de este trabajo (Figura 16).

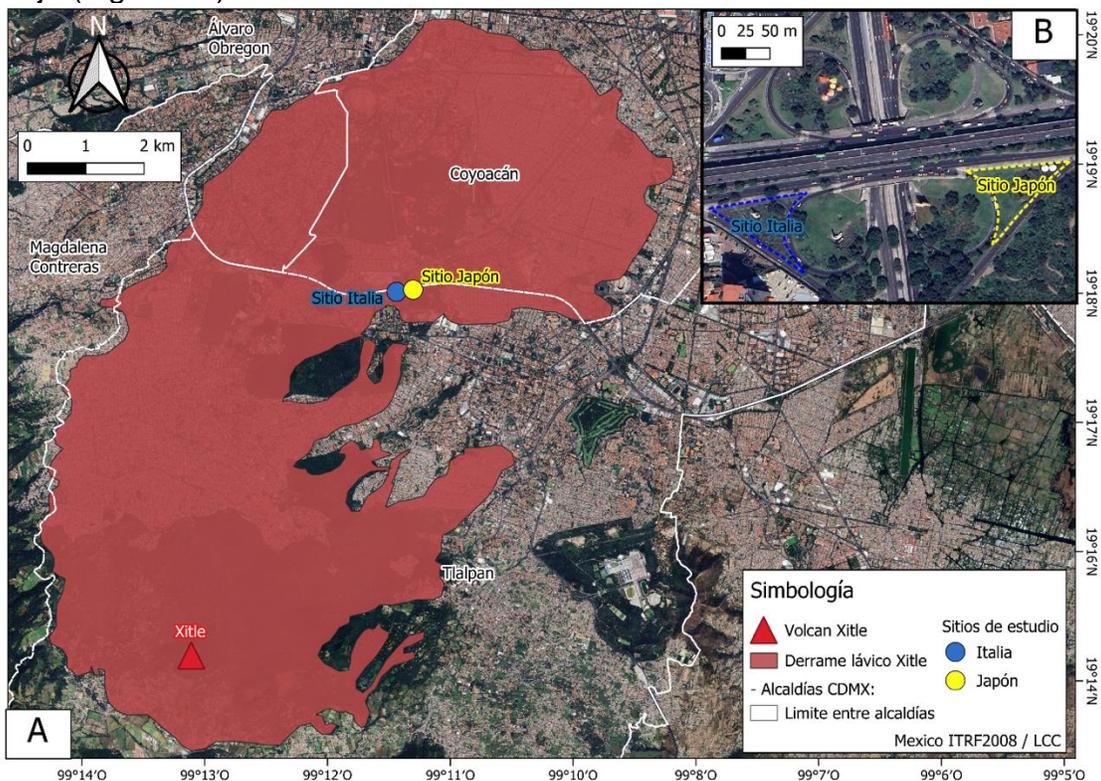


Figura 16. Derrame lávico del Volcán Xitle. A. Se observa la localización del volcán Xitle y la extensión aproximada de su derrame lávico sobre una imagen satelital del sur de la Ciudad de México. Se señalan los sitios de estudio: Japón e Italia, ubicados al norte del área de derrame, dentro de la alcaldía Tlalpan. B. Se muestra una vista ampliada del distribuidor vial donde se encuentran dichos sitios, delimitados con líneas punteadas de color. La delimitación del flujo lávico permite apreciar su extensión dentro de distintas alcaldías, incluyendo Tlalpan, Coyoacán, Magdalena Contreras y Álvaro Obregón.

Los flujos emitidos durante la fase efusiva fueron predominantemente de tipo pāhoehoe, caracterizados por superficies lisas y texturas cordadas, formadas a partir de la baja viscosidad y el enfriamiento gradual del flujo. Estas coladas presentan una inflación interna en la cual el flujo es alimentado continuamente por magma en su interior, generando estructuras elevadas como bordes y grietas superficiales. Estas estructuras, observadas en sitios como Japón e Italia, incluyen formaciones tipo “lava rise”, “sheet lobes” y “breakouts”, que evidencian el proceso de crecimiento interno de la lava y su emplazamiento en áreas de baja pendiente (Walker, 2009).

En los sitios de estudio, esta dinámica se refleja en la transición de lavas cordadas a estructuras fragmentadas en áreas con mayor inclinación (Sector 2 en Japón y la unidad 3 en Italia), lo cual sugiere una variabilidad en el comportamiento reológico de la lava según su emplazamiento y la topografía local.

En sectores específicos, como en Japón, las grietas profundas y cuevas en los bordes inclinados indican que, al enfriarse, las coladas desarrollaron una corteza rígida mientras que la lava interna mantuvo su fluidez, favoreciendo la formación de cavidades.

La presencia de estructuras tipo pillow lava en el sector 4 del sitio de Japón, sugiere un posible contacto de la lava con un cuerpo somero de agua, lo que probablemente aceleró el enfriamiento o implicó el paso de la lava sobre zonas anegadas (Siebe, 2000). Esto coincide con descubrimientos de este tipo de lavas en la zona de Cuicuilco, en donde debido a excavaciones realizadas para la urbanización de la zona, se encontraron pillow lavas. González et al. (2000) mencionan la presencia de un antiguo lago, mientras que en Guilbaud et al. (2021) se menciona que posiblemente se trataba de arroyos de agua provenientes del Volcán Ajusco.

## **6.2 Temperatura de la lava**

La temperatura es un factor crítico en la dinámica y comportamiento de los flujos de lava. La mayoría de estos volcanes produce magmas basálticos con temperaturas de erupción entre 1100 y 1200°C, aunque estas pueden variar en función de la composición química y la profundidad de origen en el manto (Cervantes y Wallace, 2003; Harris et al., 2005). Estudios de campo y de laboratorio, como los realizados en los volcanes Kilauea y Mauna Loa en Hawái, han demostrado que estas altas temperaturas iniciales, junto con un bajo contenido de sílice, permiten que la lava mantenga su fluidez sobre grandes distancias antes de enfriarse y aumentar su viscosidad, lo cual provoca cambios en la textura y en el tipo de flujo (Cashman et al., 1999).

En este estudio, se ha utilizado el contenido de MgO en los vidrios volcánicos como geotermómetro para estimar las temperaturas de emplazamiento de la lava del Xitle en el sector distal del campo, basado en el trabajo de Helz y Thornber (1987) sobre el lago de lava Kilauea Iki. Según los autores, el contenido de MgO en los vidrios volcánicos se correlaciona linealmente con la temperatura, lo que lo convierte en un

método confiable para estimar las condiciones térmicas del fundido antes de su solidificación.

En las muestras estudiadas, los resultados de las temperaturas calculadas utilizando MgO están dentro del rango esperado para magmas basálticos, lo que refuerza la validez del uso del MgO como geotermómetro para estimar las temperaturas en las muestras del Xitle. Además, la mineralogía observada en las coladas del Xitle muestra que la lava alcanzó temperaturas elevadas, lo que permitió que la lava mantuviera una baja viscosidad y se desplazara ampliamente antes de solidificarse. Esto también coincide con los estudios de campo realizados en Hawái, que destacan la importancia de la temperatura en la fluidez de la lava y cómo influye en la dinámica del flujo volcánico.

Es importante tener en cuenta que el método que usamos para calcular las temperaturas tiene un margen de error. Según Helz y Thornber (1987), las temperaturas obtenidas a partir del contenido de MgO pueden tener un error de alrededor de  $\pm 10$  °C. Esto se debe a que las composiciones del vidrio pueden variar un poco y a que la precisión de las mediciones no siempre es muy acertada. Aunque los resultados obtenidos son consistentes con las temperaturas esperadas para los basaltos, la variabilidad natural de las muestras puede causar pequeñas diferencias dentro de ese margen de error.

Además de la temperatura, el enfriamiento y la vesicularidad de las coladas de lava ofrecen información valiosa sobre el proceso de solidificación paulatino de la lava durante su emplazamiento. En estudios como los de Shea et al. (2010), se ha observado que, durante un enfriamiento rápido en la superficie, la vesicularidad tiende a ser alta debido a la liberación de gases, mientras que, en zonas más profundas, donde el enfriamiento es más gradual, la vesicularidad disminuye.

Este patrón se documentó en los sitios de estudio, donde las muestras superficiales mostraron alta vesicularidad, reflejando una liberación rápida de gases al enfriarse en contacto con el ambiente, lo cual generó vesículas pequeñas y abundantes. En cambio, en las zonas más profundas de las coladas, donde el enfriamiento fue más lento, la menor cantidad de vesículas y su mayor tamaño indican condiciones de estabilidad térmica, lo que permitió una liberación de gases más pausada. Estos perfiles de vesicularidad se correlacionan con el contenido mineral, en la cual la plagioclasa y el olivino dominan, típicos de enfriamientos sucesivos y ambientes de alta temperatura que favorecen la cristalización de estos minerales.

Se destaca que las lavas (especialmente en el sitio de Italia que expone tres unidades de lava apiladas) presentan variaciones morfológicas importantes, a pesar de tener composiciones totales similares. En Japón, las composiciones similares de los vidrios indican, además, temperaturas de emplazamiento similares. Sin embargo, documentamos variaciones en el contenido en fenocristales y en vesículas, que pueden haber afectado la viscosidad de la lava y así impactar su reología y su morfología

Estas observaciones sugieren que las variaciones de cristalinidad, vesicularidad, y morfología pueden haberse causado por controles externos como la interacción con agua somera y la microtopografía local. Adicionalmente, la tasa de emisión de lava puede haber fluctuado en el tiempo en estos sitios, como consecuencia de una evolución en el sistema de alimentación y de transporte. Estos elementos son entonces los que crearon la geodiversidad que se observa en estos sitios, la cual a su vez es la fuente de la biodiversidad que allí se conserva (Palacio y Guilbaud, 2015; Lot et al., 2019; Ortega-Larrocea et al., 2024).

### **6.3. Geopatrimonio**

El Volcán Xitle, como elemento clave del geopatrimonio del sur de la Ciudad de México, presenta un gran valor científico y educativo debido a su registro de procesos volcánicos y su interacción con el entorno urbano y ecológico de la región (Guilbaud et al., 2021). La erupción del Xitle y las estructuras resultantes, como sus flujos de lava tipo pāhoehoe, sus estructuras cordadas y formaciones de tipo “sheet lobe”, constituyen ejemplos que ilustran la alta dinámica de los flujos de este tipo de lava que pueden caracterizar las erupciones monogenéticas de tipo basálticas en esta región. Además, se demuestra que sus estructuras geomorfológicas permiten estudiar y comprender los mecanismos de transporte, emplazamiento y solidificación interna de una lava basáltica caliente.

Desde una perspectiva de geopatrimonio, el Xitle y sus alrededores destacan por su aporte a la geodiversidad y a la comprensión del paisaje volcánico en una región con alta actividad tectónica y vulcanológica. Los elementos geológicos presentes, como los afloramientos de lava y las formaciones derivadas del enfriamiento y desplazamiento de la lava basáltica, son representativos de procesos volcánicos que modelan la Tierra y sus paisajes. Además, en el contexto urbano, el Xitle ha contribuido a la identidad cultural del sur de la ciudad, donde se han integrado iniciativas como la Ruta de la Amistad, que une el valor geológico con expresiones artísticas y culturales, favoreciendo una conexión entre la historia natural y la herencia cultural de la región.

Desde una perspectiva ecológica, las lavas del Xitle aportan servicios ecosistémicos esenciales para la ciudad. Los pedregales volcánicos funcionan como áreas de filtración y almacenamiento de agua subterránea, ayudando en la recarga de acuíferos que abastecen a la Ciudad de México. Adicionalmente, estas áreas locales son hábitats para muchas especies, algunas de ellas endémicas y cumplen funciones de captura de carbono y conservación de nutrientes, lo que contribuye a la fertilidad del suelo y al equilibrio ecológico de la región (Nava-López et al., 2009). La presencia de estructuras naturales y geológicas en estos geositos proporciona un soporte fundamental para la sostenibilidad y biodiversidad local, haciendo del Xitle un ejemplo de cómo un pasado volcánico puede ofrecer recursos ambientales y culturales valiosos.

En el contexto de su preservación y aprovechamiento, el Xitle cumple con los criterios para ser considerado un lugar de interés geológico. Sus características lo

califican como un sitio modelo para la interpretación de procesos geológicos y un recurso educativo que conecta a la comunidad con el pasado geológico de la Tierra. Este tipo de iniciativas de conservación no solo promueven el conocimiento científico, sino que también fortalecen la conciencia y apreciación pública sobre la importancia de proteger y estudiar el patrimonio geológico y su geodiversidad.

## **7. Conclusiones**

El estudio de las lavas del Volcán Xitle en los sitios Japón e Italia, permitió caracterizar sus propiedades morfológicas, petrográficas y geoquímicas. Los resultados indican que las coladas son de tipo pāhoehoe, con estructuras bien conservadas como túmulos, grietas de inflación, lavas cordadas y lóbulos inflados. Estas características reflejan un emplazamiento controlado por procesos de inflación interna el cual es favorecido por la baja viscosidad de la lava.

La variación vertical en vesicularidad y cristalinidad observada en las grietas y cortes indica un enfriamiento progresivo desde la corteza hacia el núcleo de las coladas. La petrografía y el análisis geoquímico corroboran la presencia predominante de plagioclasa y olivino, con texturas microlíticas y matrices que oscilan entre vítreas y microcristalinas. La identificación de intrusiones densas y estructuras similares a pillow lavas sugiere una complejidad mayor en el dinamismo interno del flujo.

Estos hallazgos contribuyen al entendimiento de los procesos asociados a erupciones monogenéticas basálticas y ofrecen información que podría ser utilizada para el modelado de los peligros para la ciudad de México.

Desde una perspectiva sociocultural, este trabajo destaca el valor del geopatrimonio conservado en los sitios de Japón e Italia y su potencial para la geoeducación. Estos sitios forman parte del corredor escultórico de la Ruta de la Amistad, una manifestación artística y patrimonial única cuya restauración ha facilitado el acceso a afloramientos bien conservados, lo que representa una oportunidad invaluable para comunicar el riesgo volcánico y fomentar la conciencia ambiental.

Los resultados de este trabajo han sido incorporados a la Guía del Geolodía 2025 “La Ruta de la Amistad: Geobiopatrimonio de la Ciudad de México” (Zavala et al., 2025), una publicación orientada a la divulgación geocientífica, en donde se transmiten los datos científicos como explicaciones accesibles para el público general. Las características morfológicas como las lavas pãhoehoe, grietas de inflación, así como los patrones de vesicularidad, se presentan de forma visual y descriptiva, facilitando la comprensión de procesos volcánicos complejos a través de actividades en campo. Así, el conocimiento científico se convierte en una herramienta didáctica que impulsa la geoeducación.

Además, la guía engloba este contenido en un contexto cultural y ecológico al vincular el paisaje volcánico con el arte urbano y la biodiversidad del pedregal. De esta manera, se refuerza la conciencia sobre el riesgo volcánico, la conservación del geopatrimonio y la importancia de preservar estos espacios como laboratorios naturales en una ciudad densamente poblada.

La Ruta de la Amistad, con sus esculturas y afloramientos volcánicos, se convierte en un escenario ideal para fomentar el diálogo entre ciencia, arte y sociedad.

## **8. Recomendaciones para estudios posteriores**

El análisis del Volcán Xitle y la dinámica de sus flujos de lava permite identificar estrategias para la modelación de riesgos y la prevención de desastres en la Ciudad de México. A lo largo de los años, se han desarrollado algoritmos probabilísticos para simular flujos de lava basados en ecuaciones diferenciales de transporte (Morales, 2014). Gracias al avance tecnológico, hoy en día existen herramientas más accesibles para generar estos modelos.

Los flujos de lava pāhoehoe observados en los sitios de estudio muestran que la baja viscosidad y las altas temperaturas del magma permitieron su desplazamiento a grandes distancias antes de solidificarse. Estos factores deben considerarse en modelos de simulación para predecir el comportamiento de futuros flujos en caso de actividad volcánica. Además, los datos de temperatura, viscosidad y alcance son clave para modelar tanto erupciones pasadas como posibles eventos futuros, ya que la zona presenta similitudes en la composición de la lava y su comportamiento podría ser predecible.

Además, la variabilidad en la vesicularidad y cristalinidad de las coladas del Xitle indica que la viscosidad y morfología del flujo están influenciadas por factores externos como la topografía y la tasa de emisión de lava. Esta información es esencial para elaborar mapas de susceptibilidad volcánica mediante Sistemas de Información Geográfica, permitiendo identificar zonas propensas a la acumulación o redirección de flujos según el relieve y la estructura del subsuelo.

Finalmente, desde una perspectiva de gestión del riesgo, el Xitle, como parte del geopatrimonio del sur de la Ciudad de México, destaca la necesidad de integrar estos conocimientos en planes de ordenamiento territorial y evitar la urbanización en zonas de alto riesgo volcánico.

## **Bibliografía.**

Ayala, J. A. G., & Navarrete, B. M. G. (2017). Patrimonio de la XIX Olimpiada "México 68": los retos para su preservación. *Gremium*, 4(7), 99-114.

Badilla Cruz, R. R. (1977). Estudio Petrológico de la Lava de la Parte Noreste del Pedregal de San Ángel, D.F. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 38(1), 40-57.

Cambridge Dictionary. Cambridge University Press & Assessment 2025. Cambridge, Reino Unido. Consultado en septiembre 2024. Página web: <https://dictionary.cambridge.org/us/dictionary/english-spanish/>

Cashman, K. V., Thornber, C., & Kauahikaua, J. P. (1999). Cooling and crystallization of lava in open channels, and the transition of pāhoehoe Lava to 'A'a. *Bulletin of Volcanology*, 61(5), 306–323.

Cervantes, P., & Wallace, P. J. (2003). Magma degassing and basaltic eruption styles: A case study of Xitle volcano, central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 120(3-4), 249–270.

Cervantes, P., Molinero, R.J. (1995). Eventos volcánicos al sur de la ciudad de México. B.S. Tesis, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico DF, 74 pp.

Cummings, B. (1926). Cuicuilco and the Archaic Culture of Mexico. *The Scientific Monthly*, 23(4), 289–304. <http://www.jstor.org/stable/7557>

Decker, R. (2025). Kipuka. *Encyclopedia Britannica*, Inc. Chicago, Illinois. Página web: <https://www.britannica.com/science/kipuka>

Delgado, H., Molinero, R., Cervantes, P., Nieto-Obregón, J., Lozano-Santa Cruz, R., Macías-González, H. L., & 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.

Enciclopedia humanidades. (s.f.). Núcleo. Enciclopedia Humanidades. Editorial étece. Buenos Aires, Argentina. Consultado en septiembre de 2024. Página web: <https://humanidades.com/mantoterrestre/#:~:text=El%20manto%20superior%20es%20una,movimiento%20de%20las%20placas%20tect%C3%B3nicas.>

Ferreiro Giardina, G. E., García Ayala, J. A., & Gallegos Navarrete, B. M. (2023). La Ruta de la Amistad, patrimonio urbano y acción social. *Gremio*, 10(21), 57-72.

Franco, M.P. & Gonzalo, J. (2000). Taller de petrología: enseñanza de la Petrología con el microscopio petrográfico. *Enseñanza de las ciencias de la Tierra. Revista de*

la Asociación Española para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, ISSN 1132-9157, 8 (1), 38-47.

Goff, F. (1996). Vesicle cylinders in vapor-differentiated basalt flows. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 71(2-4), 167-185.

González, E. (s.f). Glosario. Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM). Consultado en septiembre de 2024. Página web: <https://volcanescalatrava.web.uclm.es/glosario.htm>

González, 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.

Guilbaud, M.-N., Ortega-Larrocea, M.d.P., Cram, S., Pastrana, A. (2021). Volcano Geoheritage, Mexico City: Raising Awareness of Natural Hazards and Environmental Sustainability in Active Volcanic Areas. *Geoheritage* 13, 6.

Gunn, B. M., & Mooser, F. (1970). Geochemistry of the volcanics of central Mexico. *Bulletin Volcanologique*, 34, 577-616.

Harris, A. J. L., Rowland, S. K., Villeneuve, N., & Thordarson, T. (2016). Pāhoehoe, ‘a’ā, and block lava: an illustrated history of the nomenclature. *Bulletin of Volcanology*, 79(1).

Harris, A., M, Favalli., F, Mazzarini, C, Hamilton., (2008). Construction dynamics of a lava channel. *Bulletin of Volcanology*. 71. (4):459-474.

Helz, R. T., & Thornber, C. R. (1987). Geothermometry of the Kilauea Iki lava lake, Hawaii. *Bulletin of Volcanology*, 49(5), 651–668.

Hoblitt, R. (2012). Inflation rates, rifts, and bands in a pāhoehoe sheet flow. *Geosphere*, 8(1), 179.

Hon, K. E. N., Kauahikaua, J. I. M., Denlinger, R., & Mackay, K. (1994). Emplacement and inflation of pāhoehoe sheet flows: Observations and measurements of active lava flows on Kilauea Volcano, Hawaii. *Geological Society of America Bulletin*, 106(3), 351-370.

IGN. (s.f). Glosario de términos volcánicos. Instituto Geográfico Nacional. Madrid, España. Consultado en septiembre de 2024. PDF: <https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/VLC-Glosario-Terminos-Volcanicos.pdf>

Ingeoexpert. (s.f). Coladas de lava: tipos y características. Madrid, España. Consultado en septiembre de 2024. Página web: <https://ingeoexpert.com/articulo/coladas-lava-tipos-caracteristicas/>

Lot, A., & Cano-Santana, Z. (2009). Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel. Universidad Nacional Autónoma de México, México, DF.

Macdonald, G. (1953). Pāhoehoe, AA and Block Lava. American Journal of Science, 251, 169-191.

Macdonald, G. A. (1967). Forms and structures of extrusive basaltic rocks. Basalts: The Poldervaart treatise on rocks of basaltic composition, 1, 1-61.

Moore, J. G. (1975). Mechanism of Formation of Pillow Lava: Pillow lava, produced as fluid lava cools underwater, is the most abundant volcanic rock on earth, but only recently have divers observed it forming. American Scientist, 63(3), 269–277. <http://www.jstor.org/stable/27845462>

National Geographic. (s.f). Core. National Geographic Society. Washington, D.C. Consultado en septiembre de 2024. Página web: <https://education.nationalgeographic.org/resource/core/>

National Park Service. (2021a). Kipuka. Hawaii National Park. Página web: <https://www.nps.gov/havo/learn/nature/kipuka.htm>

National Park Service. (2021b). Lava tubes. Hawaii National Park. Página web: <https://www.nps.gov/havo/learn/nature/lava-tubes.htm>

NPS. (2023). Inflation Structures, Lava-Rise Plateaus & Inflation Pits. National Park Service. U.S. Department of the Interior. Washington, D.C. Página web: <https://www.nps.gov/articles/000/inflation-structures-lava-rise-plateaus-inflation-pits.htm>

NPS. (2024). Lava Flow Surface Features. National Park Service. U.S. Department of the Interior. Washington, D.C. Página web: <https://www.nps.gov/articles/000/inflation-structures-lava-rise-plateaus-inflation-pits.htm>

Ordoñez, E. (1895). Las rocas eruptivas del suroeste de la cuenca de México. Boletín del Instituto Geológico de México. No. 2. México, pp. 46.

Osnaya, E. (2024). Caracterización de la geología y del geo patrimonio de la zona residencial Jardines en la Montaña y el Bosque de Tlalpan, Ciudad de México. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio de la UNAM.

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.

Philpotts, A. R., & Lewis, C. L. (1987). Pipe vesicles an alternate model for their origin. *Geology*, 15(10), 971-974.

PHIVOLCS. (2018). Glossary. Philippine Institute of Volcanology and Seismology. Quezon, Filipinas. Página web: <https://www.phivolcs.dost.gov.ph/index.php/volcano-hazard/glossary-of-volcanological-terms>

Self, S., Keszthelyi, L., & Thordarson, T. (1998). The importance of pāhoehoe. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 26(1), 81-110.

SGE (2024phi). Patrimonio geológico. Sociedad Geológica de España. Consultado en septiembre de 2024. Página web: <https://sociedadgeologica.org/divulgacion/patrimonio-geologico/>

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. (2009). La erupción del volcán Xitle y las lavas del Pedregal hace 1670+/-35 años AP y sus implicaciones. En: Lot, A., Cano-Santana, Z., Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel, Universidad Nacional Autónoma de México.

Sigurdsson, H., Houghton, B., Rymer, H., Stix, J., & McNutt, S. (1999). *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press. Cambridge, Massachusetts, United States.

SLB. (2024). Sección transversal. Energy Glossary. Schlumberger Limited. CDMX. Consultado en septiembre 2024. Página web: [https://glossary.slb.com/es/terms/c/cross\\_section](https://glossary.slb.com/es/terms/c/cross_section)

Universidad Complutense de Madrid. (2013). Lavas. Departamento de Petrología y Geoquímica. Madrid, España. Página web: <https://petroigne.wordpress.com/formas-de-yacimiento/depositos-volcanicos/lavas/#cordada>

Universidad de Alicante. (2020). Basalto. Atlas digital de petrología ígnea. Alicante, España. Página web: <https://web.ua.es/es/pim/roca-volcanicas/basalto.html>

USGS. (2016). Glossary. U.S. Geological Survey. Página web: <https://volcanoes.usgs.gov/vsc/glossary/>

Waitz, P., & Wittich, E. (1911). Tubos de explosión en el pedregal de San Ángel. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 7(2), 169–202. <http://www.jstor.org/stable/44175917>

Walker, G. P. (1991a). Origin of vesicle types and distribution patterns in the Xitle Pāhoehoe basalt in Mexico City. American Geophysical Union, Mineralogical Society of America, Fall Meeting, Baltimore, Programme with Abstracts (p. 566). <https://breiddalssetur.123.is/fs/Walker-papers/Walker-unknown-Origin-of-Vesicle-types-Mexico-City.pdf>

Walker, G. P. (1991b). Structure, and origin by injection of lava under surface crust, of tumuli, “lava rises”, “lava-rise pits”, and “lava-inflation clefts” in Hawaii. *Bulletin of Volcanology*, 53, 546-558.

Walker, G. P. (1993). Basaltic-volcano systems. Geological Society, London, Special Publications, 76(1), 3-38.

Walker, G. P. L. (2009). The endogenous growth of pāhoehoe lava lobes and morphology of lava-rise edges. En: Thordarson, T., Self, S., Larsen, G., Rowland, S.K., Höskuldsson, Studies in volcanology: The legacy of George Walker, Geological Society of London on behalf of The International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth’s Interior, 17-32.

Wallace, P. J., & Carmichael, I. S. (1999). Quaternary volcanism near the Valley of Mexico: implications for subduction zone magmatism and the effects of crustal thickness variations on primitive magma compositions. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 135(4), 291-314.

White, W. (2025). Volcanic and tectonic caves. Encyclopedia Britannica, Inc. Chicago, Illinois. Página web: <https://www.britannica.com/science/cave/Other-types-of-lava-caves>

Zavala, D., Guilbaud, MN., Ortega-Larrocea, MP., De la Torre, LJ. (2025) La Ruta de la Amistad: Geobiopatrimonio cultural de la Ciudad de México. Sociedad Geológica de España. Universidad de Salamanca. ISSN 2603-8889 Página web: <https://geolodia.es/geolodia-2025/ciudad-de-mexico-tlalpan-ruta-amistad-2025/#1539510936234-5e6d9e70-e1f2f0e5-1b5a1d3b-ea01>

## **Anexos:**

### **Anexo 1: Descripción de láminas**

A continuación, se hace una descripción detallada de las láminas pertenecientes a cada muestra tomada en los sitios. Se clasificaron las láminas de acuerdo con las partes en donde fueron tomadas. Así mismo, en la Figura 17 se muestra una galería de fotos de las láminas, con el fin de identificar con mejor detalle lo descrito.

#### **Muestras pertenecientes a la parte alta de la corteza superior (superficie de la lava o "lava selva"):**

**JAP01A:** Compuesta por fenocristales de olivino (tamaños de 3 - 4 mm) y microcristales de olivino y plagioclasa (tamaños de 0.15 - 1.5 mm), en una matriz que varía de vítrea (marrón) a microcristalina (negra). Mediante una estimación visual, se determinó que el 40% de la muestra está compuesta por minerales y el 20% son vesículas, que varían en tamaño (menos de 1 mm a 1 cm).

Se observan inclusiones de vidrio y óxidos en los olivinos. Las plagioclasas muestran formas esqueléticas tipo "swallow tail", y los olivinos tienen una morfología bien definida, con algunas extremidades dentrificadas. También se identificaron fenocristales fracturados y microcristales de olivino.

**-JAP06A:** presenta microcristales de olivino y plagioclasa (tamaño de 0.15 - 1.2 mm), con vesículas irregulares (0.15 - 6 mm de diámetro) que ocupan el 15% del total de la lámina. Se distinguen dos zonas (Figs. 9A y B):

- **Zona 1:** Matriz vítrea, color café claro, representa el 45%. Plagioclasa alterada con estructuras "swallow tail" (50%) y escaso olivino (5%).
- **Zona 2:** Matriz negra, microcristalina, ocupa el 50%. Plagioclasa (30%) y olivino (10%) dispersos, ambos dentrificados con estructuras esqueléticas.

**-JAP07A:** La lámina contiene microcristales de olivino (tamaño de 0.15 - 1 mm) y plagioclasa (tamaño de 0.15-1.2 mm) con una textura microlítica, sin fenocristales. Los olivinos presentan bordes dentrificados con estructuras esqueléticas, mientras que las plagioclasas tienen estructuras "swallow tail". Las vesículas se observan redondeadas e irregulares (0.3 - 1 mm de diámetro), ocupan un 15%. Mediante una estimación visual, se determinó que el 50% de la lámina está compuesta por minerales. Existen dos zonas diferenciadas:

- **Zona 1:** Matriz vítrea café claro (50%), plagioclasas (30%) y olivino (20%), en esta zona las plagioclasas están demasiado aglomeradas, dando la impresión de que la matriz está hecha de ellas.
- **Zona 2:** Matriz negra y microcristalina (50%), con microcristales dispersos de olivino (20%) y plagioclasa (30%).

### **Muestras pertenecientes a la parte intermedia de la corteza superior:**

**-JAP01B:** Contiene fenocristales de olivino (tamaños de 3 - 5 mm) y microcristales de plagioclasa (0.15 - 2 mm) embebidos en una matriz microcristalina negra. Mediante una estimación visual, se determinó que el 50% de la lámina está compuesta por minerales.

Las vesículas, de 1 mm a 1.2 cm de diámetro, son redondeadas o irregulares, algunas siguen la geometría de las caras de los olivinos (Figura 9C). Se observaron inclusiones de vidrio y pequeños óxidos en los olivinos.

Los olivinos muestran morfología euhedral, aunque algunos están fracturados o alterados. Las plagioclasas tienen formas esqueléticas tipo "swallow tail" y fenocristales fracturados.

**-JAP06B:** contiene microcristales de olivino (tamaños de 0.15 - 2 mm) y plagioclasa (1.2 mm), con posible presencia de piroxeno, todo en una matriz microcristalina negra. Mediante una estimación visual, se determinó que el 50% de la lámina está compuesta por minerales.

La textura es microlítica, con olivinos más grandes que las plagioclasas y sin fenocristales. Las vesículas, irregulares, varían de 0.15 a 9 mm de diámetro, representando el 15% de la muestra.

Los olivinos presentan formas esqueléticas y dendríticas, mientras que las plagioclasas tienen estructuras tipo "swallow tail".

**-JAP07B:** La muestra contiene microcristales de olivino (tamaño de 0.15 - 2 mm) y plagioclasa (1 mm) en una matriz microcristalina negra. Mediante una estimación visual, se determinó que el 40% de la lámina está compuesta por minerales.

La textura es microlítica, con olivinos más grandes que las plagioclasas y sin fenocristales. Las vesículas, irregulares, varían entre 0.15 mm y 9 mm, ocupando el 15% de la muestra.

Los olivinos presentan bordes esqueléticos y estructuras dendríticas, con algunos fracturados por vesículas. Las plagioclasas muestran estructuras tipo "swallow tail".

### **Lámina perteneciente a la parte inferior de la corteza superior:**

**-JAP02A:** La muestra contiene fenocristales de olivino (3.5 mm) y microcristales de olivino (menos de 0.5 mm) y plagioclasa (1.2-1.8 mm) en una matriz microcristalina

negra. Mediante estimación visual, se determinó que aproximadamente el 40% de la lámina está compuesta por minerales.

Las vesículas son irregulares, con un diámetro promedio de 1.2 mm, representando el 20% de la muestra. Se identificaron óxidos en los olivinos como pequeños cuadros negros y algunas plagioclasas presentan inclusiones de olivino (Figura 9D). Los cristales de olivino son euhedrales con algunas extremidades esqueléticas, sugiriendo posible alteración. Las plagioclasas tienen formas esqueléticas "swallow tail" y algunas están fracturadas.

### **Láminas de estructuras especiales:**

**-JAP04A (correspondiente a una laja en una cueva).** La lámina está compuesta por microcristales de olivino (tamaños de 0.10 – 2.7 mm) y plagioclasa (tamaños de 0.10 – 2.4 mm), junto con vesículas en una matriz microcristalina de color negro. Mediante una estimación visual, se determinó que el 40% de la lámina está compuesta por minerales. Las vesículas, mayormente grandes (con tamaños de 1.5 – 3 mm), constituyen el 20% de la muestra. La textura es microlítica, sin fenocristales, con olivinos y plagioclasas variando en tamaño. Se observaron pequeños óxidos en los olivinos. Los cristales de olivino tienen extremidades dentrificadas con formas esqueléticas, mientras que las plagioclasas presentan formas de "swallow tail" (Figura 9E).

**-JAP03A (exterior de la intrusión de lava densa).** La lámina contiene microcristales de olivino (tamaños de 0.1 – 3 mm) y plagioclasa (tamaños de 1.2 – 2.4 mm) en una matriz microcristalina negra, Mediante una estimación visual, se determinó que el 25% de la lámina está compuesta por minerales. Tiene textura microlítica sin fenocristales, con olivinos dentrificados, algunos fracturados por vesículas y con inclusiones de matriz. Las plagioclasas muestran formas de tipo "swallow tail" y están fracturadas. También se observan pequeños óxidos en los olivinos.

**-JAP03B (interior de la intrusión de lava densa):** Compuesta por microcristales de olivino (tamaños de 0.15 – 2.5 mm) y plagioclasa (tamaños de 1.2 – 2 mm) en una matriz vítrea a microcristalina. Mediante una estimación visual, se determinó que el 60% de la lámina está compuesta por minerales. Presenta microvesicularidad (20%) y olivinos dentrificados con formas esqueléticas, que a su vez, contenían inclusiones de plagioclasa. Las plagioclasas también tienen formas esqueléticas de "swallow tail" y están fracturadas. Se observó una franja más oscura con microcristales aglomerados y óxidos, posiblemente una intrusión.

**JAP05A (interior de un lóbulo tipo "pillow lavas"):** La muestra tiene tres zonas con variación de color y concentración de minerales (Figura 9, F). Se observan microcristales y fenocristales de olivino (con tamaños de 0.3 – 4 mm) y plagioclasa (tamaños de 0.6 – 3.6 mm), posible presencia de piroxeno, y un aumento en vesículas hacia la base.

- **Zona 1:** Matriz negra, microcristalina, con 30% de minerales (80% plagioclasa, 20% olivino), microvesículas (<1 mm).
- **Zona 2:** Matriz negra con 60% de minerales (65% plagioclasa, 35% olivino), vesículas irregulares (3 mm).
- **Zona 3:** Matriz negra con 40% de minerales (80% plagioclasa, 20% olivino), vesículas alargadas (0.5 mm – 1 cm).

Olivinos dentrificados con formas esqueléticas y algunas inclusiones de plagioclasa. Plagioclasas con formas "swallow tail" y mayor tamaño que en otras muestras. Pequeños óxidos presentes en los olivinos.

**JAP05B (exterior de un lóbulo tipo pillow lava”):** Muestra compuesta por microcristales de olivino (tamaños de 0.1–1.5 mm) y plagioclasa (tamaños de 0.15 – 1.2 mm) en una matriz negra. Textura microlítica sin fenocristales, con vesículas variables (0.15 –3 mm de diámetro) que representan el 10% de la muestra. Olivinos dentrificados con algunas caras intactas y fracturados por vesículas. Plagioclasas con formas "swallow tail" y fracturadas. Pequeños óxidos presentes en los olivinos.

**Para el sitio de Italia,** se estudiaron en el laboratorio 3 láminas de 4 muestras de roca colectadas en el sitio (ubicación en Figura 6), ya que la cuarta muestra (ITA04), tenía bastantes signos de alteración. Las 4 muestras colectadas fueron tomadas de la superficie de la roca.

**-ITA01A,** está compuesta por microcristales de olivino (tamaños de 0.15 – 1.5 mm) y plagioclasa (tamaño promedio de 0.5 mm), inmersos en una matriz microcristalina negra. Comparada con las muestras de Japón, las plagioclasas son menores (de 1 a 4 mm). Mediante una estimación visual, se determinó que el 30% de la lámina está compuesta por minerales

La textura es microlítica, con microcristales de olivino mayores que los de plagioclasa, y sin presencia de fenocristales. La muestra presenta vesículas irregulares, de formas redondeadas a alargadas (0.15 mm a 6 mm), representando el 10% de la muestra.

Los olivinos están dentrificados con formas esqueléticas en sus bordes; pocos óxidos están presentes. Las plagioclasas exhiben formas esqueléticas de “swallow tail”, y algunas plagioclasas y olivinos tienen caras bien definidas. Se encontraron plagioclasas con inclusiones de olivino, así como olivinos con inclusiones de vidrio (Figura 10, A)

**-ITA02A,** contiene microcristales de olivino (tamaños de 0.3 – 1.2 mm) y plagioclasa (tamaño promedio de 1 mm), inmersos en una matriz que varía de vítrea (café, correspondiente a no más de .5 mm de la lámina) a microcristalina (negra) (Figura 10, B). Mediante una estimación visual, se determinó que el 30% de la lámina está compuesta por minerales

La textura es microlítica, con microcristales de olivino más grandes que los de plagioclasa, sin fenocristales. La muestra tiene una alta vesicularidad, con vesículas irregulares de 1.5 mm a 7.5 mm, representando el 20% del total.

Los olivinos presentan dentrificación y formas esqueletales en los bordes, algunos están fracturados por las vesículas, y contienen óxidos; muy pocos tienen caras bien definidas. Las plagioclasas muestran formas esqueletales de tipo “swallow tail” y son más pequeñas que en las muestras de Japón.

**-ITA03**, contiene microcristales de olivino (tamaño promedio de 2 mm) y plagioclasa (tamaño promedio de 1.2 mm), inmersos en una matriz que varía de vítrea (café, correspondiente a no más de .5 mm de la lámina) a microcristalina (negra). Visualmente, la matriz tiene un 20% de minerales.

La textura es microlítica, con microcristales de olivino mayores que los de plagioclasa, sin fenocristales. Las vesículas son irregulares y grandes (tamaños variables de 1 mm a 8 mm), ocupando el 20% de la muestra.

Los olivinos están dentrificados con formas esqueletales en los bordes, algunos están fracturados por vesículas y tienen óxidos e inclusiones de matriz. Esta muestra en particular tiene una zona en donde los olivinos parecen estar alineados siguiendo una orientación preferencial. (Figura 10, C) Las plagioclasas tienen formas esqueletales de “swallow tail.” Una pequeña zona vítrea de color café claro muestra fracturas en los cristales cercanos, inusuales en las plagioclasas.

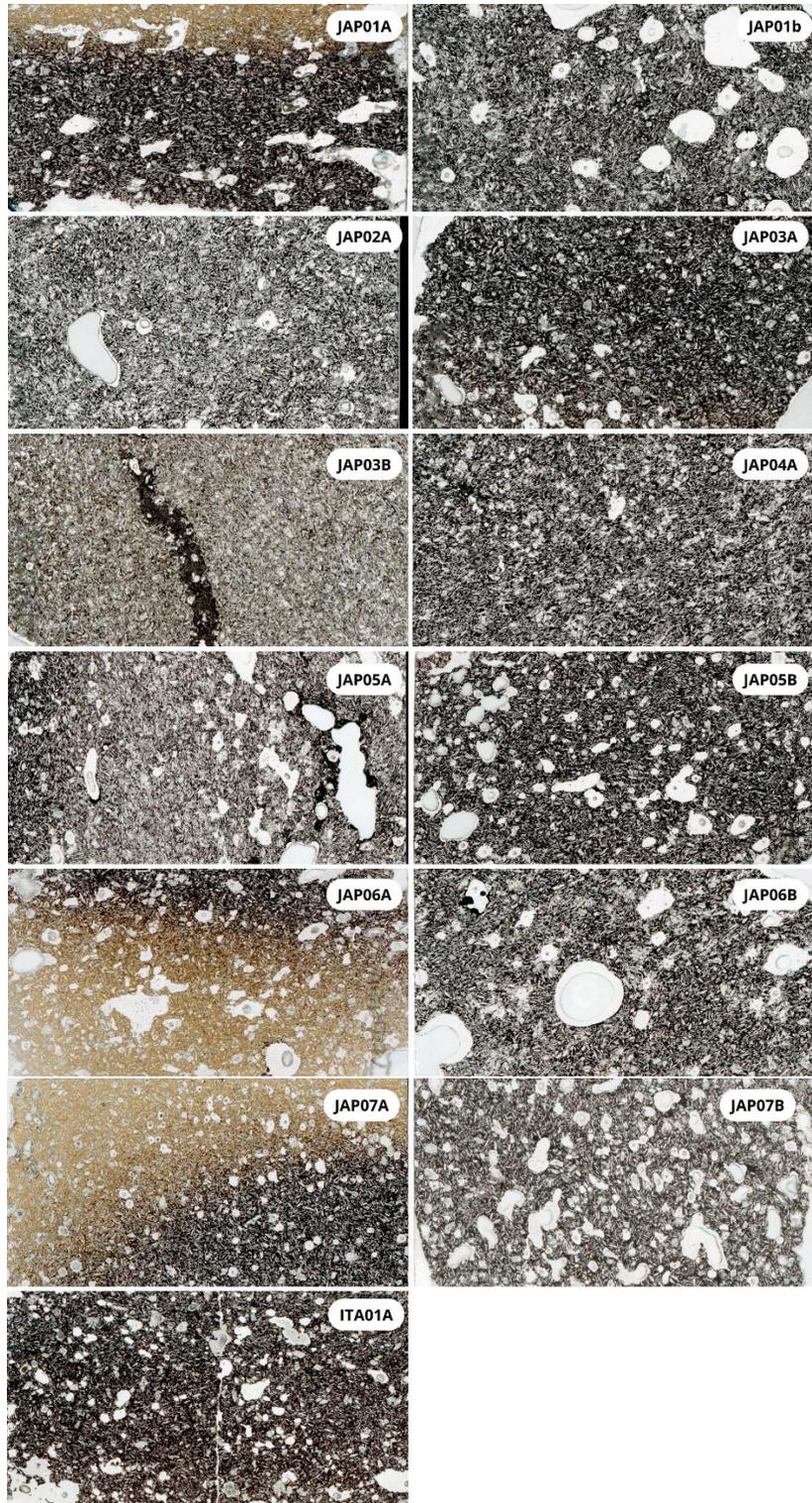


Figura 17. Galería de imágenes de las laminas observadas. Escaneadas a 300dpi.

Anexo 2: Tabla visual de porcentajes

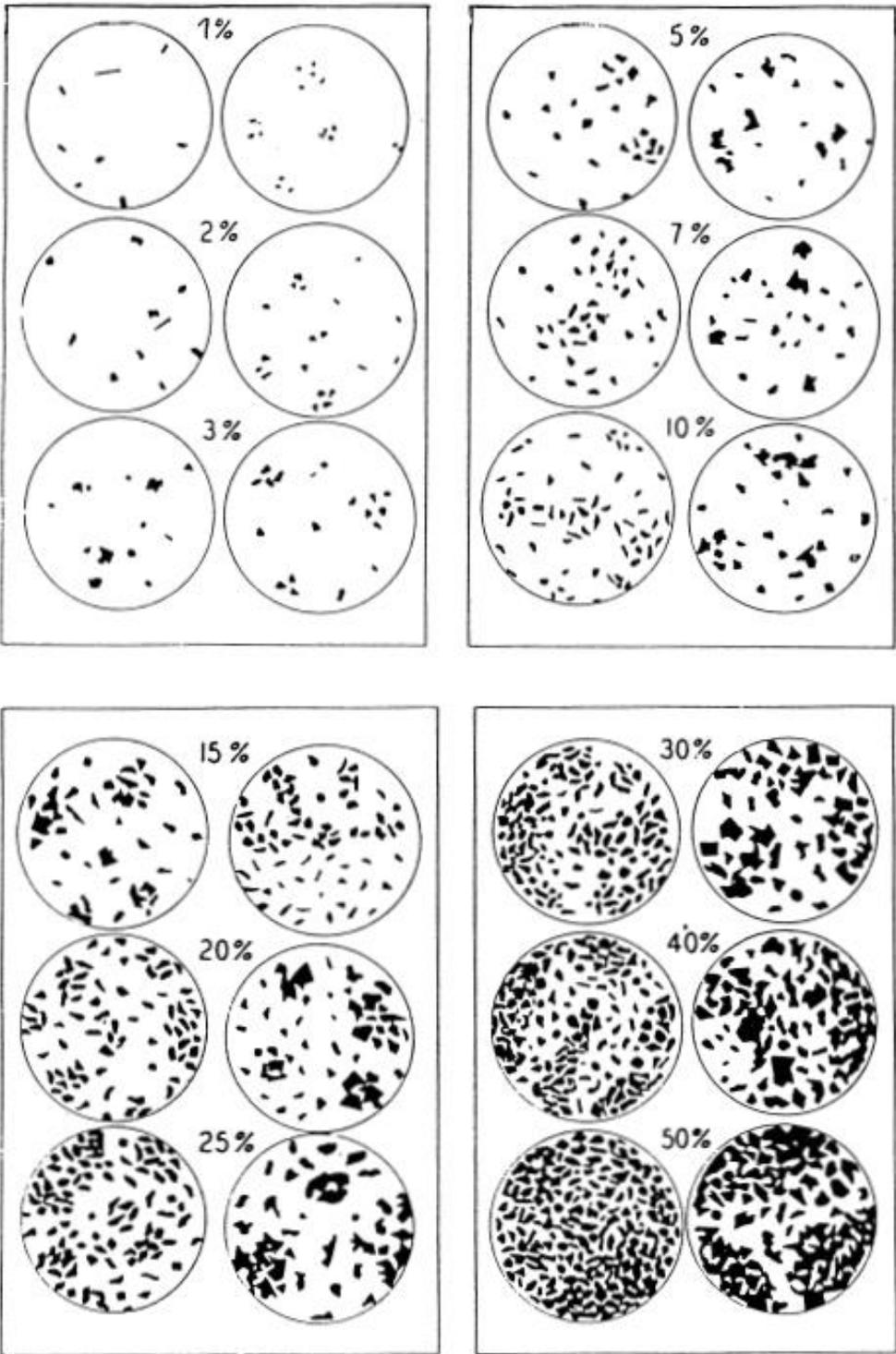


Imagen de: Franco y Gonzalo (2000)

### Anexo 3: Composición del vidrio en muestras de Japón

Tabla A: Composición de vidrio para las muestras de Japón analizadas.

Muestra	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	Total
JAP01A-130	52.01	14.51	9.77	4.48	8.44	3.76	2.72	0.18	1.94	0.83	0.02	0.01	98.67
JAP01A-131	52.26	14.51	9.72	4.52	8.48	3.64	2.67	0.15	1.94	0.83	0.04	0.04	98.79
JAP01A-132	52.13	14.51	9.90	4.48	8.52	3.74	2.71	0.12	1.94	0.81	0.00	0.02	98.89
JAP01A-133	52.03	14.41	9.79	4.49	8.55	3.60	2.71	0.12	1.97	0.80	0.00	0.01	98.48
JAP01A-134	52.16	14.37	10.01	4.51	8.36	3.58	2.69	0.16	2.14	0.83	0.00	0.00	98.81
JAP01A-137	51.82	14.15	9.81	4.40	8.52	3.45	2.66	0.11	2.07	0.82	0.00	0.00	97.80
JAP01A-138	51.97	14.24	9.54	4.43	8.48	3.29	2.76	0.16	2.00	0.87	0.00	0.03	97.77
JAP01A-140	51.90	14.31	9.73	4.43	8.52	3.44	2.69	0.13	2.03	0.86	0.02	0.03	98.08
JAP01A-141	51.86	14.25	9.69	4.44	8.50	3.54	2.70	0.14	1.88	0.81	0.00	0.00	97.81
JAP01A-142	51.94	14.38	9.88	3.91	8.76	3.51	2.79	0.16	1.90	0.80	0.01	0.01	98.06
JAP06A-116	51.57	14.25	9.31	4.53	8.26	3.69	2.60	0.09	1.85	0.86	0.05	0.00	97.05
JAP06A-117	51.77	14.43	9.26	4.48	8.22	3.62	2.59	0.14	1.99	0.79	0.01	0.02	97.32
JAP06A-118	51.96	14.45	9.16	4.46	8.25	3.69	2.62	0.16	1.98	0.82	0.02	0.00	97.57
JAP06A-119	51.83	14.33	9.37	4.48	8.26	3.50	2.62	0.16	1.87	0.84	0.00	0.01	97.28
JAP06A-120	51.39	13.96	9.57	4.61	8.13	3.36	2.65	0.14	2.20	0.85	0.00	0.03	96.89
JAP06A-121	51.36	14.31	8.51	4.23	9.61	3.95	2.65	0.15	1.42	0.79	0.01	0.00	96.98
JAP06A-122	51.74	14.34	9.28	4.53	8.32	3.71	2.63	0.12	1.89	0.83	0.00	0.00	97.39
JAP07A-Vd-1	52.99	14.77	10.00	4.53	8.64	3.86	2.84	0.15	2.16	0.85	0.00	0.02	100.79
JAP07A-Vd-2	52.92	14.68	9.88	4.63	8.62	3.78	2.75	0.18	2.24	0.82	0.00	0.00	100.51
JAP07A-Vd-3	52.93	14.56	9.97	4.50	8.56	3.86	2.78	0.15	2.40	0.84	0.01	0.02	100.59
JAP07A-Vd-4	52.70	14.67	10.02	4.39	8.96	3.63	2.73	0.14	1.94	0.88	0.00	0.00	100.05
JAP07A-Vd-7	52.81	14.75	9.90	4.39	8.75	3.88	2.82	0.16	2.17	0.85	0.04	0.02	100.52
JAP07A-Vd-8	53.13	14.77	10.19	4.60	8.73	3.94	2.70	0.14	2.03	0.85	0.01	0.01	101.10
JAP07A-Vd-9	52.57	14.54	10.54	4.50	8.27	3.72	2.76	0.18	2.22	0.85	0.00	0.00	100.16
JAP07A-Vd-10	53.00	14.73	9.85	4.49	8.71	3.83	2.77	0.13	1.99	0.88	0.00	0.00	100.37
JAP07A-Vd-11	52.77	14.72	9.88	4.45	8.70	3.74	2.69	0.15	1.99	0.84	0.00	0.01	99.93

Tabla B: Composición del estándar de vidrio (VG2) analizado para estimar los errores analíticos.

Muestra	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	Total
Std-VG2-1	50.82	14.03	12.02	6.72	11.29	2.74	1.81	0.16	0.59	0.25	0.00	0.04	100.47
Std-VG2-2	50.75	13.90	11.87	6.65	11.28	2.62	1.14	0.19	0.23	0.25	0.00	0.03	98.90
Std-VG2-3	50.78	13.97	11.94	6.67	11.34	2.71	1.79	0.18	0.21	0.26	0.00	0.00	99.83
Std-VG2-4	50.72	14.05	11.83	6.74	11.39	2.83	1.81	0.17	0.22	0.28	0.00	0.00	100.03
Std-VG2-5	50.77	14.07	11.82	6.74	11.35	2.75	1.81	0.21	0.25	0.24	0.03	0.01	100.03
Std-Vd-11	50.53	13.85	12.05	6.74	11.17	2.84	1.83	0.19	0.23	0.29	0.00	0.03	99.75
Std-Vd-12	50.66	13.84	12.33	6.73	11.14	2.69	1.84	0.19	0.22	0.27	0.02	0.01	99.92
Std-Vd-13	50.68	13.83	12.00	6.71	11.04	2.81	1.83	0.13	0.23	0.26	0.00	0.01	99.52
Std-VG2-14	51.65	14.08	12.22	6.74	11.36	2.63	1.81	0.20	0.23	0.25	0.00	0.00	101.18
Std-VG2-15	50.95	14.01	12.02	6.81	11.17	2.70	1.82	0.19	0.22	0.25	0.00	0.05	100.18
Promedio	50.83	13.96	12.01	6.72	11.25	2.73	1.75	0.18	0.26	0.26	0.00	0.02	
Desv. Est.	0.291	0.096	0.155	0.043	0.109	0.073	0.203	0.022	0.109	0.014	0.009	0.015	

## Anexo 4: Glosario de términos vulcanológicos

<b>Término y sinónimos en inglés</b>	<b>Definición en inglés</b>	<b>Término en español</b>	<b>Definición en español</b>
Aa lava flows, aa lava, aa flows	Hawaiian term for a type of lava flows that have “a rough rubbly surface composed of broken lava blocks called clinkers” (USGS, 2016)	Lava aa	Término hawaiano para “lavas con superficie de bloques ásperos y desiguales y con rugosidades.” (Ingeoexpert, s.f)
Basalt	“Volcanic rock (or lava) that (..) is dark in color (...), contains 45 to 53 percent silica, and is rich in iron and magnesium” (USGS,2016)	Basalto	“Roca ígnea de composición básica y de color mafico, de grano fino que contiene plagioclasa cálcicas y piroxeno (generalmente augita) ± olivino (...) contienen entre 45-53% de sílice, abundante Fe, Mg y Ca, y poco Na y K.” (Universidad de Alicante,2020)
Bell-jar vesicles	Type of vesicles which “are the most striking mega vesicles and occur in the flow-interior. They have an upwardly-convex roof shaped like a belljar, and an upwardly-convex floor with a lesser curvature than the roof.” (Walker, 1991a)	Vesículas de campana	Tipo de vesículas que son las mega vesículas más llamativas y se producen en el interior del flujo. Tienen un techo convexo hacia arriba en forma de campana y un piso convexo hacia arriba con una curvatura menor que el techo.” (traducción de Walker, 1991a)
Billows, billowy	Typical wavy surface of pāhoehoe lava (Macdonald, 1953)	olas, ondulante	Superficie ondulada típica de la lava pāhoehoe (traducción de Macdonald,1953)
Breakout	“a small lobe originating as an outbreak of lava from the molten interior of a previous formed lobe” (Thordarson and Self, 1998)	Fuga	“un pequeño lóbulo que se origina como un brote de lava desde el interior fundido de un lóbulo formado previamente” (traducción de Thordarson y Self 1998)
Cleft	“a space or opening made by cleavage; a split” (WordReference Random House Learner's Dictionary of American English © 2023)	hendidura abrupta, fisura neta, grieta	“un espacio o abertura hecha por escote; una división” (traducción de WordReference Random House Learner's Dictionary of American English © 2023)
Clinkery - lava clinker	loose lava surface fragments that are “exceedingly rough, irregular, and spiny” and characterize the surface of aa lava (Macdonald, 1953)	escoriáceo-lava escoria	fragmentos sueltos de la superficie de lava que son "extremadamente rugosos, irregulares y espinosos" y caracterizan la superficie de la

			lava aa (traducción de Macdonald, 1953)
Columnar joints	Cracks that form as lava cools due to contraction; usually columnar because of heat loss from the upper and lower surface at contact with air and ground, respectively (adapted from several sources; Macdonald, 1967)	Juntas de enfriamiento	“Grietas que se forman cuando la lava se enfría debido a la contracción; generalmente columnar debido a la pérdida de calor de la superficie superior e inferior en contacto con el aire y el suelo, respectivamente” (adaptado y traducido de varias fuentes; traducción de Macdonald, 1967)
Cracks, fractures, gash fractures	“a break without separation of parts” (WordReference Random House Learner's Dictionary of American English © 2023)	Grietas, fracturas, fracturas por cortes.	“una ruptura sin separación de partes” (traducción de WordReference Random House Learner's Dictionary of American English © 2023)
Dense lava	lava “ <u>containing a lot of matter in a small space</u> ” (Cambridge Dictionary, 2024)	lava densa	lava que contiene mucha materia en un espacio pequeño (traducción de Cambridge Dictionary, 2024)
Dike	“tabular or sheet-like bodies of <u>magma</u> that cut through and across the layering of adjacent rocks. They form when magma rises into an existing fracture, or creates a new crack by forcing its way through existing rock, and then solidifies. Hundreds of dikes can invade the cone and inner core of a volcano, sometimes preferentially along zones of structural weakness.” ( <u>USGS, 2016</u> )	Dique	Intrusiones de material volcánico, en estado líquido, que se solidifica en un proceso lento. El material en su ascenso aprovecha fracturas existentes, cortando varias capas de materiales más antiguos del propio volcán y a veces dichas intrusiones pueden dar lugar a erupciones. (IGN, 2024)
Flow lobe	“a single unit of lava surrounded by a glassy (chilled) crust, varying in long dimension from decimeters to several kilometers and up to 60 m thick” (Thordarson and Self, 1998)	lóbulo de flujo	“una sola unidad de lava rodeada por una corteza vítrea (fría), cuya dimensión varía desde decímetros hasta varios kilómetros y hasta 60 m de espesor” (traducción de Thordarson y Self, 1998)
Gas-blisters	Type of vesicular feature which “formed where the vesicles became so close-spaced that they coalesced, and the upper section of the lava parted from the lower section and was up-arched. Floor and roof have a distinctive bubble-wall texture consisting of disrupted vesicles, sometimes with	Ampollas de gas	Tipo de característica vesicular que se formó por vesículas que al ser muy cercanas se fusionaron, separando así la sección superior de lava de la sección inferior arqueándose hacia arriba. Son huecos en forma de cúspide con piso y techo con textura de burbujas (Adaptado y traducido de

	filaments or spike-like extensions where the lava was stretched and then disrupted as roof and floor separated” (Walker 1989) “cusplate-shaped voids with a bubble textured floor and roof” (Thordarson and Self, 1998)		Walker 1989 y Thordarson y Self, 1998)
Gash	“a long, deep wound or cut.” (WordReference Random House Learner's Dictionary of American English © 2023)	brecha	“una herida o corte largo y profundo”. (traducción de Diccionario de inglés americano para estudiantes de WordReference Random House © 2023)
horizontal lava banding	distinctive millimeter to centimeter scale texture that forms on vertical inflation clefts during inflation as a result of brittle-ductile fracturing events during the crack propagation (Hon et al. 1994). “Rough textured bands have spiny glassy veneers, whereas smoother bands are largely crystalline basalt typical of the flow interior.” (Hon et al., 1994)	bandas de lava horizontales	“textura distintiva en escala de milímetro a centímetro que se forma en hendiduras de inflación verticales durante la inflación como resultado de eventos de fractura frágil-dúctil durante la propagación de la grieta (traducción de Hon et al. 1994). "Las bandas de textura rugosa tienen carillas vítreas espinosas, mientras que las bandas más suaves son en gran medida basalto cristalino típico del interior fluido". (traducción de Hon et al., 1994)
Hummocky pāhoehoe , hummocky flow	Type of tube-fed relatively dense pāhoehoe lava flows which developed numerous tumuli structures (Swanson et al.,1973) making a meter-scale irregular relief (Hon et al., 1994)	Pāhoehoe hummocky, flujo hummocky	Tipo de flujos de lava pāhoehoe relativamente densos alimentados por tubos que desarrollaron numerosas estructuras de túmulos (traducción de Swanson et al. 1973) creando un relieve irregular a escala de un metro (traducción de Hon et al., 1994)
Kipuka	“area of land ranging from several square meters to several square kilometers where existing rock of either volcanic or nonvolcanic origin has been completely surrounded, but not covered, by later <u>lava</u> flows.(...) A kipuka that protrudes above the surrounding lava field is classified as a <u>steptoe</u> (q.v.); it results from the branching of a lava stream around a topographic rise. This kind of kipuka can be easily	Kipuka	“área de tierra que está rodeada por coladas de lava jóvenes, es decir, una isla dentro de un mar de lava. Es un terreno que se extiende desde algunos metros hasta varios kilómetros cuadrados, donde la roca, que puede o no ser de origen volcánico, ha sido rodeada, pero no cubierta por lava.” (National Park Service, 2021a)

	distinguished from the <u>adjacent</u> lava flow because it has older vegetation growing on it. A kipuka that is lower than the surrounding lava field forms as a result of irregular lava flow or the union of lava flows from two distinct streams.”(Decker, 2025)		
Lava channel, open channel	“a stream of fluid <u>lava</u> contained within zones of static (i.e., solid and stationary) lava or lava levees.”(Harris, 2008)	canal de lava	“Espacio central de una colada de lava por el que discurre ésta a mayor temperatura. Las paredes (levées) del canal están formadas por la misma lava que constituye las coladas, solidificada por enfriamiento diferencial.”(González, 2024 )
Lava core (in vertical cross-section), inner core	Internal part of lava that is hot and fluid during emplacement (Hon et al. 1994). Coincides with the innermost dense zone in solidified lava sections (Cashman and Kauahikaua, 1997; Self et al., 1998)	Núcleo de lava (en sección transversal vertical), núcleo interior	Parte interna de la lava que es caliente y fluida durante el emplazamiento (traducción de Hon et al. 1994). Coincide con la zona densa más interna en cortes de lava solidificada (traducción de Cashman and Kauahikaua, 1997; Self et al.,1998)
Lava flow	“Rivers of incandescent of molten rock or lava moving downslope or away from an eruption vent” (PHIVOLCS, 2018) “masses of molten rock that pour onto the Earth’s surface during an effusive eruption” ( USGS, 2016) “outpouring of molten rock or magma”(Sigurdsson et al 2000) “a regional subunit formed during a continuous effusive event; may in some cases correspond to a single eruption; may consist of many flow lobes” (Thordarson and Self, 1998)	Colada de lava	“Una efusión de lava en la superficie terrestre desde un punto de emisión o fractura” ( <u>IGN, 2024</u> )
Lava flow field	“a complex body of lava identified on the basis of field relations and chemistry as the product of one eruption; may consist of several lava flows” (Thordarson and Self, 1998)	Campo de flujos de lava	“Un cuerpo de lava complejo identificado con base a relaciones de campo y química como el producto de una sola erupción; puede consistir de varios flujos de lava” (traducción de Thordarson y Self, 1998).

lava flow unit	“a separate period of lava spreading, a few hours, days or weeks apart, during the same eruption” (Wentworth and Macdonald, 1953)	unidad- lóbulo separado- del flujo principal de lava	“un período separado de expansión de lava, con unas pocas horas, días o semanas de diferencia, durante la misma erupción” (traducción de Wentworth y Macdonald, 1953)
Lava inflation	“process that occurs when lava continues to be supplied within a solidified crust of a basaltic lava flow, causing the flow surface to be lifted upward. Inflation can cause lava flows to substantially thicken and create other features such as tumuli, inflation pits, and inflation clefts to form”. “occurs only in pāhoehoe flows that were emplaced as sheets. Sheet flows may form in areas with gentle slopes. Flows inflate when lava supply exceeds its ability to spread laterally due to cooling and solidification of its surface and along its margins.” (NPS, 2023)	inflación de lava	“proceso que ocurre cuando la lava continúa siendo suministrada dentro de una corteza solidificada de un flujo de lava basáltica, lo que hace que la superficie del flujo se eleve hacia arriba. La inflación puede hacer que los flujos de lava se espesen sustancialmente y creen otras características como túmulos, pozos de inflación y hendiduras de inflación”.; “ocurre sólo en flujos pāhoehoe que se emplazaron como láminas. Se pueden formar flujos laminares en áreas con pendientes suaves. Los flujos aumentan cuando el suministro de lava excede su capacidad de extenderse lateralmente debido al enfriamiento y solidificación de su superficie y a lo largo de sus márgenes”. (traducción de NPS, 2023)
Lava inflation cleft	“axial or star-like system of deep clefts that characterize tumuli” (Walker 1991) “vertical uplift scarps (...) that form when the actively inflating interior of the flow becomes physically detached from the stagnated margin” (Hon et al., 1994)	hendidura en inflación- hinchamiento- de lava	“sistema axial o en forma de estrella de hendiduras profundas que caracterizan a los túmulos” (traducción de Walker 1991) “escarpes de elevación vertical (...) que se forman cuando el interior del flujo que se infla activamente se separa físicamente del margen estancado” (traducción de Hon et al., 1994)
Lava levées	“natural banks along the sides of lava flowing in a channel. They develop on the chilled margins of a lava flow and may be higher than the surface of the flowing lava flow if flow rate decreases.” (NPS,2024)	levee-dique natural- morrena lateral-de lava	“bancos naturales a lo largo de los lados de lava que fluye en un canal. Se desarrollan en los márgenes fríos de un flujo de lava y pueden estar más altos que la superficie del flujo de lava si el caudal disminuye.” (traducción de NPS, 2024)

Lava lobe	“smallest coherent package of lava” ; “typical advancing pāhoehoe lobes (...) are 20-50 cm thick, 20-300 cm wide and 0.5-5 m long” (Self et al., 1998)	lóbulo de lava	“paquete coherente más pequeño de lava”; “Los típicos lóbulos pāhoehoe que avanzan (...) tienen entre 20 y 50 cm de espesor, 20-300 cm de ancho y 0,5-5 m de largo” (traducción de Self et al., 1998)
Lava lower crust (in vertical cross-section)	Lowermost, solid layer of lava that is rapidly chilled upon surface emplacement and thickens upwards during cooling (Hon et al 1994). Coincides with the lower vesicular zone in solidified lava sections (Cashman and Kauahikaua, 1997).	corteza inferior de lava	Capa inferior solidificada de lava que se enfría rápidamente durante el emplazamiento en la superficie y crece hacia arriba durante el enfriamiento (Hon et al 1994). Coincide con la parte inferior vesiculada en cortes de lava solidificada (Cashman and Kauahikaua, 1997).
Lava rise (Walker 1991 b), lava rise plateaus, sheet lobe (Thordarson and Self 1998), sheet flow (Hon et al. 1994), pressure plateaus (Wentworth and Macdonald 1953)	<p>“broad areas of lava, generally pāhoehoe , that have been bodily elevated by the intrusion of new fluid lava into the lower, still uncongealed part of the flow without the addition of any new lava at the surface”</p> <p>“generally formed on thick ponded flows, in which the lower parts may remain fluid for many weeks” (Wentworth and Macdonald, 1953)</p> <p>“flat-surfaced uplift formed (...) by injection of lava under a surface crust” (Walker 1991)</p> <p>“lava flows with smooth upper surfaces of relatively little relief” (...) that “have been uniformly uplifted and are nearly horizontal. Flow margins are defined by steeply tilted slabs of crust or vertical scarps”</p> <p>“originally propagated as thin layers of fluid pāhoehoe lava 10-50 cm thick that later inflated to as much as 4 m in thickness” (Hon et al., 1994)</p> <p>“a lobe with a flat or gently undulating flow surface produced by one continuous outpouring and injection of lava; much wider and longer than thick, and can be tens to thousands of meters in long dimensions” (Thordarson and Self, 1998)</p>	Aumento de lava (Walker, 1991b), mesetas de ascenso de lava, lóbulo laminar (Thordarson y Self, 1998), flujo laminar (Hon et al., 1994), mesetas de presión (Wentworth y Macdonald, 1953)	<p>“amplias áreas de lava, generalmente pāhoehoe , que han sido elevadas corporalmente por la intrusión de nueva lava fluida en la parte inferior, aún no congelada, del flujo sin la adición de nueva lava en la superficie” “generalmente formadas en espesos flujos estancados, en los cuales las partes inferiores pueden permanecer líquidas durante muchas semanas” (traducción de Wentworth y Macdonald, 1953)</p> <p>“levantamiento de superficie plana formado (...) por inyección de lava debajo de una corteza superficial” (traducción de Walker, 1991 b)</p> <p>“flujos de lava con superficies superiores lisas y de relativamente poco relieve” (...) que “han sido elevadas uniformemente y son casi horizontales. Los márgenes de flujo están definidos por losas de corteza muy inclinadas o escarpes verticales”</p> <p>“originalmente propagadas como capas delgadas de lava pāhoehoe fluida de 10 a 50 cm de espesor que luego se inflaron hasta alcanzar 4 m de espesor” (Hon et al., 1994).</p> <p>“un lóbulo con una superficie de flujo plana o suavemente</p>

			ondulada producida por un continuo derramamiento e inyección de lava; mucho más ancho y largo que grueso, y puede tener entre decenas y miles de metros de largo” (traducción de Thordarson y Self, 1998)
Lava toe, pāhoehoe toe	Tens of centimeters-size, round-shape lava lobe that forms along a moving pāhoehoe flow front that progresses by the “successive protrusion of one small bulbous toe after another” (Macdonald, 1953)	protuberancias de lava, en forma de dedos	Lóbulo de lava de forma redonda y de decenas de centímetros de tamaño que se forma a lo largo de un frente de flujo pāhoehoe en movimiento que progresa mediante la “protrusión sucesiva de un pequeño dedo bulboso tras otro” (traducción de Macdonald, 1953)
Lava tongue, pāhoehoe tongue	Narrow lobe of lava meters to tens of meters in size (Swanson et al., 1973)	lengua de lava	Lóbulo estrecho de lava de metros a decenas de metros de tamaño (traducción de Swanson et al 1973)
Lava tubes	<p>“Natural conduits through which lava travels beneath the surface of a lava flow.(...) commonly exhibit "high-lava" marks on their walls, generally flat floors, and many lava stalactites that hang from the roof. Lava can also erode downward, deepening the tube and leaving empty space above the flowing lava.”( <a href="#">USGS, 2016</a>)</p> <p>“In their simplest form, lava tube caves are long tunnels of uniform diameter oriented down the slope of the volcano from which they had their origin. Their roofs and walls consist of solidified lava. In some cases, the floor is covered with sand or other unconsolidated material that has been washed into the cave by water. The roof of a lava tube commonly breaks down, and some caves of this type are littered with blocks of fallen ceiling material. Complete collapse of segments of the roof forms skylights.” (White, 2025)</p>	Tubos de lava	<p>“<u>cuevas volcánicas</u>, usualmente con forma de túneles, formados en el interior de <u>coladas lávicas</u> más o menos fluidas mientras dura la actividad” (National Park Service, 2021b)</p> <p>“Son largos túneles de diámetro uniforme orientados hacia la ladera del volcán del que tuvieron su origen. Sus techos y paredes están hechos de lava solidificada. En algunos casos, el suelo está cubierto de arena u otro material no consolidado que ha sido arrastrado hacia la cueva por el agua. El techo de un tubo de lava comúnmente se rompe y algunas cuevas de este tipo están llenas de bloques de material del techo caído. El colapso completo de segmentos del techo forma "tragaluces"”. (traducción de White, 2025)</p>

Lava upper crust (in vertical cross-section), upper vesicular zone	Outermost solid layer of lava that is rapidly chilled upon surface emplacement and thickens downwards during cooling (Macdonald 1967; Hon et al 1994). Coincides with the upper vesicular zone in solidified lava sections (Cashman and Kauahikaua, 1997; Self et al., 1998).	Corteza superior de lava (en sección transversal vertical), zona vesicular superior	Capa externa sólida de lava que se enfría rápidamente durante el emplazamiento de la lava en la superficie y crece hacia abajo durante el enfriamiento (Macdonald, 1967; Hon et al., 1994). Coincide con la zona superior vesiculada en cortes de lava solidificada (Cashman and Kauahikaua, 1997; Self et al., 1998).
Lava wedges	V-shape protrusion formed as the inflation fracture propagates within the viscoelastic lava (Hamilton et al., 2020)	Cuñas de lava	“Protuberancia en forma de V formada a medida que la fractura de inflación se propaga dentro de la lava viscoelástica” (traducción de Hamilton et al., 2020)
Lava-rise edges	“highly distinctive margins with steep banded and striated surfaces upon which lava inflation was accommodated” (Walker, 2009)	Bordes de lava	“márgenes muy distintivos con superficies empinadas con bandas y estriadas sobre las cuales se acomodó la inflación de lava” (traducción de Walker, 2009)
Lava-rise pits (Walker 1991), inflation pits	“Pits formed (...) at places where the lava surface failed to be elevated; thus they are pits because the lava around them rose” “the walls of each pit are identical in character to the edges of lava rises”; “they generally widen downward and the surface crust forms an overhang around the top” (Walker, 1991b)	Pozos de lava, pozos de inflación	“Se formaron hoyos (...) en lugares donde la superficie de lava no logró elevarse; por lo tanto, son pozos porque la lava a su alrededor se elevó” “las paredes de cada pozo son de carácter idéntico a los bordes de los niveles de lava”; “generalmente se ensanchan hacia abajo y la corteza superficial forma un saliente alrededor de la parte superior” (traducción de Walker, 1991b)
Lava-rise sutures	“occur between contiguous lava-rises or lava lobes that inflated synchronously against each other” “in cross-section these features have the aspect of facing stacks of lava wedges” (Walker, 2009)	Suturas de lava	“ocurren entre elevaciones de lava contiguas o lóbulos de lava que se inflaron sincrónicamente entre sí” “en sección transversal, estas características tienen el aspecto de pilas de cuñas de lava enfrentadas” (traducción de Walker, 2009)
Monogenetic volcano	“A volcano that erupts only once” (Sigurdsson et al., 2000)	Volcán Monogenético	“Un volcán que se ha construido durante una sola erupción” (IGN, 2024)
Pāhoehoe lava flows, pāhoehoe flows, pāhoehoe surface morphology	Hawaiian term for a type of lava flows which “have smooth flow surfaces often deformed into elaborate ropes and	Lava pāhoehoe , colada pāhoehoe	Término hawaiano para un tipo de flujos de lava “que presentan una superficie de aspecto suave y vítreo y con estructuras cordadas muy características”

	festoons” (Cashman and Kauahikaua, 1997)		(Universidad Complutense de Madrid,2013)
Pillow lavas	“Lava emplaced in shallow water (ponds, lakes) that form lobes that are poorly-vesicular, round in shape, with well-developed radial joints, and with interstitial spaces commonly filled with fine glassy debris, its alteration products, or sedimentary material” (Macdonald, 1953)	lavas acojinadas o almohadilladas	Masas de lavas, con forma de grandes almohadas (o sacos), que se intercalan. Ese tipo de formaciones indican efusiones de lavas en ambientes subacuáticos. (IGN, 2024)
Pipe-vesicles	“Pipe vesicles are empty tubes typically 5 ±3 mm in diameter and from ten to several tens of centimetres long. If filled with secondary minerals, they are known as pipe amygdals. The walls of pipe vesicles, which are sharp and smooth, consist of massive basalt, not vesicular basalt (...) Within a limited volume of rock, pipe vesicles are regularly spaced (typically several centimetres apart), and they are parallel.” (Philpotts and Lewis, 1987)	vesículas tabulares	“Las vesículas tubulares son tubos vacíos que suelen tener entre 5 ± 3 mm de diámetro y entre diez y varias decenas de centímetros de largo. Si están llenas de minerales secundarios, se conocen como amígdalas tubulares. Las paredes de las vesículas tubulares, que son afiladas y lisas, consisten en basalto masivo, no en basalto vesicular (...) Dentro de un volumen limitado de roca, las vesículas tubulares están espaciadas regularmente (normalmente varios centímetros entre sí) y son paralelas.” (traducción de Philpotts and Lewis, 1987)
Planet core	“Earth’s core is the very hot, very dense center of our planet. The ball-shaped core lies beneath the cool, brittle crust and the mostly solid mantle. The core is found about 2,900 kilometers (1,802 miles) below Earth’s surface, and has a radius of about 3,485 kilometers (2,165 miles).” (National Geographic,2024)	Núcleo (del planeta)	“Es una esfera de 3.400 km de radio que constituye la parte más interna de la Tierra y está compuesta principalmente de hierro.” (Enciclopedia humanidades, 2024)
Ropes, corded structures, ropy (or corded), festooned	“Flexible crusts ruck into tight folds before chilling. Surface resembles a segment of coiled rope. Each “rope” can be centimeters thick” “series of small cordlike ridges, commonly aligned parallel to the direction of flow”; “may be superimposed on still larger	ropes,estructuras cordadas, cordada,	“Las cortezas flexibles se arrugan formando pliegues apretados antes de enfriarse. La superficie se asemeja a un segmento de cuerda enrollada. Cada “cuerda” puede tener centímetros de espesor” “serie de pequeñas crestas en forma de cordón, comúnmente

	<p>ropelike convolutions of the crust” (Wentworth and Macdonald, 1953)</p> <p>“regular train of corrugations a few cm in height oriented so that their long axes are perpendicular to the direction of flow” (Fink and Fletcher, 1978)</p> <p>“in general, the ropes develop in places where the velocity of the lava surface decreases, and the resultant pile-up of material causes compression parallel to the direction of flow” (Fink and Fletcher, 1978)</p>		<p>alineadas paralelas a la dirección del flujo”; “pueden superponerse a circunvoluciones de la corteza aún más grandes en forma de cuerdas” (traducción de Wentworth y Macdonald, 1953)</p> <p>“tren regular de corrugaciones de unos pocos cm de altura orientados de manera que sus ejes largos sean perpendiculares a la dirección del flujo” (traducción de Fink y Fletcher, 1978)</p> <p>“En general, las cuerdas se desarrollan en lugares donde la velocidad de la superficie de la lava disminuye, y la acumulación resultante de material provoca una compresión paralela a la dirección del flujo” (traducción de Fink y Fletcher, 1978).</p>
Slabby pāhoehoe , slab pāhoehoe	a type of lava flows that are covered by “slabs of broken crust, up to meters across and centimeters thick” (Sigurdsson et al., 2000)	pāhoehoe - lava cordada- en losa	Tipo de flujos de lava que están cubiertos por “losas o placas de corteza rota, de hasta varios metros de extensión y centímetros de espesor” (traducción de Sigurdsson et al., 2000)
Spiny surface, spinose, shark-skin surface; filamented surface	Surfaces of pāhoehoe flows that “are covered with innumerable tiny spicules and spines produced by the escape of gas from the lava surface, each bubble dragging with it a filament of the enclosing liquid. The liquid dragged upward by the escaping bubble quickly chills, sometimes leaving a small upright spine a millimeter or more high” (Wentworth and Macdonald 1953)	Superficie espinosa, espinosa (con espículas), superficie de piel de tiburón; superficie filamentosa	“Superficies de flujos pāhoehoe que “están cubiertas de innumerables espículas y espinas diminutas producidas por el escape de gas de la superficie de lava, arrastrando cada burbuja consigo un filamento del líquido que la encierra. El líquido arrastrado hacia arriba por la burbuja que escapa se enfría rápidamente, dejando a veces una pequeña columna vertical de un milímetro o más de altura” (traducción Wentworth y Macdonald, 1953).
Squeeze-up	“dikelike autointrusions of fluid matter from the lower part of the flow into fractures in the crust” (Wentworth and Macdonald, 1953)	extrusión pequeña de lava viscosa	“auto intrusiones en forma de diques de materia fluida desde la parte inferior del flujo hacia fracturas en la corteza” (traducción de Wentworth y Macdonald, 1953)

<p>Striations, grooves, scratches</p>	<p>“a <u>pattern of lines or grooves</u> on the <u>surface</u> of something”, “a <u>long, narrow, hollow space cut</u> into a <u>surface</u>”(Cambridge dictionary, 2024) Structures that are formed “wherever moderately to highly viscous but still plastic lava, either aa or pāhoehoe , moves past an irregular edge or surface of more rigid lava or other rock, or is rubbed by such rigid rock moving past it”; “resemble glacial striations or slickensides on a fault surface, but generally may be distinguished from those by the minutely rough, granular, or spinose character of the surface”; “very common on the sides of linear squeeze-ups” (Wentworth and Macdonald, 1953)</p>	<p>estriación, surco, estriaciones</p>	<p>“un patrón de líneas o surcos en la superficie de algo”, “un espacio largo, estrecho y hueco cortado en una superficie”(traducción de Cambridge Dictionary, 2024) Estructuras que se forman “dondequiera que lava de moderada a altamente viscosa pero aún plástica, ya sea aa o pāhoehoe , pase por un borde o superficie irregular de lava más rígida u otra roca, o sea frotada por dicha roca rígida que pasa a su lado”; “se asemejan a estrías glaciales o lados resbaladizos en la superficie de una falla, pero generalmente se pueden distinguir de ellas por el carácter diminutamente rugoso, granular o espinoso de la superficie”; “muy común en los lados de contracciones lineales” (traducción de Wentworth y Macdonald,1953)</p>
<p>Tumuli/tumulus, lava ridges, pressure ridge</p>	<p>“broad swelling of the lava surface” (Francis and Oppenheimer 2004) “created when the upward pressure of slow-moving molten lava within a flow swells or pushes the overlying crust upward“ ( USGS, 2016) “small dome-shaped structures on flow surfaces that are usually less than 10 m high. They are formed when pressure within an inflating lava flow buckles the lava solidified crust” (NPS,2024) “mounds or whaleback ridges 1 to 10 m high (...) deeply gashed by systema of axial to more or less radial gaping clefts” (Walker, 1991b) “domical upbowings of the flow surface, typically elliptical in plan”, “generally cracked open along the summit, the crack paralleling the long axis of the dome” (Wentworth and Macdonald, 1953)</p>	<p>Túmulos/túmulos, crestas de lava, crestas de presión</p>	<p>Hinchazón de la superficie de lava creada por la presión ascendente de lava fundida de lento movimiento dentro de un flujo, presentan pequeñas estructuras en forma de cúpula o domo sobre superficies de flujo que suelen tener menos de 10 m de altura, profundamente cortadas por sistemas de hendiduras abiertas de axiales a más o menos radiales,típicamente de planta elíptica,generalmente abiertos a lo largo de la cima, la grieta es paralela al eje longitudinal de la cúpula (Adaptado y traducido de varias fuentes)</p>

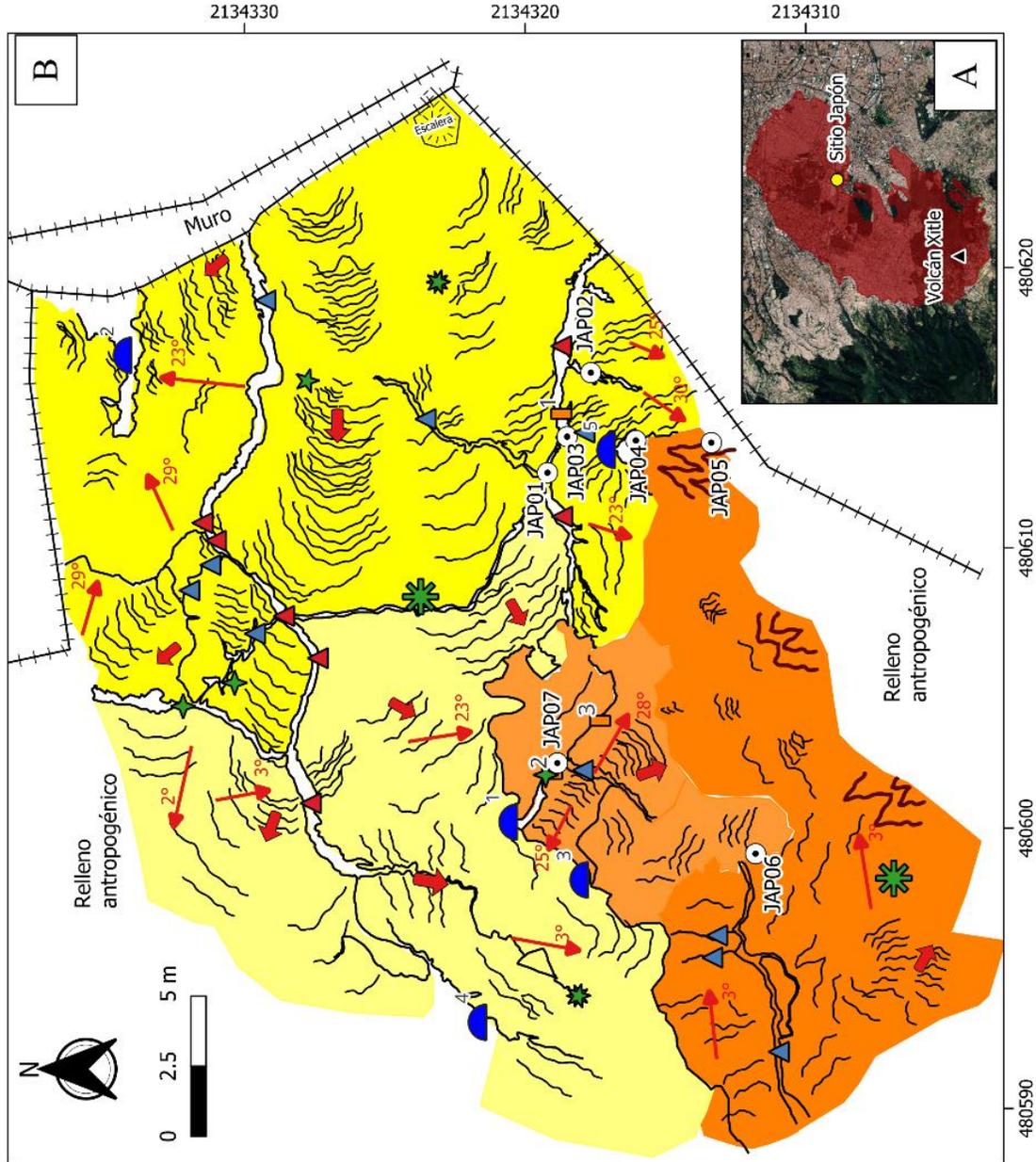
Vertical cross sections - general	“A diagram of a vertical section through a volume, as opposed to the bird's-eye perspective or plan view of a map. (...) They serve to show the types and orientations of subsurface structures and formations.” (Traducción de SLB, 2024)	Sección transversal vertical	“Un diagrama de una sección vertical a través de un volumen, en contraposición a la perspectiva a vuelo de pájaro o vista en planta de un mapa. (...) sirven para mostrar los tipos y orientaciones de las estructuras del subsuelo y las formaciones” (SLB, 2024)
Vesicle cylinders	“Vesicle cylinders appear to form as vertically elongated diapirs of low density vesicular basalt that rise through denser massive basalt” (Philpotts and Lewis, 1987)	cilindro vesicular o vacuolar	“Los cilindros de vesículas parecen formarse como diapiros verticalmente alargados de basalto vesicular de baja densidad que se elevan a través de basalto masivo más denso.” (traducción de Philpotts and Lewis, 1987)
Vesicle zone, vesicular zone (in vertical cross-section)	“decimeter to meter thick horizons with >10 vol% of macroscopic vesicles” (Thordarson and Self, 1998)	Zona de vesículas, zona vesicular (en sección transversal vertical)	“horizontes de decímetro a metro de espesor con >10% en volumen de vesículas microscópicas” (traducción de Thordarson y Self, 1998)
Vesicles	“a small cavity in an aphanitic or glassy igneous rock, formed by expansion of a bubble of gas or steam during solidification of the rock.” ( <a href="https://sites.wustl.edu/meteoritesite/items/vesicles-in-meteorites/">https://sites.wustl.edu/meteoritesite/items/vesicles-in-meteorites/</a> ) “molds of gas-filled voids frozen in the lava, referred to as microscopic (<2 mm in diameter) and macroscopic (>2 mm)” (Thordarson and Self, 1998)	Vesículas (vacuola)	“Pequeña cavidad en una roca ígnea afanítica o vítrea, formada por la expansión de una burbuja de gas o vapor durante la solidificación de la roca.”(traducción de <a href="https://sites.wustl.edu/meteoritesite/items/vesicles-in-meteorites/">https://sites.wustl.edu/meteoritesite/items/vesicles-in-meteorites/</a> ) “moldes de vacíos llenos por gas congelados en la lava, referidos como microscópicos (<2 mm en diámetro) y macroscópicos (>2 mm) (Thordarson y Self, 1998)
Vesicular subhorizontal bands, vesiculation zone, horizontal vesicle sheets (in vertical cross-section)	“sheets of vesicular segregated material” (Thordarson and Self, 1998) “typically 1-5 cm thick, have knife-sharp boundaries, and have 10-cm scale irregularities reflecting the uneven topography of the base of the upper crust” (Self et al., 1998)	Bandas vesiculares subhorizontales, zona de vesiculación, láminas de vesículas horizontales (en sección transversal vertical)	“láminas de material segregado vesicular” (traducción de Thordarson y Self, 1998) que son “típicamente de 1 a 5 cm de espesor, tienen límites afilados como cuchillos e irregularidades de escala de 10 cm que reflejan la topografía desigual de la base de la corteza superior” (traducción de Self et al., 1998)
Vesicularity	“The volume percent of bubbles in a melt or the volume percent of vesicles in pumice” (Sigurdsson et al., 2000)	Vesicularidad	“El porcentaje en volumen de burbujas en el magma fundido o el porcentaje en volumen de vesículas en pómez” o escoria

			(traducción de Sigurdsson et al., 2000)
Vesiculation	"Nucleation and growth of gas bubbles in a magma" (Sigurdsson et al., 2000)	vesiculación, formación de vesículas	"Nucleación y crecimiento de burbujas de gas en un magma." (traducción de Sigurdsson et al., 2000 )

## Anexo 5: Mapa Japón

# Mapa Japón

Simbología	
<b>Sectores de unidad</b>	
	Sector 1
	Sector 2
	Sector 3
	Sector 4
	Dirección y ángulo de inclinación en la superficie de la colada
	Dirección de emplazamiento
<b>Grietas</b>	
	Someras (<100 cm de profundidad)
	Profundas (>100 cm de profundidad)
<b>Estructuras</b>	
	Cordadas
	Cascajo
	Grietas
<b>Puntos de referencia</b>	
	Pirul
	Agave
	Moulenbergia robusta
	Palo loco
	Muestra
	Perfil
	Cuevas



Mexico ITRF92 / UTM zone 14N

## Anexo 6: Mapa Italia

