



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
DR. VICTOR HUGO GARDUÑO MONROY



# **Reconstrucción estratigráfica y grado de soldamiento de la secuencia ignimbrítica de la caldera Atécuaro**

## **Tesis**

Para obtener el grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS**

Con especialidad en

**GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

Presenta:

**Lic. José Guadalupe Correa Gómez**

Directora interna: **Dra. Martha Gabriela Gómez Vasconcelos**  
Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra  
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Director externo: **Dr. Antonio Pola Villaseñor**  
Escuela Nacional de Estudios Superiores – Unidad Morelia  
Universidad Nacional Autónoma de México

Morelia, Michoacán.

Junio 2022



## Agradecimientos

Agradezco infinitamente a mi asesora la **Dra. Martha Gabriela Gómez Vasconcelos** por sus valiosas enseñanzas, por sus consejos, por sus comentarios, por su confianza, por su apoyo incondicional, su motivación a continuar, por su tiempo y por interés en mi formación académica a lo largo de este trabajo de tesis.

Muchas gracias a mi co-asesor el **Dr. Antonio Pola** por su tiempo, sus conocimientos y su confianza a lo largo de este trabajo de tesis.

Agradezco muchísimo al **Dr. Denis Ramón Avellán López** por su apoyo, recomendaciones y comentarios durante el trabajo de campo.

Gracias a mis sinodales, **La Dra. Isabel Israde, Dr. Ángel Figueroa** y nuevamente al **Dr. Denis Ramón Avellán López** por sus valiosos comentarios y tomarse el tiempo de revisar este trabajo, que sin duda enriquecieron este escrito final.

Agradezco a **CONACYT** por la beca otorgada para realizar mis estudios de maestría.

Agradezco al **Instituto de Investigación en Ciencias de La Tierra** por proporcionarme un lugar en el cual pudiera realizar y finalizar este trabajo de tesis.

Agradezco a la **Unidad de Petrofísica** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia por permitirme la realización de las diferentes pruebas de laboratorio que involucraron este trabajo de tesis, así mismo agradezco a **Hugo Sereno, Julio Andrade** y a las diferentes personas pertenecientes a la unidad que me apoyaron en las diferentes pruebas

Agradezco al **Mtro. Guillermo Cisneros Máximo** por su apoyo durante el trabajo de campo, por sus consejos y comentarios para la elaboración de mapas.

Agradezco a la **Unidad de Sistemas de Información Geográfica, Laboratorio de Análisis de Riesgo (USIG-LAR)** del Instituto de Geofísica Unidad Michoacán a cargo del **Mtro. Guillermo Cisneros**, por la información proporcionada para este trabajo de tesis.

---



Agradezco al **Mtro. Felipe García** y al **Laboratorio de Petrografía** del Instituto de Geofísica Unidad Michoacán por permitirme realizar la elaboración de mis laminas delgadas.

Agradezco a **Madelaine Martínez** y **Silvestre Cardona** por recibirme tan cordialmente, por los cafés y sobre todo gracias por la motivación que me dieron cada que iba a verlos al Instituto.

Agradezco a mi familia por todo su apoyo en especial a mi madre **Crescenciana Gómez** por todo el esfuerzo, motivación, cariño, amistad y por el gran apoyo que ha sido y será a lo largo de las diferentes etapas de mi vida.

Agradezco a mis amigos y compañeros del área de estudio, **Itzayana Torres, Lola, Néstor, Salvador, Karla, Ruth y Estrella**, por esos momentos de diversión, por las aventuras y por el apoyo brindado.

Muchas gracias a mis amigos de la licenciatura, **Vane, Liz, Homero, Dani, Luz, Pamela y Paulina**, por los momentos de diversión, por la motivación, por los momentos de alegría y por su amistad.

Gracias a mis compañeros y amigos de juego, **Miguel López, Jesús García, Anna Aguilera, Pablo Loaiza y Arturo Monroy** por esos momentos de diversión, de estrés y por estar en los momentos en los que necesitaba unas buenas risas.

Con todo mi amor y cariño mil gracias a **Mario Díaz** por mil razones, pero sobre todo por compartir su vida conmigo.

Finalmente, muchas gracias a todas las personas que han contribuido en el desarrollo de este trabajo de tesis, en mi formación y en mi desarrollo personal.

---



## *Índice*

|   |    |
|---|----|
| Lista de figuras y tablas .....                                     | i  |
| Resumen .....   | v  |
| Abstract.....   | vi |
| <br>  |    |
| 1 Introducción.....   | 1  |
| 1.1 Justificación .....   | 2  |
| 1.2 Planteamiento del problema.....                                 | 3  |
| 1.3 Objetivos.....  | 3  |
| 1.4 Hipótesis .....   | 4  |
| 2 Marco teórico.....  | 5  |
| 3 Marco geológico - estructural.....                                | 10 |
| 4 Localización del área de estudio.....                             | 15 |
| 5 Antecedentes.....   | 17 |
| 6 Metodología.....  | 20 |
| 6.1 Trabajo de gabinete.....  | 20 |
| 6.2 Trabajo de campo.....   | 21 |
| 6.3 Trabajo de Laboratorio .....                                    | 22 |
| 6.3.1 Corte y preparación de especímenes .....                      | 23 |
| 6.3.2 Caracterización física .....                                  | 25 |
| 6.3.3 Caracterización Mecánica.....                                 | 33 |
| 7 Resultados.....   | 36 |
| 7.1 Estratigrafía de la caldera Atécuaro .....                      | 36 |
| 7.2 Análisis estructural .....                                      | 48 |
| 7.3 Petrografía.....  | 49 |
| 7.4 Caracterización física.....                                     | 55 |
| 7.4.1 Estudios texturales con base en análisis de imágenes 2D ..... | 55 |

---



---

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 7.4.2 | Densidad .....  | 58 |
| 7.4.3 | Porosidad .....   | 59 |
| 7.5   | Caracterización Mecánica.....   | 60 |
| 7.5.1 | Descripción de fracturas en pruebas de tensión.....   | 61 |
| 8     | Discusión .....   | 67 |
| 8.1   | Litofacies de la ignimbrita Atécuaro .....  | 67 |
| 8.2   | Recomendaciones para el aprovechamiento de la ignimbrita y la planificación del Territorio..... | 74 |
| 8.3   | Implicaciones de la dinámica eruptiva en el grado de soldamiento.....                           | 72 |
| 9     | Conclusiones.....   | 75 |

---



## Lista de figuras y tablas

### Figuras

- Figura 1 Origen de los flujos piroclásticos a) Colapso de columna eruptiva Pliniana, b) Corriente sostenida derivada de una fuente piroclástica prolongada, c) corriente sostenida derivada de una prolongada erupción piroclástica explosiva baja, d) Corriente con un solo (o múltiple) oleaje derivado de explosiones laterales iniciadas por una descompresión catastrófica de un sistema magmático y/o hidrotermal, e) Corriente piroclástica de densidad derivada de un colapso de domo de lava o flujo frontal, f) Corriente de densidad piroclástica derivada de depósitos causada por el colapso gravitacional y avalancha de ignimbrita suelta e inestable. Tomado y editado de Branney y Kokelaar (2002). ..... 6
- Figura 2 Diferentes grados de soldamiento de la ignimbrita, a) Ignimbrita poco soldada, b) Ignimbrita soldada, Tomado de Geology - rocks and minerals, s/f..... 8
- Figura 3 Idealización lateral y vertical de las diferentes zonas de soldamiento en una unidad simple en enfriamiento. Tomada y modificado de Fisher y Schmincke (1984)..... 8
- Figura 4 Localización, división y distribución del cinturón volcánico trans-Mexicano (CVTM). Sectores en los que se divide el CVTM: Sector Occidental (SOc), Sector Central (SC), Sector Oriental (SOOr). Claves en la figura: Placa Cocos (PC), Placa de Rivera (PR), Placa Norteamericana (PNA) y Trinchera Mesoamericana (TMA). Ciudades principales que se encuentran en la CVTM: Tepic (Tep), Guadalajara (Gdl), Morelia (Mor), Querétaro (Qro), Ciudad de México (CDMX) y Puebla (Pue), el rectángulo rojo representa la zona de estudio. 12
- Figura 5 Mapa geológico simplificado de la cuenca del lago de Cuitzeo, en la parte sur se encuentra la Sierra de Mil Cumbres. Tomado de Gómez-Vasconcelos et al. (2021). ..... 13
- Figura 6 Mapa representativo de las diferentes vías de acceso (caminos y carreteras) (líneas negras) que conectan a la caldera de Atécuaro (polígono rosa). ..... 16
- Figura 7 Imagen de una pómez donde se ilustra cómo es la medición de sus ejes principales, siendo la línea negra la representación de la medición de la longitud y la línea azul la medición del ancho de la pómez. .... 23
- Figura 8 Equipo de corte y preparación de muestras. a) rectificadora de especímenes (55-C0201/3). b) cortadora de testigos y esmeriladora (45-D0536/AZ). c) nucleadora o extractora de núcleos (C0330/Z). d) sierra de banco (55-C02010/DZ). Este equipo pertenece a la Unidad de Petrofísica de la Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia..... 24
- Figura 9 Equipo de corte y preparación de secciones delgadas a) Cámara de vacío Vacuum Pump v -100, b) Cortadora de mesa Powerfeed Trim Saw 10” /254 mm, c) Ultrasonido Fisher Scientific, d) Cortadora de precisión Struers Accutom-50..... 26
- Figura 10 Secciones planas de las diferentes ignimbritas donde se observan variaciones texturales..... 30



|   |    |
|---|----|
| Figura 11 a) Picnómetro de Helio modelo Ultrapyc 1200e. b) válvulas de presión. c) entradas del equipo para conexiones externas (por ejemplo, puertos USB).....   | 31 |
| Figura 12 Cámara de vacío 800-VAC/S.....  | 33 |
| Figura 13 Diferentes afloramientos vistos durante el trabajo de campo a) Lava en entabladura perteneciente a un domo pre-caldera, b1 y b2) Ignimbrita Atécuaro masiva de color rosa, c) Ignimbrita Atécuaro masiva de color rosa que presenta una acumulación de pómez en la parte inferior del afloramiento, d) Ignimbrita muy alterada de color gris claro y e) Ignimbrita masiva de color gris rosáceo. ....   | 38 |
| Figura 14 Diferentes afloramientos vistos durante el trabajo de campo. a1 y a2) Lava peperítica perteneciente a un domo post-caldera b) Ignimbrita Atécuaro masiva con disyunción columnar difusa de color rosa con tonalidades grisáceas, c) Ignimbrita masiva con fracturas que hacen que se formen bloques, d) Ignimbrita de color blanco grisáceo con pómez subredondeadas, e) Ignimbrita de color rosa grisáceo donde se observan cavidades donde estaban las pómez (fiammes), f) Ignimbrita alterada de color rojizo y g) Ignimbrita masiva de color rosa morado donde se visualiza una pómez de color amarillo. .... | 39 |
| Figura 15 Mapa de localización de los afloramientos (puntos azules), de las zonas donde se recolectaron muestras de roca (estrellas verdes) y de los perfiles topográficos (líneas blancas).<br>.....   | 40 |
| Figura 16 Diagrama en el que se representa la distancia y la altura de los afloramientos visitados en la parte noroeste de la caldera de Atécuaro y su correlación estratigráfica, igualmente se muestra un perfil topográfico para obtener una mejor visualización de los diferentes afloramientos, .....  | 43 |
| Figura 17 Diagrama en el que se representa la distancia y la altura de los afloramientos visitados en la parte noreste de la caldera Atécuaro y su correlación estratigráfica, igualmente se muestra un perfil topográfico para obtener una mejor visualización de los diferentes afloramientos. ....   | 44 |
| Figura 18 Mapa geológico de la Caldera de Atécuaro con la ubicación de los diferentes afloramientos. Polígonos modificados de Gómez-Vasconcelos et al., 2015.....   | 46 |
| Figura 19 Columna estratigráfica general de la caldera Atécuaro y simbología utilizada en la Figura 18. CVMG, Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato. Edades tomadas de Gómez-Vasconcelos et al., 2015 .....  | 47 |
| Figura 20 Mapa regional de la caldera de Atécuaro en el que se trazaron las fallas presentes en la zona, así mismo se visualiza de lado derecho superior el diagrama de rosa donde se visualiza la concentración promedio de las mismas fallas y la representación de las mismas con la representación de las zonas de mayor esfuerzo y zonas de menor y mayor distensión. ....   | 49 |
| Figura 21 Imágenes de las diferentes laminas delgadas consideradas como bajo grado de soldamiento, donde se observan las variaciones que presenta la matriz, en el contenido de óxidos y minerales, así como la alteración del vidrio (línea punteada blanca). Las imágenes de  |    |



lado izquierdo son laminas en luz paralela (luz natural) y de lado derecho en polarización cruzada (nicoses cruzados). Ox: óxido, vs: vesícula, Pl: plagioclasa, ma: mineral alterado, tv: trisas vítreas, dv: deformación del vidrio ..... 52

Figura 22 Imágenes de las diferentes laminas delgadas consideradas como medio grado de soldamiento, donde se observan las variaciones que presenta la matriz, en el contenido de óxidos, líticos y minerales. Las imágenes de lado izquierdo son laminas en luz paralela (luz natural) y de lado derecho en polarización cruzada (nicoses cruzados). Ox: óxido, vs: vesícula, Pl: plagioclasa, L: lítico, tv: trisas vítreas..... 53

Figura 23 Imágenes de las diferentes laminas delgadas consideradas como alto grado de soldamiento, donde se observan las variaciones que presenta la matriz, en el contenido de óxidos, líticos y minerales. La línea blanca representa el límite de la zona de mayor alteración (za) en la muestra IA-10, así mismo se observa el aplastamiento y deformación de una plagioclasa (línea negra). Las imágenes de lado izquierdo son laminas en luz paralela (luz natural) y de lado derecho en polarización cruzada (nicoses cruzados). Ox: óxido, vs: vesícula, Pl: plagioclasa, L: lítico, tv: trisas vítreas, f: fiammes, za: zona alterada..... 54

Figura 24 Clasificación de los diferentes componentes que integran las secciones planas de roca obtenidos por medio del programa ImageJ y Photoshop. a) muestra de roca, b) Matriz de roca, c) Pómez presentes en la sección de roca (con una leve orientación) y d) Líticos presentes en la sección de roca..... 57

Figura 25 Diagrama comparativo del esfuerzo deformación de los diferentes especímenes de ignimbrita. .... 62

Figura 26 Cilindros de los diferentes especímenes de roca después de la prueba a compresión simple. En algunos de ellos se visualiza la fractura, así como las secuelas de estar sometido a una carga. La línea amarilla representa la parte céntrica del espécimen y donde se colocan los aditamentos de la prensa..... 63

Figura 27 Cilindros de los diferentes especímenes de roca después de la prueba a compresión simple, en alguno de ellos se visualiza la fractura, así como de las secuelas de estar sometido a una carga..... 64

Figura 28 Cilindros de los diferentes especímenes de roca después de la prueba a compresión simple, en alguno de ellos se visualiza la fractura, así como de las secuelas de estar sometido a una carga..... 65

Figura 29 Cilindros de los diferentes especímenes de roca después de la prueba a compresión simple, en alguno de ellos se visualiza la fractura, así como de las secuelas de estar sometido a una carga..... 66

Figura 30 Distribución de los afloramientos de la ignimbrita Atécuaro en el sector noreste y noroeste a partir del grado de aplastamiento de Quane y Russell (2005) y el modelo idealizado de Fisher y Schmincke (1984). Las zonas azules representan la parte de alto grado soldamiento, los verdes representan zonas de medio grado de soldamiento y los amarillos representan zonas de bajo grado de soldamiento. .... 69



Figura 31 Representación gráfica de las variaciones en la porosidad efectiva (izquierda) y total (derecha) respecto a la altura a la que se tomaron las muestras de ignimbrita. .... 70

Figura 32 Representación gráfica de las variaciones en densidad respecto a la altura. La línea negra punteada se utiliza para tener una mejor visualización de la zona media, la cual consiste en un mayor soldamiento. .... 71

Figura 33 representación gráfica de las variaciones de la resistencia máxima respecto a la altura, la línea negra punteada se utiliza para tener una mejor visualización de la zona media la cual consiste en una mayor resistencia. .... 72

Figura 34 representación gráfica de las variaciones de la de las ondas p (lado izquierdo) y ondas s (lado derecho) respecto a la altura a la que fueron tomadas las muestras de ignimbrita. .... 72

## Tablas

Tabla 1 Descripción general de los diferentes afloramientos de la ignimbrita Atécuaro. \*: puntos de control. .... 41

Tabla 2 Porcentaje de los componentes (matriz pómez, y líticos) de las diferentes muestras de rocas (ignimbritas) el color azul representa a los especímenes del sector noroeste y el color naranja representa a los especímenes del sector noreste. .... 55

Tabla 3 Resumen de los diferentes especímenes sometidos a la prueba de densidad, el color azul representa a los especímenes que pertenecen al sector noroeste y el color naranja representa a los especímenes del sector noreste. .... 58

Tabla 4 Resumen del porcentaje de porosidad presente en los diferentes especímenes, PT:porosidad total, PE: porosidad efectiva, PPCRPT :porcentaje de poros conectados respecto a porosidad total y PC: porosidad cerrada. El color azul representa a los especímenes del sector noroeste y el color naranja representa a los especímenes del sector noreste. .... 59

Tabla 5 Resultados obtenidos de la carga puntual, donde se visualiza el valor obtenido para cada uno de los especímenes que fueron utilizados para esta prueba. El color azul representa a los especímenes que pertenecen al sector noroeste y el color naranja representa a los especímenes del sector noreste. .... 61

Tabla 6 Agrupación de los afloramientos a partir del grado de aplastamiento de Quane y Russell (2005) y el modelo idealizado de Fisher y Schmincke (1984). Las zonas azules representan la parte centro del depósito y de alto grado soldamiento, los verdes representan zonas de medio grado de soldamiento y los amarillos representan zonas de bajo grado de soldamiento. .... 68



## Resumen

Las corrientes de densidad piroclástica son consideradas como uno de los fenómenos naturales más destructivos y peligrosos debido a su rápida propagación y altas temperaturas, y podrían estar relacionados con el colapso de calderas volcánicas. Tal es el caso de la ignimbrita Atécuaro, la cual fue emplazada al momento del colapso y formación de la caldera Atécuaro hace 16.8 Ma, siendo una de las estructuras volcánicas más grandes de la sierra de Mil Cumbres, ubicada al sur de la ciudad de Morelia. El estudio de la ignimbrita Atécuaro es de gran importancia, ya que la ciudad de Morelia fue construida sobre estos depósitos, los cuáles, fueron utilizados como material de construcción durante y después del periodo colonial, y en el presente se utilizan en la construcción de obras civiles y en la restauración del patrimonio arquitectónico o como material de construcción (edificación). El objetivo de este trabajo es establecer la estratigrafía y evaluar el grado de soldamiento de la ignimbrita Atécuaro, basándose en sus características físicas y mecánicas mediante pruebas de laboratorio, que incluye la determinación de la porosidad, densidad, componentes, descripción de fracturas y resistencia máxima al esfuerzo cortante. La ignimbrita Atécuaro presenta una textura piroclástica, con pómez de textura vítrea y consta de al menos tres facies de bajo, medio y alto grado de soldamiento, basado en el grado de aplastamiento de la pómez (entre mayor sea el aplastamiento de la pómez involucra una mayor presión, más tiempo de enfriamiento). Este trabajo sugiere que las variaciones en el contenido y tamaño de los componentes, así como el grado de alteración de la ignimbrita afectan a sus características mecánicas. Se observa que la densidad proporciona un registro más directo y sutil del proceso de soldamiento, caso contrario de la porosidad donde no se muestran claramente las variaciones del soldamiento respecto a la altura. Se ha concluido que las propiedades físicas y mecánicas de la ignimbrita Atécuaro varían con respecto a la distancia de la fuente, la altura y/o ubicación en el depósito, lo cual a su vez depende de la tasa de enfriamiento y la carga litostática del depósito.

Palabras Clave: Ignimbrita Atécuaro, Morelia, Pómez, Grado de aplastamiento, Estudio textural, Petrofísica.



## Abstract

Pyroclastic density currents are considered one of the most destructive and dangerous natural phenomena due to their rapid propagation and high temperatures, and could be related to the collapse of volcanic calderas. Such is the case of the Atécuaro ignimbrite, which was emplaced at the time of the collapse of the Atécuaro caldera 16.8 Ma ago. Is one of the largest volcanic structures in the Mil Cumbres mountain range, located south of the city of Morelia. The study of the Atécuaro ignimbrite is of great importance since the city of Morelia was built on these important deposits, which were used as construction material during and after the colonial period, and at present they are used in the construction of civil works, and the restoration of architectural heritage or as construction material (building). The objective of this work is to establish the stratigraphy and evaluate the degree of welding of the Atécuaro ignimbrite, very much in its physical and mechanical characteristics through laboratory tests that includes the determination of porosity, density, components, description of fractures, and maximum resistance to shear stress. The Atécuaro ignimbrite presents a pyroclastic texture, with a glassy pumice texture and consists of at least three facies of low, medium, and a high degree of welding, based on the degree of crushing of the pumice (the greater the crushing of the pumice involves a higher pressure, longer cooling time). This work suggests that the variations in the content and size of the components, as well as the degree of alteration of the ignimbrite, arise from its mechanical characteristics. It is observed that the density is a more direct and subtle record of the welding process, the opposite case of the porosity where the variations of the welding concerning the height are not clearly shown. It has been concluded that the physical and mechanical properties of the Atécuaro ignimbrite vary to the distance from the source, the height, and/or location in the deposit, which in turn depends on the cooling rate and the lithostatic load of the deposit.

Keywords: Atécuaro Ignimbrite, Morelia, Pumice, Degree of crushing, Textural study, Petrophysics.



## 1 Introducción

En las últimas décadas, el estudio de los volcanes y sus depósitos se ha vuelto un tema de gran interés, ya que la comprensión de su origen y su distribución es importante para nuestra sociedad. Especialmente en un país como México con miles de volcanes presentes en su territorio, y con zonas urbanas y rurales en constante desarrollo y crecimiento que invaden zonas que potencialmente pueden ser afectadas por la actividad volcánica, haciéndose más vulnerables a los peligros y riesgos volcánicos.

De los procesos volcánicos existentes, las corrientes de densidad piroclásticas se consideran como uno de los fenómenos más destructivos, que van calcinando todo lo que tocan a su paso debido a su alta velocidad y temperatura (Dufek *et al.*, 2015; Fisher y Schmincke, 1984). En la actualidad se han generado varios estudios enfocados en conocer las características físicas, mecánicas y químicas de las corrientes de densidad piroclásticas. Además de muchos estudios estratigráficos de las facies que constituyen a los depósitos resultantes (por ejemplo, ignimbritas), útiles en la reconstrucción de los mecanismos de emplazamiento, parámetros eruptivos y evolución (por ejemplo, Branney y Kokelaar, 2002; Tommasi *et al.*, 2015).

Dentro de las características más importantes en los depósitos de ignimbrita, las facies que presentan soldamiento han sido de mucho interés, tanto para conocer la dinámica eruptiva de las corrientes de densidad piroclásticas, como para entender el peligro asociado a estos procesos y hasta para el uso industrial. El soldamiento de una ignimbrita se produce se produce por la cohesión, la deformación plástica y la coalescencia de sus componentes (por ejemplo, pómez, fragmentos vítreos y cristales) como resultado del emplazamiento de corrientes de densidad piroclástica con altas temperaturas, o relativamente bajas temperaturas, y en este último produciendo ignimbritas no soldadas (Fisher y Schmincke, 1984). El grado de soldamiento depende principalmente de los parámetros, como la viscosidad, la composición, contenido de vidrio y la temperatura del magma antes de salir a la superficie; pero también de las condiciones después del emplazamiento, como son la carga litostática y la tasa de enfriamiento del depósito (Cas y Wright, 1991). A menudo, el conjunto de características más



utilizado para diferenciar un depósito de otro es por litofacies, ya que es un proceso sutil que ayuda a diferenciar los cambios impulsados por los procesos laterales y verticales (por ejemplo, el proceso de la dinámica de emplazamiento y la sedimentación) (White y Houghton, 2006).

La caldera Atécuaro, ubicada en la sierra de Mil Cumbres en el centro de México, ha sido asociada a una edad de ~16.8 Ma (Garduño-Monroy *et al.*, 2009; Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2015). Su depósito *syn*-caldera ha sido definido como una ignimbrita soldada relacionada a corrientes de densidad piroclástica concentradas producto del colapso de la caldera Atécuaro, con un volumen emitido de 18 km<sup>3</sup> aproximadamente y conformada por al menos cuatro litofacies con diferentes grados de soldamiento (por ejemplo, litofacies de color vino, gris, rosa y blanca). Sin embargo, estas litofacies no se han caracterizado de manera particular, y no se conocen los parámetros físicos y mecánicos que las diferencian y que les atribuyen diferente grado de soldamiento.

Este trabajo de tesis integra una reconstrucción estratigráfica y una evaluación del grado de soldamiento de la secuencia ignimbrítica de la caldera volcánica Atécuaro, con base en la identificación y caracterización de las diferentes litofacies, que incluye el reconocimiento de las variables que condicionan el grado de soldamiento en los depósitos. La reconstrucción estratigráfica y su grado de soldamiento serán de gran utilidad para identificar los afloramientos más idóneos para su aprovechamiento como material pétreo.

## ***1.1 Justificación***

Los estudios geológico - estratigráficos y la caracterización de las unidades de roca son la base de otros estudios estructurales, de peligros y riesgos, etc. Particularmente, la caracterización de las unidades de roca es indispensable para el estudio de cualquier fenómeno geológico con fines geotécnicos. Por otro lado, el aprovechamiento de los recursos en zonas volcánicas (por ejemplo, recursos hidrogeológicos, recursos pétreos y geotérmicos) se hace más eficiente cuando se conoce la distribución y tiempo de emplazamiento de cada depósito. Así como de sus características de fracturamiento, características físicas, mecánicas e hídricas. En particular, la



estratigrafía y la caracterización de las diferentes litofacies que conforman la caldera Atécuaro es útil para la buena explotación del recurso pétreo. Por lo que se resalta la importancia de la caracterización de cada litofacie (por ejemplo, grado de soldamiento) para el conocimiento de su distribución en la planificación del territorio, realización de obras civiles y en la identificación de los sitios idóneos para la extracción de material, ya sea para la construcción o para la restauración del patrimonio arquitectónico (por ejemplo, reemplazo de piezas en monumentos históricos).

## ***1.2 Planteamiento del problema***

A pesar de que hay varios estudios enfocados en la geología y cartografía de la ignimbrita Atécuaro, hasta el momento ninguno se ha enfocado en realizar una caracterización de manera particular en la que se describan sus litofacies, sus parámetros físicos y mecánicos que las diferencian, y así mismo atribuirles diferentes grados de soldamiento. Por lo que se considera importante realizar un estudio donde se aborden estos temas.

## ***1.3 Objetivos***

### ***Objetivo general***

Reconstruir la estratigrafía y caracterizar el grado de soldamiento de la secuencia ignimbrítica de la caldera Atécuaro mediante la caracterización física y mecánica de las litofacies.

### **Objetivos específicos**

- Construir la evolución geológica de la ignimbrita Atécuaro con base en relaciones estratigráficas y asignación espacial de sus litofacies.
- Elaborar un mapa geológico-estructural de la caldera de Atécuaro
- Describir las litofacies mediante descripciones macroscópicas y microscópicas (petrografía) con la finalidad de conocer las variaciones y semejanzas.
- Caracterizar el grado de soldamiento de la ignimbrita con base en descripciones en campo, pruebas físicas y mecánicas de laboratorio.



#### ***1.4 Hipótesis***

La estratigrafía y la caracterización física y mecánica de la ignimbrita Atécuaro nos permitirá identificar las diferentes litofacies, el grado de soldamiento y las implicaciones en la dinámica eruptiva de la erupción que originó a la caldera Atécuaro. La información generada será indispensable para un mejor aprovechamiento de la ignimbrita Atécuaro como material pétreo de construcción y remodelación de los edificios del centro histórico de Morelia.



## 2 Marco teórico

En este capítulo se abordarán algunas definiciones de mayor relevancia referentes a los flujos piroclásticos, su grado de soldamiento y sus propiedades físicas y mecánicas, así como de las variables incluidas en estas últimas, con el fin de proporcionar al lector una idea más clara del tema.

Las **corrientes de densidad piroclástica (PDC's)** son mezclas no homogéneas de piroclastos (partículas volcánicas formadas por la desintegración explosiva del magma) y gas que fluyen de acuerdo a su densidad relativa al fluido circundante (la atmosfera) (Branney y Kokelaar, 2002). Pueden ser originados por el colapso total o parcial de una columna eruptiva, colapso de un pulso eruptivo, fuente baja sostenida, erupciones laterales o bien por el colapso de un domo de lava (Figura 1). Dentro de las corrientes de densidad piroclástica se encuentran los *PDC's* concentrados y *PDC's* diluidos. Los depósitos de las corrientes de densidad piroclástica generalmente se catalogan de acuerdo a su litología y estructura en ignimbrita, oleadas y flujos de bloques y ceniza (Branney y Kokelaar, 2002). Las corrientes de densidad piroclástica concentradas dan origen a los depósitos de ignimbrita y a los flujos de bloques y ceniza. Mientras que las corrientes de densidad piroclástica diluidas dan origen a los depósitos de oleadas piroclásticas. Aquí nos centraremos en los depósitos de ignimbrita, ya que estamos interesados dentro de los objetivos de nuestro trabajo en conocer las características del depósito que fue originado por el colapso de la caldera Atécuaro.

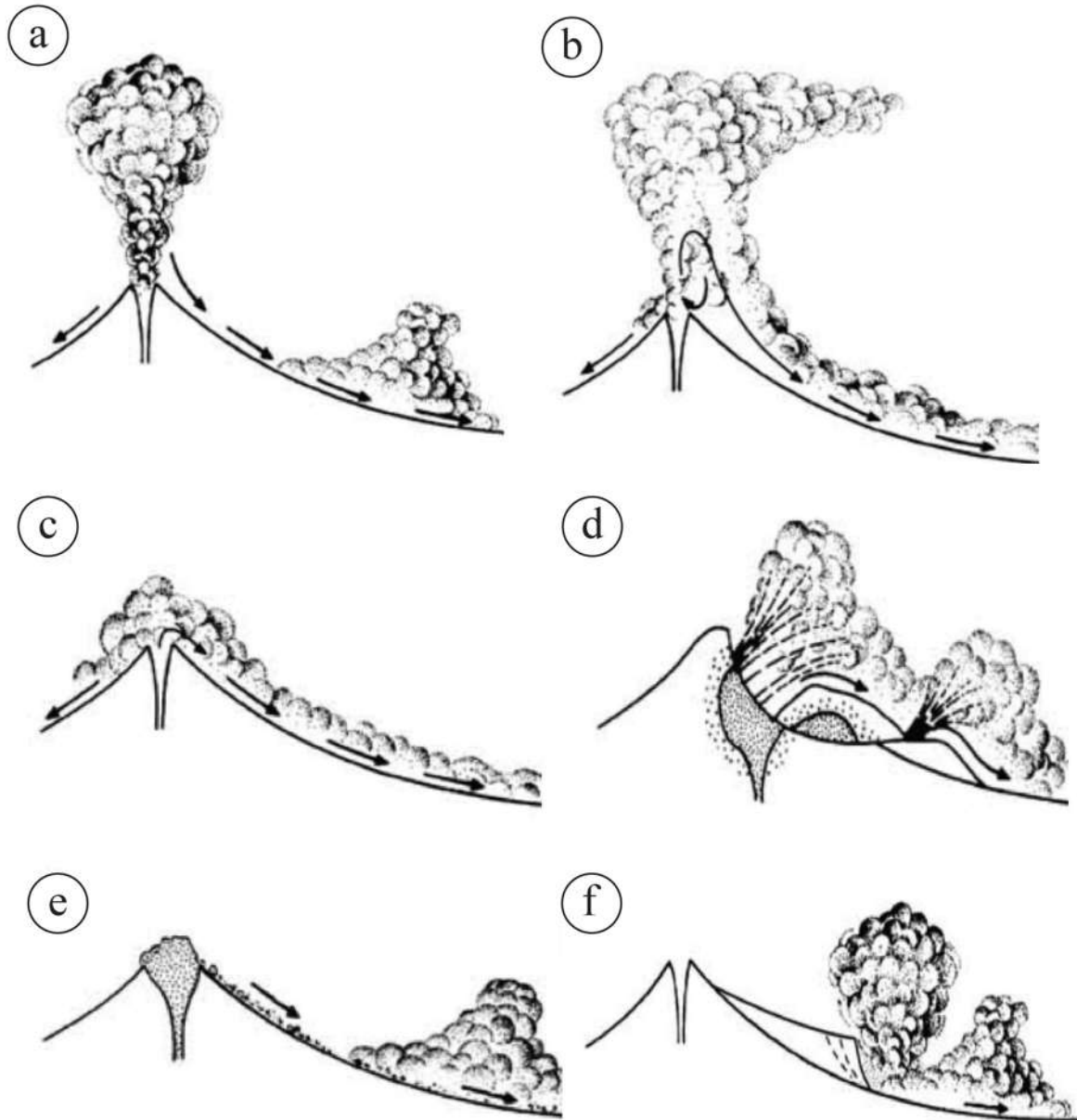


Figura 1 Origen de los flujos piroclásticos a) Colapso de columna eruptiva Pliniana, b) Corriente sostenida derivada de una fuente piroclástica prolongada, c) corriente sostenida derivada de una prolongada erupción piroclástica explosiva baja, d) Corriente con un solo (o múltiple) oleaje derivado de explosiones laterales iniciadas por una descompresión catastrófica de un sistema magmático y/o hidrotermal, e) Corriente de densidad piroclástica derivada de un colapso de domo de lava o flujo frontal, f) Corriente de densidad piroclástica derivada de depósitos causada por el colapso gravitacional y avalancha de ignimbrita suelta e inestable. Tomado y editado de Branney y Kokelaar (2002).



El término **ignimbrita** fue dado por Marshall en 1935 (Ray, 1960). La ignimbrita se define como un depósito piroclástico o roca piroclástica compuesta predominantemente de fragmentos de pómez, líticos accidentales, esquirlas de vidrio y cristales inmersos en una matriz de fragmentos tamaño ceniza (Moon, 1993; Sparks *et al.*, 1973; Walker, 1983). La arquitectura de las ignimbritas en general está formada por varias litofacies con diferentes gradaciones, grados de soldamiento y cantidad de pómez, la cual varía tanto con la distancia desde su fuente y de abajo hacia arriba en la columna estratigráfica.

Una **litofacie** se refiere a las características de un depósito o parte de uno, que es distinto según la combinación de algunas características de estratificación, tamaño de grano, forma de grano, clasificación, fábrica y composición (Branney y Kokelaar, 2002). Una ignimbrita puede presentar diferentes litofacies, es decir que en el mismo depósito de la ignimbrita podemos encontrar variaciones en las características litológicas texturales, estructurales, soldamiento, mineralógicas y granulometría. Así como al presentar características litológicas en común que puedan relacionarse y posteriormente sean interpretadas para definir las características de los procesos de su deposición.

El **soldamiento** de las ignimbritas es un proceso común que se expresa mediante cambios considerables en su textura, estructura y propiedades físicas (Figura 2) (por ejemplo, densidad, porosidad primaria; Branney y Kokelaar, 2002). El soldamiento involucra el aplastamiento de vidrio piroclástico bajo una carga de compactación a temperaturas superiores a la temperatura de transición del vidrio (Quane y Russell, 2005). Cabe mencionar que la temperatura de transición varía con la composición del magma y disminuye con el contenido de agua disuelta, estabilizándose alrededor de 500 -700 °C (Dingwell, 1998). Para los depósitos piroclásticos, especialmente los que resultan de la deposición en masa, la deformación en el soldamiento se acumula inmediatamente después de la deposición (Sparks, 1976). En tales casos, la intensidad de soldamiento refleja los efectos agregados de la carga de la columna suprayacente y del tiempo de residencia a temperaturas superiores a la temperatura de transición del vidrio del material (Quane y Russell, 2005). Así mismo, la densidad presenta variaciones de la base al techo, produciendo que la base y el techo tengan escaso soldamiento. En el caso lateral, las

porciones distales del flujo presentan menor soldamiento que las proximales (Figura 3; Fisher y Schmincke, 1984).

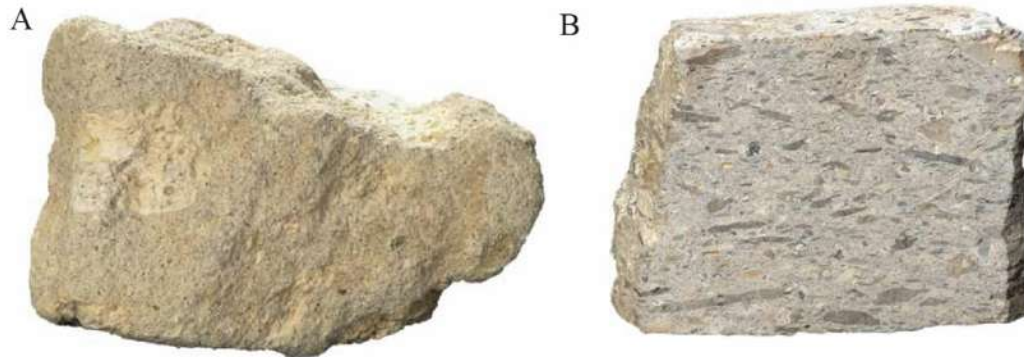


Figura 2 Diferentes grados de soldamiento de la ignimbrita, a) Ignimbrita poco soldada, b) Ignimbrita soldada, Tomado de Geology - rocks and minerals, s/f

Se considera a la **densidad** como una propiedad elemental y fundamental de los materiales, relacionada con la naturaleza de sus constituyentes y la existencia de espacios vacíos entre ellos. La densidad ( $\rho$ ) se define como la masa (M) por unidad de volumen (V), y se expresa en  $\text{kg/m}^3$  (Alonso, 2013).

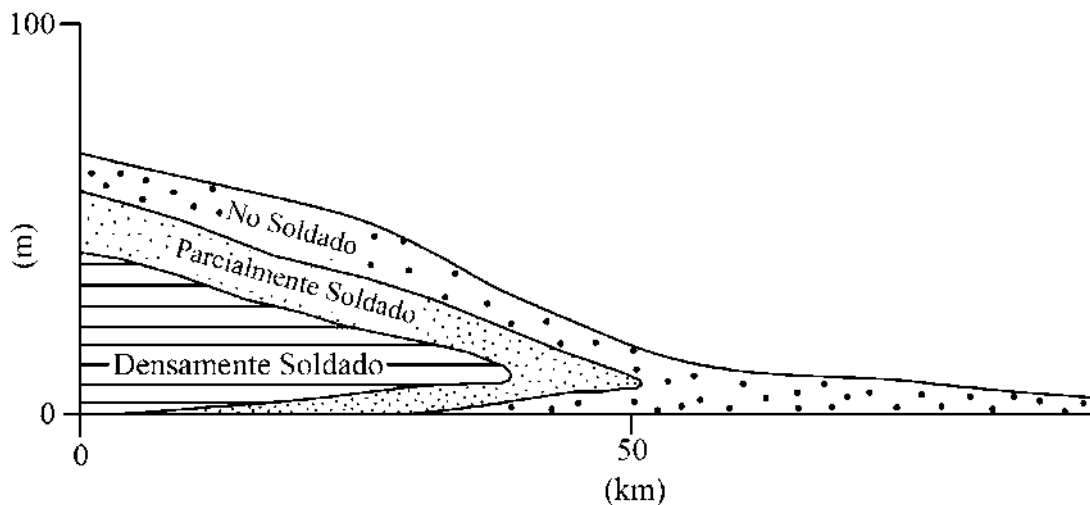


Figura 3 Idealización lateral y vertical de las diferentes zonas de soldamiento en una unidad simple en enfriamiento. Tomada y modificado de Fisher y Schmincke (1984).



Las variaciones del grado de soldamiento de una ignimbrita se ven reflejadas en sus propiedades físicas (por ejemplo, densidad), en el comportamiento mecánico frente a los diferentes esfuerzos aplicados. La resistencia a la compresión simple o resistencia uniaxial es el máximo esfuerzo que soporta la roca sometida a compresión uniaxial. Para una buena visualización de lo anterior, se utilizan los diagramas de esfuerzo - deformación, ya que es una forma excelente de representar el comportamiento de un material cuando está sometido a una fuerza deformadora. De acuerdo con Vallejo *et al.* (2002), el comportamiento esfuerzo - deformación de un cuerpo se define por la relación entre los esfuerzos aplicados y de las deformaciones producidas, y hace referencia a cómo se va deformando y cómo va variando el comportamiento del material rocoso a lo largo de la aplicación de la carga. Se pueden determinar tres niveles de deformación, los cuales son: el comportamiento antes de llegar a la rotura, la deformación en que se produce la rotura y el comportamiento después de la rotura.



### 3 Marco geológico - estructural

La zona de estudio se encuentra en la porción central del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM), el cual es un arco magmático continental relacionado con la subducción de las placas de Cocos y Rivera por debajo de la placa Norteamericana a lo largo de la Trinchera Mesoamericana (Figura 4) (Demets y Stein, 1990; Ferrari, 2000; Gómez-Tuena *et al.*, 2005; Johnson y Harrison, 1990; Pardo y Suarez, 1995). El CVTM está conformado por más de 8,000 estructuras volcánicas como estratovolcanes, calderas volcánicas y volcanes monogénéticos, entre estos últimos, conos de escorias, escudo pequeño y maares y cuerpos intrusivos distribuidos a lo largo de aproximadamente 1,000 km (Corona-Chávez *et al.*, 2006; Gómez-Tuena *et al.*, 2005; Toshiaki Hasenaka y Carmichael, 1985; Losantos *et al.*, 2017; Mori *et al.*, 2007; Pérez-López *et al.*, 2011). El CVTM es uno de los arcos volcánicos más complejos y variados del cinturón de fuego del Pacífico (Ferrari, 2000), debido a que su distribución no presenta una dirección paralela a la Trinchera Mesoamericana, sino que presenta una dirección NO-SE a partir del margen oeste del Pacífico, hasta su parte central (Ban *et al.*, 1992). Otra característica que distingue al CVTM es la gran variabilidad del estilo volcánico y composición química a lo largo del arco presentando edades Neógeno-Cuaternario (Corona-Chávez *et al.*, 2006; Gómez-Tuena *et al.*, 2005). Debido a la diferencia en los procesos volcánicos y a estudios geoquímicos, el CVTM se ha dividido en los sectores occidental, central y oriental (Demant, 1978; Ferrari, 2000; Gómez-Tuena *et al.*, 2005). Con base en los estudios de geología estructural, se ha podido definir la geometría, cinemática y edad de los sistemas principales de fallas que afectan a el CVTM en sus diferentes sectores (Mori *et al.*, 2007), estos sectores en los que se divide el CVTM (Figura 4) se describen a continuación:

a) Sector occidental

Se ubica en la aparte oeste de la sierra Madre Occidental y está relacionado con el bloque Jalisco, principalmente se caracteriza por una tendencia estructural predominante



de E-O y de la interacción de tres fosas tectónicas denominadas Tepic-Zacoalco, Colima y Chapala (Ferrari, 2000). Se considera que los rifts de Tepic-Zacoalco y Colima representan las fronteras septentrional y oriental del bloque Jalisco, y que estos límites fueron parcialmente reactivados con movimientos extensionales durante el Plioceno y el Cuaternario (Mori *et al.*, 2007).

b) Sector central

Se encuentra delimitado por el graben de Colima al occidente y por el sistema de fallas Taxco-Querétaro al oriente (Ferrari, 2000; Gómez-Tuena *et al.*, 2005). Una característica que sobresale es que está formado en un 90% por edificios monogénéticos, presentando una morfología de conos de escoria, volcanes en escudo pequeño, maares, flujos de lava y domos de composición basáltica a andesítica. Los edificios volcánicos que se encuentran en este sector presentan una orientación bien definida, debido a que su emplazamiento es controlado por fallas con una dirección preferencial NE-SO (Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2020). En este sector se han reconocido tres sistemas principales de fallas: el sistema de fallas del Bajío, el sistema de fallas de Morelia-Acambay, y el sistema de fallas Cuencas y Sierras (Mori *et al.*, 2007).

c) Sector oriental

En este sector la mayor parte del vulcanismo está conformado por estratovolcanes, calderas, conos de escoria y domos de composición andesítica a riolítica. Este sector se caracteriza por estar controlado por fallas con una orientación predominantemente E-O, aunque también existen fallas con dirección NE-SO y NO-SE de las que se incluyen las fallas Guadalupe, Quebrada, Salitrillo, Santa María Ilucan y Taxinay (Ferrari, 2000).

La deformación está concentrada principalmente en los sectores central y occidental del arco volcánico, esto debido a que estas regiones estuvieron sujetas a un régimen tectónico transcurrente y/o transtensional entre el Mioceno medio y tardío (Ferrari, 1995). Un ejemplo claro de la actividad tectónica extensional con orientación NNO en el sector central es la cuenca del lago de Cuitzeo, cuenca cerrada que tienen un área de 4,000 km<sup>2</sup> que comenzó su

desarrollo en el Mioceno medio ( $\leq 12$  Ma; Israde-Alcantara y Garduño-Monroy, 1999; Suter *et al.*, 2001; Gómez-Vasconcelos *et al.* 2021). La actividad volcánica en la cuenca, que inició en el Mioceno temprano y que hasta la actualidad aún está presente, ha sido más o menos continua. Gómez-Vasconcelos *et al.* (2021) realizaron un mapa geológico general (Figura 5) donde se muestran las principales estructuras volcánicas y la columna estratigráfica de la cuenca de Cuitzeo. La columna estratigráfica muestra una distribución de once sucesiones volcánicas que van desde el Mioceno a la actualidad.

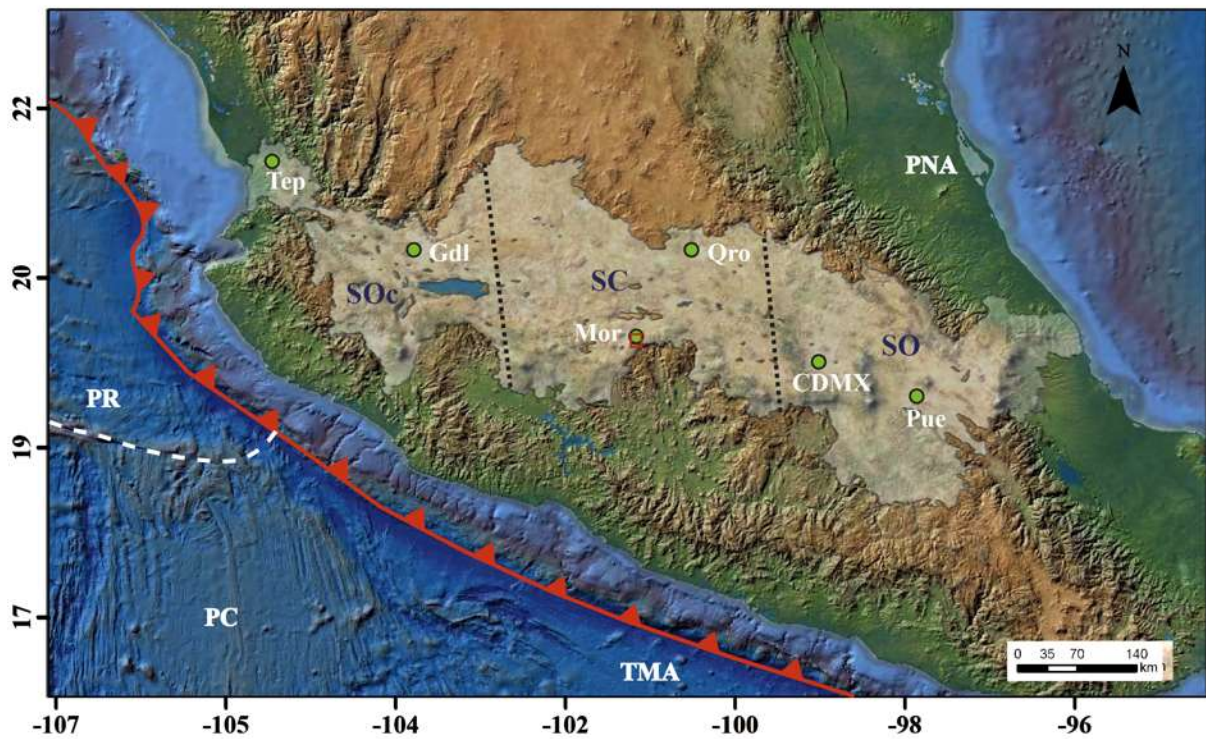


Figura 4 Localización, división y distribución del cinturón volcánico trans-Mexicano en el centro de México. Sectores en los que se divide el CVTM: Sector Occidental (SOc), Sector Central (SC), Sector Oriental (SO). Claves en la figura: Placa Cocos (PC), Placa de Rivera (PR), Placa Norteamericana (PNA) y Trinchera Mesoamericana (TMA). Ciudades principales que se encuentran en la CVTM: Tepic (Tep), Guadalajara (Gdl), Morelia (Mor), Querétaro (Qro), Ciudad de México (CDMX) y Puebla (Pue), el rectángulo rojo representa la zona de estudio.

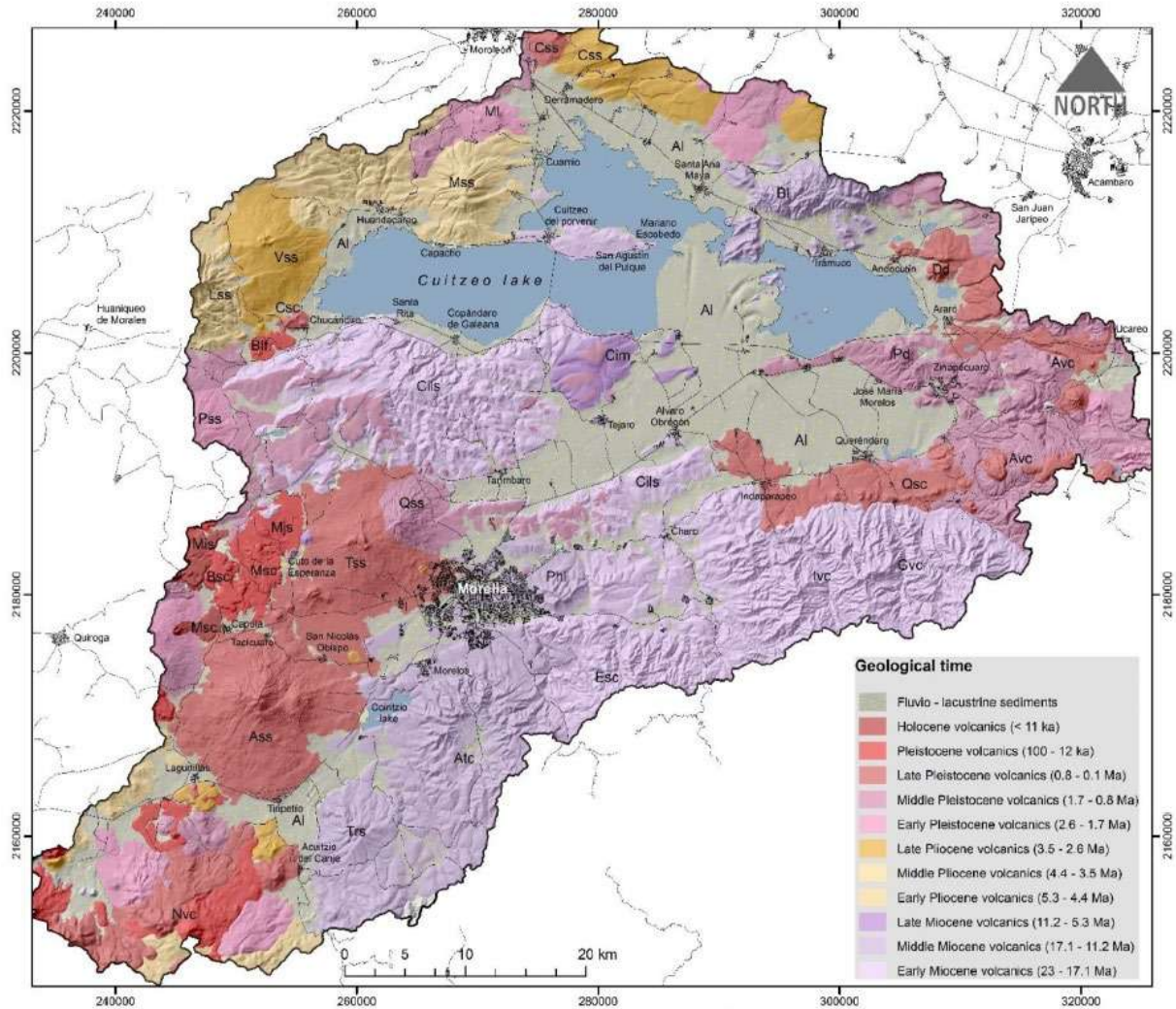


Figura 5 Mapa geológico simplificado de la cuenca del lago de Cuitzeo, en la parte sur se encuentra la Sierra de Mil Cumbres. Tomado de Gómez-Vasconcelos *et al.* (2021).

Por otro lado, la Sierra de Mil Cumbres (SMC) es una sucesión volcánica del Mioceno temprano-medio que se localiza en la porción sur de la sierra Madre Occidental y centro sur del CVTM, a ~300 km de la trinchera Mesoamericana. Mide aproximadamente 60 km de largo por 18 km de ancho, y ocupa un área de ~870 km<sup>2</sup>. Se desarrolla desde los 2,000 y los 3,000 msnm, con un gradiente altitudinal de ~1,000 m, y, pendientes que varían entre 0° y 79° (Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2015). Constituye un alto estructural (horst) delimitado por fallas con una



componente normal y de orientación E - O y NE - SO, el cual aloja a varias estructuras volcánicas. Se caracteriza por sus lavas de composición intermedia a básica y sus flujos piroclásticos de composición ácida (Garduño-Monroy *et al.*, 2009). Particularmente, la zona de estudio se enfoca en la caldera Atécuaro, ubicada al sur de la ciudad de Morelia (Figura 3), en la porción suroeste de la SMC. A continuación, se realiza la descripción general, partiendo de la base a la cima de la ignimbrita de la caldera de Atécuaro la cual fue realizada por Gómez-Vasconcelos *et al.* (2015):

- Ignimbrita de color vino

Unidad muy soldada con fiammes y algunos líticos rojizos de 1.5 m de espesor, que aflora en la zona del club Campestre, al SE de Morelia.

- Ignimbrita blanca (gris)

Unidad soldada con pómez de color blanco y beige, es la más abundante y aflora a todo lo largo del escarpe de la falla Morelia, aunque también se le conoce como falla la Paloma. Al sur de Morelia, contiene grandes fragmentos de pómez y escasos líticos de andesita, su espesor es hasta de 125 m.

- Ignimbrita rosa

Unidad muy soldada que se distribuye en las lomas bajas de Morelia, donde fue construida la ciudad. Tiene fiammes blancas y abundancia de cristales de sanidino, sin líticos y con un espesor aproximado de 30 m.

- Ignimbrita blanca

Unidad que se encuentra coronando la loma de Santa María, esta unidad es blanca poco soldada con biotita, de aproximadamente 47 m de espesor.

El Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG) sobreyace a la caldera Atécuaro. El CVMG se considera como una de las regiones de vulcanismo monogenético más extensas (>40,000 km<sup>2</sup>), presentando una densidad aproximada de 2.5 conos por cada 100 km<sup>2</sup> (Osorio Ocampo, 2014). Corona-Chávez *et al.* (2006) consideran que el vulcanismo monogenético del



CVMG comenzó hace trece millones de años y que muestra una tendencia de migración del frente volcánico activo hacia el suroeste. Avellán *et al.* (2020) indican que la actividad del CVMG inició hace como 4-6 millones de años, pero que se vuelve mucho más frecuente a partir de 1 millón de años en adelante. De acuerdo a algunos autores, tales como Hasenaka (1994) y Hasenaka y Carmichael (1985), el CVMG lo integran más de 1,200 edificios volcánicos, de los que se incluyen más de 900 conos de escoria, 61 flujos de lava, 43 domos, 22 maares, y casi 400 volcanes en escudo pequeño. Al norte de la caldera Atécuaro, en la ciudad de Morelia, se encuentran los volcanes en escudo pequeño Quinceo y Tetillas, pertenecientes al CVMG. De acuerdo a Avellán *et al.* (2020), el volcán Quinceo tiene una edad de 1.3 Ma y el volcán Tetillas 0.3 Ma.

El CVTM y el CVMG están afectados por el sistema de fallas Morelia-Acambay. Este sistema de fallas consiste en una serie de fallas normales con dirección E-O que están asociadas a la formación de depresiones lacustres, como es el caso de Chapala, Zacapu, Cuitzeo, Maravatío y Acambay (Garduño-Monroy *et al.*, 2009).

## 4 Localización del área de estudio

La caldera Atécuaro está ubicada al sur de la ciudad de Morelia, noreste del estado de Michoacán, (Figura 6). La caldera se encuentra en la parte suroeste de la SMC. La caldera posee alturas que van de 1,700 a 2,700 m sobre el nivel del mar y cubre una superficie de aproximadamente 386 km<sup>2</sup>. La forma de su cráter es circular y mide 6 km de diámetro con desniveles promedio de 150 m. Las paredes del cráter forman pendientes muy pronunciadas que van desde los 20° a los 40° y se elevan hasta 300 m sobre el piso de la caldera (Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2015). Las principales vías de acceso son la carretera federal número 14 (Morelia-Uruapan) y las carreteras secundarias Morelia - Atécuaro, Morelia - Jesús del Monte, Morelia - Santiago Undameo, Nieves - Santiago Undameo y Atécuaro - Nieves.

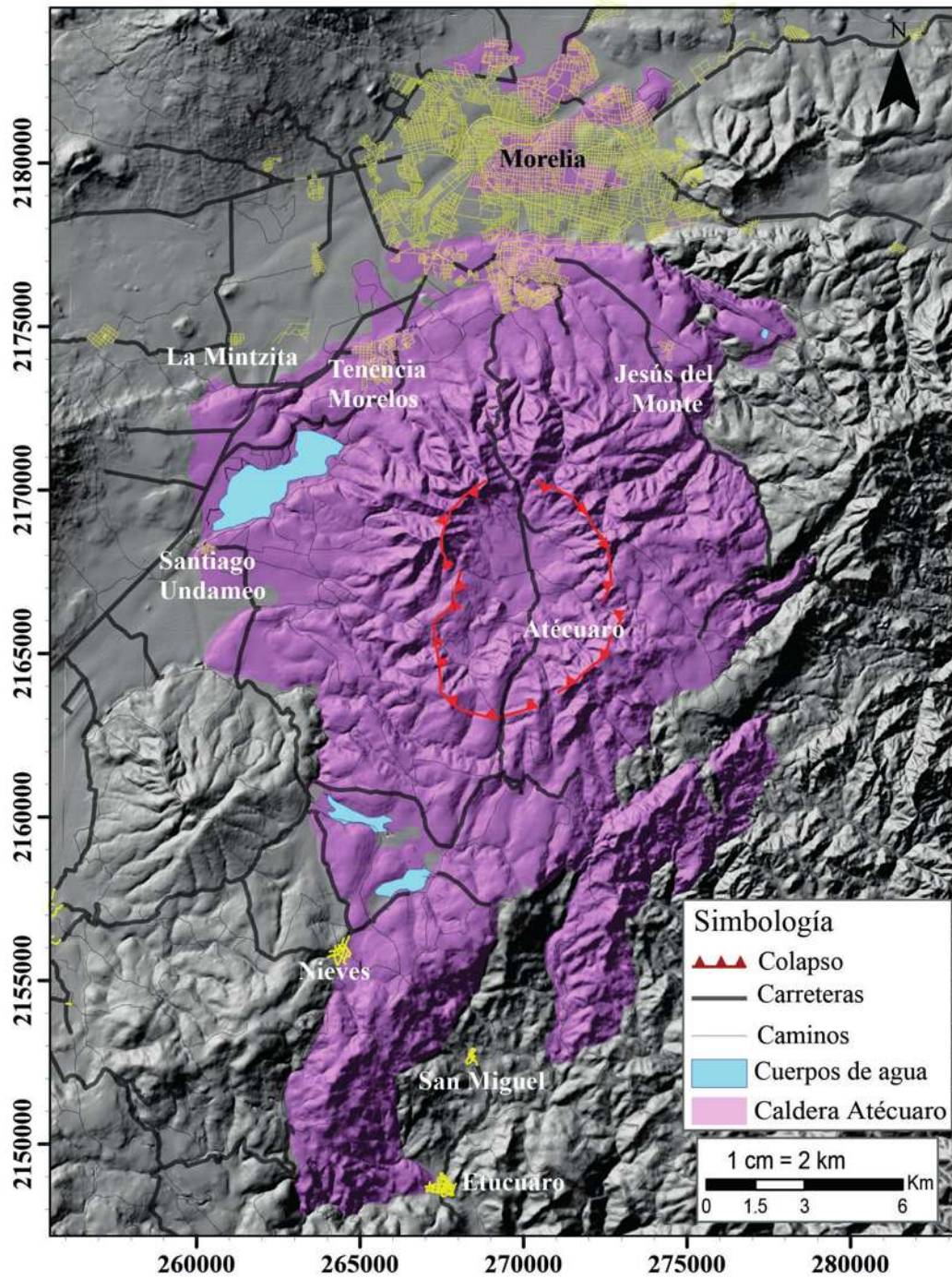


Figura 6 Mapa representativo de las diferentes vías de acceso (caminos y carreteras) (líneas negras) que conectan a la caldera Atécuaro (polígono rosa).



## 5 Antecedentes

Dentro de los primeros trabajos realizados en la zona fue el de Pasquare *et al.*, (1991), él cual describió a la SMC como una sucesión de flujos de lava basálticas y andesíticas y brechas ocasionalmente entrelazadas con depósitos de flujos piroclásticos y conglomerados volcánicos. Al realizarse un mayor enfoque en su estudio se describió como una secuencia volcánica del Mioceno temprano con una extensión de ~870 km<sup>2</sup> que se considera compleja en cuestiones estructurales, geológicas y vulcanológicas. La SMC está conformada por al menos 4 estructuras volcánicas independientes, las cuales son: caldera Escalera, complejo volcánico Garnica, complejo volcánico Indaparapeo y Caldera Atécuaro. Estas calderas están conformadas principalmente por flujos de lava y domos de composiciones andesítica a dacítica y una afinidad calcoalcalina, y de igual manera presentan depósitos de ignimbrita de composición riolítica a rio-dacítica asociadas al colapso de las calderas. El emplazamiento de las calderas se vio controlado por la tectónica regional y posteriormente sus depósitos volcánicos se vieron afectados por los sistemas de fallas más importantes de la región, tales como los sistemas de dirección NO-SE, NE-SO y E-O (Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2015).

La formación de la Caldera Atécuaro de hace ~16.8 Ma se relaciona con el emplazamiento de la ignimbrita Atécuaro. De manera general se define a la ignimbrita Atécuaro que fue producto de una corriente de densidad piroclástica concentrada de pómez y ceniza con un volumen de ca.18 km<sup>3</sup> y conformada por al menos cuatro litofacies con diferente grado de soldamiento (Garduño-Monroy *et al.* 2009; Gómez-Vasconcelos *et al.* 2015). Así mismo, se realizaron diferentes estudios relacionados con la ignimbrita Atécuaro, uno de ellos describe a la ignimbrita como la secuencia ignimbrítica de la región de Morelia. Describiendo que esta secuencia estaba constituida por una serie de flujos piroclásticos y que fueron depositados de manera estratigráfica esencialmente hacia el norte. También, descrita como una ignimbrita de textura fina, pumicítica con fenocristales visibles (Bigioggero *et al.*, 2004). Otro estudio hace mención de la estratigrafía general, la cual menciona que en la base hay un nivel de alternancia de andesitas y brechas andesíticas altamente fracturadas, seguida de una secuencia ignimbrítica que se ve interrumpida hacia la cima por un flujo de escombros. Todos los niveles se



encuentran moderadamente alterados y con fuerte presencia de afectación por vegetación. Cubriendo estas unidades se encuentra un depósito de flujo de detritos, coluviones y depósitos lacustres con bajo grado de consolidación (Villaseñor, 2014).

Por la parte de las propiedades físicas y mecánicas de la ignimbrita, uno de estos trabajos se basa en considerar solo a las ignimbritas que provienen de bancos de material, dando como resultado que cada banco de material o localidad de una ignimbrita no se debe considerar como un solo tipo de cantera y que presenta cualidades y propiedades diferentes (Bigioggero et al., 2004). Otro trabajo se enfoca en determinar el estado de alteración de núcleos de rocas ignimbriticas pertenecientes al sur de la ciudad de Morelia a partir de ensayos de laboratorio, donde se obtuvieron las propiedades de densidad, absorción, porosidad, resistencia a la compresión uniaxial, resistencia a la tensión velocidad de ondas p y durabilidad concluyendo que las ignimbritas con un índice alto de durabilidad después del quinto ciclo tienen bajos valores de porosidad y absorción, y altos valores de densidad, resistencia a la compresión, resistencia a la tensión y velocidad de onda P, caso contrario de las ignimbritas con bajo índice de durabilidad que presentan valores altos en de porosidad y absorción, y bajos en densidad, resistencia a la compresión, resistencia a la tensión y velocidad de onda P (Luz-Martínez, 2019).

Así mismo, otro estudio considera el proceso de meteorización durante los ciclos de sequía y de humedad de las ignimbritas (utilizadas en la construcción de la arquitectura de Morelia, las cuales son Piedra Vieja, Tlalpujahuá, Cointzio y Jamaica), basándose en factores petrofísicos, propiedades hídricas y mecánicas, y las presiones efectivas parciales alcanzadas dentro del sistema poroso de cada roca durante el proceso de cristalización de sal (Martínez-Martínez et al., 2018). Otro trabajo se enfoca en las mismas ignimbritas (Piedra Vieja, Tlalpujahuá, Cointzio y Jamaica) teniendo como enfoque el inmueble Centro Cultural Universitario de la UNAM campus Morelia donde se realizaron levantamientos topográficos básicos, monitoreo de deformaciones, caracterizaciones de material pétreo, generación de modelos tridimensionales, cartografía petrológica y muestreo de sales (Serenó-Villaseñor, 2020), donde ambos trabajos concluyen con una evaluación petrofísica y estética de la compatibilidad entre las rocas de



construcción originales y de reemplazo utilizadas en el patrimonio arquitectónico de Morelia con el fin de ofrecer recomendaciones técnicas para futuras obras de restauración.

Desde el punto de vista mineralógico-geoquímico se realizó una caracterización de los procesos de degradación que son característicos en las rocas piroclásticas (ignimbritas) usadas en la construcción de los edificios del centro histórico de la ciudad de Morelia. Uno de los resultados que obtienen es que las ignimbritas presentan diferentes grados de desvitrificación y que la menor intensidad y/o ausencia de este proceso es característico de las ignimbritas que presentan buena consolidación y mejores propiedades de resistencia mecánica a los procesos de intemperismo (Ostroumov et al., 2003).



## 6 Metodología

La metodología de esta tesis se divide en trabajo de gabinete, trabajo de campo, trabajo de laboratorio, y análisis de resultados, los cuales se describen a continuación:

### 6.1 Trabajo de gabinete

Esta etapa consistió en la recopilación, revisión y análisis de toda la información bibliográfica que había disponible. Dentro de la bibliografía encontrada y revisada se incluyen las publicaciones científicas, libros y mapas que han sido publicados y están relacionados con la geología estructural, estratigrafía, vulcanología y geotecnia de la región de estudio. En el almacenamiento bibliográfico se realizó la construcción de una biblioteca virtual, elaborada mediante el uso del programa de acceso libre Mendeley. Resaltando que este programa cuenta con herramientas sobresalientes como la modificación automática de las referencias al editar las citas, que incluye de manera inmediata los datos de cada manuscrito.

Así mismo, con la finalidad de facilitar el reconocimiento del área de estudio, se utilizaron imágenes satelitales de *Google Earth* y mapas topográficos que corresponden a los cuadrantes de las hojas e14a23 y e14a33 a escala 1:50,000 en formato digital e impreso del año 2018 proveídos por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Algunas imágenes satelitales fueron obtenidas mediante el programa de acceso libre *GeoMap App*, el cual es un programa de exploración y visualización de las Ciencias de la Tierra, actualizada constantemente como parte del sistema de Datos de Geociencias Marinas (*MGDS*, por sus siglas en inglés). Para manipular la información en formato digital, se realizó mediante el software *ArcMap* versión 10.6, en el que se capturó y procesó la información correspondiente a los modelos digitales de elevación con los datos vectoriales, que incluyen caminos, carreteras, curvas de nivel, etc., a una escala 1:50,000. Previo al trabajo de campo con la información ya obtenida de mapas preliminares se programaron campañas de campo donde se hizo la descripción estratigráfica de cada afloramiento encontrado. Mediante el software *ArcMap*



versión 10.6 se editó la información geológica para conocer la distribución geológica del depósito de la ignimbrita Atécuaro, apoyado con el modelo digital del terreno sombreado y la información estratigráfica obtenida en el trabajo de campo. El mapa geológico fue proyectado en el sistema de coordenadas WGS 1984 UTM zona 14.

## 6.2 Trabajo de campo

El trabajo de campo consistió en la descripción estratigráfica de la unidad ignimbrítica, la recolección de muestras para realizar diferentes análisis de las propiedades petrofísicas en la etapa de laboratorio y toma de datos de fallas geológicas. En cada afloramiento se estableció una estación geológica, y se describieron cada una de las características de los diferentes afloramientos. Estas características por ejemplo incluyen la estructura de la unidad estratigráfica, yacencia estratigráfica, como varía lateralmente, o si tiene continuidad lateral, espesor de la unidad estratigráfica, gradación independiente de los componentes dentro de la unidad, determinar que componentes constituyen a la unidad, ya que en su caso es un depósito de ignimbrita que pueden presentar una variedad compleja de fragmentos con una génesis diferente, reconocidos como componentes juveniles o accidentales. Así mismo describir la textura y color de los diferentes componentes, tanto como fragmentos grandes, como en la matriz.

Otro parámetro importante en la descripción de la unidad de ignimbrita fue la medición de las pómez y fiammes dentro de la roca a diferentes niveles de los afloramientos. El cual se hizo, midiendo los ejes principales a lo largo y ancho de cada fragmento como se muestra en la Figura 8. Para obtener la proporción de aplastamiento o el parámetro “*oblateness*” (OB) se utilizó el método propuesto por Quane y Russell (2005). Que expresa numéricamente la forma de un objeto de forma discoidal u oblado, en este caso pómez y/o fiammes. Considerando que la forma de las pómez y/ fiammes es tal que la relación entre sus ejes es  $a=b \neq c$ , seleccionando varias pómez aleatoriamente en cada afloramiento.



$$OB = 1 - \frac{c}{a}$$

Donde: **OB** es la proporción de aplastamiento o el parámetro “*oblateness*”, **c** es la altura y **a** es la longitud.

Para la recolección de muestras se tomaron fragmentos de bloques de roca total orientadas con tamaños de aproximadamente 50 x 50 cm y adicionalmente muestras más pequeñas de 10 x 10 cm, usando una nomenclatura de “IA” (para referirse a la “ignimbrita Atécuaro”) seguido del número de afloramiento.

En la obtención de los datos de fallas geológicas que afectan a la unidad ignimbrita Atécuaro se reconocieron las diferentes familias de planos de fallas, describieron y midieron los diferentes indicadores cinemáticos en cada uno de los planos independientes, que incluye el rumbo, buzamiento y rasgos asociados a la deformación.

Es muy importante resaltar que durante el muestreo se seleccionaron los especímenes más frescos posibles, sin alteración hidrotermal o meteorización, que fueron revisados con la ayuda de una lupa geológica.

El material utilizado durante campo fueron mapas topográficos, GPS, Brújula, cinta métrica de 20 m, lupas de 20x a 10x, martillo de geólogo de 24 onzas, cinceles y marro.

### **6.3 Trabajo de Laboratorio**

El trabajo de laboratorio comprende varios ensayos realizados a especímenes de roca mediante el empleo de equipos especializados para la obtención de sus parámetros petrofísicos y mecánicos. La metodología empleada para cada prueba de laboratorio está sujeta a normas internacionales propuestas por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés), las cuales están debidamente citadas dentro de este capítulo. Cabe resaltar que cada ensayo se realizó metodológicamente conforme lo dicta la norma correspondiente.

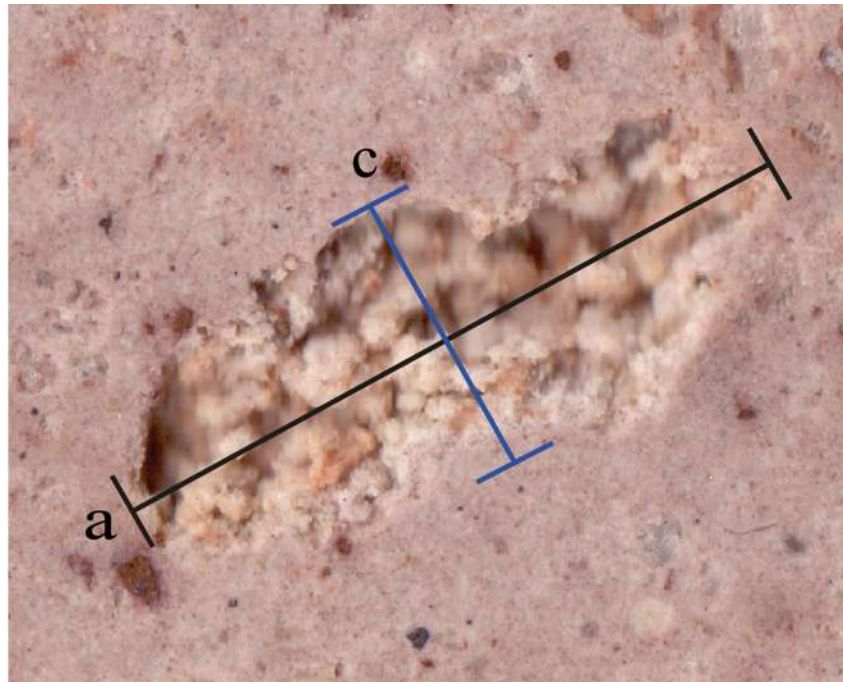


Figura 7 Imagen de una pómez donde se ilustra cómo es la medición de sus ejes principales, siendo la línea negra la representación de la medición de la longitud y la línea azul la medición del ancho de la pómez.

### 6.3.1 Corte y preparación de especímenes

Se recolectaron seis bloques de roca con tamaño de  $\sim 30 \times 30 \times 30$  cm de dimensión y posteriormente se labraron en especímenes cilíndricos de roca de diferentes pulgadas bajo los estándares internacionales (*ASTM D4543*, 2001). Así mismo, todos los especímenes fueron revisados y rectificados con equipos propuestos por las normas internacionales, incluyendo la rectificadora de especímenes (Figura 9).

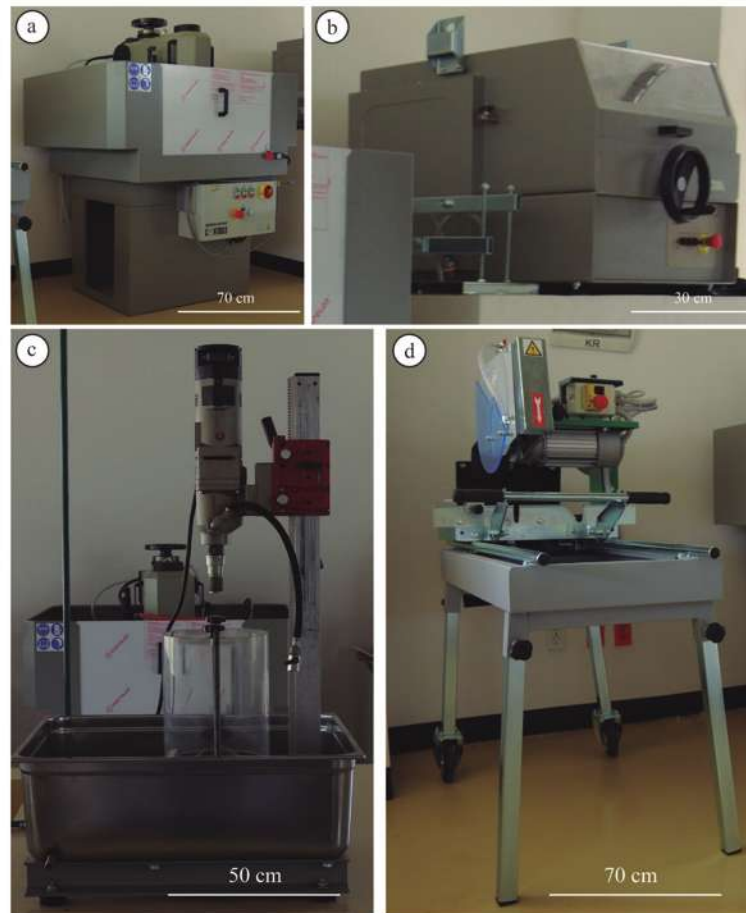


Figura 8 Equipo de corte y preparación de muestras. a) rectificadora de especímenes (55-C0201/3). b) cortadora de testigos y esmeriladora (45-D0536/AZ). c) nucleadora o extractora de núcleos (C0330/Z). d) sierra de banco (55-C02010/DZ). Este equipo pertenece a la Unidad de Petrofísica de la Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia

### 6.3.1.1 Elaboración de láminas delgadas

La elaboración de las láminas delgadas se realizó en el Laboratorio de Petrografía perteneciente al Instituto de Geofísica Unidad Michoacán y requiere una serie de pasos. Entre los más importantes se puede mencionar el corte y el desbastado de los especímenes de roca. Para el análisis se seleccionaron y cortaron 18 fragmentos de roca a un tamaño de  $\sim 45 \times 25 \times 25$  mm, que luego fueron impregnados con una mezcla de resinas *EpoxiCure* y puestos en una cámara



de vacío para limpiar los residuos adheridos (Figura 10a). Luego de esto se dejaron secar a la intemperie por 24 horas. Posteriormente, con una cortadora de mesa (*Powerfeed Trim Saw 10” /254 mm*, figura 10b) se les quitó el exceso de resina, dejando una de las caras expuestas. En seguida, se tomó cada una de las muestras y a la cara expuesta se les pegó un portaobjetos para después desbastar con ayuda de abrasivos desde el más grueso al más fino con no. 100, 200, 240 400, 600 y 1,000. Una vez obtenida un espesor adecuado de cada uno de los especímenes de roca, nuevamente fueron introducidos a un baño ultrasónico (Figura 10b) para limpiar impurezas, para luego ser secadas utilizando una resina UV. Todo el proceso del desbastado es hasta conseguir un espesor de 0.03 mm (30  $\mu\text{m}$ ) en cada muestra. Para así poder observar y describir las propiedades de los minerales, tales como su textura, fábrica, color, brillo, morfología, relieve, extinción de las fases minerales, exfoliación, etc., bajo el microscopio petrográfico.

### 6.3.2 Caracterización física

#### 6.3.2.1 Estudios texturales con base en análisis de imágenes 2D

Para el análisis de las imágenes se utilizó el *software* de uso gratuito *ImageJ* (<https://imagej.nih.gov/ij/download.html>). Este software permite el procesado de imágenes con base en una serie de ajustes como el contraste, la binarización y el uso de filtros. Además, el programa permite obtener de manera automática diferentes características como: áreas, contornos, esfericidad y diámetros, y ejecuta transformaciones geométricas, como rotar, escalar y zoom. El *software ImageJ* puede trabajar con un número ilimitado de imágenes simultáneamente, guardar e imprimir imágenes de 8 bits (256 colores), 16 bits (miles de colores) y 32 bits (millones de colores). Puede leer casi cualquier tipo y formato de imagen (por ejemplo, TIFF, PNG, GIF, JPEG, BMP, DICOM, FITS). Se resalta que la calidad en la obtención y el análisis de imágenes depende en gran medida de su adquisición (por ejemplo, escaneo).

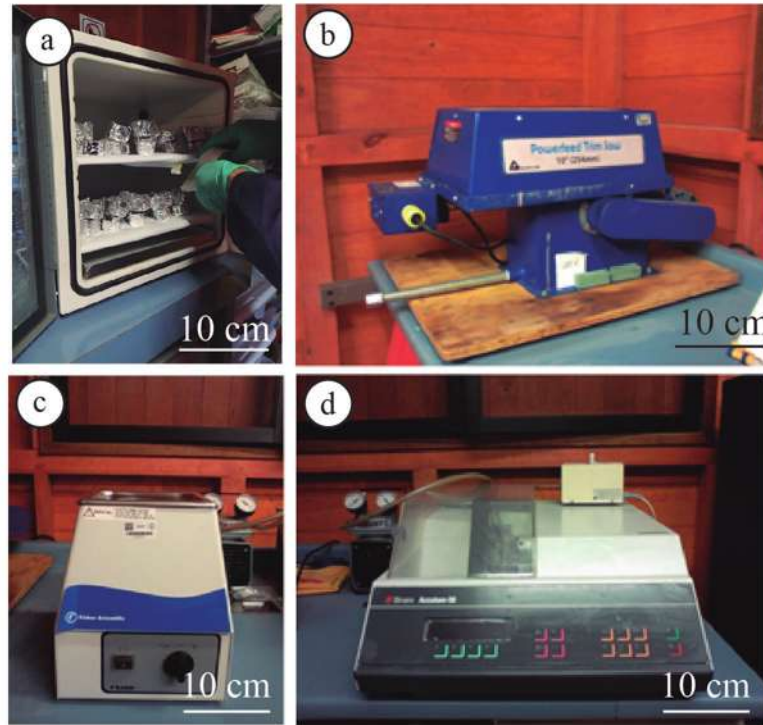


Figura 9 Equipo de corte y preparación de secciones delgadas a) Cámara de vacío *Vacuum Pump v-100*, b) Cortadora de mesa *Powerfeed Trim Saw 10\"* /254 mm, c) Ultrasonido *Fisher Scientific*, d) Cortadora de precisión *Struers Accutom-50*.

Para la estereología se utilizó el principio de Delesse, el cual consiste en que el área ocupada por cualquier elemento (por ejemplo, líticos, pómez) dado una superficie de una sección de roca es proporcional al volumen del elemento en la roca. Este principio se basa en estructuras homogéneas (desde el punto de vista estereológico en “secciones aleatorias isotrópicas y uniformes, Mandarim-de-Lacerda, 2003), solo así se puede considerar que:

$$\frac{A_A}{A_T} = \frac{V_V}{V_T}$$

Donde:  $A_A$  es el área parcial,  $A_T$  es el área total,  $V_V$  es el volumen parcial y  $V_T$  es el volumen total

La metodología para el análisis textural se describe de manera general de la siguiente forma:



- 1) Se cortaron diez secciones planas (Figura 11) de  $\sim 120 \times 100$  mm con un espesor de  $\sim 20$  mm. Una de sus superficies fué desbastada en una base de vidrio mediante el uso de agua y abrasivo de carburo de silicio *Buehler* (N° 240 y 400) con la finalidad de obtener una superficie homogénea y lisa que favorezca el escaneo. Para el escaneo, las secciones planas deben ser humedecidas para homogeneizar el contraste de colores de la imagen digitalizada, además de evidenciar sus elementos. Posteriormente, las imágenes fueron escaneadas utilizando un escáner *Hp Modelo Scanjet 300* a una resolución de 600 ppi.
- 2) El segundo paso básico es el tratamiento de las imágenes mediante el programa *Photoshop* utilizando herramientas básicas (así como, la herramienta barita mágica) para la separación de los diferentes elementos presentes en la muestra como matriz, líticos, fiammes y pómez.
- 3) Una vez que son obtenidas las secciones planas digitalizadas y los elementos de la roca ya agrupados, se introducen al programa (*ImageJ*) para realizar un conteo de las dimensiones y distribución correspondientes a cada uno de los elementos. Los elementos con respecto a su tamaño y porcentaje se obtendrán con las herramientas básicas de binarización y umbral (en inglés “*Threshold*”). Después de este proceso, la imagen queda lista para el análisis de las partículas, el cual se realiza con la herramienta “*Analyze Particles*” y los resultados se obtienen con la herramienta “*Summarize*”. Finalmente, el manejo y análisis de resultados se hace mediante el uso del programa *Excel*, utilizando la escala de tamaños de granos de Fielding (1997) para clasificar los diferentes elementos presentes.

### **6.3.2.2 Densidad**

La densidad es una propiedad de los sólidos, líquidos y gases, y es una propiedad de alta importancia, debido a que no varía su valor a pesar del tamaño del objeto o la cantidad de sustancia. Es una medida de cuanto material se encuentra en un espacio determinado, lo que



quiere decir que es la cantidad de masa por unidad de volumen. La densidad se deriva en 2 tipos:

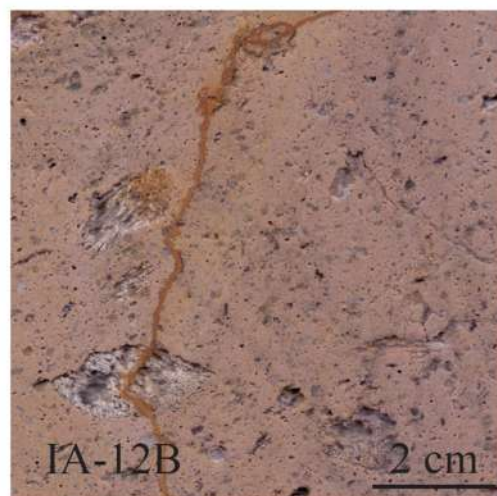
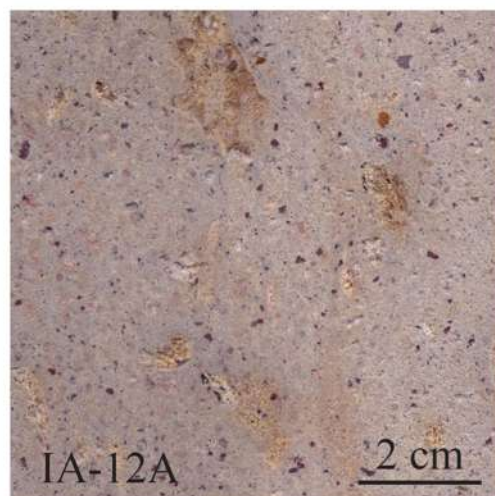
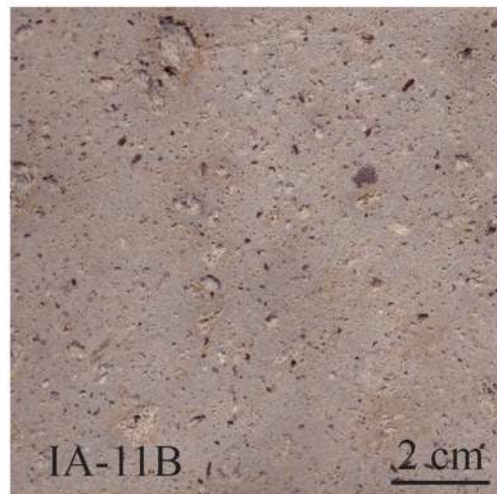
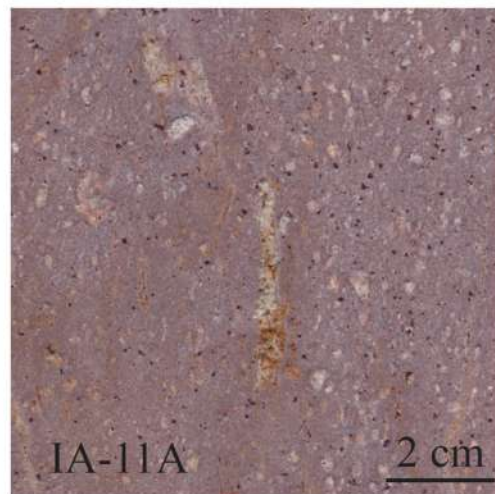
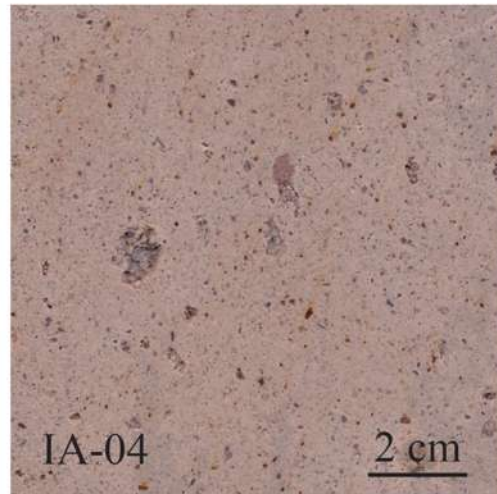
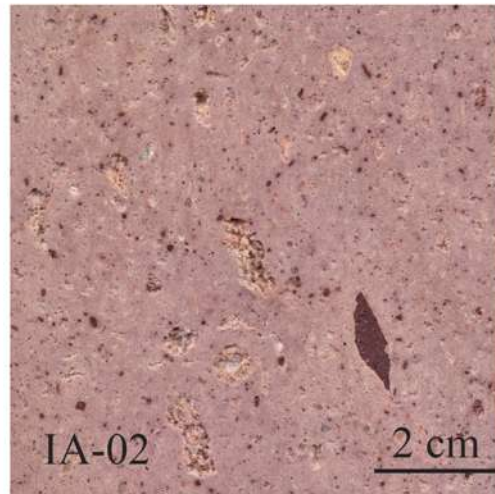
- **Densidad aparente**, es la magnitud que expresa la relación existente entre la masa y el volumen de un cuerpo o sustancia. Por lo general se representa por  $\rho$  y tiene unidades  $\text{kg/m}^3$  (en el Sistema Internacional). Su ecuación se expresa

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Donde  $\rho$  es la densidad aparente,  $m$  es la masa y  $v$  es el volumen del determinado cuerpo

- **Densidad real**, es la densidad del material sólido, excluyendo el volumen de cualquier poro abierto y cerrado; en otras palabras, es la relación entre la masa del espécimen seco y el volumen de su parte sólida.

Para obtener la densidad se utilizó el método del Picnómetro de Helio, ya que es un método basado en el desplazamiento de volúmenes para medir con gran precisión el volumen del esqueleto sólido de cualquier tipo de material. Los picnómetros de Helio son capaces de medir el volumen real de materiales sólidos (ya sean polvos o sólidos porosos). Se utiliza Helio ya que es un gas inerte que además puede penetrar en poros de diámetros muy pequeños (hasta 2 *Angstroms*). Para realizar la prueba de densidad real (o densidad de sólidos) se utilizó el picnómetro de Helio modelo *Ultrapyc* 1200e (Figura 12), la metodología corresponde a la descrita en la norma *ASTM D5550-06*.



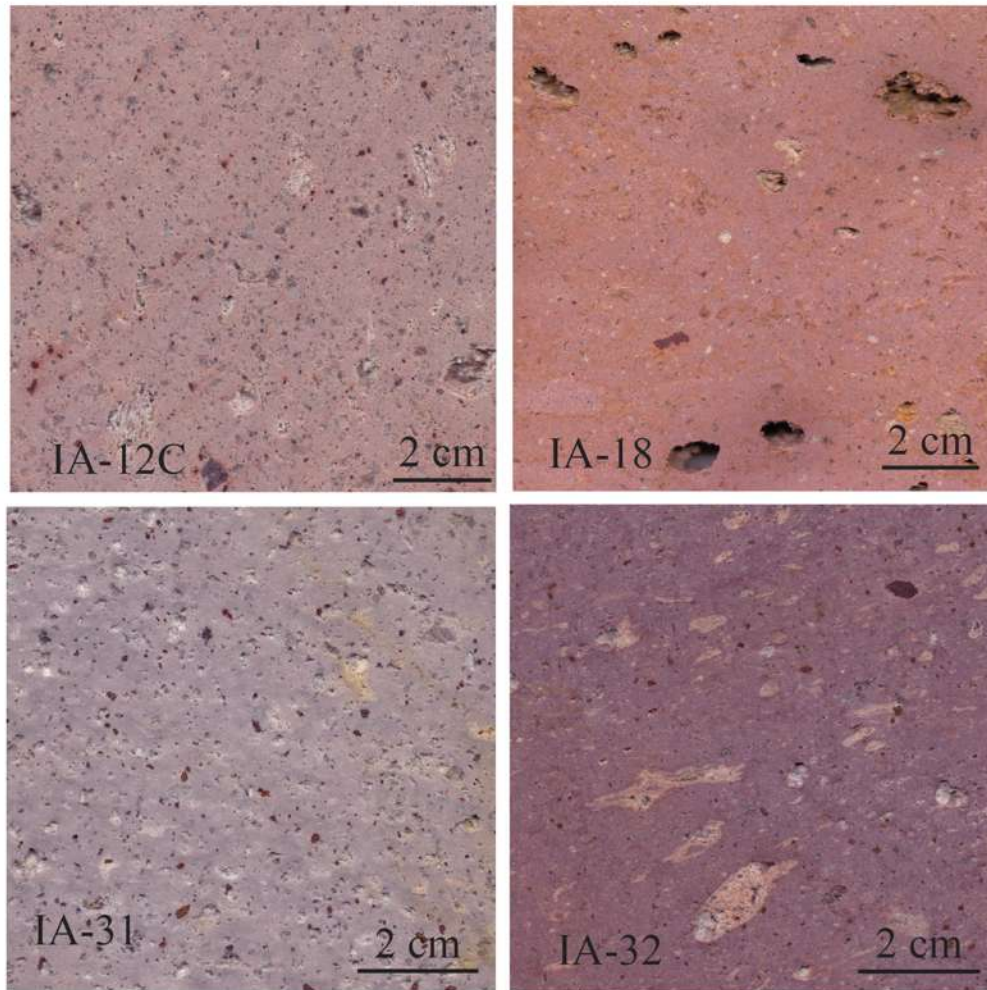


Figura 10 Secciones planas de las diferentes ignimbritas donde se observan variaciones texturales.

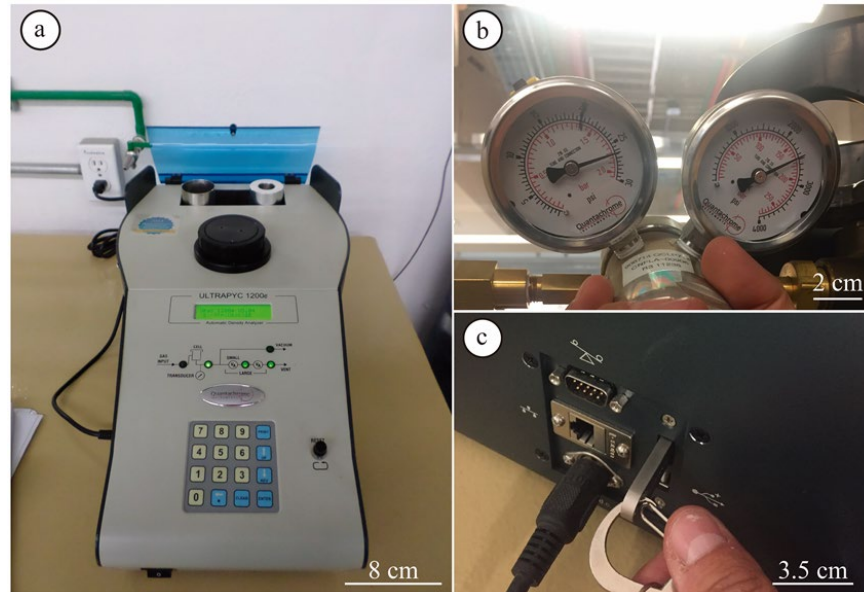


Figura 11 a) Picnómetro de Helio modelo Ultrapyc 1200e. b) válvulas de presión. c) entradas del equipo para conexiones externas (por ejemplo, puertos USB).

### 6.3.2.3 Porosidad

Se denomina porosidad al conjunto de espacios vacíos (por ejemplo, grietas, fracturas y vesículas) que posee una roca. La porosidad se define como la relación entre el volumen de espacio vacío en una muestra entre el volumen total de la muestra expresada en porcentaje. Se considera la propiedad que más influye en las características de resistencia de la roca: es sabido que existe una relación directa entre la porosidad y la resistencia de las rocas, entre más porosa una roca presenta menor resistencia, también se sabe que no solo el porcentaje de poros influye en la resistencia, sino también su tamaño y distribución. Existen diferentes tipos de porosidades:

**Porosidad efectiva (o abierta):** se refiere al porcentaje de poros interconectados que permite la circulación de fluidos.

$$h_e = \left[ \frac{v_a}{v_t} \right] * 100$$

Donde:  $h_e$  es la porosidad efectiva,  $v_a$  es el volumen de poros abiertos y  $v_t$  volumen total de la roca.



**Porosidad Absoluta o total:** es considerada como el volumen poroso total independientemente de si están o no interconectados.

$$h_T = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_r}\right) * 100$$

Donde:  $h_T$  es la porosidad total,  $\rho_a$  es densidad aparente,  $\rho_r$  es la densidad real.

**Porosidad No Efectiva (o cerrada,  $\eta_c$ ):** representa la diferencia entre las porosidades absoluta y efectiva, es decir, los poros que no están interconectados.

Para obtener la porosidad efectiva se utilizó el método de porosidad por medio de vacío más conocida como el método de saturación de Barnes al vacío, la cual se describe a continuación:

#### **Método de saturación de Barnes al vacío**

Esta técnica experimental se basa en introducir un fluido en los poros por medio de una cámara de vacío para cuantificar su volumen (Alonso, 2013). Para realizar esta prueba se utilizó una cámara de vacío 800-VAC/S, (Figura 13) y la metodología empleada es la referente a la norma UNE-EN 1936 (2007) en la que se describe la preparación de los especímenes, así como los pasos a seguir. Algunos de los pasos más importantes del procedimiento técnico son los siguientes:

1. Los especímenes son puestos a secar en horno ventilado a una temperatura de  $70 \pm 5$  °C hasta tener una masa constante. Se considera que ha alcanzado la masa contante cuando la diferencia entre dos pesadas efectuadas en un intervalo de 24 horas no es superior al 0.1 % de la masa del espécimen.
2. Una vez secos los especímenes se colocan dentro de una cámara de vacío y se disminuye gradualmente la presión hasta alcanzar una presión de 2 kPa o 15 mm Hg, esta presión se mantiene por  $2 \pm 0.2$  horas para eliminar el aire de los poros.

3. Transcurridas las 2 horas se introduce agua destilada lentamente en el recipiente de vacío, en un tiempo mínimo de 15 minutos, manteniendo la presión de 2 kPa. Una vez que todos los especímenes están sumergidos totalmente se reestablece la presión atmosférica del recipiente y se mantienen sumergidos a presión atmosférica por otras 24 horas.
4. Después de las 24 horas, se determina el peso sumergido de los especímenes, así como también se pesan al ambiente lo más rápidamente posible para obtener la masa saturada.
5. Ya obtenida la masa saturada de todos los especímenes se procede a obtener el coeficiente de absorción mediante la siguiente ecuación:

$$C_{abs} = \left( \frac{Ms - Md}{Md} \right) * 100$$

Donde:  $C_{abs}$  es el coeficiente de absorción,  $Ms$  es la masa saturada del espécimen,  $Md$  es la masa seca del espécimen.



Figura 12 Cámara de vacío 800-VAC/S

### 6.3.3 Caracterización Mecánica

El comportamiento mecánico de las rocas está definido por su resistencia y su deformabilidad. En otras palabras, la resistencia es el esfuerzo que soporta una roca para determinadas



deformaciones que producen su rotura, como pérdida de cohesión interpartícula en la superficie de falla. Cuando la resistencia se mide en especímenes de roca sin confinar se denomina resistencia a compresión simple. Su valor es necesario para el análisis de cualquier problema geotécnico. Los resultados de la prueba se visualizan mediante gráficas esfuerzo - deformación. Así mismo, las constantes elásticas ( $\nu$  y  $E$ ) se obtienen con base en las características del segmento lineal-elástico de la curva esfuerzo-deformación (*ASTM D7012*). Las deformaciones son medidas mediante el uso de transformadores diferenciales de variación lineal (LVDT) que miden deformaciones locales (axiales y radiales). Por otro lado, la carga es registrada mediante el uso de dos celdas de carga (interna [dentro de la celda de carga] y externa [integrada en el marco de compresión]) que tienen una capacidad máxima de carga de 250 kN.

#### **6.3.3.1 Resistencia a compresión simple ( $\sigma_{max}$ )**

La prensa de carga de rigidez virtual infinita GDS 250 kN determina con gran precisión la resistencia de núcleos de roca a compresión simple. Como se describe en el párrafo anterior, permite la construcción de curvas esfuerzo-deformación por medio de las cuales se pueden calcular los módulos estáticos (por ejemplo, Módulo de *Young*, relación de *Poisson*). El método consiste en un marco de carga que se desplaza a una velocidad constante y registra la evolución de las cargas y desplazamientos hasta la falla del espécimen mediante un *Data Log*. El equipo se manipula con base en el uso de una plataforma, y permite controlar con gran precisión la velocidad de carga o la velocidad de desplazamiento. La interfaz del *software* o plataforma permite visualizar en tiempo real distintos tipos de gráficas, entre las cuales se incluyen las curvas esfuerzo-deformación y la evolución de las deformaciones locales que sufre el espécimen (deformadores locales, LVDT *Local Strain Transducers*). Los accesorios del equipo están diseñados para trabajar con muestras cilíndricas de  $54 \pm 0.5$  mm de diámetro y  $100 \pm 10$  mm de altura. Como se mencionó anteriormente, la parte lineal de la curva esfuerzo-deformación sirve para la determinación del Módulo de *Young* y la Relación de *Poisson*. Dicha parte lineal sigue lo establecido en la Ley de *Hooke*, que entre otras cosas establece que la



deformación de un material es proporcional al esfuerzo que se aplica sobre el mismo. La relación de *Poisson* se obtiene relacionando las deformaciones laterales y las axiales.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Donde: **E** es el Módulo de Young o Módulo Elástico (MPa),  **$\sigma$**  es el Esfuerzo normal a la sección transversal del espécimen (MPa) y  **$\varepsilon$**  es la Deformación del espécimen (mm/mm)

$$v = \frac{\varepsilon_{lat}}{\varepsilon_{axl}}$$

Donde: **v** es la Relación de Poisson (adimensional);  $\leq 0.5$ ,  **$\varepsilon_{lat}$**  es la Deformación lateral del espécimen (mm/mm) y  **$\varepsilon_{axl}$** : Deformación axial espécimen (mm/mm).



## 7 Resultados

### 7.1 *Estratigrafía de la caldera Atécuaro*

La evolución volcánica de la caldera Atécuaro está construida por al menos seis unidades estratigráficas, las cuales se describen a continuación de la más antigua a la más reciente.

#### 1. Mesa de lavas de composición andesita-basáltica (21.5 Ma)

Esta mesa de lava aflora en la parte oriental de la caldera Atécuaro, en la cascada de los filtros viejos del río Chiquito. Es masiva de color gris oscuro con zonas alteradas de color rojo, afanítica, en muestra de mano se observan cristales de olivino (iddingsitizado), clinopiroxeno y plagioclasas, los cuales están soportados por una matriz traquítica con microlitos de plagioclasas.

#### 2. Domos Pre-caldera (<19.4 Ma)

Estos domos de lava constituyen la parte inicial del edificio volcánico y se encuentran a lo largo del camino que va de Morelia a Atécuaro y en el área del río Chiquito (Figura 13a). Se componen de lava afanítica de color gris oscuro, en zonas alteradas presenta un color rojizo, masiva, en muestra de mano se observaron cristales de plagioclasa, ortopiroxeno y olivino (iddingsitizado) soportados en un matriz hipocrystalina. A nivel afloramiento esta unidad es representada por una secuencia de lavas en entabladura (Figura 13a) que presenta una coloración oscura en zonas frescas y rojiza en zonas alteradas de textura afanítica. En muestra de mano se observan minerales ferromagnesianos color verde, que posiblemente corresponden a clinopiroxenos soportados por una matriz vítrea. Se distinguen tres familias de discontinuidades (con una dirección preferencial de 349°/76° NE). Presenta variaciones en la alteración que va de mayor alteración en la parte externa y que se va reduciendo hacia la parte interna de la unidad.



### 3. Ignimbrita Atécuaro (formación de la caldera, 16.8 Ma)

La ignimbrita Atécuaro, tiene una importante distribución en la región, que es usada estratigráficamente como una unidad guía. Los mejores lugares donde se expone la ignimbrita son a lo largo del escarpe de la falla Morelia y Cerritos, así como en los filtros viejos del río Chiquito de Morelia y en la carretera a Pátzcuaro (Cointzio).

Esta unidad corresponde a una ignimbrita producto de los procesos conocidos como corrientes de densidad piroclástica concentrada y ésta presenta diferentes grados de soldamiento con una amplia variedad de colores debido a la alteración y meteorización alteración, desde colores blanco grisáceo a guinda rojizo (figura 13 y figura 14). Esta ignimbrita se compone en su mayoría de pómez de diferentes tamaños con una gradación inversa soportadas por una matriz de ceniza constituida de esquirlas, líticos, pómez y cristales.

En otros sitios, es muy común que la ignimbrita exhibe cavidades a diferentes niveles debido a la erosión de los fragmentos de pómez (sección IA-18, figura 14e), la que se encuentra también afectada por fracturas y fallas rellenas de arcilla (sección IA-10, Figura 14f).

La facies que corresponde a la brecha de rezago se encuentra al sur de Zimpanio Norte (en la ladera superior de la caldera) y en una parte de la carretera que va de Morelia al poblado de Atécuaro. La ignimbrita aquí se observa con estructura masiva, los fragmentos se encuentran pobremente seleccionados, estos fragmentos tienden a ser tamaño bloque de diferente composición. La mayoría de los fragmentos tienden a estar entre subredondeados a subangulosos, soportados por una matriz vítrea heterolitológica (líticos accidentales y cristales). Dentro de los componentes se distinguen hasta once diferentes líticos que varían de 2 a 16 cm en tamaño. En general, los minerales que presentan los líticos son plagioclasas, anfíboles, clinopiroxeno, y cuarzo.

Se realizaron 32 puntos en campo (de los cuales el IA-05, IA-07, IA-08, IA-21, IA-28, IA-29, IA-31 e IA-32 son puntos de control) donde se describieron las características de los afloramientos vistos en cada punto, estos se muestran en la Figura 16. En la Tabla 1 se describen de manera general las características de los diferentes afloramientos de ignimbrita,

así como de sus componentes y relación de aplastamiento de pómez. Se puede realizar una agrupación preliminar del grado de soldamiento de la ignimbrita en cada afloramiento con base en su relación de aplastamiento de pómez. Considerando que el grado de bajo soldamiento es menor al 0.40, grado medio entre 0.40 a 0.70 y de alto grado mayor a 0.70.



Figura 13 Diferentes afloramientos vistos durante el trabajo de campo a) Lava en entabladura perteneciente a un domo pre-caldera, b1 y b2) Ignimbrita Atécuaro masiva de color rosa, c) Ignimbrita Atécuaro masiva de color rosa

que presenta una acumulación de pómez en la parte inferior del afloramiento, d) Ignimbrita muy alterada de color gris claro y e) Ignimbrita masiva de color gris rosáceo.

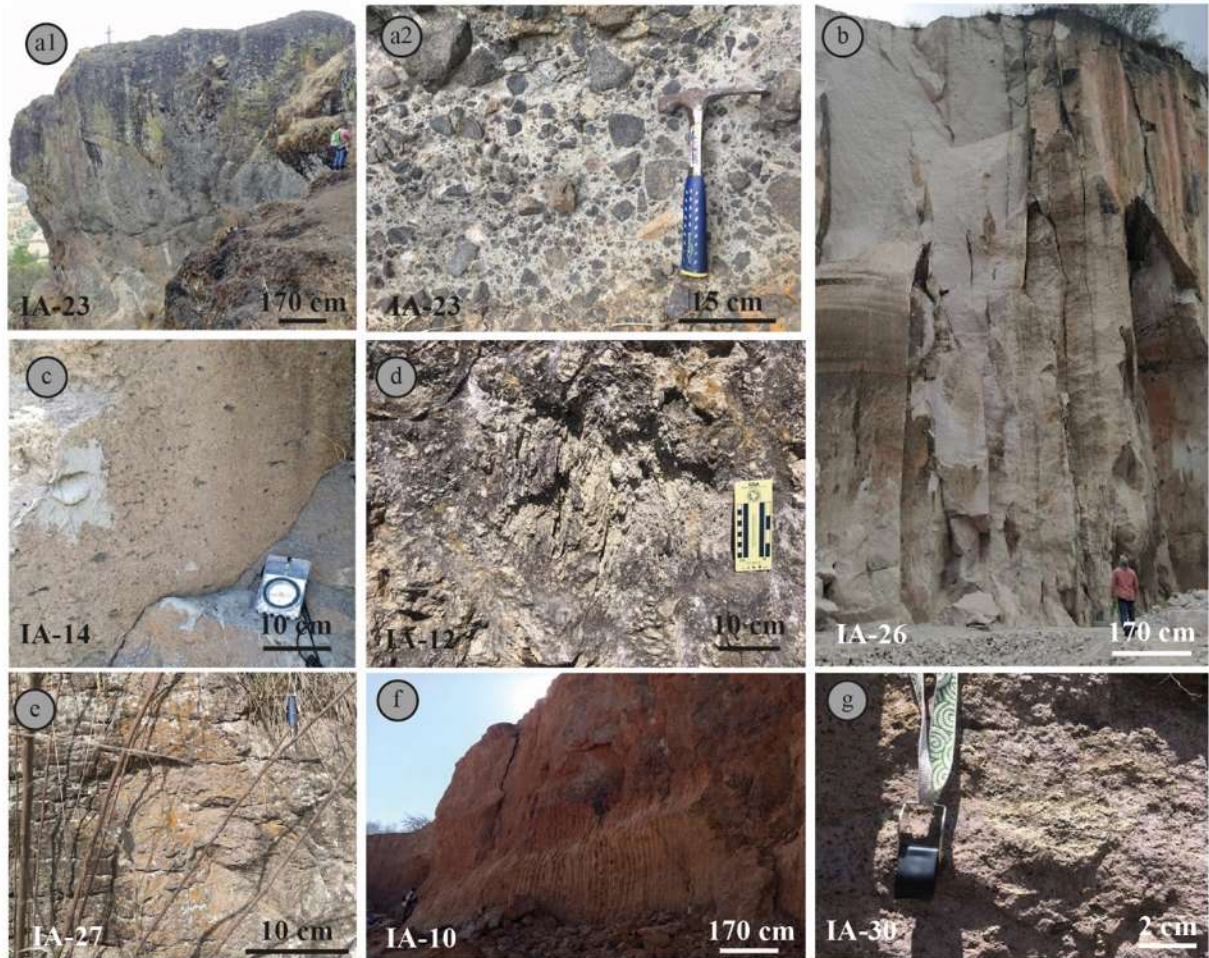


Figura 14 Diferentes afloramientos vistos durante el trabajo de campo. a1 y a2) Lava peperítica perteneciente a un domo post-caldera b) Ignimbrita Atécuaro masiva con disyunción columnar difusa de color rosa con tonalidades grisáceas, c) Ignimbrita masiva con fracturas que hacen que se formen bloques, d) Ignimbrita de color blanco grisáceo con pómez subredondeadas, e) Ignimbrita de color rosa grisáceo donde se observan cavidades donde estaban las pómez (fiammes), f) Ignimbrita alterada de color rojizo y g) Ignimbrita masiva de color rosa morado donde se visualiza una pómez de color amarillo.

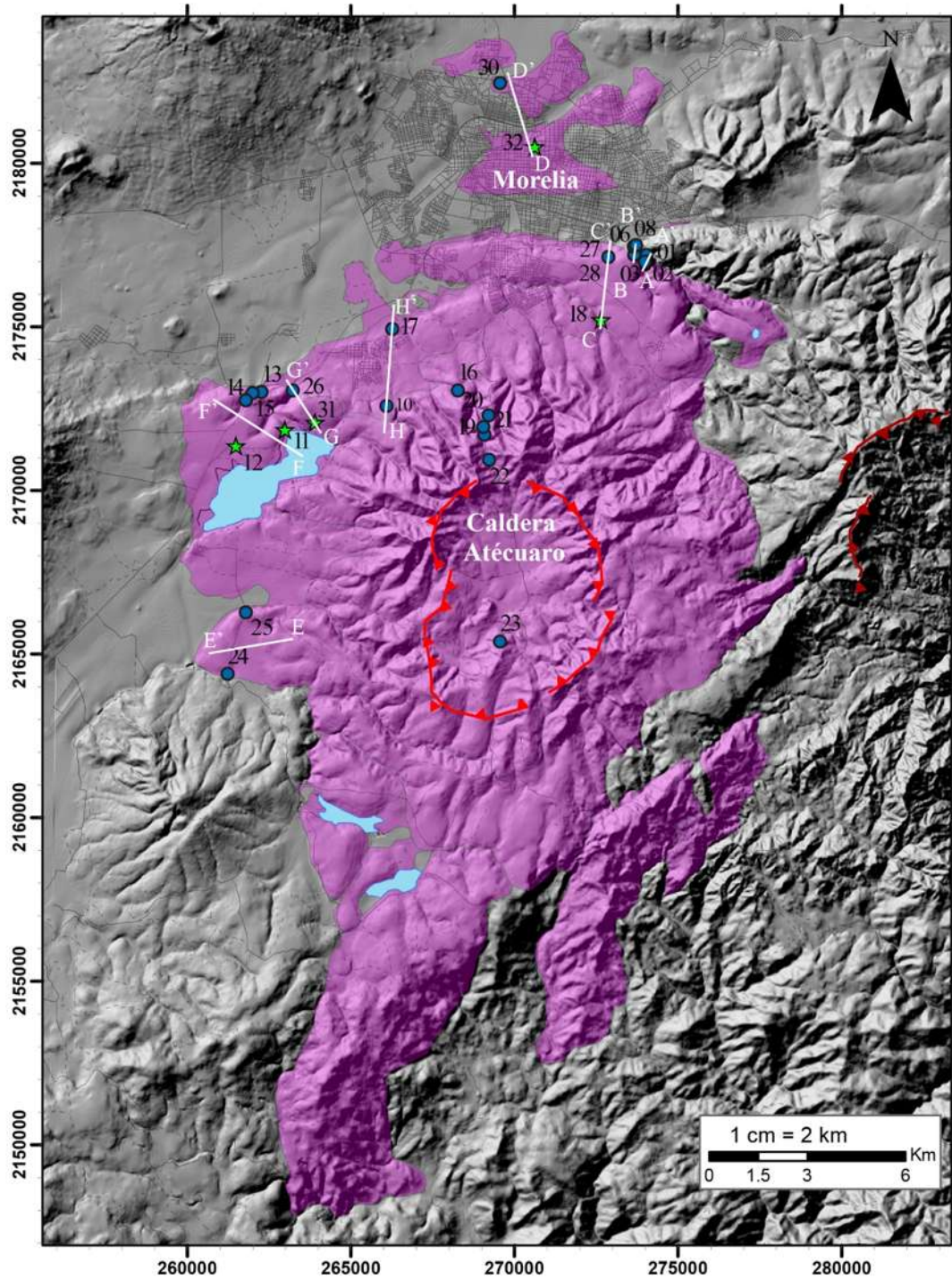


Figura 15 Mapa de localización de los afloramientos (puntos azules), de las zonas donde se recolectaron muestras de roca (estrellas verdes) y de los perfiles topográficos (líneas blancas).



Tabla 1 Descripción general de los diferentes afloramientos de la ignimbrita Atécuaro. \*: puntos de control.

| Afloramiento Depósito   | Estructura (1), Textura (2) y Color (3)   | Componentes  | Minerales                                   | Distancia de la fuente (km) y espesor (m) | Relación de aplastamiento de pómez |
|---|---|--|---|---|------------------------------------|
| IA-02<br>Ignimbrita   | 1. Masiva<br>2. Piroclástica<br>3. Rosa claro   | Minerales, líticos (subangulosos) y pómez  | Feldespato, Sanidino, Anfíbol y Cuarzo      | 7.1<br>5                                  | 0.53                               |
| IA-03<br>Ignimbrita   | 1. Masiva<br>2. Piroclástica<br>3. Rosa   | Minerales, líticos (subangulosos) y pómez  | Feldespato, Cuarzo y Sanidino               | 7.15<br>4                                 | 0.66                               |
| IA-04<br>Ignimbrita (alterada)                                | 1. Masiva<br>2. Piroclástica<br>3. Blanco grisáceo                                    | Minerales, líticos (subangulosos) y pómez  | Feldespatos y Cuarzo                        | 7.24<br>4                                 | -----                              |
| IA-05<br>Ignimbrita*  | 1. Masiva<br>2. Piroclástica<br>3. Rosa claro   | -----  | -----                                       | 7.18<br>10                                | -----                              |
| IA-06<br>Ignimbrita   | 1. Masiva<br>2. Piroclástica<br>3. Rosa, en zonas alteradas presenta un color naranja | Minerales, líticos (subangulosos) y pómez (alineadas)  | Feldespatos y Cuarzo                        | 7.04<br>5                                 | -----                              |
| IA-07<br>Ignimbrita*  | 1. Masiva<br>2. Piroclástica<br>3. Morado-rojizo                                      | Minerales, líticos (subangulosos) y pómez (< 4 cm)   | Feldespato, Sanidino, Hornblenda y Cuarzo   | 7.02<br>10                                | 0.79                               |
| IA-08<br>Ignimbrita*  | 1. Masiva<br>2. Piroclástica<br>3. Blanco grisáceo                                    | Minerales, líticos y pómez   | Feldespatos y Cuarzo                        | 7.41<br>10                                | -----                              |
| IA-09<br>Contacto Ignimbrita-Lava                             | 1. Masiva<br>2. Piroclástica /Afanítica<br>3. Rosa rojizo / rojo oscuro               | Minerales, líticos (subangulosos) y pómez (alineadas)  | Feldespato, plagioclasas y Cuarzo           | 7.45<br>-----                             | -----                              |
| IA-10<br>Ignimbrita (alterada)                                | 1. Masiva<br>2. Piroclástica<br>3. Rojiza   | Líticos (subangulosos) y pómez   | No se aprecian                              | 3.66<br>10                                | 0.85                               |
| IA-11<br>Ignimbrita (dividida en 3 horizontes)                | 1. Masiva<br>2. Piroclástica<br>3. Naranja  | Minerales, líticos (subangulosos) y pómez  | Plagioclasas y Cuarzo                       | 5.46<br>38                                | 0.53                               |
| IA-12<br>Ignimbrita   | 1. Masiva<br>2. Piroclástica<br>3. Blanco grisáceo                                    | Minerales, líticos (subangulosos) y pómez (fibrosas)   | Feldespatos, plagioclasas y Cuarzo          | 6.39<br>6                                 | 0.3                                |
| IA-13<br>Ignimbrita   | 1. Masiva<br>2. Piroclástica<br>3. Rosa   | Minerales, líticos (subangulosos) y pómez (cavidades)  | Plagioclasa                                 | 6.4<br>10                                 | 0.54                               |
| IA-14<br>Ignimbrita   | 1. Masiva<br>2. Piroclástica<br>3. Rosa grisácea                                      | Minerales, líticos (semi subangulosos) y pómez (más pequeñas y en menor cantidad que el IA-13) | Plagioclasa                                 | 6.64<br>10                                | 0.55                               |
| IA-15<br>Ignimbrita   | 1. Masiva<br>2. Piroclástica<br>3. Rosa oscuro  | Minerales, líticos y pómez   | Plagioclasa                                 | 6.64<br>12                                | 0.44                               |
| IA-16<br>Brecha de rezago (por lo menos once rocas agrupadas) | 1. Masiva<br>2. Piroclástica con lentes<br>3. -----                                   | Minerales y líticos (subangulosos a sub-redondeada)  | Feldespato, Clinopiroxeno, Anfíbol y Cuarzo | 2.62<br>6                                 | -----                              |



|  |   |  |  |              |       |
|--|---|--|--|--------------|-------|
| por su color)                                      |   |  |  |              |       |
| IA-17<br>Ignimbrita<br>(alterada)                  | 1. Masiva<br>2. Piroclástica<br>3. Gris   | Minerales, líticos<br>(subangulosos) y<br>pómez  | Plagioclasa, Cuarzo<br>y Anfíboles                       | 5.03<br>12   | 0.7   |
| IA-18<br>Ignimbrita                                | 1. Masiva<br>2. Piroclástica<br>3. Rosa anaranjado  | Minerales, líticos<br>(subangulosos) y<br>pómez (cavidades)  | Plagioclasas   | 5.15<br>3    | 0.51  |
| IA-21<br>Brecha de rezagó*                         | 1. Masiva   | '-----   | '-----   | 1.31<br>3-4  | ----- |
| IA-24<br>Ignimbrita (muy<br>alterada)              | 2. Masiva<br>3. Piroclástica<br>4. Gris claro   | Minerales, líticos<br>(subangulosos) y<br>pómez  | Anfíboles,<br>plagioclasas y<br>posiblemente<br>sanidino | 5.51<br>1.5  | 0.26  |
| IA-25<br>Ignimbrita                                | 1. Bloques<br>2. Piroclástica<br>3. Rosa grisácea   | Minerales, líticos<br>(subangulosos) y<br>pómez<br>(subangulosos a<br>redondeadas)                     | Anfíboles, cuarzo,<br>plagioclasa y<br>sanidino          | 4.64<br>3-4  | 0.5   |
| IA-26<br>Ignimbrita (banco<br>de material)         | 1. Masiva<br>2. Piroclástica<br>3. Rosa con tonalidades<br>grisáceas  | Minerales, líticos<br>(subangulosos) y<br>pómez  | Sanidino, anfíboles,<br>cuarzo y<br>plagioclasas         | 5.77<br>41.2 | 0.55  |
| IA-27<br>Ignimbrita                                | 1. Masiva<br>2. Piroclástica<br>3. Rosa grisácea (en las<br>zonas alteradas tiene una<br>tonalidad gris<br>amarillento) | Minerales, líticos<br>(subangulosos) y<br>pómez (cavidades y<br>pseudo<br>estratificación)             | Plagioclasa, cuarzo<br>y feldespatos                     | 6.76<br>12   | 0.7   |
| IA-28<br>Ignimbrita*                               | 1. Masiva<br>2. Piroclástica<br>3. Rosa grisácea (en las<br>zonas alteradas tiene una<br>tonalidad gris<br>amarillento) | Minerales, líticos<br>(subangulosos) y<br>pómez (gradación<br>inversa y más<br>pequeños que IA-<br>27) | Plagioclasa, cuarzo<br>y feldespatos                     | 6.76<br>50   | 0.77  |
| IA-29<br>Ignimbrita*<br>(similar al IA-03)         | 1. Columnar difusa<br>2. Piroclástica<br>3. Rosa  | Minerales, líticos y<br>pómez  | Feldespatos, Cuarzo<br>y Sanidino                        | 7.1<br>5     | 0.55  |
| IA-30<br>Ignimbrita<br>(alterada y<br>deleznable)  | 1. Masiva<br>2. Piroclástica<br>3. Rosa morado y amarillo<br>(en zonas alteradas)                                       | Minerales, líticos y<br>pómez  | Plagioclasas, cuarzo<br>y algunos óxidos                 | 11.54<br>40  | 0.43  |
| IA-31<br>Ignimbrita*<br>(alterada y<br>deleznable) | 1. Masiva<br>2. Piroclástica<br>3. Blanca-Naranja   | Minerales, líticos<br>(subangulosos) y<br>pómez (alargadas)  | Plagioclasas y<br>Cuarzo                                 | 4.6<br>2-3   | 0.57  |
| IA-32<br>Ignimbrita*                               | 1. Masiva<br>2. Piroclástica<br>3. Blanca-Naranja   | Minerales, líticos y<br>pómez  | Plagioclasas y<br>Cuarzo                                 | 9.88<br>3-4  | 0.74  |

Con lo visto en campo, se separó a la ignimbrita en dos sectores: noroeste (Figura 17) y noreste (Figura 18) y con la finalidad de tener una mejor correlación de las unidades, las cuales se muestran a continuación:

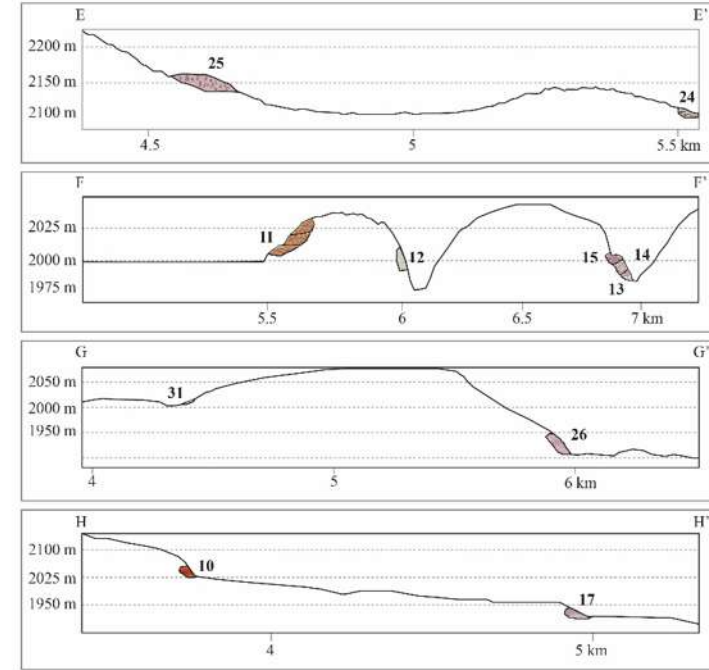
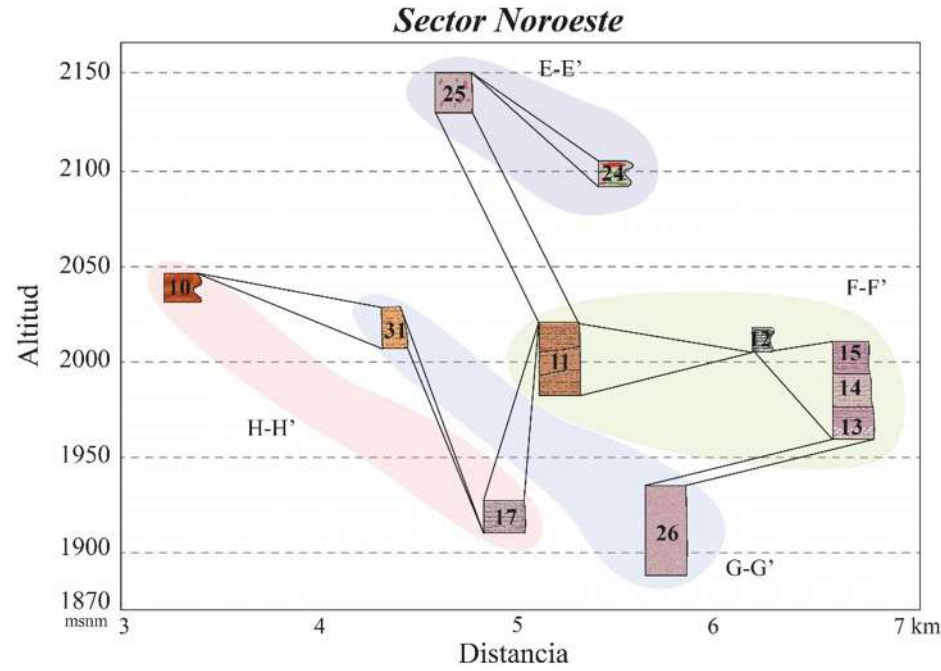


Figura 16 Diagrama en el que se representa la distancia y la altura de los afloramientos visitados en la parte noroeste de la caldera de Atécuaro y su correlación estratigráfica, igualmente se muestra un perfil topográfico para obtener una mejor visualización de los diferentes afloramientos,

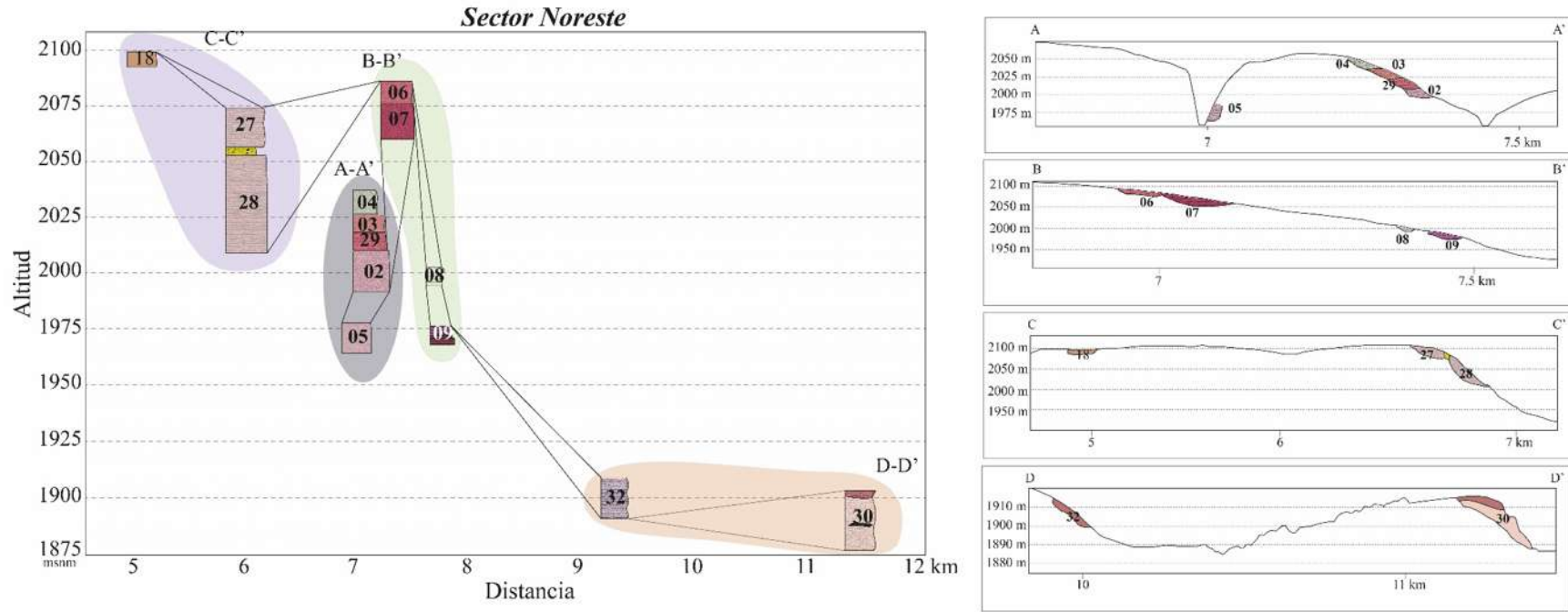


Figura 17 Diagrama en el que se representa la distancia y la altura de los afloramientos visitados en la parte noreste de la caldera Atécuaro y su correlación estratigráfica, igualmente se muestra un perfil topográfico para obtener una mejor visualización de los diferentes afloramientos.



### **Domos Post-caldera (16.3- Ma)**

Afloran al sur de Morelia, en Altozano y en la carretera a Atécuaro. Domos de lavas de textura hipocristalina. En algunas partes se aprecia una lava color rojizo en zonas alteradas y en las partes frescas presenta un color gris oscuro, presentando una alteración por capas o en cebolla. Se observan unas brechas y algunos bloques angulosos y monolitológicos, así como algunos lentes, teniendo varias diaclasas que le dan la forma de lascas, lo que hace que se vea una pseudoestratificación. Así mismo, se observa un domo con facies de autobrecha que consiste en una lava con textura peperítica (Figura 14a1 y a2) que presenta líticas mal seleccionados con tamaños que van de lapilli grueso a bloques, angulares, soportados por una matriz endurecida de coloración grisácea y en unas zonas amarillo claro (indicando una posible alteración hidrotermal) que presenta cristales de plagioclasa, piroxenos y anfíboles. En muestra de mano los líticos presentan cristales de plagioclasa y piroxeno. A lo largo de todo el depósito es común apreciar clastos fracturados en forma de rompecabezas con superficies muy angulares.

#### **4. Flujos de escombros y aluviones**

Los depósitos de flujos de escombros afloran al sur de la ciudad de Morelia. También a lo largo de la falla Morelia, camino a San Miguel del Monte y Atécuaro. Son flujos de estructura masiva, heterolitológicos, constituidos por fragmentos de ignimbrita y líticas de lava de composición andesítica, redondeados, los cuales se encuentran dentro una matriz arenosa. Presenta un espesor que varía de 1 metro hasta más de 15 m.

Con base en el trabajo de campo, que incluye el levantamiento estratigráfico, apoyados en el análisis del relieve de sombras, obtenidos desde los modelos digitales del terreno se realizó la construcción del mapa geológico (Figura 19), donde se muestran las diferentes unidades geológicas que pertenecen a la caldera Atécuaro, así como las unidades (generales) que se encuentran en los alrededores de la misma.

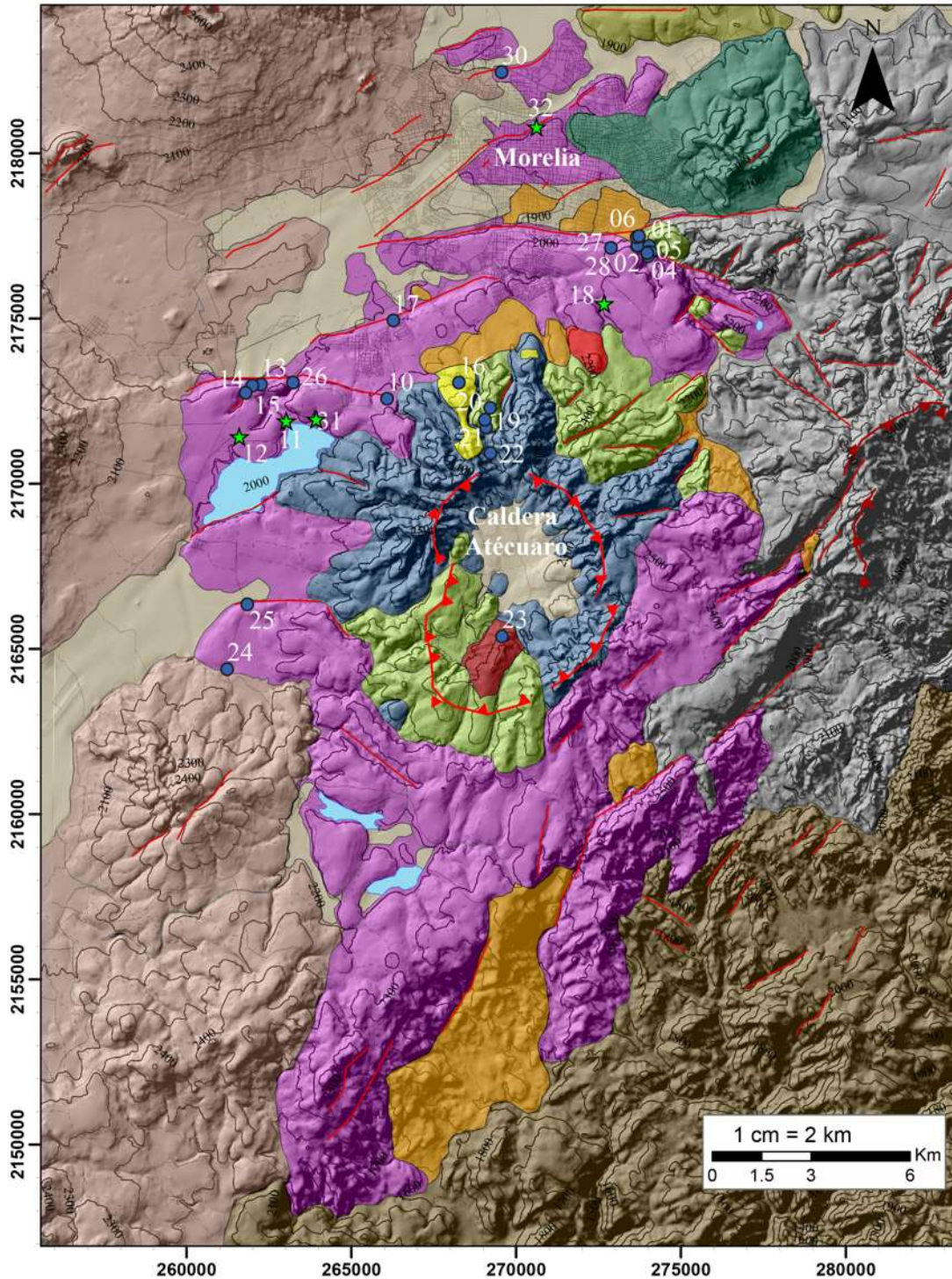


Figura 18 Mapa geológico de la Caldera de Atécuaro con la ubicación de los diferentes afloramientos. Polígonos modificados de Gómez-Vasconcelos *et al.* (2015).

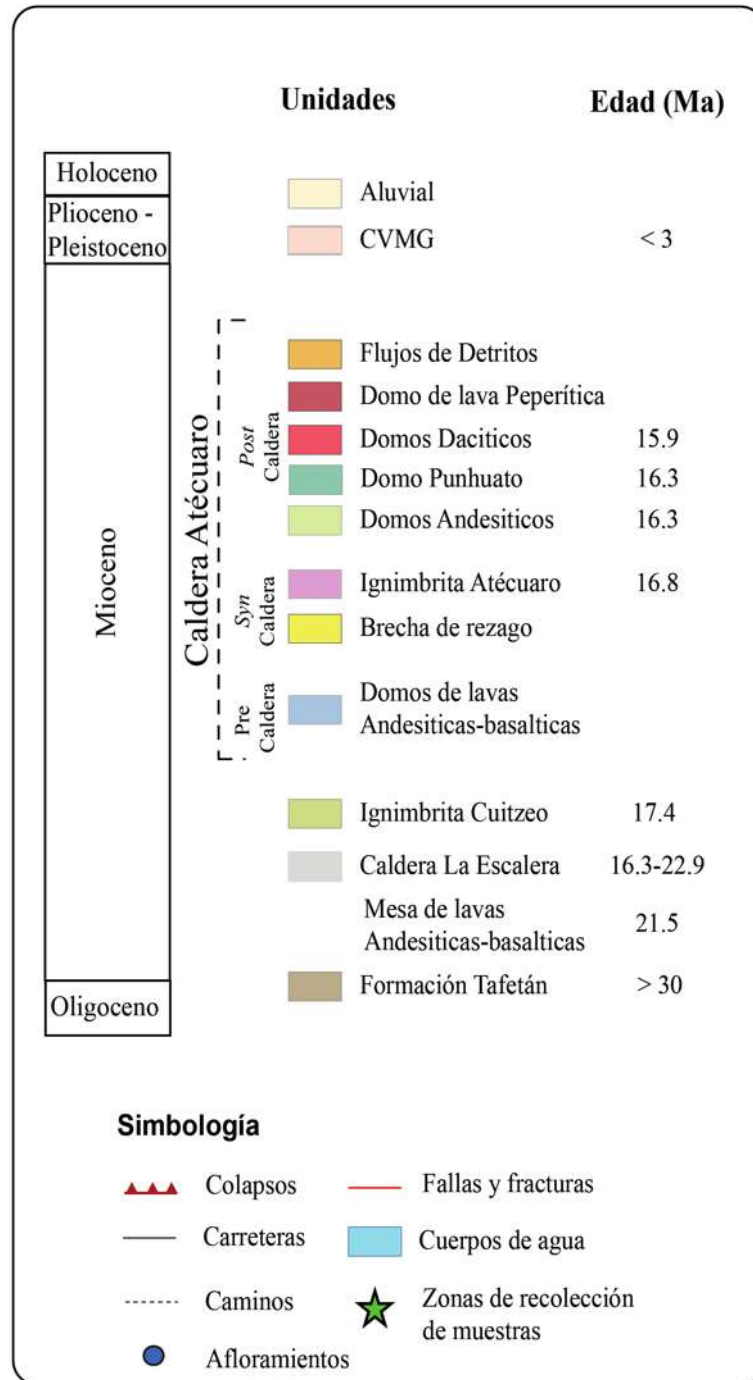


Figura 19 Columna estratigráfica general de la caldera Atécuaro y simbología utilizada en la Figura 18. CVMG, Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato. Edades tomadas de Gómez-Vasconcelos *et al.* (2015).



## 7.2 *Análisis estructural*

La mayor zona de deformación se encuentra principalmente en los sectores central y occidental del CVTM (Salomón-Chida, 2012) producto de la distensión N-S. La porción central del CVTM está afectada por tres sistemas de fallas: 1) Sistema NNO-SSE de edad post-Laramide (<45 Ma) y formado en el contexto de la extensión *Basin and Range* (Henry y Aranda-Gomez, 1992), que incluye fallas normales de altos ángulos reactivadas como fallas transformantes derechas en el campo de esfuerzos actual; 2) el sistema NE-SO, contemporáneo al CVTM y 3) el Sistema de Fallas Morelia-Acambay de edad Mio-Pleistoceno de dirección ~E-O, de fallas normales de alto ángulo, algunas lítricas (Garduño-Monroy et al., 2009). Este últimas representan el sistema más activo del área y representa un segmento del sistema Chapala-Tula (Mazzoldi et al., 2016)

Las fallas que pertenecen al sistema Morelia-Acambay E-O o al Basin and Range N-S son fallas activas que cortan rocas del Mioceno al Cuaternario. En el área de estudio se observan fallas pertenecientes a ambos sistemas de fallas (Figura 20). Las fallas que cortan los depósitos de la caldera Atécuaro son las fallas de Central Camionera, la Colina, Morelia (La Paloma), Cerritos (Morelos) y Cointzio, que pertenecen al sistema de fallas Morelia-Acambay (E-O) (Garduño-Monroy et al., 2009; Gómez-Vasconcelos et al., 2021)

En los modelos digitales del terreno y modelos de sombras de la región se observan varios lineamientos de conos monogénéticos pertenecientes al CVMG (ubicados al norte de la zona de estudio). Así mismo, se observan fallas que afectan a estructuras volcánicas como mesas de ignimbrita que están basculadas hacia el norte y sur, y de fallas y fracturas que facilitan el emplazamiento de diques en la región (Gómez-Vasconcelos et al., 2015).

Con la ayuda de los softwares Stereonet y Win-Tensor se realizó el análisis del promedio de densidad de dirección de fallas y alineamientos, dando como resultado el diagrama de rosas (Figura 20), donde se pueden visualizar tres direcciones N-S, NE-SO y E-O, siendo esta última la dirección más frecuente en las estructuras.

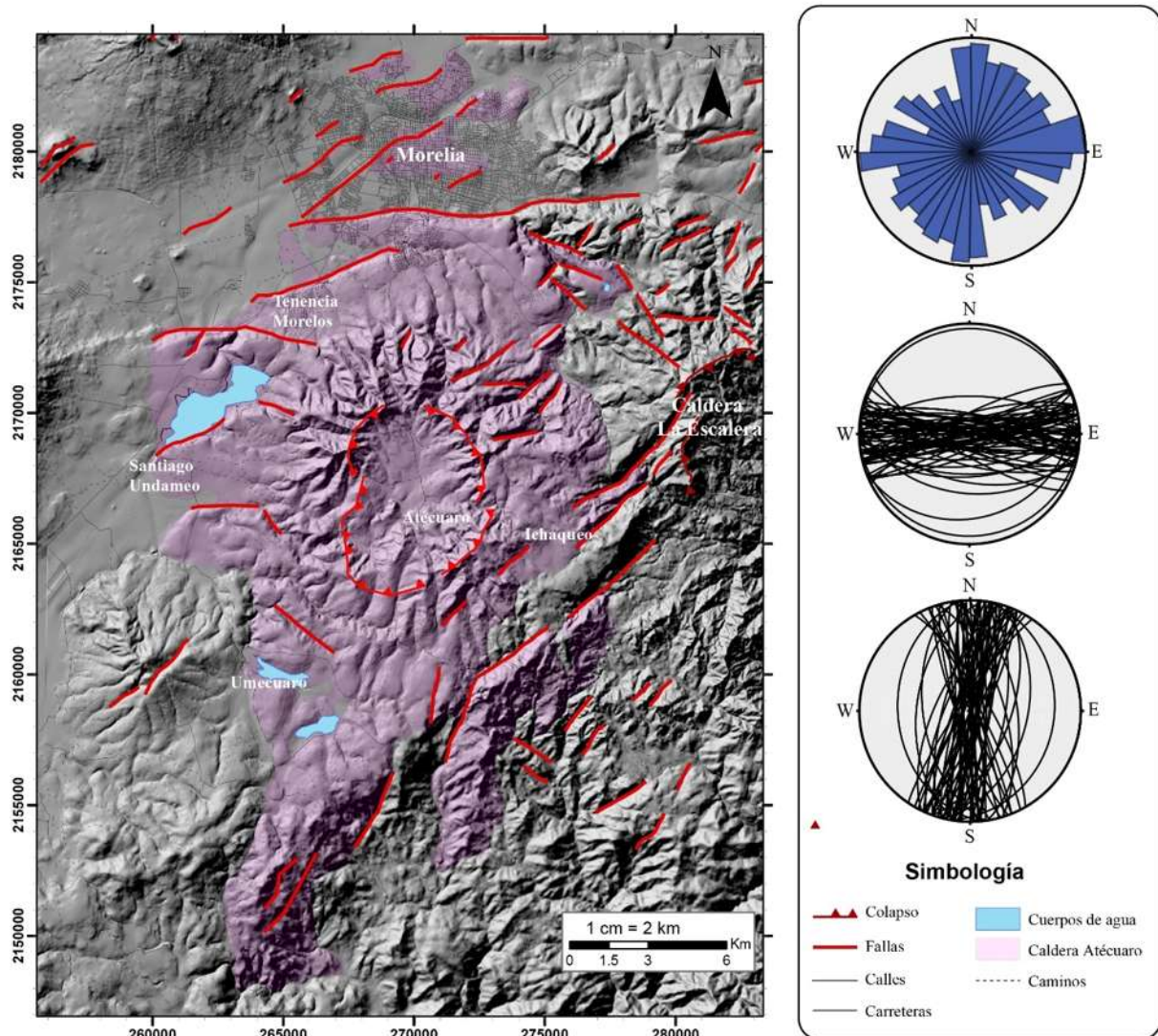


Figura 20 Mapa regional de la caldera de Atécuaro en el que se trazaron las fallas presentes en la zona, así mismo se visualiza de lado derecho superior el diagrama de rosa donde se visualiza la concentración promedio de las mismas fallas y la representación de las mismas con la representación de las zonas de mayor esfuerzo y zonas de menor y mayor distensión.

### 7.3 Petrografía

Para la descripción microscópica se seleccionaron nueve muestras en total, de las cuales se seleccionaron tres de bajo grado de soldamiento, tres de medio grado de soldamiento y tres de alto grado de soldamiento.



### **Descripción microscópica**

#### Bajo grado de soldamiento

Para el bajo grado de soldamiento se seleccionaron las muestras de lámina IA-12A, IA-12B e IA-12C, teniendo como resultado la siguiente descripción:

Las muestras de ignimbrita presentan una textura piroclástica y la componen fenocristales de plagioclasa, algunos minerales alterados que debido a la alteración no se pudieron identificar. No se observaron fragmentos líticos, presenta vesículas circulares y muchos óxidos semicirculares. Algunas de las plagioclasas presentan formas subredondeadas, así mismo, la mayoría de fenocristales de plagioclasa presentan fracturas. La matriz es vitrofídica con zonas y vidrio alterado (Figura 21). En la matriz se distinguen otros componentes vitreos, presenta pequeñas ramas delgadas (trizas vítreas) que tienen formas laminadas a cúspides.

#### Grado medio de soldamiento

Para el grado medio de soldamiento se seleccionaron las muestras de láminas IA-26, IA-11 e IA-13, teniendo como resultado la siguiente descripción:

Las muestras de ignimbrita presentan una textura piroclástica y la componen plagioclasas, minerales alterados, fragmentos líticos, vesículas circulares y muchos óxidos semicirculares. Algunas plagioclasas presentan bordes redondeados a subredondeados y muy pocas presentan fracturas. Algunas plagioclasas presentan alteración, y algunos fragmentos líticos presentan una textura afanítica, de color rojizo y la mayoría presenta una forma subredondeada. Hay vesículas rellenas de resina, las cuales presentan una forma semicircular. La matriz es vitrofídica (con zonas alteradas, Figura 22), en ella son visibles las ramas delgadas (trizas vítreas) que tienen forma laminar a cúspide.

#### Alto grado de soldamiento

Para el alto grado de soldamiento se seleccionaron las muestras de láminas IA-32, IA-07 e IA-10, teniendo como resultado la siguiente descripción:



Las muestras de ignimbrita presentan una textura piroclástica y la componen minerales de plagioclasa, minerales alterados, fragmentos líticos (para el caso de la IA-10 no se observaron fragmentos líticos) y muchos óxidos. Algunas minerales de plagioclasa presentan fracturas y sus bordes redondeados; algunos minerales alterados posiblemente sean plagioclasas. Los fragmentos líticos presentan una forma subredondeada; algunos de ellos tienen una textura afanítica y otros tienen minerales alterados (posiblemente sean plagioclasas) y los óxidos presentan formas subangulosas y alargadas a subredondeados. La matriz es eutaxítica (con zonas alteradas a muy alteradas, Figura 23), con deformación y alineación de las trizas vítreas, así como del vidrio.

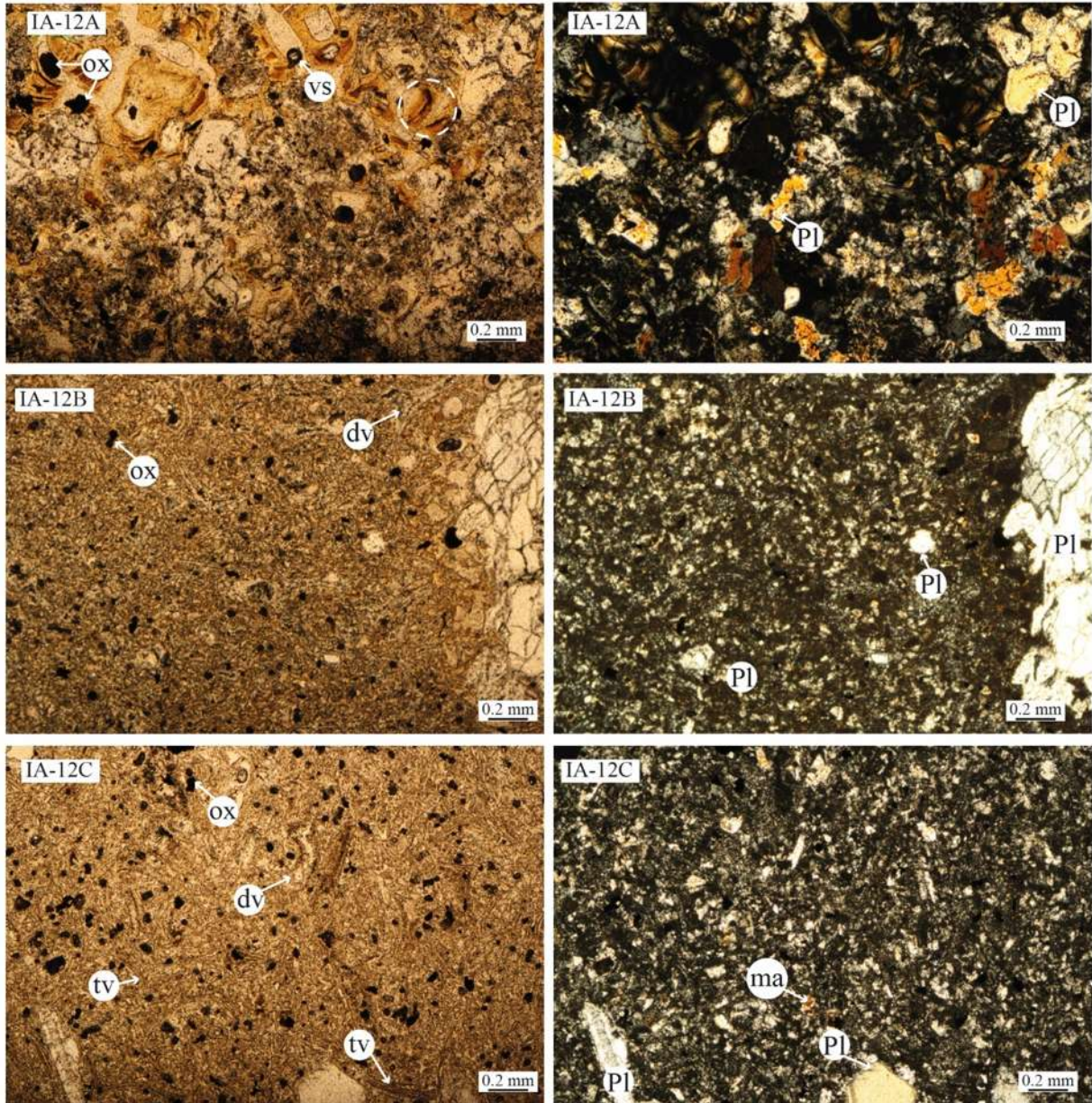


Figura 21 Imágenes de las diferentes laminas delgadas consideradas como bajo grado de soldamiento, donde se observan las variaciones que presenta la matriz, en el contenido de óxidos y minerales, así como la alteración del vidrio (línea punteada blanca). Las imágenes de lado izquierdo son laminas en luz paralela (luz natural) y de lado derecho en polarización cruzada (nicoles cruzados). Ox: óxido, vs: vesícula, Pl: plagioclasa, ma: mineral alterado, tv: trisas vítreas, dv: deformación del vidrio

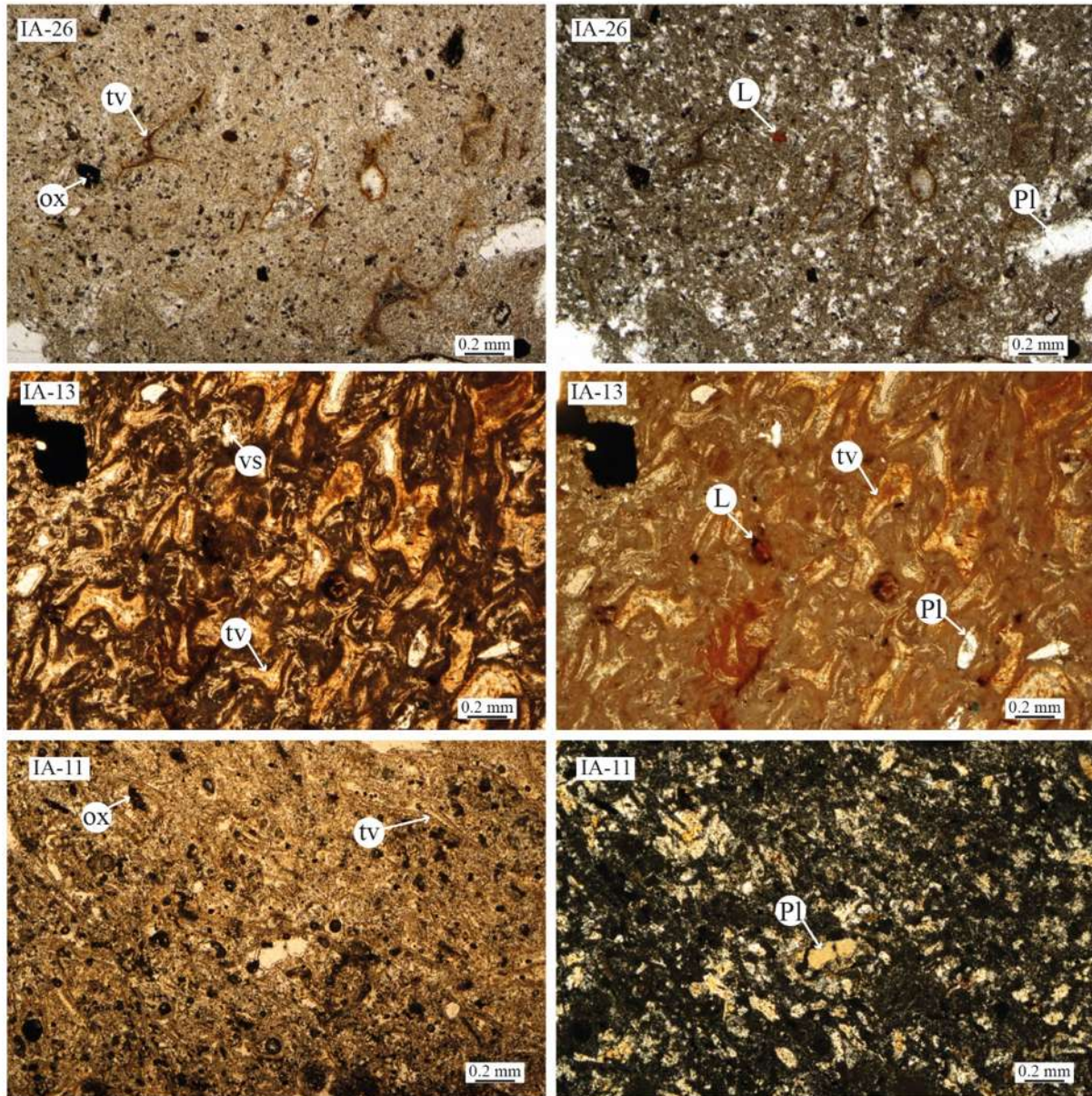


Figura 22 Imágenes de las diferentes laminas delgadas consideradas como medio grado de soldamiento, donde se observan las variaciones que presenta la matriz, en el contenido de óxidos, líticos y minerales. Las imágenes de lado izquierdo son laminas en luz paralela (luz natural) y de lado derecho en polarización cruzada (nicoses cruzados). Ox: óxido, vs: vesícula, Pl: plagioclasa, L: lítico, tv: trisas vitreas.

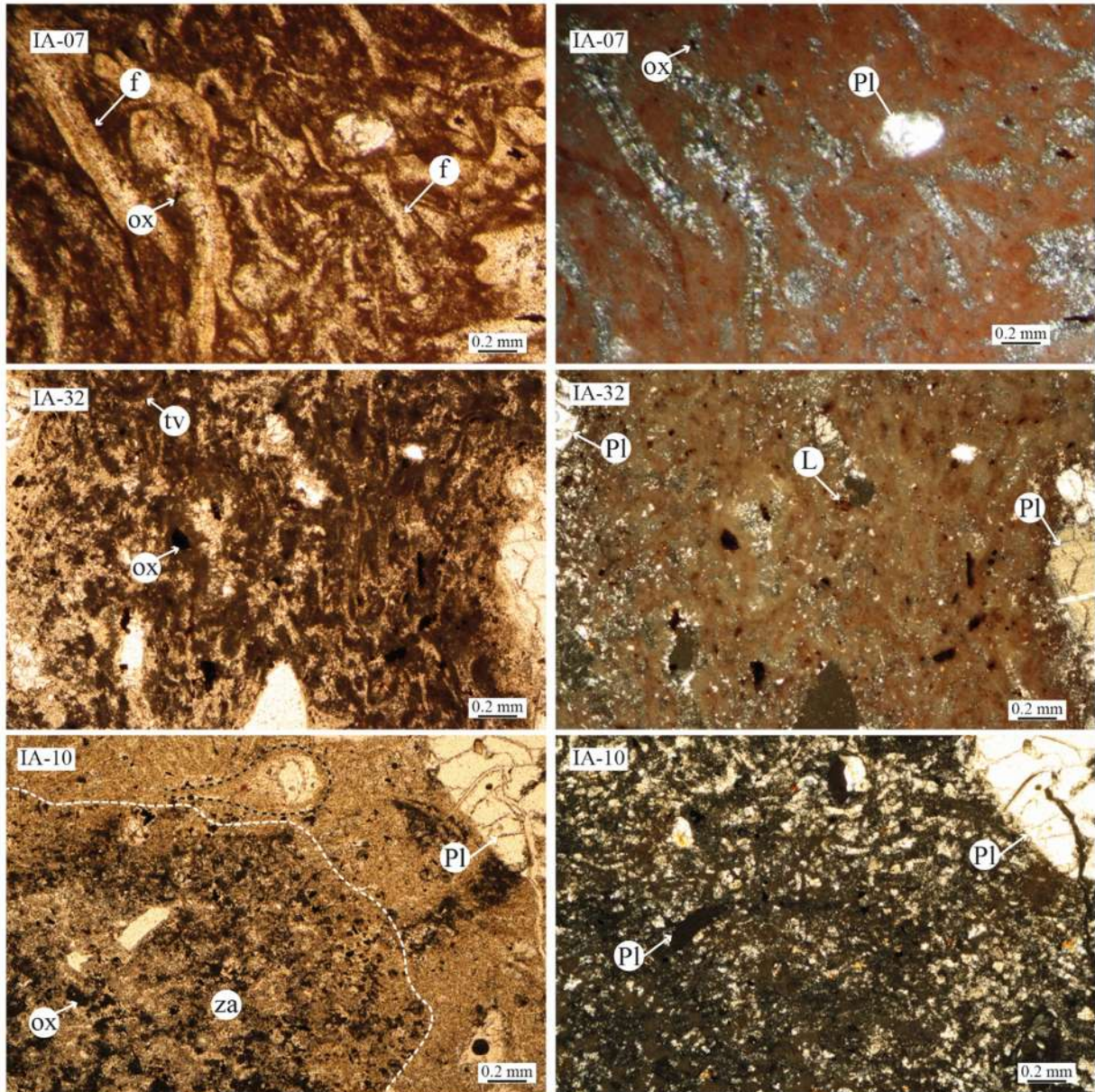


Figura 23 Imágenes de las diferentes laminas delgadas consideradas como alto grado de soldamiento, donde se observan las variaciones que presenta la matriz, en el contenido de óxidos, líticos y minerales. La línea blanca representa el límite de la zona de mayor alteración (za) en la muestra IA-10, así mismo se observa el aplastamiento y deformación de una plagioclasa (línea negra). Las imágenes de lado izquierdo son laminas en luz paralela (luz natural) y de lado derecho en polarización cruzada (nicoses cruzados). Ox: óxido, vs: vesícula, Pl: plagioclasa, L: lítico, tv: trisas vitreas, f: fiammes, za: zona alterada.



## 7.4 Caracterización física

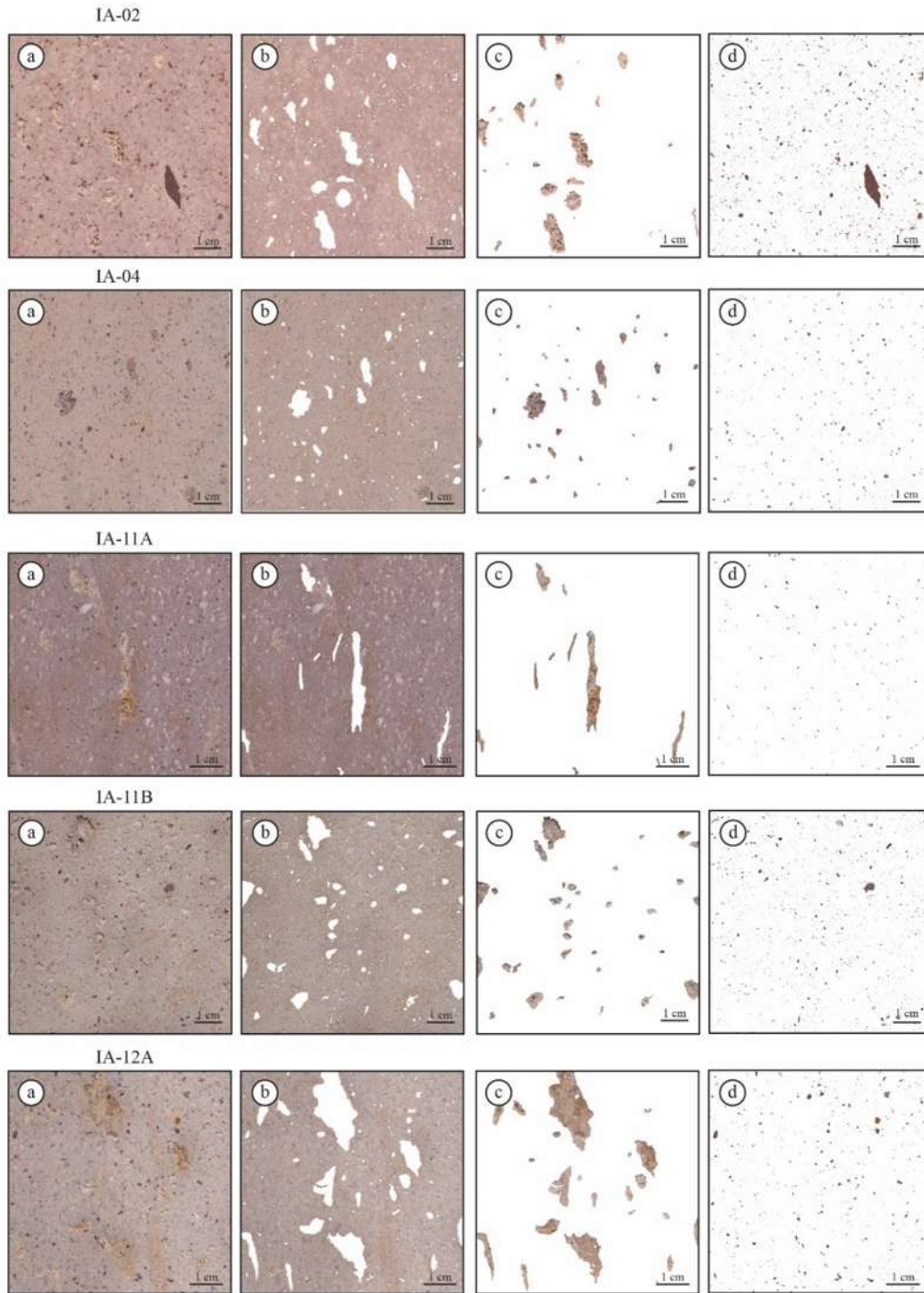
En esta parte se mostrarán los diferentes resultados obtenidos durante el trabajo de laboratorio en cada una de las diferentes pruebas, las cuales corresponden al estudio textural con base en imágenes 2D, porosidad y densidad por intrusión de Helio.

### 7.4.1 Estudios texturales con base en análisis de imágenes 2D

Para el estudio textural se analizaron diez secciones planas (Figura 11) utilizando el software de uso libre ImageJ. El análisis consistió en realizar una clasificación de los componentes de cada roca, los cuales fueron divididos en matriz, pómez y líticos (Figura 24). La Tabla 2 muestra los porcentajes de cada elemento presente en las diferentes secciones planas, teniendo a la IA-31 como la sección plana con mayor porcentaje de matriz (97.22%), a la IA-12B como la de mayor porcentaje en pómez (9.27%) y a la IA-12C como la de mayor porcentaje de líticos (1.77%). Caso contrario a los anteriores tenemos que la IA-12A es la de menor porcentaje de matriz (89.48%), IA-31 como la de menor porcentaje de pómez (2.30%) y a la IA-04 como la de menor porcentaje de líticos (0.11%).

Tabla 2 Porcentaje de los componentes (matriz pómez, y líticos) de las diferentes muestras de rocas (ignimbritas) el color azul representa a los especímenes del sector noroeste y el color naranja representa a los especímenes del sector noreste.

| ID     | % Matriz | % Pómez | % Líticos |
|--------|----------|---------|-----------|
| IA-02  | 93.95    | 4.55    | 1.50      |
| IA-04  | 97.00    | 2.89    | 0.11      |
| IA-11A | 96.84    | 2.99    | 0.17      |
| IA-11B | 95.54    | 2.77    | 1.69      |
| IA-12A | 89.48    | 9.16    | 1.36      |
| IA-12B | 90.38    | 9.27    | 0.35      |
| IA-12C | 94.80    | 3.43    | 1.77      |
| IA-18  | 95.92    | 3.79    | 0.29      |
| IA-31  | 97.22    | 2.30    | 0.48      |
| IA-32  | 94.74    | 4.03    | 1.23      |



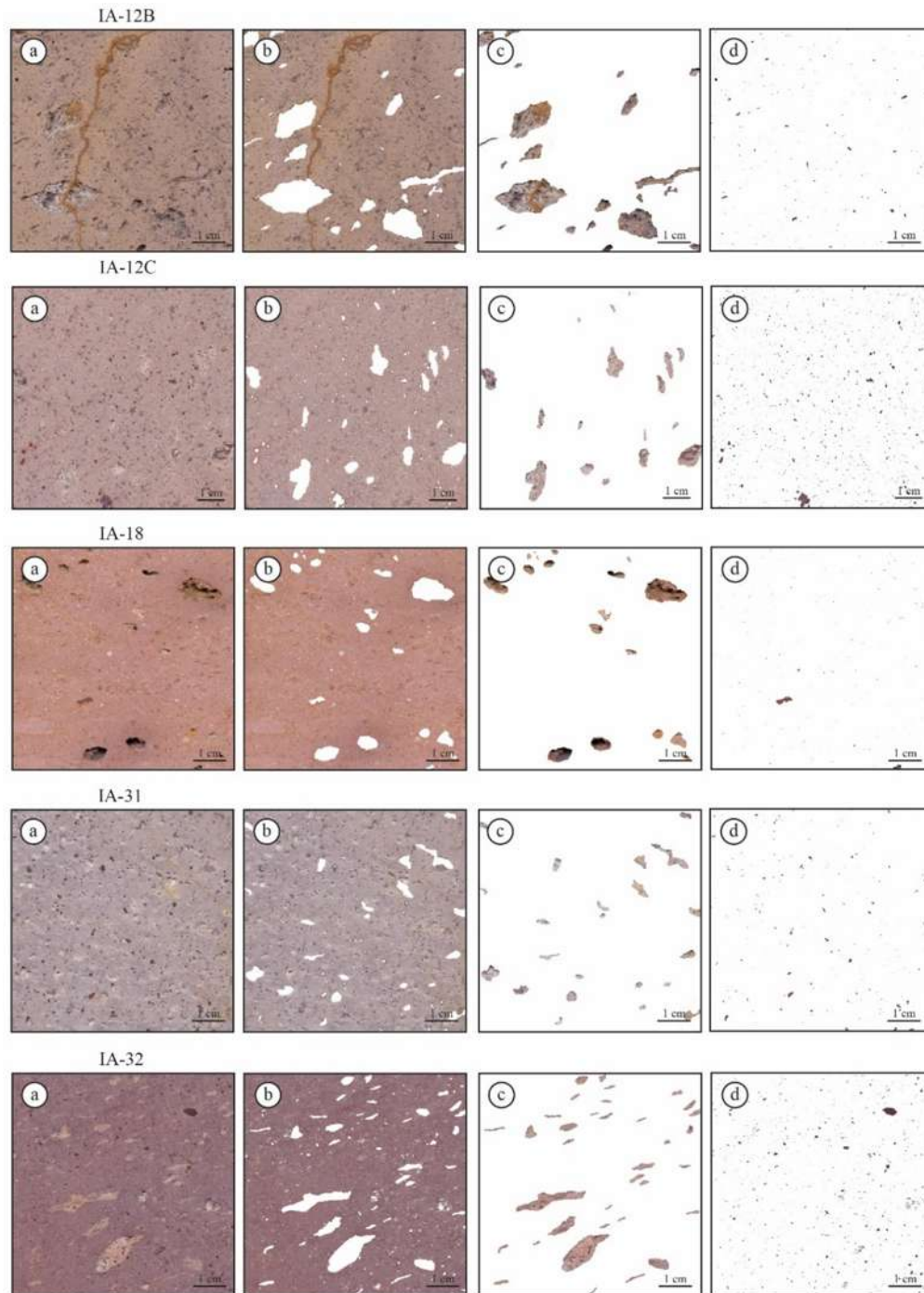


Figura 24 Clasificación de los diferentes componentes que integran las secciones planas de roca obtenidos por medio del programa ImageJ y Photoshop. a) muestra de roca, b) Matriz de roca, c) Pómez presentes en la sección de roca (con una leve orientación) y d) Líticos presentes en la sección de roca.



### 7.4.2 Densidad

Se seleccionaron siete especímenes para realizar esta prueba, el método utilizado y los resultados se consideran muy confiables ya que el equipo hace diferentes mediciones hasta obtener una desviación estándar apegada a las normas internacionales. En la Tabla 3 se muestra una variación de las densidades que va desde los 2.505 a los 2.766 g/cm<sup>3</sup> en el caso de la densidad real. En el caso del coeficiente de absorción tenemos que la IA-12B presenta un mayor porcentaje siendo de 30.73% y la IA-32 presenta un porcentaje de 16.06%.

Tabla 3 Resumen de los diferentes especímenes sometidos a la prueba de densidad, el color azul representa a los especímenes que pertenecen al sector noroeste y el color naranja representa a los especímenes del sector noreste.

| ID       | Volumen (cm <sup>3</sup> ) | Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) |                     |                         | Coeficiente de absorción (%) |
|----------|----------------------------|-------------------------------|---------------------|-------------------------|------------------------------|
|          |                            | Real                          | Aparente geométrica | Aparente Inmersión agua |                              |
| IA-12A   | 216.54                     | 2.748 ± 0.0005                | 1.762 ± 0.001       | 1.741 ± 0.001           | 17.95                        |
| IA-12B-1 | 217.25                     | 2.696 ± 0.0007                | 1.398 ± 0.055       | 1.422 ± 0.052           | 30.73                        |
| IA-12B-2 | 218.20                     |                               | 1.444 ± 0.055       | 1.451 ± 0.052           | 29.46                        |
| IA-12B-3 | 217.30                     |                               | 1.336 ± 0.055       | 1.350 ± 0.052           | 34.45                        |
| IA-12C-1 | 217.30                     | 2.756 ± 0.0007                | 1.667 ± 0.021       | 1.653 ± 0.016           | 20.80                        |
| IA-12C-2 | 217.29                     |                               | 1.675 ± 0.021       | 1.640 ± 0.016           | 21.44                        |
| IA-12C-3 | 216.31                     |                               | 1.689 ± 0.021       | 1.666 ± 0.016           | 20.51                        |
| IA-31-1  | 219.68                     | 2.726 ± 0.0005                | 1.752 ± 0.038       | 1.745 ± 0.024           | 17.31                        |
| IA-31-2  | 217.92                     |                               | 1.806 ± 0.038       | 1.778 ± 0.024           | 16.47                        |
| IA-11-1  | 216.51                     | 2.766 ± 0.0008                | 1.721 ± 0.0007      | 1.749 ± 0.013           | 18.35                        |
| IA-11-2  | 216.27                     |                               | 1.716 ± 0.0007      | 1.743 ± 0.013           | 18.53                        |
| IA-11-3  | 215.63                     |                               | 1.754 ± 0.0007      | 1.767 ± 0.013           | 17.67                        |
| IA-18-1  | 220.00                     | 2.505 ± 0.0003                | 1.561 ± 0.041       | 1.590 ± 0.042           | 19.66                        |
| IA-18-2  | 221.07                     |                               | 1.507 ± 0.041       | 1.528 ± 0.042           | 22.49                        |
| IA-18-3  | 216.40                     |                               | 1.534 ± 0.041       | 1.559 ± 0.042           | 21.12                        |
| IA-18-4  | 220.18                     |                               | 1.473 ± 0.041       | 1.499 ± 0.042           | 23.87                        |
| IA-32    | 151.147                    | 2.715 ± 0.0004                | 1.801 ± 0.001       | 1.778 ± 0.001           | 16.06                        |



### 7.4.3 Porosidad

Se seleccionaron siete especímenes para la realización de esta prueba, dando como resultado la Tabla 4, en la que se visualiza la variación de porosidad presente en los especímenes. Se tienen variaciones de porosidad total que van de 34.51 a 49.94%, porosidad efectiva de 28.55 a 46.49%. Los valores más altos de estas dos porosidades corresponden a la muestra IA-12B-3 con uno de los valores de menor grado de soldamiento, y en caso contrario, los valores menores corresponden a la muestra IA-32 con uno de los mayores grados de soldamiento.

Tabla 4 Resumen del porcentaje de porosidad presente en los diferentes especímenes, PT:porosidad total, PE: porosidad efectiva, PPCRPT :porcentaje de poros conectados respecto a porosidad total y PC: porosidad cerrada. El color azul representa a los especímenes del sector noroeste y el color naranja representa a los especímenes del sector noreste.

| ID       | PT (%) | PT (%) promedio | PE (%) | PE (%) Promedio | PPCRPT (%) | PPCRPT (%) | PC (%) | PC (%) promedio |
|----------|--------|-----------------|--------|-----------------|------------|------------|--------|-----------------|
| IA-12A   | 36.64  | 36.64           | 31.26  | 31.26           | 85.31      | 85.31      | 5.38   | 5.38            |
| IA-12B-1 | 47.26  | 47.79           | 43.69  | 44.30e          | 92.43      | 92.69      | 3.58   | 3.49            |
| IA-12B-2 | 46.18  |                 | 42.73  |                 | 92.53      |            | 3.45   |                 |
| IA-12B-3 | 49.94  |                 | 46.49  |                 | 93.10      |            | 3.45   |                 |
| IA-12C-1 | 39.88  | 40.02           | 34.46  | 34.67           | 86.42      | 86.63      | 5.42   | 5.35            |
| IA-12C-2 | 40.48  |                 | 35.17  |                 | 86.87      |            | 5.32   |                 |
| IA-12C-3 | 39.55  |                 | 34.16  |                 | 86.38      |            | 5.39   |                 |
| IA-31-   | 36.00  | 35.38           | 30.30  | 29.80           | 84.17      | 84.22      | 5.70   | 5.58            |
| IA-31-2  | 34.76  |                 | 29.29  |                 | 84.28      |            | 5.47   |                 |
| IA-11-1  | 36.74  | 36.61           | 32.10  | 31.88           | 87.37      | 87.07      | 4.64   | 4.73            |
| IA-11-2  | 36.98  |                 | 32.30  |                 | 87.34      |            | 4.68   |                 |
| IA-11-3  | 36.10  |                 | 31.22  |                 | 86.50      |            | 4.88   |                 |
| IA-18-1  | 36.53  | 39.13           | 31.26  | 34.60           | 85.57      | 88.38      | 5.27   | 4.53            |
| IA-18-2  | 39.01  |                 | 34.36  |                 | 88.07      |            | 4.65   |                 |
| IA-18-3  | 37.81  |                 | 32.92  |                 | 87.06      |            | 4.89   |                 |
| IA-18-4  | 40.16  |                 | 35.79  |                 | 89.12      |            | 4.37   |                 |
| IA-32    | 34.51  | 34.51           | 28.55  | 28.55           | 82.72      | 82.72      | 5.97   | 5.97            |



Para el caso de la porosidad cerrada, los valores varían de 3.45 a 5.97%. El porcentaje más bajo corresponde a la muestra IA-12B con un bajo grado de soldamiento y en caso contrario el valor más alto corresponde a la muestra IA-32 con uno de los grados más altos. Durante la realización de esta prueba se observó que los especímenes IA-12B fueron de los primeros en adsorber más rápido el agua y fueron de los primeros en dejar de burbujear, lo que sugiere que existe una buena conexión entre los poros (porosidad efectiva) que permitió una mejor intrusión del líquido a ellos.

### ***7.5 Caracterización Mecánica***

En esta parte se mostrarán los diferentes resultados obtenidos durante el trabajo de laboratorio enfocado en la mecánica de los diferentes especímenes. Los resultados de la compresión simple se muestran a manera de resumen en la Tabla 5 y de manera gráfica en la Figura 25. Cabe resaltar que algunas muestras de roca dadas sus características físicas no fue posible obtener más especímenes cilíndricos para obtener una mejor representación de los resultados. El espécimen con menor resistencia fue la IA-12B-3 con 2.61 Mpa, en caso contrario el espécimen con mayor resistencia es la IA-18-1 con 30.95 Mpa. Para el caso de las velocidades de onda, la de menor velocidad es la IA-31-1 con 1776.96 m/s para la onda P y 605.03 m/s para la onda s. La de mayor velocidad es la IA-12C-3 con 2836.13 m/s para la onda P, pero para el caso de la onda s la velocidad mayor le pertenece a la IA-18-1 con 1679.62 m/s, siendo este espécimen el segundo con una mayor velocidad de onda P.

En la Figura 25 se muestra el comportamiento esfuerzo-deformación donde podemos observar un comportamiento de tipo elastoplástico previo a la rotura de los especímenes, así como las zonas de resistencia máxima y de rotura de los diferentes especímenes de roca, donde se observa que algunos especímenes que fueron considerados como de bajo grado de soldamiento presentan mayor nivel de resistencia a deformarse y caso opuesto de algunos que fueron considerados de grado medio y presentan una menor resistencia a la deformación.



Tabla 5 Resultados obtenidos de la carga puntual, donde se visualiza el valor obtenido para cada uno de los especímenes que fueron utilizados para esta prueba. El color azul representa a los especímenes que pertenecen al sector noroeste y el color naranja representa a los especímenes del sector noreste

| ID       | Resistencia máxima (Mpa) | Resistencia a máxima (Mpa) promedio | Velocidad de onda |                  |         |                  |
|----------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------|------------------|---------|------------------|
|          |                          |                                     | P (m/s)           | P (m/s) promedio | S (m/s) | S (m/s) promedio |
| IA-12A-1 | 7.86                     | 7.86                                | 2021.46           | 2021.46          | 704.91  | 704.91           |
| IA-12B-1 | 7.25                     | 6.02                                | 2035.30           | 2026.46          | 661.08  | 746.00           |
| IA-12B-2 | 8.19                     |                                     | 2023.99           |                  | 940.29  |                  |
| IA-12B-3 | 2.61                     |                                     | 2020.1            |                  | 636.642 |                  |
| IA-12C-1 | 20.32                    | 20.17                               | 2670.9            | 2724.55          | 1340.57 | 1197.74          |
| IA-12C-2 | 16.21                    |                                     | 2666.61           |                  | 1158.44 |                  |
| IA-12C-3 | 23.99                    |                                     | 2836.13           |                  | 1094.2  |                  |
| IA-31-1  | 7.23                     | 10.14                               | 1776.96           | 2005.31          | 605.03  | 647.72           |
| IA-31-2  | 13.04                    |                                     | 2233.66           |                  | 690.4   |                  |
| IA-11-1  | 14.23                    | 14.57                               | 2643.22           | 2612.30          | 961.34  | 953.85           |
| IA-11-2  | 8.87                     |                                     | 2596.93           |                  | 943.45  |                  |
| IA-11-3  | 20.61                    |                                     | 2596.76           |                  | 956.76  |                  |
| IA-18-1  | 30.95                    | 23.51                               | 2711.19           | 2386.61          | 1679.62 | 1301.28          |
| IA-18-2  | 19.51                    |                                     | 2464.43           |                  | 1176.71 |                  |
| IA-18-3  | 23.15                    |                                     | 2085.3            |                  | 1061.43 |                  |
| IA-18-4  | 20.41                    |                                     | 2285.51           |                  | 1287.34 |                  |
| IA-32-1  | 23.17                    | 23.17                               | 2672.50           | 2672.50          | 966.45  | 966.45           |

### 7.5.1 Descripción de fracturas en pruebas de tensión

#### IA-12A (Figura 26)

La fractura en la prueba de tracción indirecta muestra una geometría discontinua e irregular. La fractura se desplaza a un costado de algunos líticos, vesículas y pómez. Debido a que no hubo una separación del espécimen no se pueden observar los planos de fractura, aunque en la parte superior del espécimen hay una pequeña parte que se puede desprender.

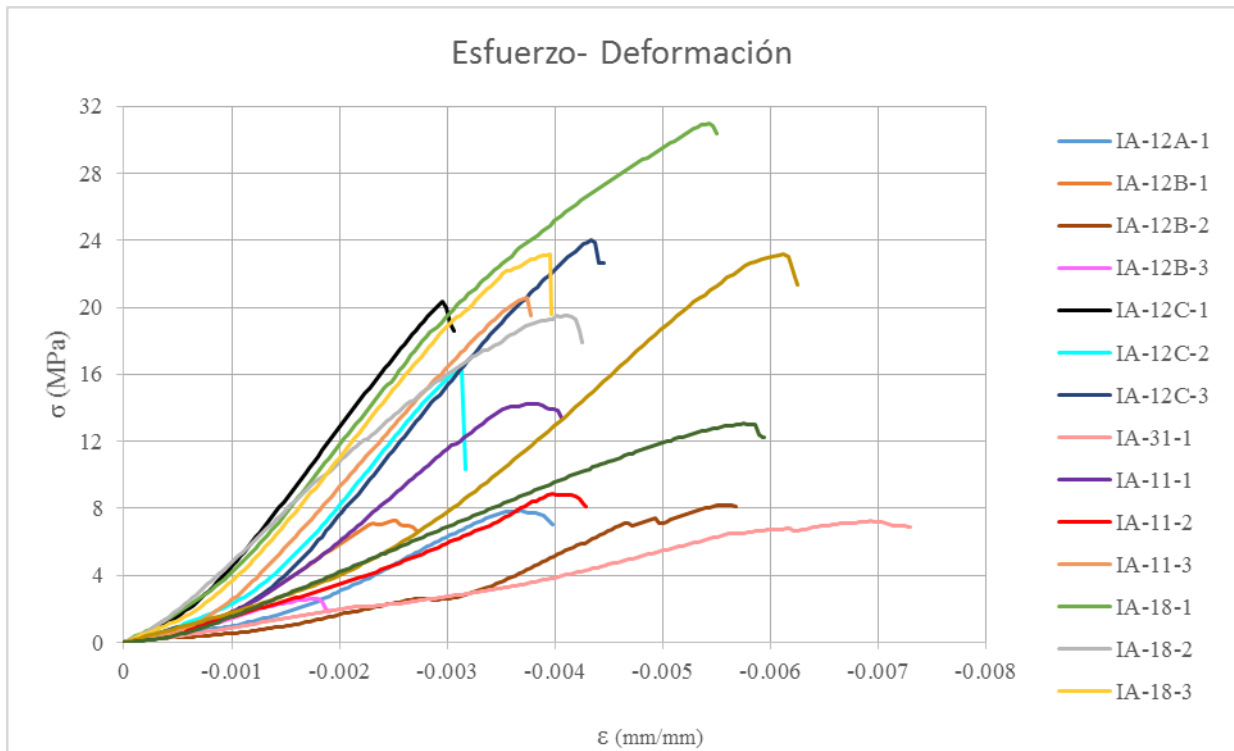


Figura 25 Diagrama comparativo del esfuerzo deformación de los diferentes especímenes de ignimbrita.

### IA-12B (Figura 26)

La fractura en la prueba de tracción indirecta muestra una geometría discontinua, irregular, y perpendicular al plano de carga. La fractura se desplaza a un costado de algunos líticos, vesículas y pómez. Debido a que no hubo una separación del espécimen no se pueden observar los planos de fractura.

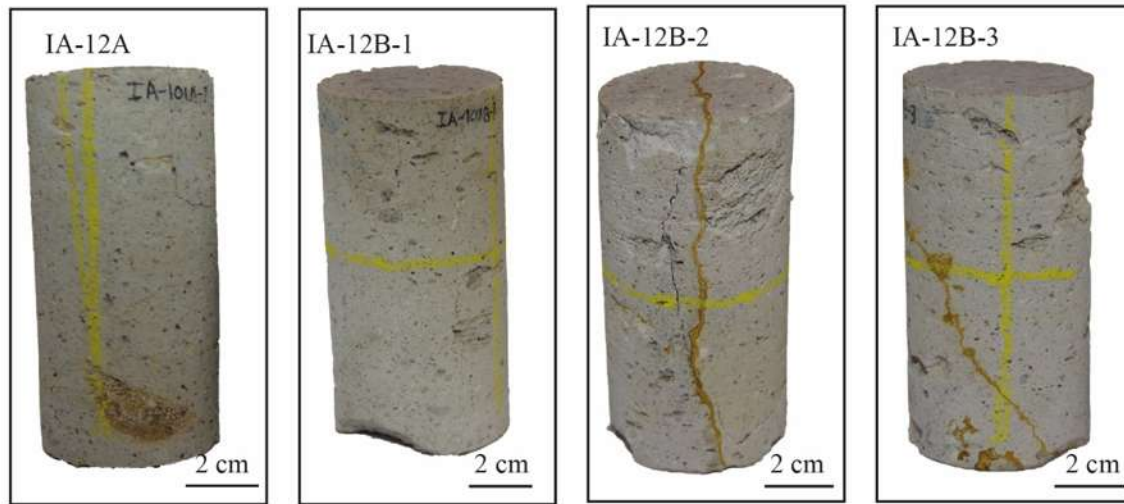


Figura 26 Cilindros de los diferentes especímenes de roca después de la prueba a compresión simple. En algunos de ellos se visualiza la fractura, así como las secuelas de estar sometido a una carga. La línea amarilla representa la parte céntrica del espécimen y donde se colocan los aditamentos de la prensa.

#### IA-12C (Figura 27)

La fractura en la prueba de tracción indirecta muestra una geometría discontinua e irregular en la parte externa del espécimen. En la parte intermedia la fractura se divide en dos y se desplaza a un costado de algunos líticos, vesículas y pómez. Debido a que no hubo una separación del espécimen no se pueden observar los planos de fractura, aunque hay pequeñas partes del espécimen que se pueden desprender.

#### IA-31 (Figura 27 y Figura 28)

La fractura en la prueba de tracción indirecta muestra una geometría discontinua e irregular en la parte inferior del espécimen. La fractura se desplaza a un costado de algunas vesículas y pómez. Debido a que no hubo una separación del espécimen no se pueden observar los planos de fractura.

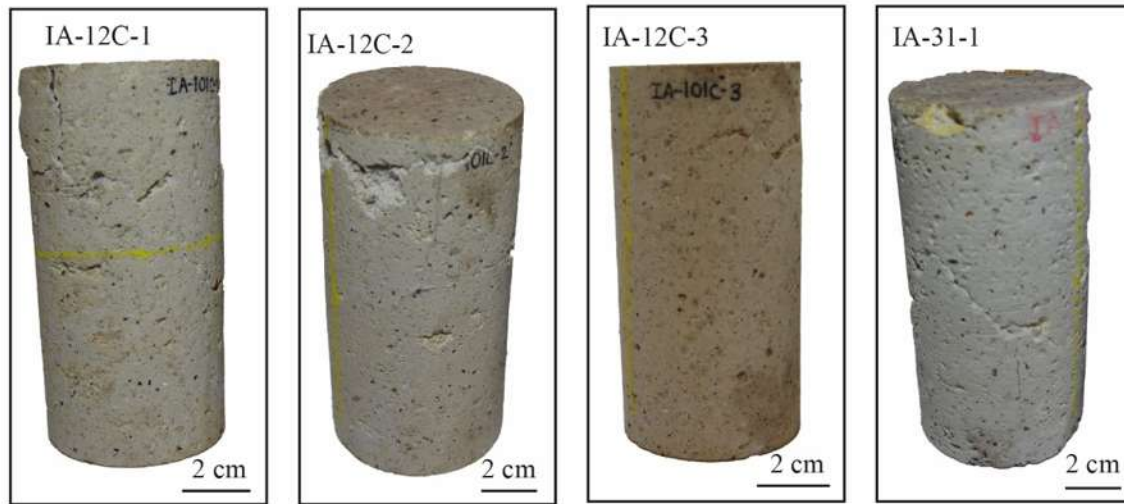


Figura 27 Cilindros de los diferentes especímenes de roca después de la prueba a compresión simple, en alguno de ellos se visualiza la fractura, así como de las secuelas de estar sometido a una carga

#### IA-11 (Figura 28)

La fractura en la prueba de tracción indirecta muestra una geometría discontinua e irregular en la parte externa del espécimen. La fractura (en algunos especímenes es más visible en la parte media- inferior del espécimen) se encuentra casi perpendicular al plano de carga y se desplaza a un costado de algunas vesículas y pómez. Debido a que no hubo una separación del espécimen no se pueden observar los planos de fractura, pero hay pequeñas partes del espécimen que se desprenden.

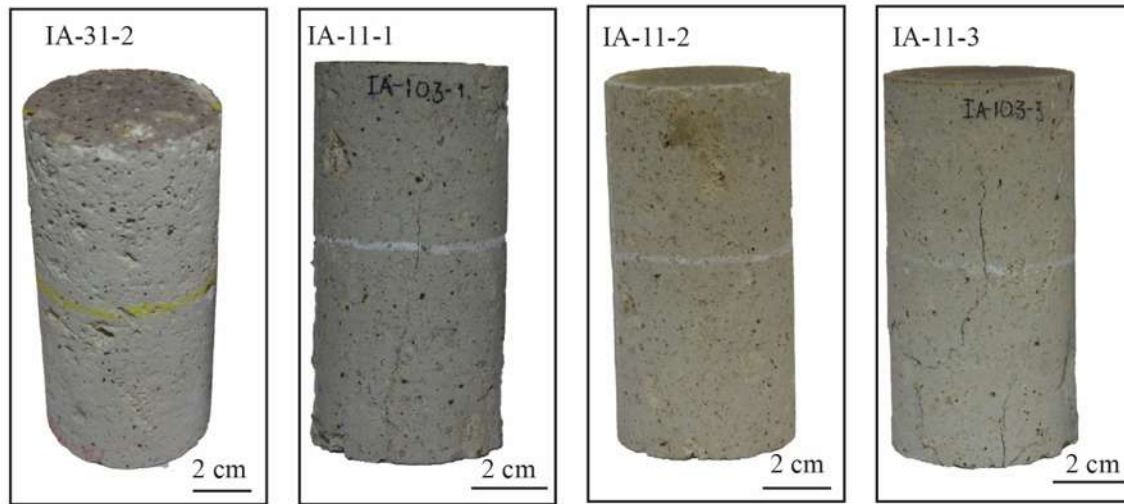


Figura 28 Cilindros de los diferentes especímenes de roca después de la prueba a compresión simple, en alguno de ellos se visualiza la fractura, así como de las secuelas de estar sometido a una carga

#### IA-18 (Figura 29)

La fractura en la prueba de tracción indirecta muestra una geometría continua e irregular, prácticamente atraviesa todo el espécimen, siendo perpendicular al plano de carga y se desplaza a un costado de algunas vesículas y pómez, así mismo presenta muchas fracturas. En este espécimen si hay una separación por lo que sus planos de fracturas presentan un  $JRC = 14-16$  y estos mismos no presentan alteración. En algunos especímenes no hubo una separación del espécimen, por lo que no se pueden observar los planos de fractura.

#### IA-32 (Figura 29)

La fractura en la prueba de tracción indirecta muestra una geometría discontinua e irregular en la parte externa del espécimen; la fractura es más visible en la parte media-inferior del espécimen y se desplaza a un costado de algunas vesículas y pómez. Debido a que no hubo una separación del espécimen no se pueden observar los planos de fractura, pero hay pequeñas partes del espécimen que se han desprendido y que pueden desprenderse.

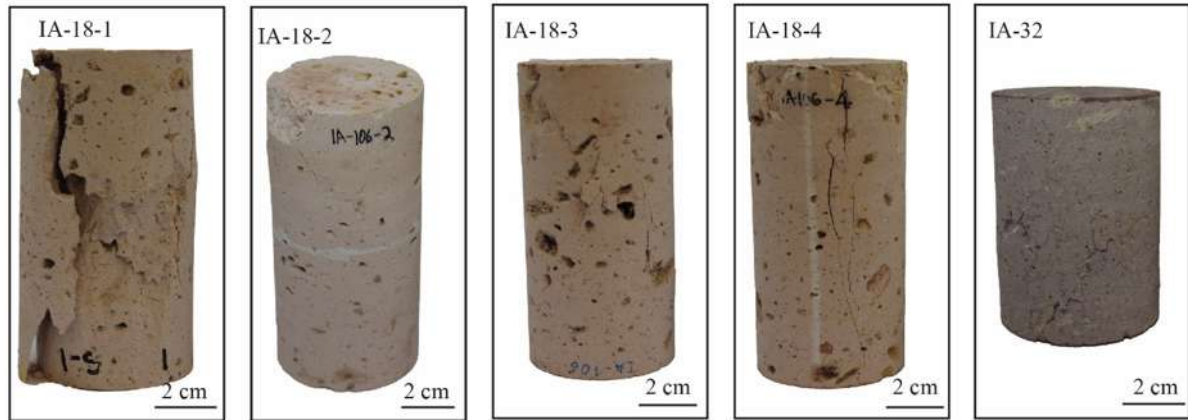


Figura 29 Cilindros de los diferentes especímenes de roca después de la prueba a compresión simple, en alguno de ellos se visualiza la fractura, así como de las secuelas de estar sometido a una carga.



## 8 Discusión

### 8.1 Litofacies de la ignimbrita Atécuaro

A continuación, se compararán y analizarán los resultados obtenidos a partir de las diferentes pruebas de laboratorio, así como del trabajo de campo. La clasificación de las litofacies se basa en la relación del grado de aplastamiento de las pómez observadas en campo (Tabla 1), método propuesto por Quane y Russell (2005). Se realizó una agrupación de los afloramientos siendo nombrados como bajo, medio y alto grado con la finalidad de estudiar las diferentes facies de la ignimbrita Atécuaro.

Dada la complejidad tanto vertical como horizontal de los depósitos de ignimbrita, para realizar la correlación litológica se dividió en dos sectores (Noroeste y Noreste). En ambos sectores se observa una variación lateral y vertical, coincidiendo en su mayoría con lo que se describe en la literatura (Fisher y Schmincke, 1984).

Basados en el modelo idealizado de Fisher y Schmincke (1984, Figura 3) y con el grado de aplastamiento de las pómez, se realizó una agrupación de la ignimbrita en ambos sectores (Tabla 6). Se le dió más peso a esta propiedad que a otras debido a que es una medida directa del grado de soldamiento y se puede utilizar para analizar los efectos de la alteración posterior a la soldadura. Para el sector noroeste, el afloramiento IA-10, al estar más cercano a la fuente y tener mayor grado de aplastamiento, se considera como parte intermedia superior, es decir que se encuentra en la zona externa de mayor grado de soldamiento de la ignimbrita (Figura 30). Los demás afloramientos se consideran en la parte intermedia y de bajo grado de soldamiento, ya que se encuentran en la parte distal del depósito. El caso del sector noreste es más complejo (Figura 30), ya que las fallas y algunos deslizamientos han puesto en contacto algunas zonas de menor y mayor grado de soldamiento, lo que dificulta el poder graficar los diferentes afloramientos pertenecientes a este sector y a la vez comparar con el modelo idealizado de Fisher y Schmincke (1984). Tomando al IA-07 como la parte más cercana al centro y dividiendo a los demás afloramientos en zonas superior e inferior, se realiza una agrupación de



cómo sería su distribución (Figura 30). Notar que el depósito no se distribuye de forma totalmente radial, ya que en las zonas de dirección este y oeste tiene una menor longitud de distribución que al norte y sur.

Tabla 6 Agrupación de los afloramientos a partir del grado de aplastamiento de Quane y Russell (2005) y el modelo idealizado de Fisher y Schmincke (1984). Las zonas azules representan la parte centro del depósito y de alto grado soldamiento, los verdes representan zonas de medio grado de soldamiento y los amarillos representan zonas de bajo grado de soldamiento.

| Sector noroeste |                                    | Sector noroeste |                                    |
|-----------------|------------------------------------|-----------------|------------------------------------|
| Afloramiento    | Relación de aplastamiento de pómez | Afloramiento    | Relación de aplastamiento de pómez |
| IA-24           | 0.26                               | IA-30           | 0.43                               |
| IA-12           | 0.3                                | IA-18           | 0.51                               |
| IA-15           | 0.44                               | IA-29           | 0.55                               |
| IA-25           | 0.5                                | IA-27           | 0.7                                |
| IA-11           | 0.53                               | IA-32           | 0.74                               |
| IA-14           | 0.55                               | IA-28           | 0.77                               |
| IA-31           | 0.57                               | IA-06           |                                    |
| IA-10           | 0.85                               | IA-07           | 0.79                               |
| IA-17           | 0.7                                | IA-03           | 0.66                               |
| IA-26           | 0.55                               | IA-02           | 0.53                               |
| IA-13           | 0.54                               | IA-05           |                                    |
| ----            | ----                               | IA-09           |                                    |
| ----            | ----                               | IA-04           |                                    |
| ----            | ----                               | IA-08           |                                    |

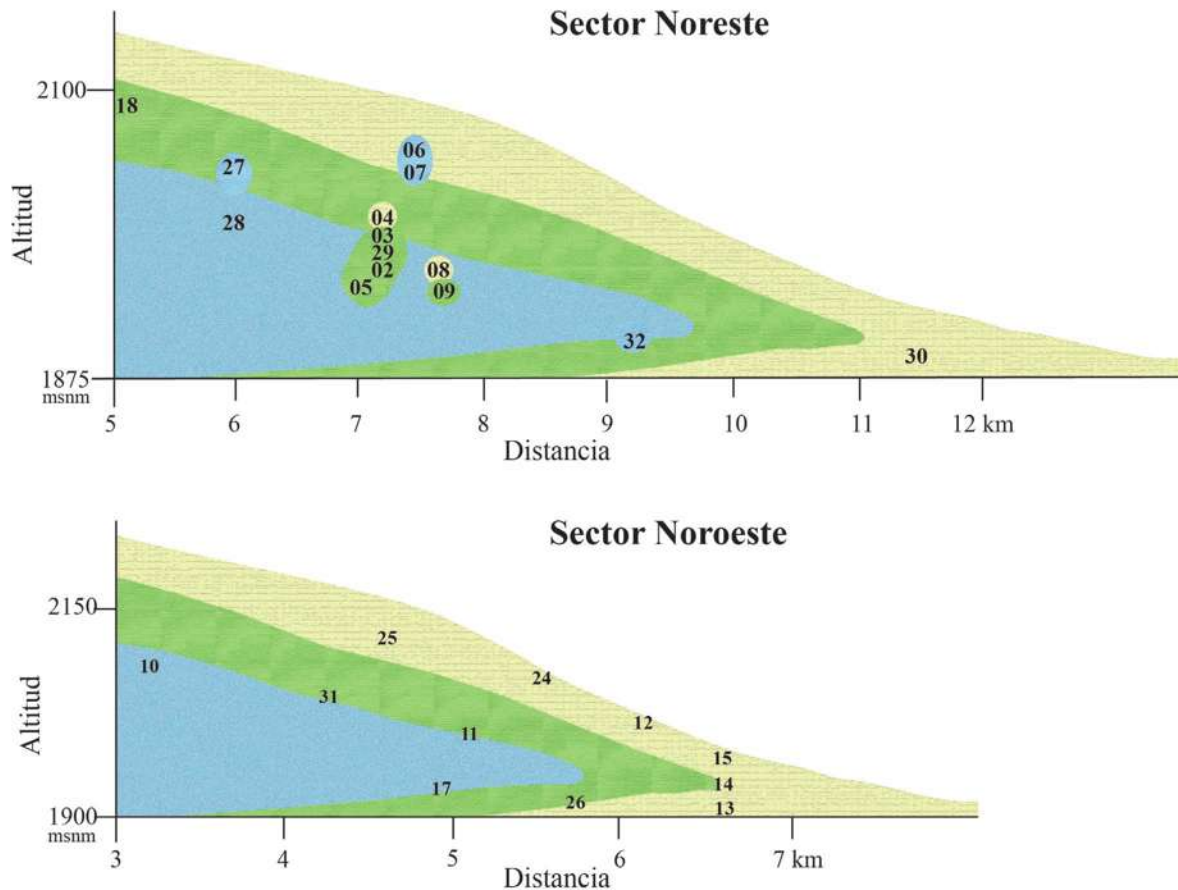


Figura 30 Distribución de los afloramientos de la ignimbrita Atécuaro en el sector noreste y noroeste a partir del grado de aplastamiento de Quane y Russell (2005) y el modelo idealizado de Fisher y Schmincke (1984). Las zonas azules representan la parte de alto grado soldamiento, los verdes representan zonas de medio grado de soldamiento y los amarillos representan zonas de bajo grado de soldamiento.

Para el caso de las láminas delgadas podemos ver una variación muy marcada entre los tres grados de soldamiento, ya que en las zonas de bajo grado podemos encontrar alteraciones del vidrio muy marcadas (Figura 21, IA-12A), así como zonas donde el vidrio se deforma muy levemente y apenas se distinguen las trizas vítreas. Para el caso de grado medio, las trizas vítreas son más evidentes (Figura 22, IA-26) y algunas presentan una alineación más marcada. En el grado alto de soldamiento, además de observarse un mayor aplastamiento y deformación, se distinguen fiammes y/o pómez aplastadas, así como algunos minerales de plagioclasas que

presentan un aplastamiento y alargamiento que se visualiza en la Figura 23 (IA-10). Algo que sobresale en los tres grados de soldamiento es la gran cantidad de óxidos presentes, ya que en muestras de mano no son tan visibles.

Como ya se ha mencionado, las propiedades físicas y mecánicas de un flujo ignimbrítico varían con respecto a la distancia a la fuente y a la altura, estas variaciones se expresan en las siguientes graficas:

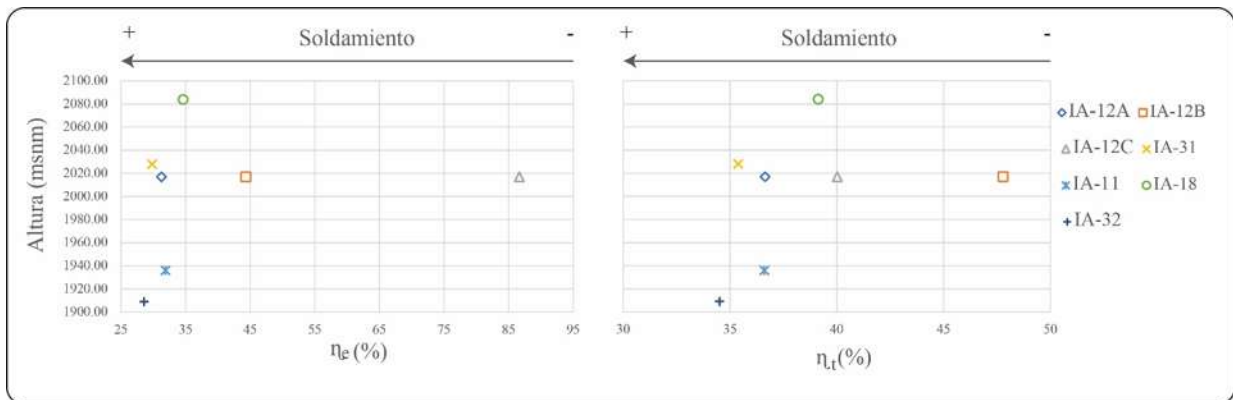


Figura 31 Representación gráfica de las variaciones en la porosidad efectiva (izquierda) y total (derecha) respecto a la altura a la que se tomaron las muestras de ignimbrita.

En la Figura 31 podemos observar las variaciones de la porosidad efectiva y total respecto a la altura. En esta imagen se distingue que, entre mayor porosidad, menor será el grado de soldamiento. No se muestra claramente la variación en alturas de las zonas de soldamiento.

Para el caso de la densidad (Figura 32) es más clara la relación del soldamiento, ya que la parte media de la gráfica representa la zona con mayor densidad, que irá disminuyendo hacia la parte superior e inferior, ya que puede proporcionar un registro directo y sutil en el proceso de soldamiento.

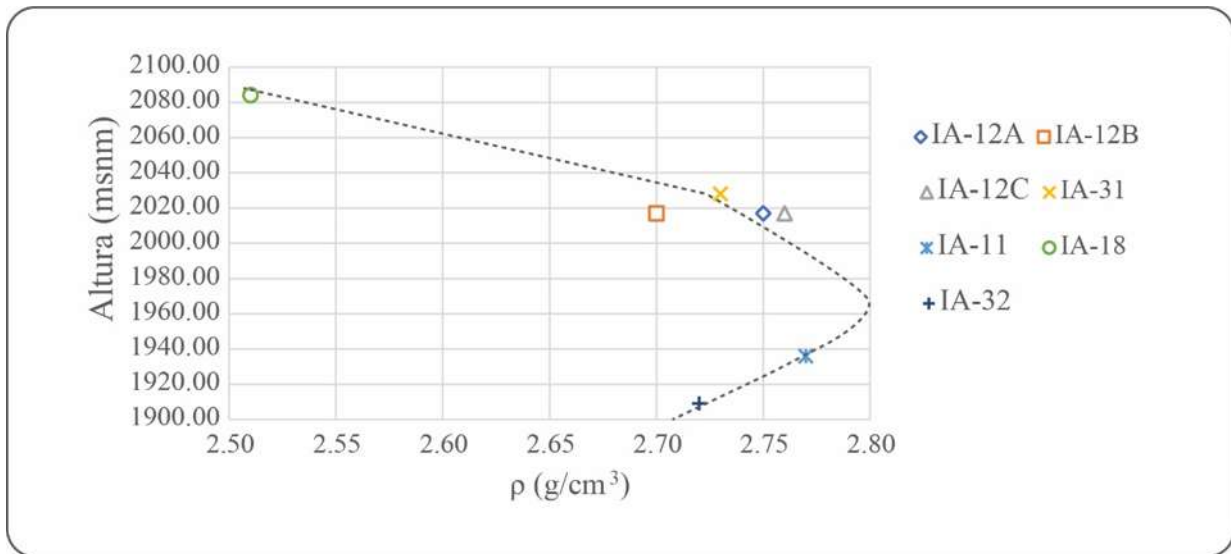


Figura 32 Representación gráfica de las variaciones en densidad respecto a la altura. La línea negra punteada se utiliza para tener una mejor visualización de la zona media, la cual consiste en un mayor soldamiento.

Para el caso de las cargas máximas (Figura 33) vemos que existe un acomodo de las diferentes muestras, donde se observa que las de menor resistencia están agrupadas en la parte superior izquierda y que corresponden a las muestras de menor grado de aplastamiento, excepto por la IA-12C que presenta valores de mayor resistencia a pesar de ser considerada como una de bajo grado de soldamiento. Se considera que esto tiene que ver con la relación de porcentaje de pómez y líticos, que es de los valores medios bajos, al igual que la porosidad donde está entre los valores medios, lo que hace que tenga una mayor resistencia en compresión con las otras: IA-12 tiene valores más bajos en cuestión de resistencia; IA-18 es de las que presentan mayor resistencia (Figura 25 y Tabla 5). Esto podría deberse a que la IA-18 es una de las muestras que menos pómez y líticos tiene, y es una de las muestras que presenta una porosidad menor al 40%.

Para las ondas comparadas con la altura (Figura 34) es más complicado de visualizar la relación entre la disminución en velocidad entre más se aleje de la parte media del depósito, ya que hay variaciones en porosidad y en contenido de componentes que permiten a unas muestras obtener valores superiores. Tal es el caso de la IA-12C que tiene de los valores más altos de velocidad,

tanto de onda P como de s, y que se considera como parte de las zonas de bajo grado de soldamiento.

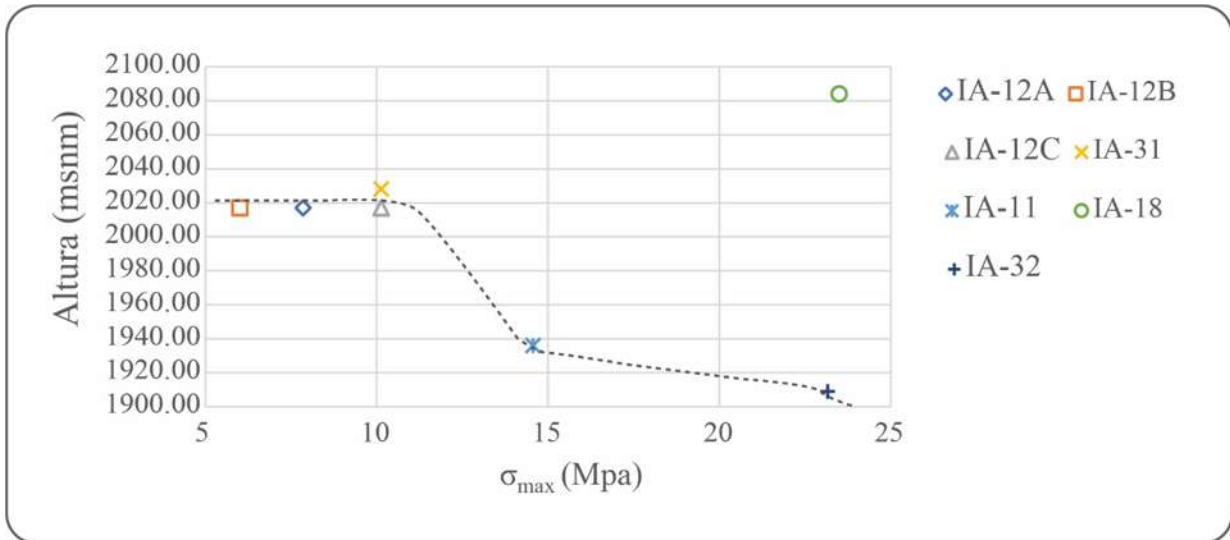


Figura 33 Representación gráfica de las variaciones de la resistencia máxima respecto a la altura, la línea negra punteada se utiliza para tener una mejor visualización de la zona media la cual consiste en una mayor resistencia.

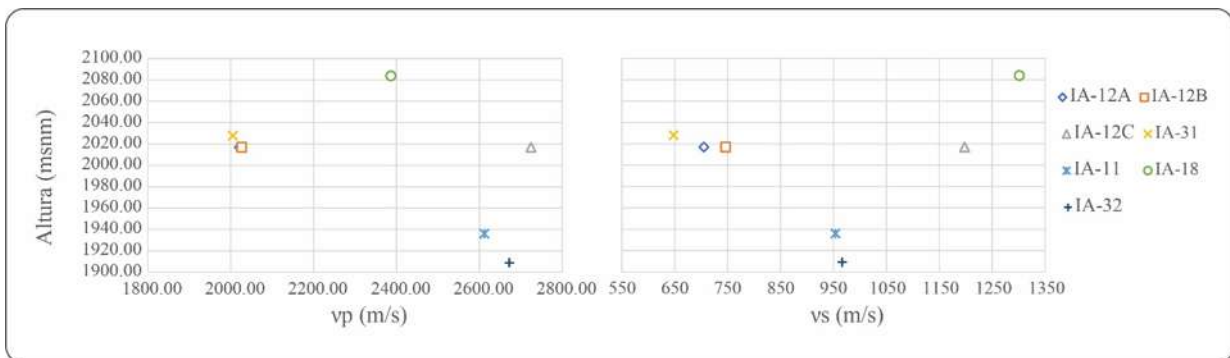


Figura 34 Representación gráfica de las variaciones de la de las ondas p (lado izquierdo) y onda s (lado derecho) respecto a la altura a la que fueron tomadas las muestras de ignimbrita.

## 8.2 Implicaciones de la dinámica eruptiva en el grado de soldamiento

La ignimbrita Atécuaro y la brecha de rezago se consideran sin-caldera, ya que su origen tuvo lugar contemporáneamente a la formación de la caldera. La formación de la caldera se debe al



vaciado de la cámara magmática y al colapso y/o hundimiento del área de suministro a lo largo de fallas y fracturas (provocando que no exista un soporte del edificio volcánico pre-caldérico), produciendo flujos piroclásticos con temperaturas típicas de entre 300° a 700 °C (Dufek et al., 2015). Para el caso de la ignimbrita Atécuaro, Montes et al. (2015) determinó una temperatura de Curie que varía de los 520° a 565 °C.

Durante el proceso de formación de la ignimbrita, el depósito se ve afectado por diversos procesos y factores (siendo la viscosidad, la composición, el contenido de vidrio y la temperatura del magma) de deformación y soldadura que modifica a los fragmentos de pómez y partículas de origen magmático, así como de las condiciones después de su emplazamiento (carga litostática y la tasa de enfriamiento), lo que da como resultado que las ignimbritas puedan estar o no soldadas (Fisher y Schmincke, 1984). Cabe mencionar que la deformación en el soldamiento se acumula inmediatamente después de la deposición (Sparks, 1976). La intensidad de soldamiento refleja los efectos agregados de la carga de la columna suprayacente y del tiempo de residencia a temperaturas superiores a la temperatura de transición del vidrio del material (Quane y Russell, 2005). Así mismo, la densidad presenta variaciones de la base al techo, produciendo que la base y el techo tengan escaso soldamiento; en el caso lateral, las porciones distales del flujo presentan menor soldamiento que las proximales (Fisher y Schmincke, 1984).

Para la ignimbrita Atécuaro, el paleo-relieve pudo jugar un papel muy importante, ya que hay facies con alto grado de soldamiento en zonas medias y distales, además de tener una mayor concentración de depósitos en la parte norte y sur de la caldera (Figura 19), con espesores aproximados de 100 a 200 m, cubriendo un área aproximada de 230 km<sup>2</sup> (Gómez-Vasconcelos et al., 2015).



### ***8.3 Recomendaciones para el aprovechamiento de la ignimbrita y la planificación del Territorio.***

Cundo se selecciona una roca nueva para el proceso de restauración del patrimonio arquitectónico se debe garantizar una buena durabilidad y una compatibilidad buena con la edificación y materiales prexistente, además de cumplir con requisitos estéticos necesarios para preservar la homogeneidad visual de las construcciones (por ejemplo, el color). Así mismo, las propiedades físicas e hídricas deben ser muy similares con la finalidad de evitar que se desarrolle más rápido el deterioro.

Dado lo visto en campo, se recomienda la construcción en zonas donde la ignimbrita presenta un alto grado de soldamiento, que no exista mucha porosidad, que no esté muy alterada, que no esté en zonas inestables y contar con una buena caracterización geotécnica que apoye la construcción de la edificación, esto con la finalidad de evitar que se genere un hundimiento debido a la compactación del material rocoso, todo esto con la finalidad de reducir las afectación principalmente de la vida humana y del inmueble.



## 9 Conclusiones

Este trabajo detalla la relación estratigráfica y la caracterización física y mecánica existente de la ignimbrita Atécuaro, resultando en la actualización del mapa geológico.

La asignación de litofacies fue de acuerdo al grado de soldamiento de la ignimbrita Atécuaro, dividiéndola en tres: bajo, medio y alto grado de soldamiento, considerando el grado de aplastamiento de las pómez. Así mismo, se relacionó su distribución lateral y vertical con los tres grados de soldamiento, encontrando una distribución idealizada de la ignimbrita en el sector noroeste, mientras que en el sector noreste no se pudo realizar una correlación entre la altura y la distancia a la fuente debido a fallas y desliamientos que ponen en contacto a las unidades de diferentes grados de soldamiento.

Las incertidumbres sobre la resistencia de las ignimbritas son más inciertas que otras propiedades, esto debido a que es más probable que exista una segunda cristalización que cambie la resistencia de las ignimbritas.

La porosidad y el tamaño de los elementos que integran la ignimbrita (líticos y pómez) son propicias de microfracturas y mientras mayor sean estas microfracturas existirá una amplificación de los esfuerzos, lo que significa que se requerirá un menor esfuerzo externo para propagar las fracturas. En caso contrario, entre menor sean el tamaño de estas características, mayor será el esfuerzo externo requerido para llegar al punto de ruptura. Concluyendo que el tamaño de los elementos y la variación de porosidad tienen una gran influencia en la compresión uniaxial (resistencia mecánica), en este caso teniendo una mayor importancia el tamaño y orientación de las pómez.

Los factores petrográficos de las rocas delimitan la propagación y dispersión de las ondas P y S en toda la roca, condicionando que la energía sea mayor o menor al momento de recibir la señal. Algunos factores son: la mineralogía (ya que cada mineral, lítico y pómez posee



diferentes propiedades elásticas), la porosidad y el contenido de arcillas. La velocidad es delimitada principalmente por la porosidad y el tamaño y cantidad de las pómez.

Finalmente, se recomienda llevar a cabo más estudios geológicos detallados, más pruebas físicas y mecánicas, pues hay más partes de la ignimbrita Atécuaro por estudiar para obtener más información y mejorar la clasificación y descripción del grado de soldamiento.



## Bibliografía

- Alonso, F. J. (2013). Propiedades Físicas : Densidad Y Porosidad. *Departamento de Geología; Petrología y Geoquímica. Universidad de Oviedo.*, 2–5.
- ASTM. (2001). Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer. *ASTM International*, 04, 1–4. <https://doi.org/10.1520/D5550-06.priate>
- Avellán, D. R., Cisneros-Máximo, G., Macías, J. L., Gómez-Vasconcelos, M. G., Layer, P. W., Sosa-Ceballos, G., y Robles-Camacho, J. (2020). Eruptive chronology of monogenetic volcanoes northwestern of Morelia – Insights into volcano-tectonic interactions in the central-eastern Michoacán-Guanajuato Volcanic Field, México. *Journal of South American Earth Sciences*, 100(March), 102554. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102554>
- Ban, M., Hasenaka, T., Delgado-Granados, H., y Takaoka, N. (1992). K-Ar ages of lavas from shield volcanoes in the Michoacan-Guanajuato volcanic field, Mexico. En *Geofísica Internacional* (Vol. 31, Número 4, pp. 467–473).
- Bigioggero, B., Corona-Chávez, P., Garduño-Monroy, V., E., C., y Lanza, L. (2004). La "piedra de cantera "de morelia desarrollo entre la tradicion y la cultura:un acercamiento geologico y una alternativa. En *Contribuciones a la geologia e impacto a impacto ambiental* (pp. 14–42).
- Branney, J. M., y Kokelaar, P. (2002). Pyroclastic density currents and the sedimentation of ignimbrites. En *Geological Society Memoir No. 27*. <https://doi.org/10.1086/427850>
- Cas, R. A., y Wright, J. V. (1991). Subaqueous pyroclastic flows and ignimbrites: an assessment. *Bulletin of Volcanology*, 53(5), 357–380. <https://doi.org/10.1007/BF00280227>
- Corona-Chávez, P., Reyes-Salas, M., Garduño-Monroy, V. H., Israde-Alcántara, I., Lozano-Santa Cruz, R., Morton-Bermea, O., y Hernández-Álvarez, E. (2006). Asimilación de



- xenolitos graníticos en el Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato: El caso de Arócutin Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 23(2), 233–245.
- Demant, A. (1978). Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. En *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* (Vol. 2, Número 2, pp. 172–187).
- Demets, C., y Stein, S. (1990). Present-day kinematics of the Rivera Plate and implications for tectonics in southwestern Mexico. *Journal of Geophysical Research*, 95(B13). <https://doi.org/10.1029/jb095ib13p21931>
- Dingwell, D. B. (1998). The glass transition in hydrous granitic melts. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 107(1–3), 1–8. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(97\)00119-2](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(97)00119-2)
- Dufek, J., Esposti Ongaro, T., y Roche, O. (2015). Pyroclastic Density Currents. En *The Encyclopedia of Volcanoes* (Second Edi). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00035-3>
- Ferrari, L. (1995). Miocene shearing along the northern boundary of the Jalisco Block and the opening of the southern Gulf of California. *Geology*, 23(8), 751–754. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0751:MSATNB>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0751:MSATNB>2.3.CO;2)
- Ferrari, Luca. (2000). Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LIII, 84–92.
- Fielding, C. R. (1997). Sedimentary Rocks in the Field. En *Sedimentary Geology* (Vol. 109, Números 1–2). [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(96\)00039-5](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(96)00039-5)
- Fisher, R. V., y Schmincke, H.-U. (1984). Pyroclastic Flow Deposits. *Pyroclastic Rocks*, 186–230. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-74864-6\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-74864-6_8)
- Garduño-Monroy, V. H., Pérez-Lopez, R., Israde-Alcantara, I., Rodríguez-Pascua, M. A., Szykaruk, E., Hernández-Madrigal, V. M., García-Zepeda, M. L., Corona-Chávez, P., Ostroumov, M., Medina-Vega, V. H., García-Estrada, G., Carranza, O., Lopez-Granados, E., y Mora Chaparro, J. C. (2009). Paleoseismology of the southwestern Morelia-



- Acambay fault system, central Mexico. *Geofísica Internacional*, 48(3), 319–335.
- Geology - rocks and minerals*. (s/f). Recuperado el 31 de agosto de 2021, de [https://flexiblelearning.auckland.ac.nz/rocks\\_minerals/rocks/ignimbrite.html](https://flexiblelearning.auckland.ac.nz/rocks_minerals/rocks/ignimbrite.html)
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M., y Ferrari, L. (2005). Petrogénesis ígnea de la faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LVII(3), 227–283.
- Gómez-Vasconcelos, M. G., Avellán, D. R., Soria-Caballero, D., Macías, J. L., Velázquez-Bucio, M. M., Jiménez-Haro, A., Israde-Alcántara, I., Garduño-Monroy, V. H., Ávila-Olivera, J. A., Figueroa-Soto, G., Cisneros-Máximo, G., y Cardona-Melchor, S. (2021). Geomorphic characterization of faults as earthquake sources in the Cuitzeo Lake basin, central México. *Journal of South American Earth Sciences*, 109(July 2020). <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103196>
- Gómez-Vasconcelos, Martha Gabriela, Garduño-Monroy, V. H., Macías, J. L., Layer, P. W., y Benowitz, J. A. (2015). The Sierra de Mil Cumbres, Michoacán, México: Transitional volcanism between the Sierra Madre Occidental and the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 301, 128–147. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.05.005>
- Gómez-Vasconcelos, Martha Gabriela, Luis Macías, J., Avellán, D. R., Sosa-Ceballos, G., Garduño-Monroy, V. H., Cisneros-Máximo, G., Layer, P. W., Benowitz, J., López-Loera, H., López, F. M., y Perton, M. (2020). The control of preexisting faults on the distribution, morphology, and volume of monogenetic volcanism in the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field. *Bulletin of the Geological Society of America*, 132(11–12), 2455–2474. <https://doi.org/10.1130/B35397.1>
- Hasenaka, T. (1994). Size, distribution, and magma output rate for shield volcanoes of the Michoacán-Guanajuato volcanic field, Central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 63(1–2), 13–31. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(94\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0377-0273(94)90016-7)
- Hasenaka, T., y Carmichael, I. S. E. (1985). A compilation of location, size, and geomorphological parameters of volcanoes of the Michoacan-Guanajuato volcanic field,



- central Mexico. En *Geofísica Internacional* (Vol. 24, Número 4, pp. 577–607).
- Hasenaka, Toshiaki, y Carmichael, I. S. E. (1985). The cinder cones of Michoacán-Guanajuato, central Mexico: their age, volume and distribution, and magma discharge rate. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 25(1–2), 105–124. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(85\)90007-1](https://doi.org/10.1016/0377-0273(85)90007-1)
- Henry, C. D., y Aranda-Gomez, J. J. (1992). The real southern Basin and Range: Mid- to late Cenozoic extension in Mexico. *Geology*, 20(8), 701–704. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1992\)020<0701:TRSBAR>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020<0701:TRSBAR>2.3.CO;2)
- Israde-Alcantara, I., y Garduño-Monroy, V. H. (1999). Lacustrine record in a volcanic intra-arc setting: The evolution of the Late Neogene Cuitzeo basin system (central-western Mexico, Michoacan). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 151(1–3), 209–227. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(99\)00024-3](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(99)00024-3)
- Johnson, C. A., y Harrison, C. G. A. (1990). Neotectonics in central Mexico. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 64(2–4), 187–210. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(90\)90037-X](https://doi.org/10.1016/0031-9201(90)90037-X)
- Losantos, E., Cebriá, J. M., Morán-Zenteno, D. J., Martiny, B. M., López-Ruiz, J., y Solis-Pichardo, G. (2017). Petrogenesis of the alkaline and calcalkaline monogenetic volcanism in the northern sector of the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field (Central Mexico). *Lithos*. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.07.013>
- Luz-Martínez, J. C. (2019). *Determinación del deterioro de núcleos de ignimbritas a través de ensayos en laboratorio*.
- Mandarim-de-Lacerda, C. A. (2003). Stereological tools in biomedical research. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 75(4), 469–486. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652003000400006>
- Martínez-Martínez, J., Pola, A., García-Sánchez, L., Reyes Agustin, G., Osorio Ocampo, L. S., Macías Vázquez, J. L., y Robles-Camacho, J. (2018). Building stones used in the



- architectural heritage of Morelia (México): quarries location, rock durability and stone compatibility in the monument. *Environmental Earth Sciences*, 77(5), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7340-7>
- Mazzoldi, A., Guevara-Alday, J. A., Gómez-Cortés, J. J., y Garduño-Monroy, V. H. (2016). *Papel de estructuras Basin and Range en la formación del sistema geotérmico al centrosur del lago Cuitzeo , segmento central del ... April.*
- Montes Alva, O., Garduño Monroy, V. H., Cervantes Solano, M., Gogichaishvili, A., Morales Contreras, J., Soler-Arechalde, A. M., Maciel-Peña, R., Alva-Valdivia, L., Rosas Elguera, J., y Urrutia-Fucugauchi, J. (2015). Estudio paleomagnético de la secuencia volcánica Mil Cumbres (Michoacán, México). *Latinmag Letters*, 5(5), 1–20. <http://www.geofisica.unam.mx/LatinmagLetters/>
- Moon, V. G. (1993). Geotechnical characteristics of ignimbrite: A soft pyroclastic rock type. *Engineering Geology*, 35(1–2), 33–48. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(93\)90068-N](https://doi.org/10.1016/0013-7952(93)90068-N)
- Mori, L., Gómez-Tuena, A., Cai, Y., y Goldstein, S. L. (2007). Effects of prolonged flat subduction on the Miocene magmatic record of the central Trans-Mexican Volcanic Belt. *Chemical Geology*, 244(3–4), 452–473. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.07.002>
- Osorio Ocampo, S. (2014). *Evolucion espacio temporal del vulcanismo alrededor del lago de Patzcuaro.* Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Ostroumov, M., Garduño-Monroy, V. H., Carreón-Nieto, H., y Cruz, R. L. S. (2003). Mineralogía y geoquímica de los procesos de degradación en monumentos históricos: Primer acercamiento a un caso mexicano (Morelia, Michoacán). *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 20(3), 223–232.
- Pardo, M., y Suarez, G. (1995). Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico: seismic and tectonic implications. *Journal of Geophysical Research*, 100(B7). <https://doi.org/10.1029/95jb00919>
- Pasquarè, G., Ferrari, L., Garduño-Monroy, V. H., Tibaldi, A., y Vezzoli, L. (1991). Geology



- map of the central sector of the Mexican Volcanic belt, States of Guanajuato and Michoacán. *Geological Society of America Map and Chart series MCH072*, 22 p.
- Pasquaré, G., Garduno, V. H., Tibaldi, A., y Ferrari, M. (1988). Stress pattern evolution in the central sector of the Mexican Volcanic Belt. *Tectonophysics*, 146(1–4), 353–364. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(88\)90099-6](https://doi.org/10.1016/0040-1951(88)90099-6)
- Pérez-López, R., Legrand, D., Garduño-Monroy, V. H., Rodríguez-Pascua, M. A., y Giner-Robles, J. L. (2011). Scaling laws of the size-distribution of monogenetic volcanoes within the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field (Mexico). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 201(1–4), 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.09.006>
- Quane, S. L., y Russell, J. K. (2005). Ranking welding intensity in pyroclastic deposits. *Bulletin of Volcanology*, 67(2), 129–143. <https://doi.org/10.1007/s00445-004-0367-5>
- Ray, P. S. (1960). Ignimbrite in the Kilchrist Vent, Skye. *Geological Magazine*, 97(3), 229–238. <https://doi.org/10.1017/S0016756800061409>
- Salomón-Chida, J. I. (2012). *Metodología para el análisis de zonas inestables con clasificaciones geomecánicas empíricas. Ejemplo en zona sur de la Ciudad de Morelia, Michoacán*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Sereno-Villaseñor, H. I. (2020). *Petrología del Corpus y Módulo estructural del monumento histórico: centro cultural universitario Unam, Morelia*.
- Sparks, R. S. J. (1976). Grain size variations in ignimbrites and implications for the transport of pyroclastic flows. *Sedimentology*, 23(2), 147–188. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1976.tb00045.x>
- Sparks, R. S. J., Self, S., y Walker, G. P. L. (1973). Products of ignimbrite eruptions. *Geology*, 1(3), 115–118. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1973\)1<115:POIE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1973)1<115:POIE>2.0.CO;2)
- Suter, M., Martínez, M. L., Legorreta, O. Q., y Martínez, M. C. (2001). Quaternary intra-arc extension in the Central Trans-Mexican volcanic belt. *Bulletin of the Geological Society of America*, 113(6), 693–703. <https://doi.org/10.1130/0016->



7606(2001)113<0693:QIAEIT>2.0.CO;2

- Tommasi, P., Verrucci, L., y Rotonda, T. (2015). Mechanical properties of a weak pyroclastic rock and their relationship with microstructure. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(2), 211–223. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0149>
- UNE-EN 1936. (2007). *Determinación de la densidad aparente, de la porosidad abierta y de la porosidad total*. 5–12.
- Vallejo, L. I. G. De, Ferrer, M., Ortuño, L., y Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*.
- Villaseñor, C. I. (2014). *Caracterización geomecánica y estudio del deslizamiento el campestre, Morelia, Mich.*
- Walker, G. P. L. (1983). Ignimbrite types and ignimbrite problems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 17(1–4), 65–88. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(83\)90062-8](https://doi.org/10.1016/0377-0273(83)90062-8)
- White, J. D. L., y Houghton, B. F. (2006). Primary volcaniclastic rocks. *Geology*, 34(8), 677–680. <https://doi.org/10.1130/G22346.1>