



Universidad Michoacana de  
San Nicolás de Hidalgo.



Instituto de Investigaciones Metalúrgicas y Materiales.

Departamento de Geología y Mineralogía

**“Caracterización físico - mecánico de las principales litofacias de los flujos  
ignimbríticos de la región de Cuitzeo, Michoacán”**

**Tesis Profesional.**

**Para obtener el grado de:**

Maestro en ciencias, con especialidad en Geociencias y Planificación del  
Territorio.

**Presenta:**

Ing. José Antonio Núñez Hurtado.

**Asesor:**

Dr. Antonio Pola Villaseñor.

**Co-asesor:**

Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy.

Morelia, Michoacán, Junio del 2016.

## Índice

Índice de figuras.....	iv
Índice de tablas .....	ix
Dedicatoria.....	xi
Agradecimiento.....	xii
Resumen .....	xiv
Abstract.....	xv
1 Introducción.....	16
1.1 Justificación .....	18
1.2 Objetivo general.....	19
1.3 Objetivos específicos .....	19
2 Antecedentes.....	20
2.1 Trabajos realizados en la región .....	22
2.2 Localización.....	24
2.3 Marco geológico .....	28
2.4 Marco estructural .....	29
3 Marco teórico y conceptual .....	30
4 Metodología.....	38
4.1 Trabajo de gabinete.....	38
4.2 Trabajo de campo.....	38
4.3 Trabajo de laboratorio.....	39
4.3.1 Preparación y dimensionamiento de muestras .....	39
4.3.2 Caracterización mineralógica y petrográfica.....	40
4.3.3 Análisis texturales .....	41
4.4 Caracterización física.....	42
4.4.1 Masa .....	42
4.4.2 Densidad.....	42
4.4.2.1 Densidad por el método del picnómetro de sifón.....	42
4.4.3 Porosidad.....	43
4.4.4 Velocidad de ondas sísmicas.....	44

4.5 Caracterización mecánica .....	45
4.5.1 Resistencia a compresión simple.....	45
4.5.2 Resistencia a la tracción .....	46
4.6 Propiedades hídricas de las rocas.....	48
4.6.1 Capilaridad .....	48
5 Resultados.....	49
5.1 Marco geológico general .....	49
5.1.1 Descripción de afloramientos y rasgos estructurales locales .....	52
5.1.2 Marco geológico estructural.....	57
5.1.3 Petrografía y mineralogía.....	58
5.1.3.1 Litofacie estratificada (IE-A).....	59
5.1.3.2 Litofacie (IP).....	60
5.1.3.3 Litofacie (IH).....	61
5.1.3.4 Litofacie rosa (IR) .....	62
5.1.3.5 Litofacie (IGP).....	63
5.1.4 Análisis de difracción de rayos X .....	64
5.2 Análisis de laboratorio .....	65
5.2.1 Dimensionamiento de muestras .....	65
5.2.2 Análisis textural.....	66
5.2.3 Caracterización física .....	70
5.2.3.1 Masa y Densidad .....	70
5.2.3.2 Porosidad .....	71
5.2.3.3 Velocidad de ondas sísmicas .....	72
5.2.4 Caracterización mecánica.....	76
5.2.4.1 Compresión simple.....	76
5.2.4.2 Resistencia a la tracción .....	81
5.2.4.3 Prueba de durabilidad .....	84
5.2.5 Propiedades hídricas de las rocas .....	85
5.2.5.1 Prueba de capilaridad.....	86
6. Discusiones.....	88
6.1 Caracterización física y dinámicas.....	88

6.2 Caracterización Mecánica.....	92
7 Conclusiones.....	95
Referencias .....	98
Anexos .....	107

## Índice de figuras

- Figura 1.-Mapa tectónico regional del CVMG. Proyectado en una escala 1:50 000 sobre un MDE. Se muestran los principales rasgos estructurales y los límites del CVTM (Gómez-Tuena et al., 2005, Quintero-Legorreta, 2008). Las abreviaciones significan. GZ: Graven de Zacoalco; RC: Rift de Chapala; ZE M-A: Zona de Extensión Morelia-Acambay; GA: Graven de Amatlán de Cañas; GS: Graven de Sayula; GC: Graven de Chapala; GCO: Graven de Cotija; GP: Graven de Penjamillo; SF M-A: Sistema de Falla Morelia-Acambay; FM-Q-A: Falla Morelia Queréndaro los Azufres; FVB: Falla Venta de Bravo; SF C-Q: Sistema de Falla Cuitzeo Queréndaro; LP: lago de Pátzcuaro; LC: Lago de Cuitzeo; LCH: Lago de Chapala; LY : Lago de Yuriria; ZE: Zona de Estudio; Las líneas azules son los límites del Cinturón Volcánico Transmexicano(Gómez-Tuena et al., 2005) y el polígono rojo representa el estado de Michoacán de Ocampo..... 25
- Figura 2. Mapa de la zona de estudio. El modelo de sombras está construido con base en un MDE, en el se muestra la ubicación de los principales rasgos estructurales y localidades de la zona de estudio. El significado de las abreviaciones y líneas son: VQ: Volcán el Quinceo; FP: Falla de la Paloma; LC: Lago de Cuitzeo; ZE: Zona de Estudio; LHU: Localidad de Huandacareo; LCH: Localidad de Chucandiro; LCO: Localidad de Copándaro; LCU: Cuitzeo; LTI: Localidad de Tejaro de los izquierdos; FCH: Falla de Chucandiro; FC: Falla de Copandaro; F YB: Falla la yerba buena. Las líneas rojas son los principales rasgos estructurales (fallas, grietas, ríos y arroyos), las líneas amarillas son las principales carreteras existentes en la zona..... 27
- Figura 3. Forma de propagación de las ondas R,S y P.La figura muestra como los tres tipos de ondas se propagan a través de un medio solido. Donde; R es la onda superficial Rayleigh; S es la onda cortante o transversal y P es la onda de compresión o longitudinal (Malhotra y Carino, 2004). ..... 33
- Figura 4. Gráfica de esfuerzo-deformación. Esta imagen nos muestra las principales características de una gráfica esfuerzo y deformación, en donde tenemos dos diferentes comportamientos ( p. ej. elástico y plástico). Dentro de la gráfica existen tres comportamientos de un espécimen según sus características físicas (Grietas y poros)..... 35
- Figura 5. Materiales existentes en la zona de estudio. En estas imágenes se muestran las principales características de los materiales de la zona de estudio: a) Afloramiento del punto CZ-1, en la imagen se observa un afloramiento de rocas ignimbríticas mal soldadas y con alteraciones en la parte baja; b) en la imagen se observa un afloramiento de ignimbrítica con algunos rasgos de fallas y matriz deleznable; c) Afloramiento del punto CZ-16, se observa una roca con menor grado de alteración, y conservando su característica de bloques; d) Afloramiento del punto CZ-2, flujo ignimbrítico en el que se observan tres capas; 1) color verdoso con

mayor porcentaje de alteración; 2) color rojizo también alterada; 3) frente de lava estratificada. ....	40
Figura 6. Formas de especímenes para prueba Brasileña. En la imagen a) se observa una muestra con forma de prisma; en la imagen (b) se observa una muestra con forma circular o de disco. Las nomenclaturas son: $\delta E$ , decremento en el espesor; $\Delta L$ , incremento en la longitud; $L_i$ , longitud inicial; $D_i$ , diámetro inicial; $\Delta D$ , incremento en el diámetro. ....	47
Figura 7. Imagen de afloramientos de ignimbritas. En la figura a) se muestra el flanco izquierdo de un corte de carretera, donde se observa un depósito de ignimbrita de color verdoso, así como sus límites de contacto con una lava masiva, la nomenclaturas significan: LA= material de lava; IC = ignimbrita cloritizada y material estudiada IP; ZL = material deslizado: en la figura b) se muestra el flanco derecho de un corte de carretera, se observa dos líneas de fallas y cada límite presentan diferentes colores, la nomenclatura LLA es un lente de material de lava; las líneas amarillas representan los contactos y las líneas rojas representa las fallas y erosiones en los materiales. ....	50
Figura 8. Mapa geológico general de la zona de Cuitzeo, Michoacán. Los puntos rojos representan la ubicación de las secciones estratigráfica, y las abreviaturas son descritas a continuación: CM = ciudad de Morelia; LTA= Localidad de Tarímbaro; LCO=localidad de Copándaro; LCH=Localidad de Chucándiro, las edades fueron obtenidos de Gómez-Vasconcelos, (2012) e Israde-Alcántara, (1999).....	51
Figura 9. Imagen de materiales ignimbríticos de la parte noroeste de la zona de estudio. Imagen a) se observa un afloramiento de tres tipos de materiales ignimbríticas, en la cima del estrato uno sobreyace un material Ignimbrítico muy deleznable y en el estratos tres sobreyace un material ignimbrítica muy fracturada con discontinuidades; en la imagen b) se observa una ignimbrita muy fracturada con planos de fallas (PF) de hasta dos metros; las líneas amarillas representan los contactos y las líneas rojas representa las fallas y grietas. ....	53
Figura 10. Diagrama de rosa y densidad de polos de las secciones: a) CZ-25; b) CZ-26.....	53
Figura 11. Imagen de materiales de la parte noreste de la zona de estudios. En la imagen a) del punto CZ-1, se observa un material Ignimbríticos de dos capas mal soldada; en la imagen b) del punto CZ-16, se observa un material Ignimbrítico bien soldado con planos de fallas (PF); en la imagen c) se observa un deposito de ignimbrita afectado por fallas locales y fracturas; en la imagen d) se observa una la lava andesítica fracturada con nomenclatura (FR).....	55
Figura 12. Diagrama de rosa y densidad de polos de los rasgos estructurales de CZ-01 y CZ-16. ....	55

- Figura 13. Mapa de rasgos estructurales de la parte sur del lago de Cuitzeo. El mapa se obtuvo a partir de un MDE, en donde se trazan los principales rasgos estructurales existentes en la región. .... 58
- Figura 14. Afloramiento de las litofacies caracterizadas. Donde las abreviaturas son: IE-A E IE-B= Ignimbrita Estratificada A y B; IH=Ignimbrita Homogénea; IP = Ignimbrita con Pómez; AC = Andesita de Cuitzeo. .... 59
- Figura 15. Fotografía de lámina delgada de la IE-A. En estas imágenes micrográficas se observan los componentes de la ignimbrita IE-A. Imagen a) se observan tres componentes principales (plagioclasas, vidrio y fragmentos de roca) y recristalización de la matriz, las nomenclaturas significan: Mr, Matriz de la muestra recristalizada; FR, fragmento de roca con fenocristales; Plg, Plagioclasas. En la imagen b) se observa un alto grado de alteración de la muestra, con nomenclatura: Ar, arcillas producto de la alteración hidrotermal; también se observan algunos piroxenos (Px) y minerales fracturados (Mf). .... 60
- Figura 16. Fotografías en láminas delgadas de componentes IP. En esta imagen micrográfica se observan los diferentes componentes de la ignimbrita IP. Imagen a) se observa una plagioclasa altamente fracturada y con fragmento de roca alterada (FR), con un mineral embebido en su matriz (MR); en la imagen b) se observa una plagioclasa (plg). MA es la matriz arcillosa de la ignimbrita producto de la alteración hidrotermal. .... 61
- Figura 17. Imagen de componentes de la muestra IH. En la imagen a) se ve la presencia de fiammes vesiculados (Fm), fragmentos de roca alterada (FR), óxidos (Fo) y también se observan algunos fenocristales de plagioclasas y piroxenos; En la imagen b) se observan fenocristales de plagioclasas fracturadas (plg) y una matriz vítrea de la roca con fragmentos de roca alteradas (FA). .... 62
- Figura 18. Componentes principales de la ignimbrita rosa (IR). En la imagen a) se observan cinco principales componentes de la muestra: fiammes (Fm) vesiculados de aproximadamente 5 mm, fragmentos de roca oxidada (Fo), Fragmento de roca alterada (FA); en la matriz de la roca se observa una recristalización (Mr). En la imagen b) se observan algunos minerales de plagioclasas (plg) muy fracturadas, piroxenos (px) y algunos óxidos (Fo). .... 63
- Figura 19. Imagen micrográfica de la ignimbrita IGP. En la imagen a) se observa un fenocristal de plagioclasa (plg), óxidos (Fo) y recristalización de la matriz (Mr); En la imagen b) se observan dos óxidos (Fo) y un mineral de plagioclasa (plg). .... 64
- Figura 20. Imágenes obtenidas en el escaneo de los especímenes de roca. a) se muestran las texturas estratificada de la litofacie IE-A, donde las abreviaturas significan; P = pómez; L = líticos: figura b) se evidencia la textura de la litofacie IE-B que contiene menor porcentaje de pómez y líticos; figura c) se observan las características y texturas de la litofacie IH que contiene algunos líticos de color

rojizo de mayor tamaño que las pómez; figura d) principales componentes de la litofacie IP. ....	67
Figura 21. Imágenes procesadas en ImageJ. En la figura se muestran cuatro imágenes que a continuación se describen; a) Fotografía de la roca original, en la matriz se observan dos pómez (P) y dos lítico (L);imagen b)escala de grises en 32 bits; c) imagen procesada con la herramienta Threshold y ajustada a la escala de colores de los pómez; d) imagen procesada en la herramienta Threshold y ajustado a la escala de colores de los líticos. ....	68
Figura 22. Gráfica de porcentajes de pómez y líticos. En estas gráficas se observa que IP tienen un alto porcentaje de pómez e IH-T con alto porcentaje de líticos. ....	69
Figura 23. Gráficas comparativas(% de Pómez con Densidad) y (Masa con Densidad). ....	71
Figura 24. Gráfica de resultados de porosidad por intrusión de mercurio. En la gráfica se observa el comportamiento de la porosidad presente en los materiales probados, se observa que los materiales tiene menos porcentajes de macroporosidades. ....	72
Figura 25. Gráficas comparativas de velocidades de ondas P y S. A los materiales se les realizaron pruebas en estado seco y húmedo. En estas gráficas se observa cómo se reducen las ondas P y S en un material húmedo; las nomenclaturas en gráficas son descritas de la siguiente manera: $V_{pS}$ =Velocidad de ondas P en estado seco; $V_{pH}$ = Velocidad de ondas P en estado húmedo; $V_{sS}$ = Velocidad de ondas S en estado seco; $V_{sH}$ = Velocidad de ondas S en estado húmedo. ....	73
Figura 26. Gráficas comparativas de la relación de resistencia a compresión simple y velocidades de pulso. Se observa que, entre más altos son los valores de ondas P y S, mayores son los valores de resistencia a compresión simple.....	75
Figura 27. Gráfica comparativa de velocidades de ondas P y porcentaje de pómez. En esta gráfica se hace una comparación de cómo afecta el porcentaje de pómez en las ondas P. ....	76
Figura 28. Gráfica de resultados de especímenes de las litofacies IE-A e IE-B. La gráfica de estos especímenes presentan mayor resistencia. ....	78
Figura 29. Gráfica de resultados de especímenes de las litofacies IH-T y IP. En las gráficas se observa el comportamiento de las muestras sometidas a cargas constantes; en la segunda gráfica se observa que las resistencias son menores. Causa de ello son el alto porcentaje de pómez según resultados de análisis de imágenes.....	79
Figura 30. Gráfica de resistencia a compresión simple vs porcentaje de pómez. En esta gráfica se observa el efecto del porcentaje de pómez en la resistencia máxima. ....	80



Figura 31. Gráfica de la resistencia máxima a compresión simple vs densidades máximas. En la gráfica se observa una relación entre la propiedad física y la propiedad mecánica. En la gráfica se observa la variación de la resistencia máxima con la densidad.....	81
Figura 32. Gráfica comparativa de resistencia a tensión nominal vs porcentaje de pómez.	83
Figura 33. Gráfica de resultados de pruebas de durabilidad.....	85
Figura 34. Gráfica de succión capilar de los materiales ignimbríticos. En esta gráfica se observa que las litofacies IP e IH-T son los materiales que más capilaridad tienen. ....	87
Figura 35. Gráficas de capilaridad de las litofacies (IH-T, IP, IEB) .....	112

## Índice de tablas

Tabla 1. Estudios petrográficos de los principales bancos de materiales usados en las construcciones en la región de Morelia, Michoacán, (Navarrete et al., 2013). Los resultados se obtuvieron de un promedio de 35 fragmentos irregulares por banco.	22
Tabla 2. Resultados de rasgos estructurales de los afloramientos. En esta tabla se observan los resultados obtenidos en EstereoNet, se observa que la mayoría de las direcciones preferenciales en diagrama rosa son NW.	56
Tabla 3. Resultados de mineralogía total.	64
Tabla 4. Los resultados de mineralogía de fracción arcilla (< 2micras).	65
Tabla 5. Dimensiones de materiales usados en las pruebas de caracterización. En la tabla a) se tienen las dimensiones de muestras cilíndricas que fueron usadas para pruebas a compresión simple y velocidad de ondas P y S; en la tabla b) se tiene las dimensiones de las muestras en forma de discos, usadas en pruebas a tensión.	66
Tabla 6. Promedio de resultados texturales (porcentajes de pómez, líticos y matriz de los materiales). En esta tabla se muestran los resultados obtenidos en los procesamientos de imágenes. En ImageJ.	68
Tabla 7. Resultados texturales (pómez y líticos) en diferentes tamaños en la muestra. Los valores calculados en esta tabla se obtuvieron promediando los resultados de de cuatro a cinco muestras de cada litofacie.	69
Tabla 8. Resultados de las velocidades de las ondas P y S, coeficiente de Poisson y módulo de Young dinámico.	73
Tabla 9. Resultados de resistencia máxima a compresión simple y resultados del módulo de elasticidad al 50%.	77
Tabla 10. Resultados de materiales ignimbríticos a tensión nominal y módulo de elasticidad dinámico.	82
Tabla 11. Resultados en prueba de durabilidad. En la tabla se observan los resultados a desgaste en ocho repeticiones.	84
Tabla 12. Resultados de volumen absorbido de los distintos materiales sometidos a capilaridad.	86
Tabla 13. Resultados de succión capilar de los materiales de la región de Cuitzeo.	86
Tabla 14. Resultados promedio de velocidades de ondas P y S, en estado seco y húmedo.	90

Tabla 15. Resultados de ondas P de diferentes autores con porcentajes comparativos con los materiales estudiados.....	91
Tabla 16. Resultados máximo a compresión uniaxial de diferentes autores.....	93
Tabla 17. Porcentajes desgastados de los materiales sometidos a la prueba de durabilidad.	94
Tabla 18. Resumen petrográfico de las secciones delgadas realizadas en las muestras sometidas a pruebas físicas y mecánicas.....	107
Tabla 19. Resultados texturales obtenidos en imageJ. ....	108
Tabla 20. Resultados de velocidades de ondas P y S, coeficiente de Poisson y módulo de Young dinámico. ....	109
Tabla 21. Resultado de capilaridad de la litofacie IE-B. ....	110
Tabla 22. Resultado de capilaridad de la litofacie IH-T.....	110
Tabla 23. Resultado de capilaridad de la litofacie IP. ....	111

## **Dedicatoria**

A mi madre **María Hurtado Guzmán**, con tus lágrimas y esfuerzo supiste hacerme entender que los sueños si son alcanzables, gracias por el gran apoyo que me has dado viejita linda.

A mi mejor amigo del alma mi padre **Manuel Núñez López**, éste es uno de tus sueños, papá. Gracias por ese ejemplo que nos has mostrado de carácter y valentía.

A mis hermanos **Rosa, Petrona, María, Manuel, Manuela, Pedro, Josefa**, gracias por los apoyos que me han dado y los llevo en el corazón, por cada lágrima que me han regalado por estar lejos de nuestro seno familiar.

A mi padrino **Francisco González Guzmán**, por los consejos que me ha brindado para estudiar una carrera y salir adelante.

## **Agradecimiento**

A mi tutor al **Dr. Antonio Pola Villaseñor**, por haberme aceptado como su alumno durante la realización de la tesis y por haberme facilitado los materiales necesarios para la obtención y depuración de resultados, que gracias a él se termina en tiempo y forma esta tesis.

Al **Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy**, por haber sido mi co-asesor y por su colaboración académica durante mi estancia en la maestría y también estoy eternamente agradecido por haberme aceptado en la maestría.

Al **Dr. José Luis Macías Vásquez** por haber sido mi co-asesor y por haberme brindado un espacio para el trabajo en las instalaciones del instituto de Geofísica de la UNAM campus Morelia.

A la **Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán**, por los consejos y por haber sido mi asesora de licenciatura y por la haberme insistido de seguir estudiando una maestría.

A mis sinodales el Dr. Ricardo Vázquez Rosas, Al Dr. Víctor Hugo, Al Dr. Pedro Corona, y al Dr. Jorge Alejandro Ávila, por haberles quitado el tiempo para la revisión de esta tesis.

Gracias a la Geol. Fabiola Mendiola, al MC. Felipe García, y al Dr. Giovanni Sosa, por haberme permitido el uso de los distintos equipos de sus laboratorios.

Gracias a Guillermo Cisneros por haberme facilitado material para la realización de los distintos mapas de la zona de estudio.

Agradezco a la universidad Michoacana y al Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, por haberme abierto la puerta para la realización de la maestría en Geociencias y planificación del territorio, mi eterno agradecimiento a la coordinadora la Dra. Erna Martha López.

A **CONACYT** por haberme aceptado como becario durante mi estancia de la maestría, que sin duda sin este apoyo económico no hubiera podido terminar mis estudios.

Agradezco infinitamente a mi generación de la maestría por sus compañerismos, amistad y consejos, a las Biólogas **Nancy Alanís** y **Mariela Casillas**, a los Ingenieros, **José Refugio**,

**Alejandro Casillas y Gabriel Nieto** y por supuesto al Ingeniero Geólogo **Jorge Alejandro Alday** (Wily), gracias a todos.

Agradezco a la **MC. Gabriela Reyes**, al **Dr. Denis Abellán** y **MC. Silvestre Cardona** por haberse tomado un tiempo en explicarme algunos temas de pruebas y análisis mineralógicas en rocas.

Al Instituto de Geofísica Campus Morelia, por haberme brindado un espacio de trabajo en sus áreas y salas de estudiantes.

Al Departamento de ambientales y ciencias de la tierra Laboratorio de Petrología Aplicada (Unidad CSIC-UA). Departamento de ambientales y ciencias de la tierra. Universidad de Alicante. Campus Sant Vicent del Raspeig. Alicante, España.

Al Departamento de ambientales y ciencias de la tierra Università degli Studi di Milano-Bicocca, Milán Italia.

## Resumen

El estudio de las propiedades físicas y mecánicas de las rocas es de gran importancia para la geología aplicada a la ingeniería civil. Las obras de ingeniería (p. ej. túneles, cimentaciones profundas y trazos carreteros) requieren de información del comportamiento mecánico del macizo rocoso y de su matriz o roca intacta. La caracterización geomecánica detallada de diferentes litofacies de los flujos ignimbríticos de la zona de Cuitzeo, se realizó con base en una serie de pruebas de laboratorio. El objetivo principal del proyecto se basa en relacionar diferentes propiedades físicas con la evolución mecánica de los materiales, mediante ecuaciones empíricas descritas gráficamente.

El estudio petrofísico y del sistema poroso se realizó mediante una serie de pruebas de intrusión de mercurio y análisis de imágenes, mientras la caracterización de la evolución mecánica y modo de fracturamiento, se realizó con una serie de pruebas de compresión simple y reconstrucción 3D de imágenes tomográficas. En particular los resultados de las pruebas mecánicas se representan en una gráfica esfuerzo – deformación, donde los diferentes parámetros pueden ser fácilmente evaluados (p. ej. Módulo de Young y Coeficiente de Poisson). Propiedades dinámicas, estrechamente ligadas a su composición (p.ej. contenido de pómez, líticos, minerales), se obtuvieron mediante la medición de las velocidades de onda P y S. Los resultados obtenidos nos brindan información del estado y evolución de los materiales. Una de las metas derivadas de la caracterización geomecánica es construir una base de datos útil en la construcción de escenarios, mediante la atribución de propiedades a cada unidad de roca.

De acuerdo a los resultados de laboratorio las litofacies con más contenido de poros son la IP e IH. En particular, las pruebas de intrusión de mercurio describen un alto porcentaje de microporosidades que facilitan los efectos de capilaridad (capacidad de absorción = 2.7 gr/cm<sup>2</sup>). A su vez, el alto contenido de minerales de arcilla (montmorilonita) y fragmentos de pómez y líticos, están estrechamente relacionado con la resistencia de cada muestra. Por ejemplo: La resistencia (< 4.40 MPa) y evolución mecánica de la muestra de roca IP está controlada por el alto contenido de fragmentos de pómez (>38 %) y materiales arcillosos (montmorilonita) en su matriz.

**Palabras claves:** propiedades físico-mecánicas, Sistema poroso, flujos ignimbríticos, Cuitzeo.

## Abstract

Geomechanical characterization of rocks (e.g. physical, mechanical, hydric) is very important and useful for the geological studies, applied to civil engineering. The civil works require (e.g. galleries, depth foundations, road traces) information about the mechanical behavior of rocks masses, as well as the rock matrix. The detailed geomechanical characterization of different ignimbrite lithofacies of the Cuitzeo zone, was performed according to a series of laboratory tests. The main objective of the project is the study of the relationships between different physical properties and the mechanical behavior of the materials by graphical description of several empirical equations.

The Petrophysical and porous system studies were performed by a series mercury porosimeter tests and image analyses, where as the characterization of the mechanical behavior and fracture mode was performed by a series of uniaxial compressive strength tests and X-ray tomographic image analyses. Particularly, the mechanical tests results were represented into a stress-strain graph, where different parameters could be easily evaluated (e.g. Young`s modulus and Poisson ratio). The dynamic properties, strongly related to the physical composition (e.g. pumice, lithics, and minerals content), were obtained through P and S wave velocity measurements. Final results give us information about the state and evolution of the materials: One of the goals, derived from the geomechanical characterization, is the compilation of a data base, which are very useful in the construction of the geological scenarios by attributing properties of every single rock unit.

According to the laboratory tests results, the IP and IH lithofacies present more porous content. Particularly, the mercury porosimeter tests describe a high percentage of microporosities, which in turn promote the capillarity effects (absorption capacity =  $2.7 \text{ g / cm}^2$ ). In the other hand, the high percentage of clay minerals content (montmorillonite) and pumices and lithics fragments are strongly related to the strength of each sample. For example: The strength ( $< 4.40 \text{ MPa}$ ) and mechanical evolution of the IP sample is controlled by the high content of pumice fragments ( $> 38\%$ ) and clay minerals (montmorillonite) in the matrix.

**Keywords:** physical-mechanical properties, porous system, ignimbrites flows, Cuitzeo.



# 1 Introducción

El conocimiento de las características físicas y mecánicas de las rocas en cualquier ambiente geológico (p. ej. volcánico, geotérmico) son de suma importancia para la construcción y evaluación de modelos conceptuales útiles en el diseño de cualquier obra civil (p.ej. galerías, cimentaciones profundas, perforaciones de pozos). En particular la Ingeniería Geológica ha tenido interés en el comportamiento mecánico que depende en gran medida de las características físicas de las rocas, que a su vez pueden cambiar cuando están sometidas a procesos de alteración.

Las alteraciones de las rocas son producidas por diferentes agentes (p. ej. intemperismo, fluidos ácidos, vapores y aguas hidrotermales), todos estos modifican y debilitan la matriz de la roca, haciendo que las propiedades tiendan a disminuir o aumentar dependiendo de los agentes que la afectan; un ejemplo de ellas es la alteración por hidrotermalismo que aumenta el grado de porosidad pero disminuye la densidad, y en las propiedades mecánicas disminuye la resistencia a compresión simple.

La resistencia se ve disminuida conforme al tipo de roca, textura y arreglos estructurales, uno de los factores que afecta mucho la resistencia mecánica son las propiedades físicas, en donde [Benavente, et al. \(2006\)](#) dicen que el componente de la roca más influyente en sus propiedades físicas es el espacio vacío o poroso. La porosidad se puede definir como los espacios huecos de una muestra de roca, la cual se origina en su proceso de formación o proceso de asimilación. Este proceso genera distintos tipos de porosidad como lo son: micro-poros y macro-poros, así como poros interconectados o cerrados.

Los diferentes tipos de porosidad juegan un papel muy importante en las propiedades físicas e hídricas, por ejemplo la capilaridad necesita de los microporos, la permeabilidad necesitan de los macroporos y poros interconectados. Todos estos procesos conllevan a efectos secundarios, por ejemplo una roca al estar en contacto con fluidos, incrementa su volumen, debido al aumento de la presión de poros, esto genera efectos como la formación de micro-fracturas y fisuras internas del material.

Los procesos antes mencionados afectan el comportamiento mecánico de una roca. Otro ejemplo es el intemperismo, donde una roca sufre cambios cíclicos en su estructura y éstos son producidos por la humedad, formación de hielos en los poros y el calor. *Ceryan, et al. (2008)* mencionan que, uno de los parámetros que más influyen en los comportamientos físico-mecánicos es el grado de meteorización; *Loughnan, (1969)* menciona que, algunos elementos alcalinos y alcalino-térreos son fácilmente lixiviados a partir de rocas y que los elementos residuales se redistribuyen a minerales secundarios.

Otros procesos de formación y cambios que sufre una roca influyen en sus propiedades físicas y mecánicas, donde la norma de la American society for Testing and Materials 2005 (ASTM 2005), aplica algunos métodos y pruebas para analizar estas propiedades antes mencionadas. Los materiales que serán sometidos a pruebas de laboratorio son rocas de origen volcánico, de la región de Cuitzeo, Michoacán, México.

Michoacán se encuentra en una zona con mucha actividad geológica y volcánica en el pasado, por lo tanto el caracterizar mecánicamente las rocas existentes en cada región es importante, ya que las principales rocas presentes en obras civiles del estado, en su mayoría son rocas ígneas.

Los análisis y resultados de laboratorio de este trabajo, servirán para caracterizar los diferentes comportamientos de las litofacies de ignimbritas de la zona de Cuitzeo, así como para el análisis de inestabilidad de taludes en las carreteras principales de la región.

## 1.1 Justificación

En la actualidad existe un crecimiento importante en las investigaciones y estudios de las propiedades físicas y mecánicas de las rocas, en gran parte debido a que las grandes obras ingenieriles requieren un estudio detallado de mecánica de rocas y suelos para su desplante. Se resalta que el análisis de las propiedades de las rocas, es de gran importancia en el diseño de este tipo de obras civiles. Otro ejemplo es el conocimiento de las características físicas de rocas ornamentales que requieren de resultados de la porosidad y de la resistencia máxima a compresión. Algunos autores como *Navarrete et al. (2013)*, *Aduvire et al., (1992)* nos indican que la resistencia a la compresión ha sido y sigue siendo una de las propiedades más representativas del comportamiento de las rocas explotables (p. ej. carreteras, puentes, túneles, cimentación de grandes edificios).

Para el caso de la zona de estudio la caracterización físico-mecánico, es importante ya que en ella existen grandes obras civiles, por ejemplo carreteras de tipo A, puentes y construcciones de viviendas, todas éstas obras mencionadas requieren de un conocimientos del estados de los materiales (p.ej. porosidad, resistencia máxima y grado de alteración). Las propiedades mencionadas son los principales agentes que desencadenan movimientos en rocas y suelos.

Los efectos de las propiedades mecánicas y físicas de los materiales en la región de Cuitzeo, son evidenciados en su mayoría por los deslizamientos y desprendimientos en bloques de rocas, estas manifestaciones se presentan en los taludes de la carretera Morelia-Guadalajara. Los efectos de la propiedades físicas (p. ej. porosidad) influyen directamente en la capacidad de hacer circular fluido en el interior del material y esto propicia un alto grado de alteración por contacto de aguas hidrotermales.

Por lo tanto, caracterizar las rocas ignimbríticas de la región, nos proporciona resultados e ideas del comportamientos (erosión y desgaste) de los materiales relacionados con sus características, que sirven principalmente para poder predecir algunos cambios y el comportamiento en obras civiles, esto se puede predecir analizando los materiales en pruebas de desgaste y compresión simple.

## **1.2 Objetivo general**

Caracterización geomecánica de algunas litofacies de los flujos ignimbríticos de la zona de Cuitzeo, Michoacán.

## **1.3 Objetivos específicos**

- Evaluación del comportamiento mecánico de cada litofacie con base en sus características físicas, heredadas de su génesis.
- Atribución de propiedades a cada litofacie.
- Identificación de relaciones directas entre propiedades (p. ej. relación de la resistencia con las características del sistema poroso).

## 2 Antecedentes

Las propiedades físicas y mecánicas de las rocas se han estudiado con fines científicos (p. ej. geológico y vulcanológico) o prácticos (p. ej. obras ingenieriles). En particular, para el diseño de cualquier obra civil es importante el estudio de la resistencia y la deformabilidad de un material. Un ejemplo de estudio de las propiedades de las rocas extraídas de bancos de materiales, que se han estudiado para su uso en carreteras, construcción en edificaciones y puentes. Algunos autores como [Alonso-Guzmán, \(1996\)](#), [Carreón-Nieto, \(2002\)](#), [Bioggero et al., \(2004\)](#), [Carreón-Nieto et al., \(2004\)](#), [Villaseñor-Reyes, \(2014\)](#), [Navarrete et al. \(2013\)](#) realizaron la caracterización físico-mecánico de rocas volcánicas y específicamente a ignimbritas. Con base en resultados obtenidos de pruebas de densidades, peso específico, índice de carga puntual, prueba uniaxial, geoquímica y mineralogía; por su parte, [Aduvire, \(1992\)](#) resaltó la importancia de la caracterización geomecánica mediante índices (densidad y porosidad), para la explotación de rocas con fines ornamentales.

Algunos otros autores han investigado y aplicado la caracterización física y mecánica de las rocas en otras áreas de conocimiento como la vulcanología e hidrotermalismo por ejemplo ([Frolova et al., 2014](#); [Pola et al., 2014](#); [Erguler y Ulusay, 2009](#)), estos autores mencionan la importancia de las propiedades físicas (p. ej. porosidad y densidad), que son las propiedades que cambian las características internas de la roca, así como también propician el movimiento libre de un fluido a través de los materiales rocosos.

Los materiales rocosos también pueden sufrir cambios importantes cuando son sometidos a variaciones drásticas de temperatura, y esto puede derivar efectos secundarios como es el movimiento de las rocas sin fracturar. Estos cambios se ven reflejados en pequeños pliegues en la matriz. Muchos autores ([Brotons et al., 2013](#); [Shi-Liu y Jinyu-Xu, 2013](#); [Tian et al., 2014](#)), realizaron estudios acerca de la influencia de la temperatura en las propiedades físicas y mecánicas de las rocas, y mencionan que una roca sometida a diferentes temperaturas sufre un cambio en sus propiedades, pero principalmente en las mecánicas ya que una roca sometida a alta temperatura soporta mayor deformación.

A su vez, en la rama de la geología y la vulcanología la caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de las rocas, son de vital importancia para la construcción

de modelos conceptuales de zonas específicas, que ayuden a entender fenómenos naturales complejos. Por ejemplo, el estudio de la evolución del sistema poroso, en relación con la permeabilidad del medio, en ambientes hidrotermales; esto nos permite la identificación de zonas de prospección para la explotación geotérmica. Así mismo, es importante el conocimiento del entorno físico de las rocas encajantes, ya que es un punto de partida para las simulaciones de modelos conceptuales y numéricos por ejemplo [Iriart et al., \(2011\)](#) explica la simulación Montecarlo (USGS), que propone cómo estimar el potencial de un yacimiento geotérmico. Este modelo pone en evidencia la importancia de la porosidad y densidad de una roca. En la ecuación de calor recuperable se observa la importancia del uso de las propiedades físicas.

$$Q_{\text{recuperable}} = R_g V \cdot [\Phi \rho_{\text{agua}} C_{p_{\text{agua}}} + (1 - \Phi) \rho_{\text{roca}} C_{\text{roca}}] \cdot [T_{\text{yacimiento}} - T_{\text{ambiente}}]$$

Donde

$q$  = es el calor disponible

$V$  = el volumen total del yacimiento

$\rho$  = porosidad

$\Phi$  = densidad

$C_p$  = calor específico a presión constante

$C$  = capacidad calorífica

$T$  = temperatura.

Estos modelos numéricos son útiles para los primeros cálculos para la exploración de zonas geotérmicas. En otros campos como la ingeniería en construcción, este conocimiento es de gran importancia, por ejemplo en el caso de carreteras es fundamental la caracterización (física y mecánica) de los materiales obtenidos en los bancos. Un ejemplo es el estudio más reciente de los materiales usados en las construcciones en obras ingenieriles, que fue realizado por [Navarrete et al., \(2013\)](#), los autores determinaron las propiedades de las rocas bajo estudios físicos y mecánicos; los materiales que se emplearon en el estudio son procedentes de algunos yacimientos de materiales de construcción más representativos de la región de Morelia, Michoacán, México.

La propiedades que según el autor se deben realizar con la finalidad de caracterizar de manera básica un material, se encuentran en la tabla 1 y son: resistencia a compresión

simple mediante el ensayo de carga puntual, porcentaje de humedad actual, porcentaje de absorción, densidad por medio de picnómetro, densidad aparente o gravedad específica, y ensayo de absorción capilar, los resultados que el autor obtuvo se encuentra descrito en la Tabla 1, donde se observan los resultados más sobresalientes y se resaltan los materiales más competentes que se encuentran en la zona de Cuenúmbo.

Tabla 1. Estudios petrográficos de los principales bancos de materiales usados en las construcciones en la región de Morelia, Michoacán, (Navarrete et al., 2013). Los resultados se obtuvieron de un promedio de 35 fragmentos irregulares por banco.

Banco	%H.A	%H.ABS	G.E	D (g/cm <sup>3</sup> )	Is <sub>(50)</sub> (Mpa)	σ(Mpa)
Cerritos (C)	0.22	5	1.7	1.7	2.27	54.48
Huramba(H)	0.24	4.01	1.7	1.93	3.27	78.48
Joyitas (J)	1.49	5.4	1.8	1.8	3.29	78.96
Comanja (Co)	1.06	5.08	1.91	2.09	3.56	85.44
Cuenembo(U)	0.15	5.8	2	2	2.43	58.32
Cigre(T)	0.19	5.9	1.7	1.7	1.82	43.68
Maskutan(K)	0.8	15.82	1.31	1.49	1.68	40.32
Melón(M)	0.6	15	1.5	1.6	1.71	41.04
AGC(G)	2.99	1.26	2.57	2.64	3.77	90.48
El Colegios (S)	0.83	0.83	2.63	2.61	4.33	103.92

%H.A, Porcentaje de humedad actual; %H.ABS, Porcentaje de humedad de absorción; G.E, gravedad específica; D, densidad; Is<sub>(50)</sub>, corrección de tamaño; σ carga puntual.

El análisis de las propiedades físicas de la rocas nos brinda información de la estructura interna e indirectamente de su grado de compactación y alteración (p. ej. hidrotermalismo). La caracterización del sistema poroso se puede relacionar de manera indirecta con la resistencia a compresión simple de la roca. Se sabe que al aumentar el porcentaje de poros disminuye la densidad y resistencia de la roca.

## 2.1 Trabajos realizados en la región

Se sabe que la región de Cuitzeo se encuentra dentro del CVTM y del CVMG, por consiguiente algunos autores como Pascuare et al., (1987), Garduño-Monroy, (1999), han hecho estudios del marco tectónico y de la geología estructural regional, así como los campos de esfuerzos en donde mencionan que las deformaciones frágiles se deben a las

reactivaciones repetidas de los diversos componentes cinemáticas del CVTM, algunas de las características son las diferentes fases de compresión que han determinado el desarrollo de pliegues de escalas diferentes, clivajes, fracturas y fallas, un ejemplo de ella es la falla de 16 km que cruza la orillas del lago de Cuitzeo. Otros autores (Pasquare *et al.*, 1991, Israde-Alcántara, 1999, Suter *et al.*, 2001, Garduño-Monroy *et al.*, 2009) han estudiado de manera general la geología estructural y volcánica del CVMG, donde mencionan las principales estructura de las región, como los semigrabens, el sistema de fallas Morelia-Acambay, la cuenca del lago de Cuitzeo y la falla San Agustín NW-SE que corta el lago.

Para el caso de la estratigrafía general de la región de Cuitzeo fue descrita y estudiado por Israde Alcantara., (2002), Israde y Garduño, (2004), Israde Alcántara, (2009), donde menciona que está compuesta principalmente por flujos ignimbríticos, domos dacíticos y depósitos fluviolacustres, autores como Pradal y Robin, (1994), mencionan que la región están compuestas en algunas zonas por basáltos calco-alcalinos Plio-Cuaternarios. IMP., (1986), Suter *et al.*, (2001), Garduño Monroy, (1999), Pérez Esquivias *et al.*, (2010), Gómez-Vasconcelos, (2012), mencionan los principales aparatos volcánicos con que cuenta en los alrededores de la región como el complejo volcánico Quinceo -Tetillas, la secuencia volcánica del Óligoceno-Mioceno de la Sierra de Mil Cumbres y La caldera de Atécuaro.

Autores como Ostrooumov *et al.*, (2012), han realizado algunos estudios sobre la mineralogía de los principales materiales existente en la región de Cuitzeo Michoacán (p.ej. Ignimbritas alteradas y minerales secundarias como las zeolitas), autores como Alonso Guzmán, (1996), Carreón Nieto, (2002), Bigioggero *et al.*, (2004), Carreón-Nieto *et al.*, (2004), Villaseñor-Reyes, (2014), han realizado estudios específicamente en las rocas ignimbritas y realizaron estudios geoquímicos, estratigráficos, mineralógicos y mecánicos ya que estos materiales son usadas como rocas ornamentales.

La cuenca de Cuitzeo es una zona con alta biodiversidad, es por ello que muchos se han interesado hacía ella, por ejemplo Mendoza, López y Bocco, ( 2004-A) publicaron un estudio sobre la evolución del efecto del cambio de cobertura y uso de suelo para el caso de la cuenca del lago de Cuitzeo, otro estudio de la región es publicado por la Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente de Michoacán junto con algunos institutos de la UNAM (CIECO e IG), entre los años 2002 y 2006 hicieron un Ordenamiento Ecológico Territorial



de la cuenca de lago de Cuitzeo, con el objetivo de garantizar la funcionalidad y sustentabilidad del medio natural, para así lograr el equilibrio entre la transformación y la conservación del medio; el trabajo de estas dependencias comprenden desde mapas geomorfológicos, mapas de relieve, mapas de clasificación de suelos, mapas de distribución de cobertura vegetal y estudio de la erosión, en donde junto con **Mendoza, López y Bocco, (2004-B)** mencionan que las ignimbritas tienen un 13% y en conos andesíticos y volcanes monogénicos 19%. Otros autores que han hecho trabajo del medio ambiente de la región es **Buenrostro-Delgado, (2004)** e **Israde-Alcántara et al., (2009)**, donde mencionan que algunos sitios de vertido de basura, no tienen control alguna, ni un diseño de ingeniería que permita el control de lixiviados y de biogases generados por las actividades urbanas, agrícolas e industriales, el objetivo del trabajo comprende en establecer métodos de ingeniería y de gestión para minimizar el impacto ambiental y de salud pública de los tiraderos en zonas urbanas.

La región de Cuitzeo ha sido ampliamente estudiada, donde los autores han mostrado el gran interés que tienen en la región, pero desafortunadamente no hay trabajos de peligros y riesgo sobre deslizamientos producidos por materiales de origen volcánico.

## **2.2 Localización**

El área de estudio se ubica en el estado de Michoacán dentro de Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM) y del Campo Volcánico Michoacán Guanajuato (CVMG) Figura 1, se localiza a 20 km al norte de la ciudad de Morelia, la zona se encuentra entre en las coordenadas  $101^{\circ}23' 20''$  y  $101^{\circ} 3' 28''$  de longitud oeste y  $19^{\circ} 58' 12''$  y  $19^{\circ} 46' 26''$  de longitud norte, con un área total de 329, 694, 023 m<sup>2</sup>. La geomorfología son variables que van desde alturas de 1880 a 2400 msnm. Entre los principales volcanes y estructuras que se encuentran a su alrededor se encuentran: hacia el sur el complejo volcánico Quinceo-Tetillas, hacia el sur-este el vulcanismo de la zona de mil cumbres y hacia el norte el lago de Cuitzeo. En la figura siguiente (Figura 1), muestra las principales fallas existentes en la región, así como los límites del CVTM y del CVMG, también se muestra el punto donde se ubica la zona de estudio

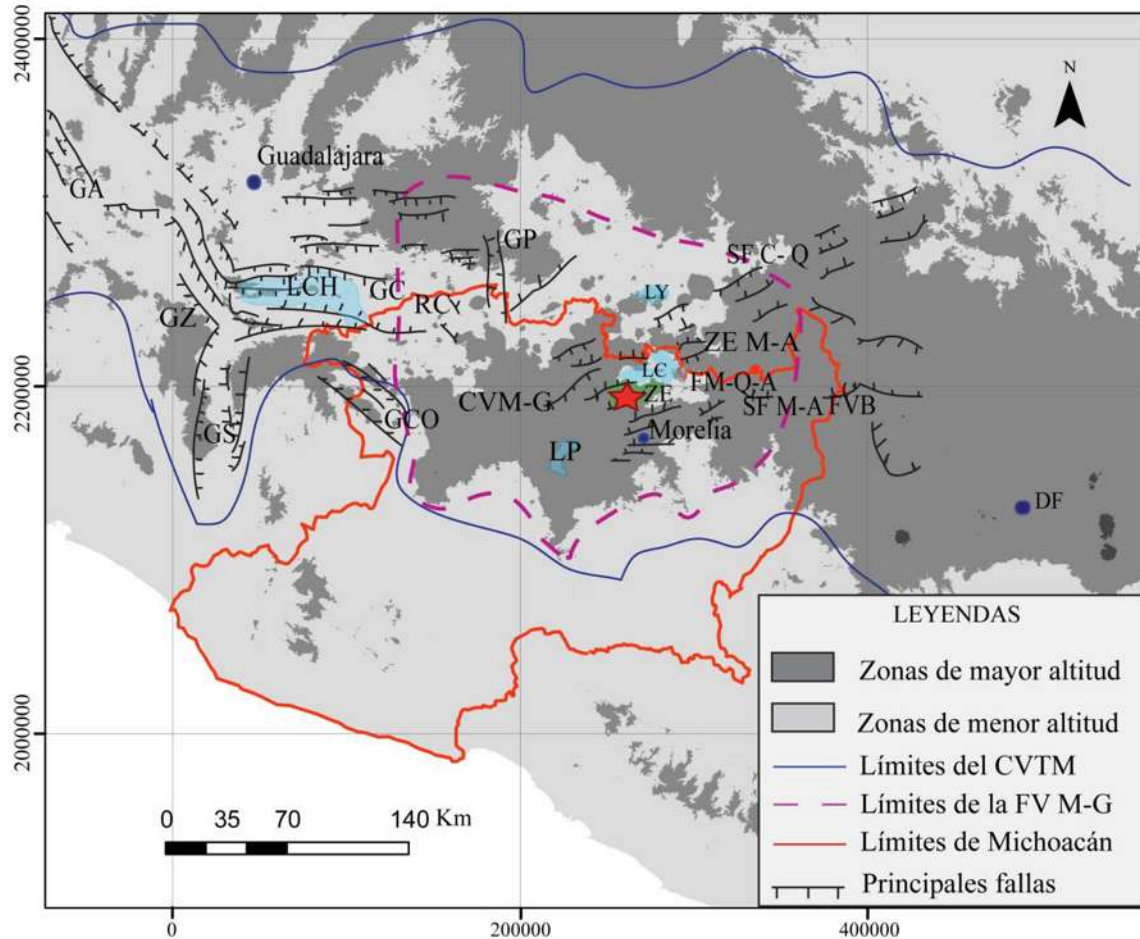


Figura 1.-Mapa tectónico regional del CVMG. Proyectado en una escala 1:50 000 sobre un MDE. Se muestran los principales rasgos estructurales y los límites del CVTM (Gómez-Tuena et al., 2005, Quintero-Legorreta, 2008). Las abreviaciones significan. GZ: Graven de Zacoalco; RC: Rift de Chapala; ZE M-A: Zona de Extensión Morelia-Acambay; GA: Graven de Amatlán de Cañas; GS: Graven de Sayula; GC: Graven de Chapala; GCO: Graven de Cotija; GP: Graven de Penjamillo; SF M-A: Sistema de Falla Morelia-Acambay; FM-Q-A: Falla Morelia Queréndaro los Azufres; FVB: Falla Venta de Bravo; SF C-Q: Sistema de Falla Cuitzeo Queréndaro; LP: lago de Pátzcuaro; LC: Lago de Cuitzeo; LCH: Lago de Chapala; LY : Lago de Yuriria; ZE: Zona de Estudio; Las líneas azules son los límites del Cinturón Volcánico Transmexicano(Gómez-Tuena et al., 2005) y el polígono rojo representa el estado de Michoacán de Ocampo.

Los mapas de localización fueron realizados a partir de un modelo digital de elevaciones (MDE) con escala de 1:50 000, descargados en la página principal del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), en la siguiente página (<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/continuoelevaciones.aspx>). Los materiales obtenidos fueron principalmente dos tipos de modelos: El primero fue el de la República Mexicana y el segundo es la carta topográfica con clave (E14A13) de la región de Cuitzeo Michoacán. Los mapas fueron realizados para la ubicación de la región

en estudio dentro del área mexicana, así como para identificar las principales estructuras geológicas (p.ej. fallas, lagos y volcanes). En la Figura 2, se identifican los principales rasgos estructurales locales, también se delimitan las localidades colindantes, el lago de Cuitzeo, por último el trazo de las principales carreteras, que son las principales vías de acceso a la zona de estudio, y en ella existen: la carretera internacional Morelia-Guadalajara y la carretera tipo B Morelia-Copándaro Figura 2.

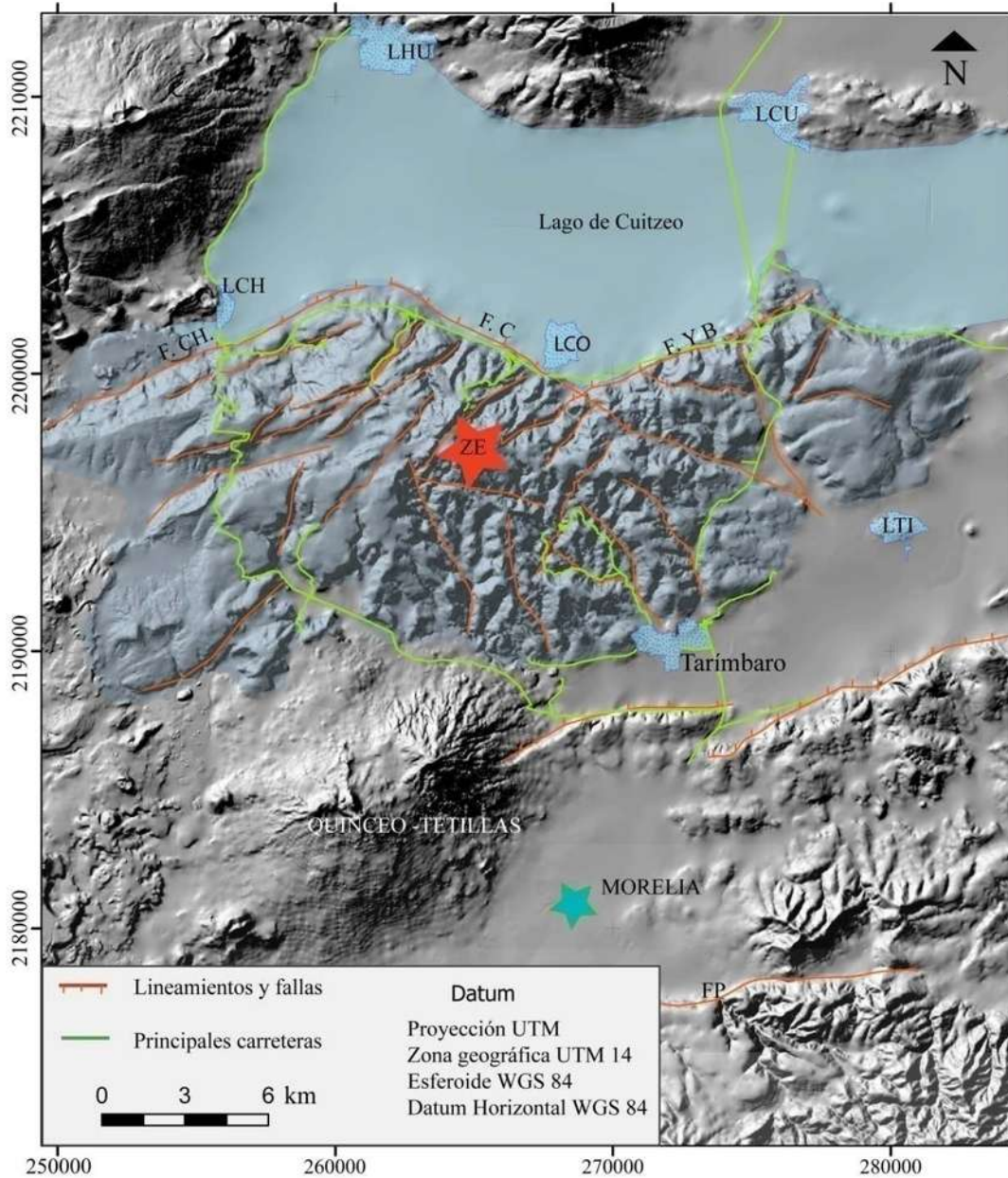


Figura 2. Mapa de la zona de estudio. El modelo de sombras está construido con base en un MDE, en él se muestra la ubicación de los principales rasgos estructurales y localidades de la zona de estudio. El significado de las abreviaciones y líneas son: VQ: Volcán el Quinceo; FP: Falla de la Paloma; LC: Lago de Cuitzeo; ZE: Zona de Estudio; LHU: Localidad de Huandacareo; LCH: Localidad de Chucandiro; LCO: Localidad de Copándaro; LCU: Cuitzeo; LTI: Localidad de Tejaro de los izquierdos; FCH: Falla de Chucandiro; FC: Falla de Copándaro; F YB: Falla la yerba buena. Las líneas rojas son los principales rasgos estructurales (fallas, grietas, ríos y arroyos), las líneas amarillas son las principales carreteras existentes en la zona.

## 2.3 Marco geológico

La zona de Cuitzeo se localiza dentro del CVTM en el CVMG, estos dos campos son generados por la subducción de la placa de cocos hacia la placa de norte América y la del Caribe (Suter *et al.*, 2001). La geometría del CVTM corresponde a una región comprendida dentro de sistemas de fallas NW-SE en su parte central y oriental, mientras que en su parte occidental la dirección preferencial es ENE-WNW y E-W (Gómez-Tuena, 2005). Estas geometrías, en conjunto forman un ángulo cercano a los 16° con respecto a la Trinchera Mesoamericana (Gómez-Tuena, 2005).

La importancia geológica de la FVTM es de considerar, ya que es una zona altamente activa y productiva, activa como el caso de los principales volcanes de México (p. ej. Popocatepetl y volcán de Colima), productiva como el caso de las zonas geotérmicas (p. ej. Los Azufre en Michoacán y Los Humeros en Puebla).

El Estado de Michoacán se encuentra al Oeste de la FVTM, en una zona volcánica histórica sísmicamente (Garduño-Monroy, 2009). Uno de los principales efectos de la actividad tectónica y sísmica es el surgimiento y las erupciones de los volcanes Jorullo en 1759 y Parícutín en 1943 (Luhr y Simkin, 1993), los cuales pertenecen al CVMG, que según Hasenaka y Carmichael, (1985), cuenta con más de mil pequeños volcanes monogénicos, como conos de escoria (p. ej. El Estribo), volcanes en escudo (p. ej. El Quinceo y Tetillas), domos de lava (p. ej. Cerro Chapultepec).

En particular, el lago de Cuitzeo está limitado por una serie de semigrabens con dirección NE-SW Y E-W basculados hacia el sur (Israde Alcantara., 2002), los fechamientos obtenidos en la zona (basamento andesítico y en los flujos piroclásticos) comprenden un periodo de 2 a 7 millones de años (Israde Alcantara., 2002). La estratigrafía general de la zona está compuesta principalmente por flujos ignimbríticos, domos dacíticos y depósitos fluviolacustres (Israde Alcántara, 2009), de acuerdo a diferentes autores, la zona de estudio está limitada al oriente, por productos basálticos calco-alcalinos pliocuaternarios de la región de Querendaro (Pradal y Robi, 1995), al oeste por el volcán de Quinceo (Suter *et al.*, 2001), mientras que al sur, lo limita la secuencia volcánica del Oligoceno-Mioceno de Mil Cumbres (Imp,1986,Pérez Esquivias *et al.*, 2010, Gómez-Vasconcelos, 2012), en su mayoría afectados por la actividad tectónica, donde según

Pasquare *et al.*, (1991) la zona se encuentra en un régimen de transtensión, con un basculamiento hacia el sur que ha permitido el desarrollo y migración del lago hacia el Norte.

## 2.4 Marco estructural

La región de Cuitzeo, Michoacán se encuentra al NW del CVTM y se ubica dentro del CVMG, este último es el que le ha afectado la mayor parte de su geomorfología, ya que algunos autores como Hasenaka y Carmichael, (1985) mencionan que, el CVMG cuenta con más de mil pequeños volcanes monogénicos, como conos de escoria (p. ej. El Estribo), volcanes en escudo (p. ej. El Quinceo y Tetillas), domos de lava (p. ej. Cerro Chapultepec).

La zona de estudio se encuentra dentro del sistema de fallas Morelia-Acambay, que es la principal estructura que afecta a la región mediante una serie de fallas normales con dirección E-O y NE-SW que cortan la región de Cuitzeo y la parte central del CVMG (Garduño-Monroy *et al.*, 2009).

Particularmente la parte NE de la zona de estudio se encuentra afectada por el graben de Cuitzeo, mientras que la parte SE se encuentra afectada por el Semigraben de Cuitzeo. Estas estructuras mencionadas tienen una orientación tendencial NE-SW (Garduño-Monroy *et al.*, 2009). La zona de estudio se encuentra afectada por la falla regional Tzitzio-Valle de Santiago que tiene una orientación NNW-SSE, la cual posiblemente ha generado el pliegue de Tzitzio, ya que ha experimentado movimientos laterales derechos (Mennella *et al.*, 2000; Garduño-Monroy *et al.*, 2009).

Estas estructuras generan rasgos secundarios los cuales se han analizado a nivel regional y local, se elaboraron mapas de los principales rasgos estructurales a lo largo de la zona sur del lago de Cuitzeo por medio de mapas a partir de un MDE, los cuales fueron proyectados a una escala de 1:50000. Los MDE se procesaron en ArcGis, mediante la herramienta COGO, y se obtuvieron direcciones de los lineamientos, (ver resultados en el sub-capítulo 4.2)

### 3 Marco teórico y conceptual

En este capítulo se aborda algunos conceptos importantes sobre las distintas pruebas realizadas en el trabajo, el propósito es dar una idea más clara sobre los distintos métodos e importancias de las propiedades de las rocas.

#### Caracterización mineralógica y petrográfica

El estudio petrográfico de las rocas se realiza principalmente para el análisis y conocimiento de su mineralogía y composición. Se efectúa mediante la observación en microscopio petrográfico con luz polarizada y paralela.

El análisis petrográfico incluyen, fábrica, composición interna de una roca, tipo y porcentaje de minerales, porcentaje de matriz, tamaño de granos, y porcentaje de líticos en el caso de rocas ignimbríticas. Por otro lado, la composición petrográfica está estrechamente relacionada con las propiedades mecánicas, en particular con su potencial de ruptura (p. ej. resistencia a compresión simple y tracción). **Zhaoping-Meng. (2006)** afirma que las características petrográficas de las rocas tienen un efecto en el comportamiento de las propiedades macro-mecánicas, por ejemplo: la composición mineral y su micro estructura.

#### Análisis texturales

Las características texturales (p.ej. tamaño y distribución de los diferentes componentes) de cada litofacie se obtuvieron mediante el análisis de imágenes. Esto nos sirve para cuantificar y diferenciar los distintos componentes en una muestra seleccionada. El programa usado en este trabajo fue ImageJ (<http://imagej.nih.gov/ij/>), creado por Way Rasband con fines médicos. Diferentes autores (p.ej. **Martinez-Nistal, 2013; Alonso-Guervos, 2012**) mencionan su aplicación (densitometría óptica, morfometría de partículas, así como para el análisis de fisuras y fracturas en los huesos), otros autores como **Castillo-Castañeda, (2006)**, **Cadena-Sánchez et al., (2011)** han usado este método para el conteo de partículas microscópicas.

#### Caracterización física

Algunos autores como **Benavente, (2006)** mencionan que las propiedades físicas contribuyen fuertemente a la durabilidad y resistencia de la roca, así como está condicionado en gran medida por el tipo, tamaño y forma de las porosidades, el arreglo de

su estructura y textura interna, y también controla algunas otras propiedades como las hídricas.

Las rocas con poros interconectados condicionan las propiedades hídricas, por ejemplo en la cantidad de flujo que permite atravesar la matriz de la roca. Un efecto de estas propiedades es la erosión de las paredes del sistema poroso ocasionando cambios en la forma, tamaño y volumen de los espacios vacíos (Erguler y Ulusay, 2009).

### **Densidad**

La densidad es una propiedad física fundamental de las rocas, se relaciona principalmente con su composición mineralógica, porcentaje de poros y arreglo de la estructura del material. Algunos autores como Benavente *et al.*, (2006) mencionan que se pueden definir diferentes tipos de densidades como la densidad real, densidad de conjunto y densidad aparente.

### **Porosidad**

La porosidad es un parámetro de gran importancia en la caracterización de los materiales pétreos, esta propiedad es empleada como elemento del análisis de calidad en materiales rocosos para usos constructivos o con un fin de investigación. Buj y Gisbert, (2007) mencionan que esta propiedad gobierna su dureza, deformabilidad, propiedades hídricas, conductividad hidráulica y durabilidad. La porosidad de un material pétreo es un parámetro de conjunto que se define como la relación entre el volumen total de poros y el volumen total de la muestra o roca. La porosidad de una roca puede estar clasificada en dos, la porosidad abierta o cerrada.

Se define la porosidad abierta, conectada o efectiva, como el volumen de poros que presentan un cierto grado de interconexión con el exterior, de forma que un fluido puede ser transportado a su interior. Por el contrario, la porosidad cerrada, aislada o no comunicada, como su nombre indica, es aquel volumen de poros de una roca que no presenta ningún tipo de comunicación con el exterior (Dullien, 1992). Las otras características de la porosidad son macro-poros y micro-poros, en particular este tipo de porosidad son los que hacen que el material tenga la propiedad capilar de la roca.



Los diferentes tipos de porosidades mencionadas anteriormente se obtienen realizando pruebas normadas por la ASTM 2005, en donde los resultados nos dan una idea de la cantidad de porosidad presente en una roca. La norma menciona los procedimientos para la obtención de la porosidad aparente y real.

Algunos métodos para la obtención de la porosidad aparente, en donde se usa la inmersión de muestras en agua, están descritos en las normas técnicas de la ASTM 2005 D2980-04 y; para la obtención de la porosidad real, en donde se usan las técnicas por intrusión de mercurio, están especificadas en las normas técnicas de la ASTM (2005) D4404-84R04.

Otro método para la obtención del porcentaje de poros en materiales, es el análisis de imágenes utilizando diferentes programas o herramientas (p.ej. ImageJ, y JMicroVision 1.2.7); también existen otros métodos más complejos como la adsorción de gases (agua y nitrógeno) y la picnometría de Helio.

### **Velocidad de ondas sísmicas**

Este método de caracterización dinámico, muchos autores lo manejan como una prueba no destructiva, ya que los especímenes no sufren ningún cambio en sus propiedades al estar sometidos en velocidades de ondas. La prueba consiste en hacer propagar ondas a través de un material sólido (p.ej. rocas, concretos, suelos y maderas); las muestras pueden tener formas cubicas o cilíndricas, de acuerdo a lo que establece la norma [ASTM D 4543-01 2005](#) o [Navarro \*et al.\* \(2011\)](#).

Algunos autores han propagado la velocidad de ondas sísmicas en diferentes tipos de materiales como [Malhotra y Carino \(2004\)](#); [Chavez-García \(2011\)](#) en concretos, [Sandoz \(1996\)](#) en maderas y [García San Milan, \*et al.\* \(1996\)](#); [Cerillo, \*et al.\* \(2014\)](#); [Vasconcelos, \*et al.\* \(2008\)](#); [Zoubeir-Lafhaj, \*et al.\* \(2006\)](#) en análisis de rocas mediante las ondas P y S.

[Malhotra y Carino \(2004\)](#) mencionan que este método puede ser usado para evaluar grietas internas y otros defectos, como por ejemplo cambios en el concreto por deterioro debido a agresiones químicas del medio ambiente, así como por congelación y deshielo. Para el caso de materiales rocosos se puede usar el mismo principio, por ejemplo algunos autores como [Saka y Uchikawa, \(1995\)](#) han trabajado con rocas usando las velocidades de ondas y mencionan que puede usarse para el análisis de los espacios y cerramiento de micro

grietas. Vasconcelos, *et al.*, (2008) nos dicen que en estas pruebas se pueden analizar las irregularidades en la estructura de un material sólido, así como hacer una reconstrucción de las características internas de un elemento rocoso.

Los resultados de esta prueba son dados principalmente por dos tipos de onda que son la sondas P y la S, aunque Chavez-García (2011) dice que cuando un medio sólido es alterado por una carga dinámica o vibratoria, se producen tres tipos de propagación de ondas mecánicas también llamadas ondas de esfuerzo (p. ej. ondas P, S y Rayleigh) estas tres ondas tienen diferentes características, así como diferentes medios de propagación que a continuación se describen (Figura 3):

- Ondas de compresión o también llamadas longitudinales u ondas P; estas ondas de compresión se propagan a través del medio sólido de manera análoga a las ondas sonoras que se propagan a través del aire.
- Ondas de cortantes o de cizalla, también llamadas transversales u ondas S; estas ondas hacen vibrar una partícula en sentido perpendicular a la trayectoria de las ondas, produciendo esfuerzos de cizalla en el medio sólido en que se propaga.
- Ondas superficiales (Love y Rayleigh); estas onda se propagan a través de la superficie terrestre en forma análoga a como se propagan las ondas sobre el agua.

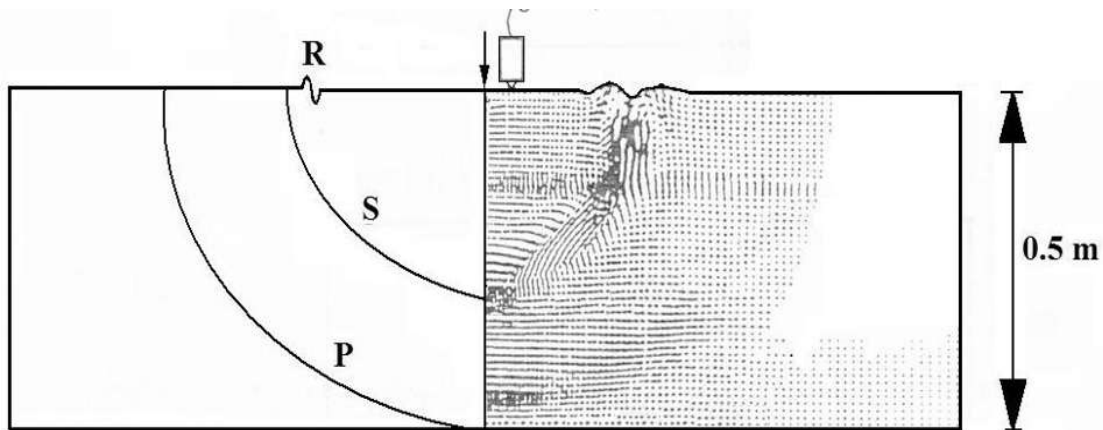


Figura 3. Forma de propagación de las ondas R, S y P. La figura muestra como los tres tipos de ondas se propagan a través de un medio sólido. Donde; R es la onda superficial Rayleigh; S es la onda cortante o transversal y P es la onda de compresión o longitudinal (Malhotra y Carino, 2004).

## **Caracterización mecánica**

Las caracterización mecánica de las rocas ha tomado un gran interés en las obras ingenieriles, por ejemplo **Okubo y Fukui, (1996)** mencionan que el diseño de estructuras subterráneas requiere principalmente del conocimiento de las características mecánicas como resistencia a tensión y compresión, otro ejemplo es en la ingeniería geológica en donde **Sonmez et al., (2006)** mencionan que las características mecánicas como la resistencia a compresión son importantes para la creación o análisis de pendientes, es por ello que la caracterización mecánica ha tomado un gran impacto, ya que estas son propiedades que nos permite tener una idea de la calidad del material.

La calidad de los materiales también varía fuertemente con el paso del tiempo, ya que al estar en contacto con otros materiales (p.ej. líquidos o vapores), los materiales se intemperizan o se meteorizan, produciendo dilatación y micro-grietas; estos dos efectos del intemperismo hace que la estructura del material rocoso se debilite y pierda la resistencia máxima, autores como por ejemplo **Hsieh et al., (2014)** demuestran que el cambio en el módulo de Young bajo diferentes niveles de esfuerzo se debe a la combinación de cierre de grietas, deslizamiento y dilatación en el material.

Otros agentes que condicionan la resistencia de las rocas es el grado de alteración por hidrotermalismo, donde por la inducción de agua ácida en el sistema de poros, la roca pierde el estado de unión cohesiva, así como la unión de su estructura y esto tiene un efecto principal en la resistencia mecánica.

### **Resistencia a compresión simple**

La resistencia a la Compresión Uniaxial es una propiedad mecánica de falla en rocas, y numéricamente nos indica: el grado de dureza, el comportamiento de las rocas en una gráfica esfuerzo-deformación, la fuerza máxima que soportan las rocas antes de su fractura o falla.

El análisis de las propiedades mecánicas y la prueba a compresión uniaxial están normados en la ASTM e ISRM. Para las pruebas a compresión simple se usaron las normas técnicas de la ASTM (2005) D2936-95R04E01, ASTM (2005) D2938-95R02 y ASTM (2005) D4555-01. El análisis de la resistencia uniaxial nos da parámetros sobre como es el estado actual de la roca y los valores obtenidos son: resistencia máxima, gráfica de

esfuerzo-deformación, en esta gráfica podemos obtener el módulo de elasticidad o módulo de Young.

Los resultados mencionados anteriormente como la resistencia y la gráfica esfuerzo-deformación, son reflejados tanto en imagen como numéricamente, por ejemplo la resistencia máxima así como el módulo de elasticidad ó Young son obtenidos mediante ecuaciones matemáticas (p.ej. ecuaciones de esfuerzo y elasticidad); pero el análisis de la gráfica será mediante observación directa ya que los resultados los encontramos en la tangente y curva de la gráfica. La gráfica nos brinda tres conceptos según [Hsieh, et al. \(2014\)](#), se obtienen resultados como: cerramiento de grietas o porosidad, iniciación de fracturamiento y propagación de fracturas (Figura 4). Algunas ecuaciones para los cálculos se mencionan a continuación.

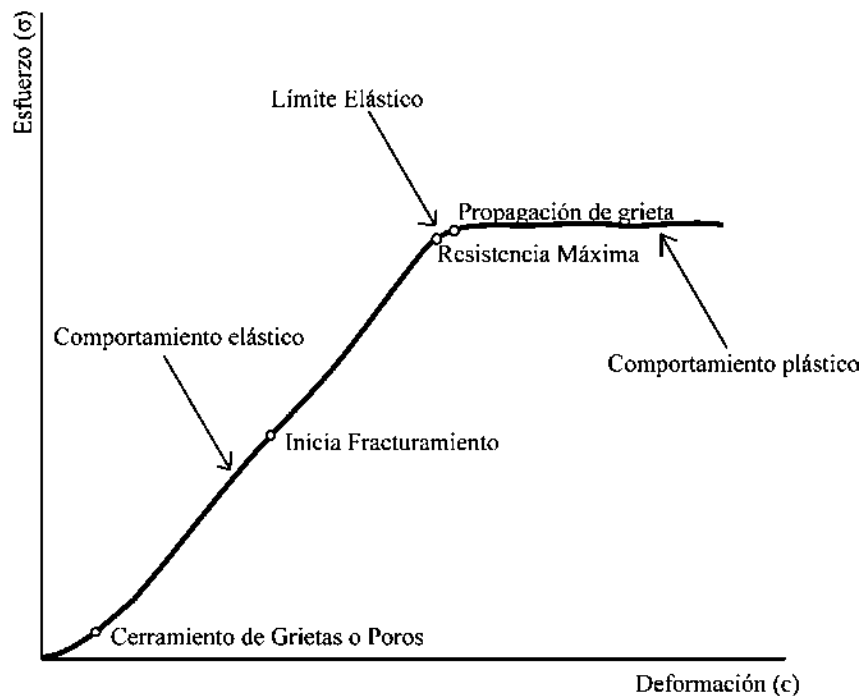


Figura 4. Gráfica de esfuerzo-deformación. Esta imagen nos muestra las principales características de una gráfica esfuerzo y deformación, en donde tenemos dos diferentes comportamientos (p. ej. elástico y plástico). Dentro de la gráfica existen tres comportamientos de un espécimen según sus características físicas (Grietas y poros).

## **Resistencia a la tracción**

Las rocas son consideradas como materiales frágiles que presentan menor grado de elasticidad. Los materiales ideales según **Canova y Fraga, (2004)** presentan tres tipos de características principales como lo son: la homogeneidad, la isotropía y la continuidad.

La isotropía es una medida de las propiedades direccionales de un material; por ejemplo si un material granular tiene la orientación de sus granos en una misma dirección.

La homogeneidad es una medida de la continuidad física de un cuerpo; por ejemplo los constituyentes de un material homogéneo estarán distribuidos de tal forma que un pequeño fragmento separado de cualquier cuerpo deberá tener constituyentes y propiedades representativas del todo.

La continuidad puede ser considerada como la porosidad, la cantidad de diaclasas y las fallas en un cuerpo rocoso, el grado de continuidad afectará su cohesión, y por lo tanto afecta la distribución de tensiones a través de todo el espécimen.

Estas condiciones descritas hacen que un material rocoso tenga un alto o bajo grado de resistencia a la tracción. La fuerza de tracción es una propiedad de los materiales sólidos que hace que tenga un estiramiento o una elongación.

La mecánica de rocas se estudia conforme pruebas de laboratorios como por ejemplo, tracción directa, tracción indirecta o brasileña; estas pruebas son usadas principalmente para los análisis de la resistencia a la deformación elástica (tracción) de los materiales frágiles, tales como por ejemplo, concretos, rocas, suelos y madera. Las pruebas a tracción consisten en someter una muestra de roca a estiramientos, en donde la descripción de los procedimientos de prueba lo marca la norma ASTM (2005) C0496-C0496-04 y la D3967-95AR04; los especímenes tendrán formas según se facilite el corte y dimensionamiento (p.ej. formas cilíndricas, prismáticas o en forma de discos).

## **Propiedades hídricas de las rocas**

Las propiedades hídricas de los materiales es la capacidad que tienen de mantener o dejar pasar un fluido a través de ellos. Algunas de estas propiedades son la capilaridad y la permeabilidad. Estas propiedades hídricas se presentan principalmente por el tipo y características de la porosidad de los materiales, por ejemplo un material con alto grado de

permeabilidad tendrá mayor porcentaje de macroporos e interconexiones, y un material con alto porcentaje de capilaridad es aquel que presenta un alto grado de micro-porosidad.

Estas propiedades de los materiales son las que tienen un gran impacto en la durabilidad de un material rocoso, ya que al circular fluido en la matriz de la roca erosiona las paredes porosas, y esto hace que el porcentaje de porosidad aumente.

### **Capilaridad**

El transporte de agua por capilaridad o imbibición capilar, es el mecanismo más importante del movimiento del agua en la mayoría de las rocas con microporos, el mecanismo de ascenso es a través de los tubos capilares usando el principio de la tensión superficial. Debido a la presencia de esta interface, existe una diferencia de presión dentro y fuera del líquido. Debido a que la presión dentro del líquido es menor que afuera, éste tiende a subir hasta que alcanza el equilibrio hidrostático, es decir, cuando el peso por unidad de área del capilar es igual a la presión capilar ( $\Delta p = \rho gh$ ) (Winkler, 1997).

Algunos experimentos realizados mencionan que el movimiento capilar se produce principalmente en poros de un tamaño mayor de  $0.1 \mu\text{m}$  (microporos) (Winkler, 1997) y, que la altura capilar máxima para un radio de poro de  $1000 \mu\text{m}$  (1 mm) es 15 mm (Benavente, 2006).

Algunos efectos de la capilaridad en rocas es el incremento de la presión de poros. Özvan, *et al.*, (2015) mencionan que la capilaridad afecta a la actividad de agua y solutos en la zona no saturada a través de la presión de poros y, se sabe que el aumento de la presión de poros hace que la presión en la matriz rocosa aumente y desencadena cambios en la estructura tales como por ejemplo grietas y fisuras.

## **4 Metodología**

En este capítulo se describe brevemente la metodología que se siguió para la elaboración de pruebas de laboratorio, análisis de datos y construcción de mapas geológico-estructurales generales.

### **4.1 Trabajo de gabinete**

Para el trabajo de gabinete fue necesaria una recopilación de bibliografía, artículos y libros, tanto de la zona de estudio, así como del tema de investigación; la finalidad es tener los conocimientos generales del tema de tesis, y de los materiales y estructuras geológicas existentes en la región.

Otra actividad realizada en esta etapa es la obtención de la carta topográfica de la región de Cuitzeo, Michoacán (E14A13), así como el MDE a escala 1:50 000; los materiales fueron descargados directamente de la página principal del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). La obtención de los modelos anteriores se utilizó para la elaboración de datos vectoriales, modelo de sombras, anáglifos y mapa de pendientes, la finalidad es para construir un mapa geológico preliminar de la zona de estudio. Los mapas mencionadas anteriormente, fueron procesadas en distintos softwares que son: ArcMap 10, Erdas Imagine 9.1 y Global Mapper v9.00, también se usaron algunos imágenes satelitales obtenidas en Google Earth ya que fueron necesarias para ver las formas de relieves.

### **4.2 Trabajo de campo**

Para el trabajo de campo se realizaron cuatro visitas, donde se modificaron los contactos litológicos trazados en el mapa geológico preliminar. En las cuatro salidas de campo se describieron veintinueve afloramientos de ignimbritas y lavas, estos afloramientos fueron observados y descritos detalladamente, tomando en cuenta el color general del depósito, el espesor, estructura, textura, gradación, tamaños de las partículas y por último la proporción de las muestras (p. ej. porcentaje de pómez, líticos y su mineralogía).

Parte del trabajo de campo es la obtención y medición de los datos geológicos estructurales (p.ej. fallas, grietas y fisuras); la finalidad de la recolección de estos datos es

la elaboración de mapas de rasgos estructurales de la región de Cuitzeo. Los datos descritos y obtenido en cada afloramiento fueron: direcciones y buzamientos.

### **4.3 Trabajo de laboratorio**

Una vez recolectados y dimensionados los materiales ignimbríticos, se realizaron las siguientes pruebas:

Pruebas petrográficas.

- Petrografía (Láminas delgadas)
- Difracción de rayos X

Pruebas físicas.

- Densidad (Picnómetro y gravedad específica)
- Porosidad (Inmersión en agua y mercurio)

Pruebas mecánicas.

- Compresión simple
- Brasileña o tracción
- Durabilidad

Pruebas hídricas.

- Capilaridad

#### **4.3.1 Preparación y dimensionamiento de muestras**

Los materiales existentes en campo son rocas ígneas alteradas e inalteradas (Figura 5). La recolección de las muestras se realizó de las diferentes litofacies de los flujos ignimbríticos existentes en la zona de estudio, los cuales tienen diferentes características (p.ej. color, textura y estructura).

Para la obtención de muestras en campo se eligieron los materiales más representativos de las diferentes litofacies de los flujos ignimbríticos. Se realizó una descripción general de las características del afloramiento, se describieron sus estructuras, así como la mineralogía de las rocas.

Como segundo paso se tomaron muestras que cumplieron con las dimensiones aproximadas de 30 x 20 cm, esto es con la finalidad de que pudieran ser dimensionable bajo las normas de la ASTM D 4543-01 (05).



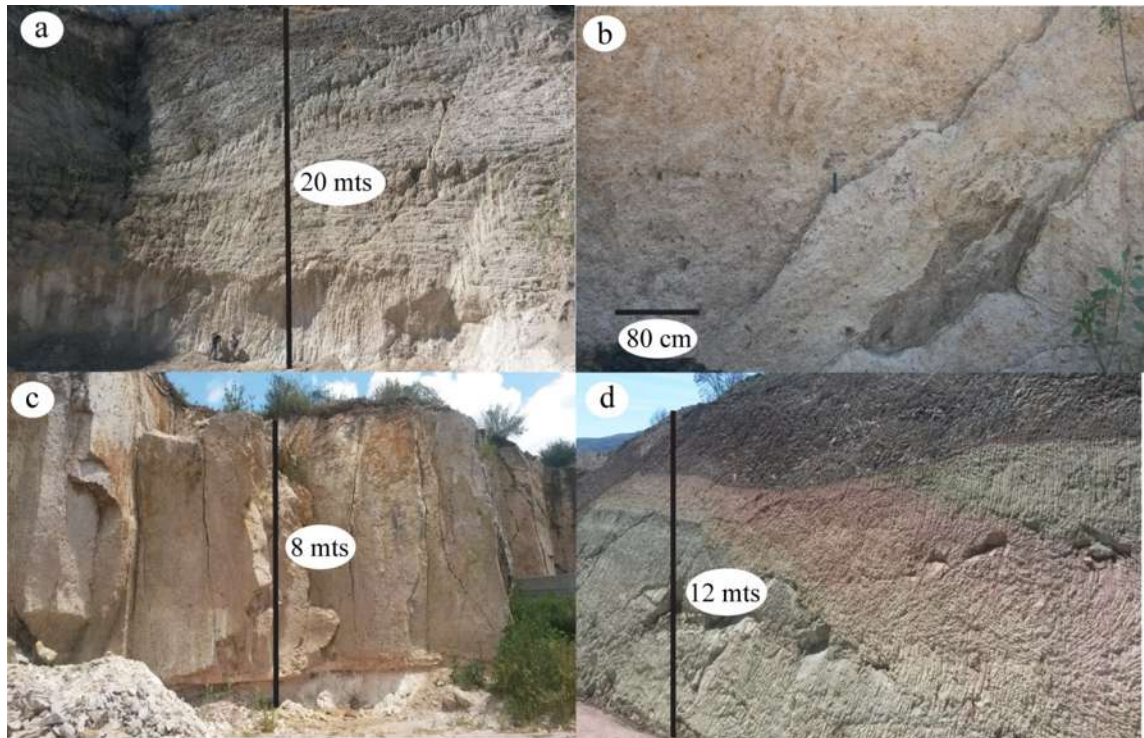


Figura 5. Materiales existentes en la zona de estudio. En estas imágenes se muestran las principales características de los materiales de la zona de estudio: a) Afloramiento del punto CZ-1, en la imagen se observa un afloramiento de rocas ignimbríticas mal soldadas y con alteraciones en la parte baja; b) en la imagen se observa un afloramiento de ignimbrita con algunos rasgos de fallas y matriz deleznable; c) Afloramiento del punto CZ-16, se observa una roca con menor grado de alteración, y conservando su característica de bloques; d) Afloramiento del punto CZ-2, flujo ignimbrítico en el que se observan tres capas; 1) color verdoso con mayor porcentaje de alteración; 2) color rojizo también alterada; 3) frente de lava estratificada.

Para dimensionar los especímenes se realizaron de acuerdo a la norma ASTM D4543-01, las muestras de roca pueden ser principalmente de dos formas: las cilíndricas deben tener dimensiones con relación a su diámetro y tamaño de grano, en donde la relación que establece la norma es:  $L/D$  entre 2 y 2.5, y que el diámetro no debe ser menor a  $1\frac{7}{8}$  es decir 47 mm. Para los especímenes cúbicos se maneja el manual de laboratorio de resistencia de materiales de Navarro *et al.*, (2011) en donde las dimensiones es de 5 x 5 x 5 cm.

### 4.3.2 Caracterización mineralógica y petrográfica

Para la obtención de los datos mencionados anteriormente fue necesario realizar laminas delgadas de las cinco litofacies seleccionadas, los cuales se elaboraron en el

laboratorio de petrografía del Instituto de Geofísica de la UNAM, mediante los siguientes cuatro pasos básicos.

1.- Preparación de muestras, que incluye el corte con una maquina (BUEHLER powerfeed trimsaw 10 in) y sujeción con pegamento de resina UV en un porta objeto de vidrio (2.6 x 4.6 cm).

2.- Desgaste con abrasivos e impregnación con resina UV.

3.- Pulido con abrasivos con granos de 250, 400, 600, 1000  $\mu\text{m}$ , hasta obtener un espesor máximo de 30  $\mu\text{m}$ .

4.- Análisis de las láminas con un Microscopio Petrográfico (OLYMPUS BX60) y (ZEISS Axio Scope. A1).

La preparación y descripción de las láminas delgadas se realizó con base en la metodología descrita en diferentes trabajos (p.ej. [Reyes-Agustín, 2015](#); [Raith \*et al.\*, 2012](#); [MacKenzie y Adams, \(1996\)](#)).

### **4.3.3 Análisis texturales**

Las características texturales de cada litofacie (p.ej. porcentaje total de pómez y líticos) se determinaron mediante el análisis de imágenes por medio del programa imageJ, siguiendo algunos procedimientos descrito en la bibliografía ([Martínez y Alonso, 2013](#)), los cuales se resumen en los siguientes cuatro pasos:

1.- Descarga de plugins para la depuración y limpieza de imágenes y también para la aplicación de filtros para una buena diferenciación de los distintos componentes.

2.- Binarización. Consiste en convertir la imagen en escala de grises (p.ej. 8, 16 y 32 bits). Esto sirve para aplicar la herramienta Threshold para una buena diferenciación de los componentes.

3.- Segmentación de la imagen. Consiste en la separación, definición e identificación de los diferentes componentes.

4.- Extracción automática de las características de cada elemento (p.ej. pómez y líticos).

Los datos obtenidos en esta prueba fueron el porcentaje total de pómez y líticos, así como el promedio y desviación estándar, también se obtuvieron porcentaje de pómez y líticos en diferentes áreas como: de 0.50 a 1 mm<sup>2</sup>, de 1 a 2 mm<sup>2</sup>, de 2 a 4 mm<sup>2</sup>. Las imágenes procesadas fueron de cuatro tipos de ignimbritas de las diferentes litofacies de la zona de estudio.

## **4.4 Caracterización física**

Se resalta la importancia de caracterizar diferentes características físicas como un factor desencadenante en su comportamiento mecánico, es por ello que en el trabajo se analizaron: la densidad, la porosidad y las velocidades de ondas sísmicas.

### **4.4.1 Masa**

El cálculo de la masa de los materiales se puede hacer de dos diferentes maneras: 1) por masa húmeda (Mh), que se basa en que los materiales en campo presentan diferentes pesos, ya que están expuestos al intemperismo y puede contener o no un porcentaje de humedad; 2) masa seca (Ms), es calculada en laboratorio haciendo un procedimiento de secando en el horno por 24 Horas, a un temperatura de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

### **4.4.2 Densidad**

Algunas de estas pruebas índice mencionadas fueron realizadas siguiendo las normas de la ASTM C127-04, en donde proporcionan los modelos de especímenes así como los métodos y procesos de elaboración de una prueba. Uno de los métodos es el del Picnómetro y densidad aparente o gravedad específica ASTM 127-04.

#### **4.4.2.1 Densidad por el método del picnómetro de sifón**

En este método se emplea un aparato normado por la M.MMP 4 04 003/02, es usado para determinar la densidad aparente de la roca o gravas. Para este análisis se usaron los procedimientos para el cálculo de la densidad en muestras de grava descritas en [Navarro-Sánchez \*et al.\* \(2011\)](#). A continuación se enlistan tres pasos fundamentales.

Es importante mencionar que esta densidad también se le conoce como densidad aparente o de bulk density.

1.- Los especímenes se saturan en agua durante un periodo de 24 Hr, después se procede a secar superficialmente y registrar su peso húmedo ( $W$  en gramos).

2.- Llenado del picnómetro (aparato que sirve para medir el volumen de agua desalojado por el material sólido equivalente al volumen del mismo, tal como grava y arena) con agua.

3.- Colocar la muestra de roca dentro del aparato y medir el volumen de agua desalojado en  $\text{cm}^3$ .

Por último la densidad se determina por medio de la ecuación 1.

$$\rho = \frac{g}{v} \quad (1)$$

Dónde:

$\rho$  = Densidad de la muestra,  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

$g$  = Peso de la muestra, g.

$v$  = Volumen de agua desalojado por la muestra de roca,  $\text{cm}^3$ .

#### 4.4.3. Porosidad

Estos métodos nos pueden proporcionar valores variados, tales como una porosidad aparente en el caso de la prueba por inmersión en agua, que a continuación se describe brevemente.

1.- Se dimensionan las muestras en forma cúbica y se secan al horno a una temperatura no mayor a  $60^\circ \text{C}$  por 24 horas. Una vez secadas, se enumera cada muestra.

2.- Se hacen tres mediciones en cada cara de las muestras para promediarlas y obtener las medidas finales.

3.-Una vez tomadas las medidas se procede a pesarlas en una balanza con precisión al milésimo de gramo, esto sirve para obtener la masa seca de los cubos ( $P_s$ ).

4.- En este paso se hace la inmersión en agua durante 24 horas. La saturación completa se obtiene cuando la muestra no presenta burbujas a su alrededor, en algunos materiales pueden durar 24 horas.

5.- A continuación se seca superficialmente la muestra y se pesa obteniendo así la masa húmeda ( $P_h$ ), después la muestra se sumerge en agua y se calcula el volumen desalojado, obteniendo así el ( $V_d$ ).

Por último el porcentaje de porosidad se calcula con la siguiente ecuación 2.

$$\% \text{ poros} = \frac{V_p}{(V_p - V_s)} \times 100 \quad (2)$$

En donde

$V_p$  = Volumen de poros

$V_s$  = Volumen del sólido

#### 4.4.4 Velocidad de ondas sísmicas

Las pruebas de velocidades de ondas se especifican en la norma ASTM (2005) D2845-00R04E01, en la cual se describe la metodología que se usa para la aplicación de la prueba. En la norma se encuentran algunas ecuaciones para el cálculo del módulo de elasticidad dinámico o Young dinámico y el módulo de Poisson.

Las ecuaciones usadas para el análisis de los resultados fueron:

Ecuación 3 de la relación de Poisson.

$$v = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1}{2\left(\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1\right)} \quad (3)$$

Donde

$v$  = relación de Poisson

$V_p$  = ondas P

$V_s$  = ondas S

Ecuación del módulo de elasticidad dinámico.

$$E = \frac{\rho v^2 (1+v)(1-2v)}{(1-v)} \quad (4)$$

Dónde:

$E$  = Módulo de elasticidad dinámico ( $\text{MN/m}^2$ )

$v$  = Relación de Poisson dinámico

$\rho$  = Densidad del material ( $\text{kg/m}^3$ )

V = Velocidad de pulso (m/s)

## 4.5 Caracterización mecánica

Las propiedades mecánicas son analizadas principalmente por medio de pruebas de fracturamiento o fallamiento de muestras de rocas cilíndricas o cúbicas en laboratorio, obteniendo así la resistencia máxima a compresión y tensión. En este trabajo se analizaron la resistencia a compresión, la resisten a tracción indirecta y la durabilidad.

### 4.5.1 Resistencia a compresión simple

La prueba a compresión simple consiste en someter un espécimen cilíndrico a una carga en un área definida, cuyo fin es lograr determinar la resistencia de las rocas sometidas a un esfuerzo normal en una sola dirección, esto quiere decir que no existe una presión de confinamiento o que los valores de confinamiento son iguales a cero.

Para la obtención de resultados y gráficas, se tomaron en cuenta los siguientes pasos de Navarro *et al.* (2011).

- 1.- Enumeración y toma de medidas reales de cada una de las muestras para determinar las áreas efectivas.
- 2.- Se coloca la muestra en la maquina universal, en este paso se buscan las caras más uniformes del espécimen, para que el contacto sea homogéneo en el área de carga.
- 3.- Se ajusta y se nivela la máquina.
- 4.- Se aplica la carga en forma lenta y constante hasta la falla de la muestra y así se registra la carga de la ruptura.
- 5.- Por último se aplican las ecuaciones 5 de esfuerzo y la ecuación 6 de módulo de Young.

Algunas ecuaciones para los cálculos se menciones a continuación.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (5)$$

Donde

$\sigma$  = Esfuerzo (Mpa)

P = Presión ejercida en un área definida (kgf)

A = Área definida (cm<sup>2</sup>)

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (6)$$

Donde

E = Módulo de Young (GPa)

$\sigma$  = Esfuerzo (MPa)

$\epsilon$  = Deformación (mm)

#### **4.5.2 Resistencia a la tracción**

Las pruebas a tracción consisten en someter una muestra de roca a estiramientos, en donde la descripción de los procedimientos de prueba lo marca la norma ASTM (2005) C0496-C0496-04 y la D3967-95AR04; los especímenes tendrán formas según se facilite el corte y dimensionamiento (p.ej. formas cilíndricas, prismáticas o en forma de discos).

Los resultados de esta prueba se obtienen midiendo la carga y las deformaciones que sufre el material. Los materiales sometidos a esta prueba pueden tener la deformación a lo largo de la longitud o en el diámetro, esto depende de la forma del dimensionamiento (Figura 6).

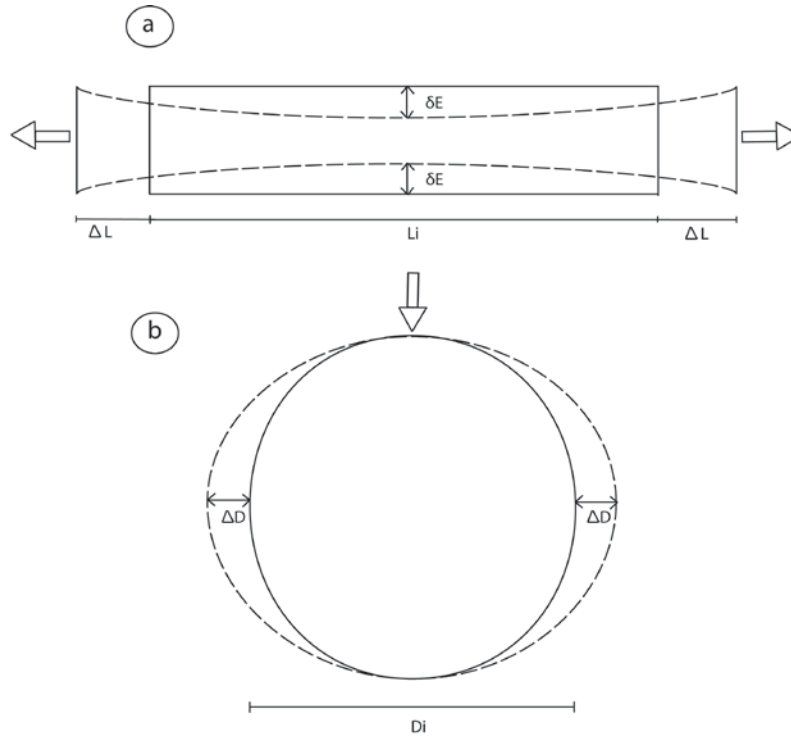


Figura 6. Formas de especímenes para prueba Brasileña. En la imagen a) se observa una muestra con forma de prisma; en la imagen (b) se observa una muestra con forma circular o de disco. Las nomenclaturas son:  $\delta E$ , decremento en el espesor;  $\Delta L$ , incremento en la longitud;  $L_i$ , longitud inicial;  $D_i$ , diámetro inicial;  $\Delta D$ , incremento en el diámetro.

Las ecuaciones (7), es para medir las tenciones nominales, y la ecuación (8) es para calcular el módulo de Young dinámico.

Ecuación de una muestra en forma de disco.

$$\sigma = \frac{2F}{\pi BD} \quad (7)$$

Donde

F = Carga máxima o de rotura

B = Espesor de la probeta

D = Diámetro

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (8)$$



Donde

E = Módulo de Young (GPa)

$\sigma$  = Esfuerzo (MPa)

$\epsilon$  = Deformación (mm)

## 4.6 Propiedades hídricas de las rocas

Estas propiedades de los materiales son las que tienen un gran impacto en la durabilidad de un material rocoso, ya que al circular fluido en la matriz de la roca erosiona las paredes porosas, y esto hace que el porcentaje de porosidad aumente.

### 4.6.1 Capilaridad

Los procedimientos de prueba están normados por la ASTM (2005) D2325-01 así como el manual del laboratorio de materiales de Navarro, *et al.*, (2011). Las ecuaciones para la obtención de resultados están descritas en las normas mencionadas, así como la obtención de las gráficas T (s) vs m (gr); la gráfica nos da información del comportamiento de absorción de agua en un determinado tiempo.

Ecuación de la masa.

$$M = m_i - m_f \quad (9)$$

Donde

M = masa succionada

$m_i$  = masa inicial

$m_f$  = masa final

Ecuación de succión en materiales.

$$x = \frac{30M}{LB} \quad (10)$$

Donde

L = Longitud de la muestra  
B = Ancho medio de la muestra.

## 5 Resultados

Los resultados obtenidos con base en pruebas de laboratorio se presentan en Tablas (2-13). Las características físicas principales que contribuyen a la evolución mecánica de cada litofacie se evidencian mediante su comparación directa, representada en diferentes gráficas. Los resultados finales han sido comparados con resultados recolectados en la bibliografía con la finalidad de comparar su comportamiento con otros casos de estudio similares en México y en otros países y así poder ubicarlos en un contexto global.

### 5.1 Marco geológico general

Las principales unidades litológicas de la región están constituidas en gran parte por depósitos ignimbríticos y lavas andesítica. De manera general y con una secuencia cronológica de la base a la cima, se describen a continuación tres de las principales unidades litológicas existentes en la región.

**Ignimbrita Jamaica:** Este material se describió de manera general en los puntos CZ-15 y CZ 16. En los puntos se observaron depósitos masivos bien soldados, afectado por fallas, grietas y fisuras. En estos afloramientos se observaron dos secuencias: En la secuencia 1 se encontró un material de color blanco muy deleznable con un espesor de 1.50 metros, con textura piroclástica y matriz muy fina; el material contiene algunos cristales de plagioclasas, cuarzos, anfíboles y pequeños líticos de color rojizo. En la secuencia 2 se encontró un material masivo bien soldado de 8 metros de espesor de color gris claro con textura piroclástica; el material contiene esferulitas y pómez grandes de color blanco. En la muestra también se observaron cristales de plagioclasa y cuarzos; otros componentes son los líticos de color rojizo y negro muy alterados.

**Ignimbrita de Cuitzeo:** En la Figura 7, se ilustran las ignimbritas de Cuitzeo cuya característica principal es el alto grado de alteración por hidrotermalismo. Está conformada por una secuencia de diferentes litofacies, se describe de manera general en el punto CZ-02. En el afloramiento se observó un depósito masivo de 12 a 17 metros de altura sobre yaciendo en una capa de lava andesítica masiva. La ignimbrita tiene un color verdoso a

rojizo en algunas partes, estos colores se deben a la alteración y oxidación al momento de la asimilación. En muestra de mano el material tiene una textura piroclástica, con soporte de matriz muy deleznable compuesta por cloritas y epidotas de color verde intenso, también contiene algunos fenocristales de plagioclasas, piroxenos y cuarzos. Otros componentes son los fragmentos de líticos de color negro y café; los fragmentos se describieron como andesitas basálticas. También se observaron algunos minerales secundarios como calcitas.

**Lava andesítica:** El material fue descrito en el punto CZ-02. Esta lava sobreyace a la ignimbrita, con un espesor de 2 a 3 metros. Es una lava masiva lajeada de color oscuro a gris oscuro, con alteraciones y presencia de indicitas; la matriz es vítrea con textura afanítica, con algunos fenocristales de olivino, plagioclasas y piroxenos.

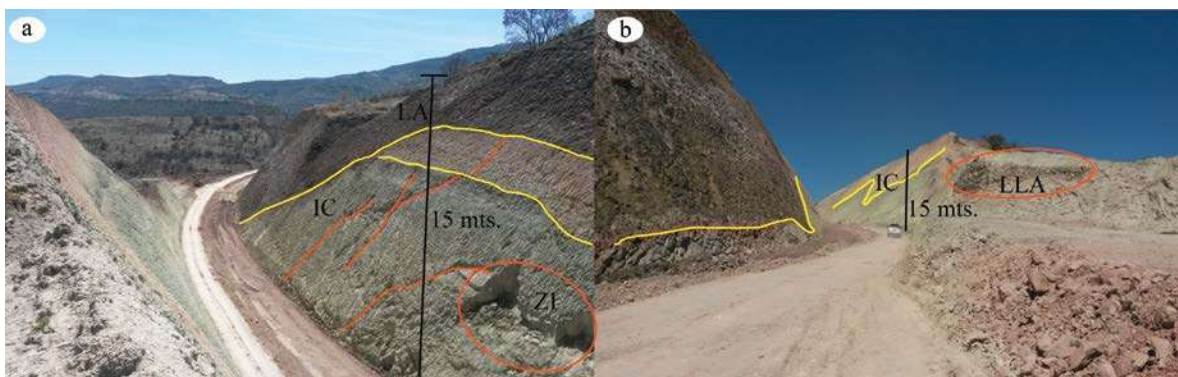


Figura 7. Imagen de afloramientos de ignimbritas. En la figura a) se muestra el flanco izquierdo de un corte de carretera, donde se observa un depósito de ignimbrita de color verdoso, así como sus límites de contacto con una lava masiva, la nomenclaturas significan: LA= material de lava; IC = ignimbrita cloritizada y material estudiada IP; ZL = material deslizado: en la figura b) se muestra el flanco derecho de un corte de carretera, se observa dos líneas de fallas y cada límite presentan diferentes colores, la nomenclatura LLA es un lente de material de lava; las líneas amarillas representan los contactos y las líneas rojas representa las fallas y erosiones en los materiales.

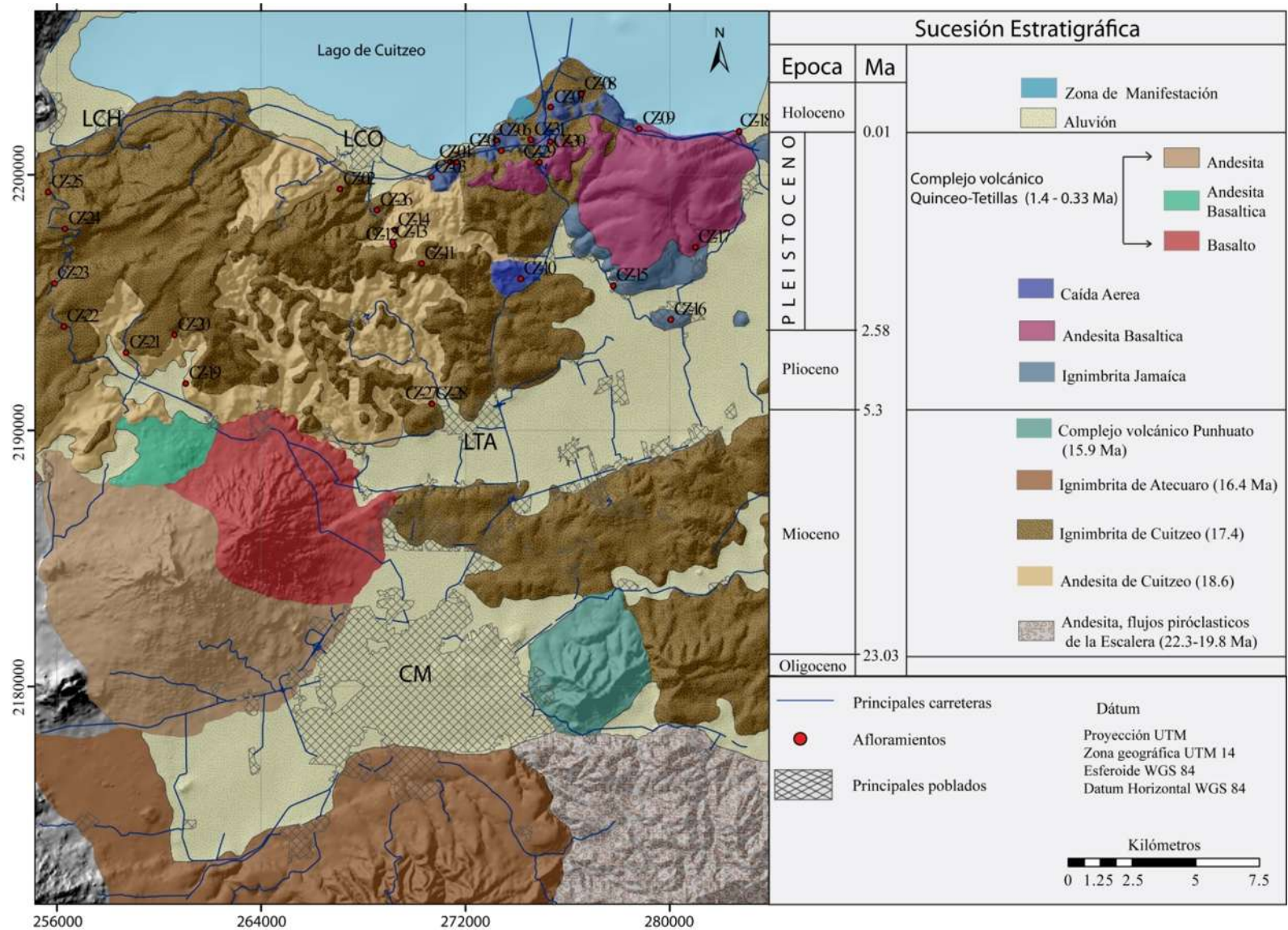


Figura 8. Mapa geol3gico general de la zona de Cuitzeo, Michoac3n. Los puntos rojos representan la ubicaci3n de las secciones estratigr3ficas, y las abreviaturas son descritas a continuaci3n: CM = ciudad de Morelia; LTA= Localidad de Tar3mbaro; LCO=localidad de Cop3ndaro; LCH=Localidad de Chuc3ndiro, las edades fueron obtenidas de G3mez-Vasconcelos, (2012) e Israde-Alc3ntara, (1999).

### **5.1.1 Descripción de afloramientos y rasgos estructurales locales**

En la parte noroeste de la zona de estudio se visitaron afloramientos de ignimbritas, donde se tomaron datos estructurales de fallas y grietas. Se obtuvieron direcciones según diagrama rosas: CZ-25 = NE y CZ-26 = NW (Figura 9 izquierda). Los puntos mencionados anteriormente fueron descritos en campo de la siguiente manera: En el afloramiento CZ-25 se observaron tres litofacias que se describen según enumerados en la Figura 9:

1) Esta primera capa tiene un espesor de 2.5 metros, el material cuenta con soporte de matriz mal soldada de color café, con una textura piroclástica con matriz muy deleznable y cuenta con algunos cristales de cuarzo, plagioclasas y líticos de color rojo y negro.

2) esta capa tiene un metro de espesor, de color blanco, con matriz muy deleznable y con fenocristales de cuarzo, plagioclasa y pómez pequeños.

3) este último estrato es un material masivo de 8 a 9 metros de espesor, con un color en general gris claro y con matriz bien soldada, cuenta con cristales de plagioclasas, cuarzos y pómez de hasta 1 cm, en la matriz del material tiene líticos oxidados de color rojizo y negro.

En el afloramiento CZ-26, a lo largo del talud de la carretera se observaron diferentes tipos de materiales ignimbríticos, entre ellos están los materiales descritos anteriormente en los puntos CZ-02. También se observaron materiales masivos de color rosa bien soldados de 6 metros de espesor, afectados principalmente por fallas y fracturas (Figura. 9 derecha); el material contiene fenocristales de plagioclasas, líticos de color negro y rojizo, y pómez grandes.

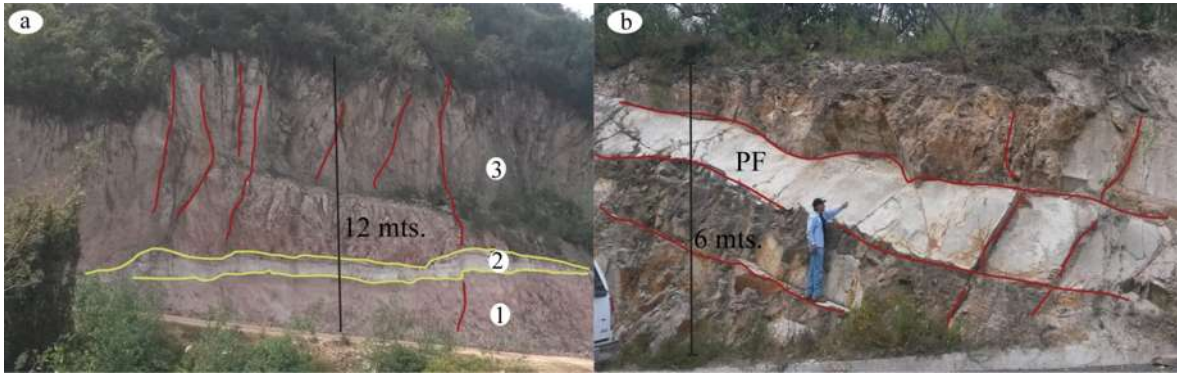


Figura 9. Imagen de materiales ignimbríticos de la parte noroeste de la zona de estudio. Imagen a) se observa un afloramiento de tres tipos de materiales ignimbríticos, en la cima del estrato uno sobreyace un material Ignimbrítico muy deleznable y en el estratos tres sobreyace un material ignimbrítica muy fracturada con discontinuidades; en la imagen b), se observa una ignimbrita muy fracturada con planos de fallas (PF) de hasta dos metros; las líneas amarillas representan los contactos y las líneas rojas representa las fallas y grietas.

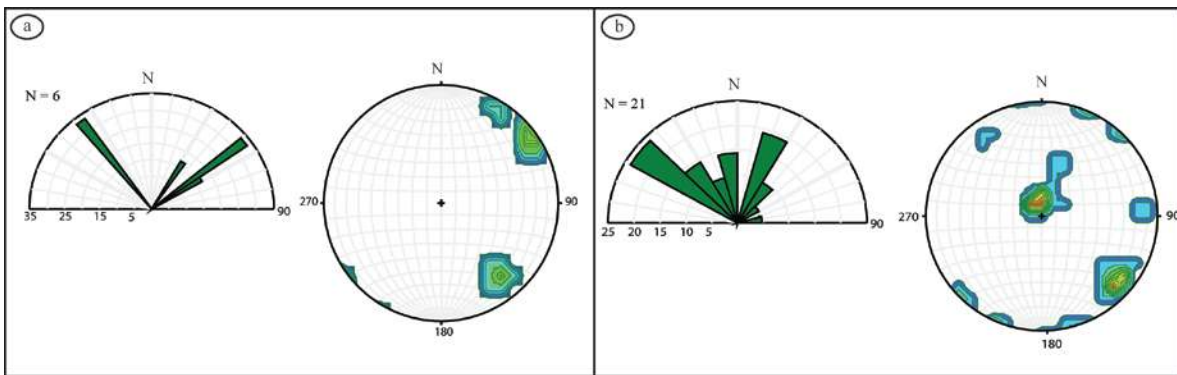


Figura 10. Diagrama de rosa y densidad de polos de las secciones: a) CZ-25; b) CZ-26. Los resultados de los diagramas se incluyen en la Tabla número 1, con una orientación preferencial NO.

En la parte noreste de la zona de estudio se hicieron diferentes descripciones de materiales, a su vez se encontraron el material ignimbrítico IP y se describe como en la figura 11a, también se tomaron datos (promedio de 20 datos por afloramiento) de los principales rasgos estructurales locales del afloramiento y fueron procesados en EstereoNet. Se elaboraron diagramas rosas y mapas de densidad de polos (Figura 12), todos los datos sirvieron para la identificación de las familias y direcciones de los rasgos geológicos locales. En esta parte de la región se encontraron tres tipos de materiales que son: lavas, ignimbrita soldada e ignimbrita mal soldada con alto grado de alteración (IP) y las descripciones se hicieron conforme a la Figura 11.

En la Figura 11a, se muestra el material del punto CZ-01. Es un depósito masivo de color café claro y verdoso, afectados en su mayoría por fallas con dirección NE. En la parte inferior del afloramiento se observó un material de color verdoso y con soporte de matriz, conformado de algunos fenocristales de cuarzo y plagioclasas, también se observaron líticos de color negro y rojizo muy alterados, en la matriz de la roca se observaron minerales secundarios como cloritas y epidotas que son productos del hidrotermalismo. En la parte superior es un material de color café claro con matriz y textura piroclástica, con algunos fenocristales de plagioclasa y algunos líticos de color verde y rojizo, el depósito cuenta con un mínimo porcentaje de pómez.

En la Figura 11b, se observa el afloramiento del punto CZ-16. Es un depósito masivo bien soldado, afectado por fallas, grietas y fisuras. En el afloramiento se observaron dos capas y se describieron de la siguiente manera: en la capa 1 se encontró un material de color blanco muy deleznable con un espesor de 1.50 metros, con textura piroclástica y matriz muy fina, con algunos fenocristales de plagioclasas, cuarzos, anfíboles y pequeños líticos de color rojizo. En la capa 2 se encontró un material masivo bien soldada de 8 metros de espesor de color gris claro, con textura piroclástica, conformado por esferulitas y pómez grandes de color blanco; también se observaron fenocristales de plagioclasas, cuarzos y líticos de color rojizo y negro, ambos alterados.

En la Figura 11d, se observa un material de lava del punto CZ-18. Es un depósito de lava masiva, de color gris oscuro con textura afanítica y matriz vítrea, conformado por fenocristales de olivinos, piroxenos y plagioclasas; el depósito contiene un mínimo porcentaje de alteración con presencia mínima de indicitas.

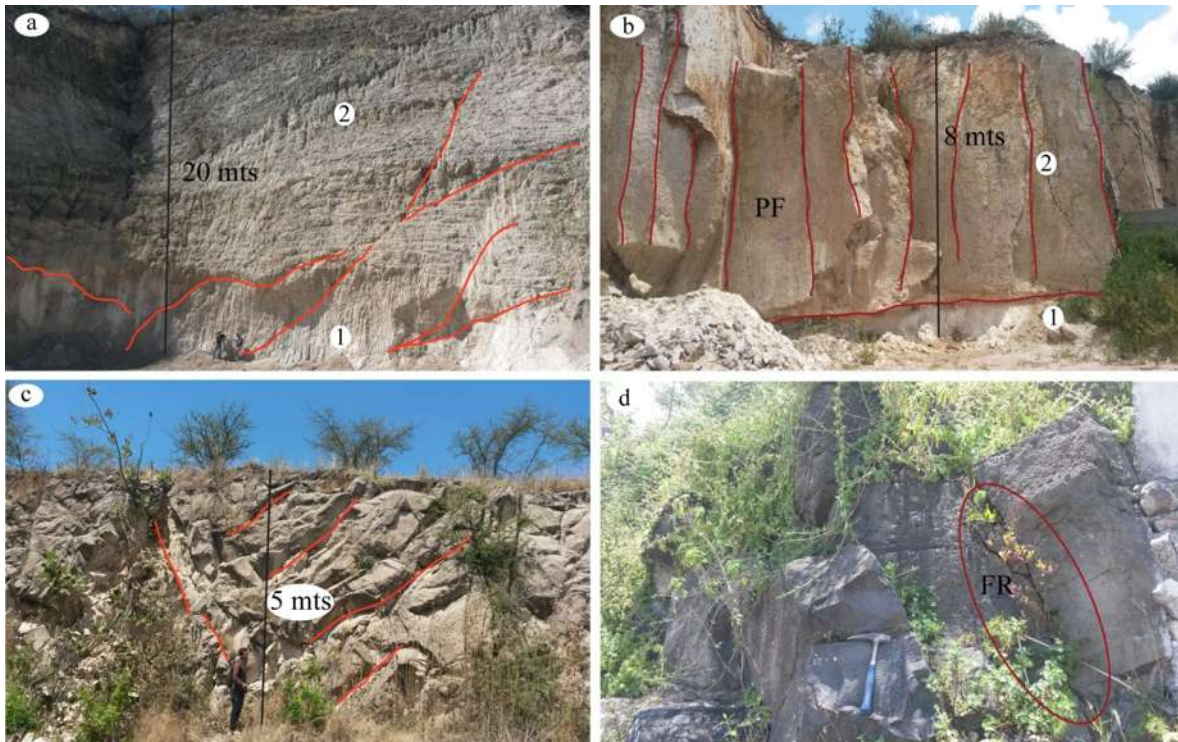


Figura 11. Imagen de materiales de la parte noreste de la zona de estudios. En la imagen a) del punto CZ-1, se observa un material Ignimbrítico de dos capas mal soldada; en la imagen b) del punto CZ-16, se observa un material Ignimbrítico bien soldado con planos de fallas (PF); en la imagen c) se observa un depósito de ignimbrita afectado por fallas locales y fracturas; en la imagen d) se observa una la lava andesítica fracturada con nomenclatura (FR).

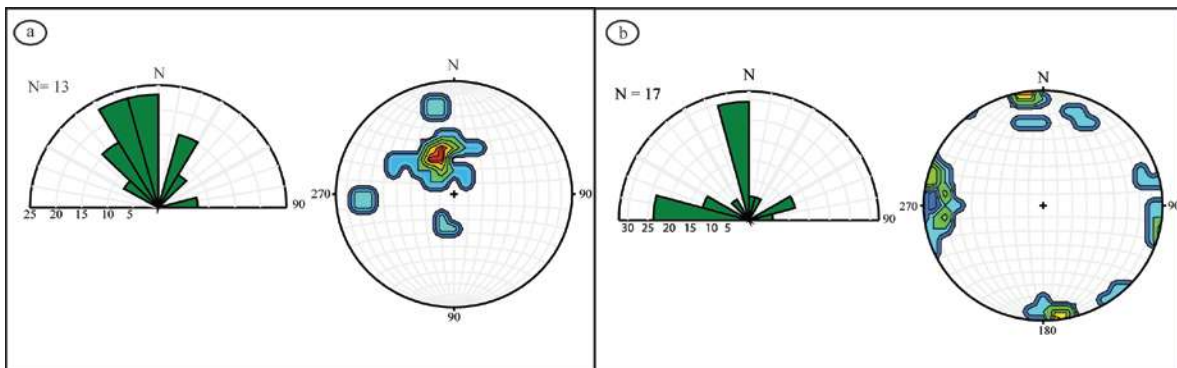


Figura 12. Diagrama de rosa y densidad de polos de los rasgos estructurales de CZ-01 y CZ-16. Según el resultado del diagrama rosa las direcciones principales tienen una orientación preferencial NO.

Los resultados obtenidos en el procesamiento de datos en EstereoNet fueron diagramas rosas, mapas de densidad de polos, y fueron descritos de la siguiente manera: los diagramas rosas sirven para identificar el mayor porcentaje de direcciones preferenciales de los rasgos estructurales y los mapas de densidad de polos se utilizaron para encontrar el número de familias, así como su dirección y buzamiento (Tabla 2).



Los resultados obtenidos en la Tabla 2, fueron del procesamiento de los datos de rumbos y buzamientos de cada afloramiento, el objetivo es analizar el número de familias en cada secuencia estratigráfica, así como las direcciones preferenciales de los rasgos locales y por último obtener un mapa de polos. Los procesos tectónicos de la región de Cuitzeo, han sido un factor desencadenante de fallas, deslizamientos y erosión de los materiales, ya que existe un sin número de direcciones complejas de los rasgos locales estructurales, en el procesamiento de estos datos se observaron diferentes direcciones con un patrón igual al de las principales fallas existentes, como la de San Agustín NW-SE, Falla Chucándiro NE-SW, Copándaro NW-SE y la de la Yerba Buena NE-SW, en forma general se observa estructuras locales con un mayor porcentaje con direcciones NE-SW.

*Tabla 2. Resultados de rasgos estructurales de los afloramientos. En esta Tabla se observan los resultados obtenidos en EstereoNet, se observa que la mayoría de las direcciones preferenciales en diagrama rosa son NW.*

Estaciones	DP	NF	DRF
CZ-01	NO	3	67/28 NE, 284/23 SO, 358/64 NO
CZ-16	NO	5	261/87 SO, 189/87 SO, 83/87 NE, 13/83 NE, 353/72 NO
CZ-19	NO	3	193/86 SO, 329/86 NE 13/86 NE
CZ	NE	3	275/71 NO, 13/05 NE 12/85 NE
CZ-25	NE	3	231/64 SO, 146/82 SE 122/80 SE,
CZ-26	NO	4	84/09 NE, 225/77 SO, 291/86 NO, 113/87 SE

*DP = Direcciones preferenciales según diagrama rosa; NF = Número de familias según mapa de polos; DRF = Dirección y buzamiento de las familias encontradas según mapa de polos.*

### 5.1.2 Marco geológico estructural

Para los rasgos estructurales en afloramientos se tomaron datos en los puntos CZ-5 y CZ-15, los datos obtenidos fueron: dirección e inclinación de las fallas y fracturas. Estos datos se procesaron con RockWorks 16 y SterioNet, con la finalidad de obtener las principales familias, así como la elaboración de un diagrama rosa y densidad de polos (Figura 13). Todos estos resultados serán analizados con la finalidad de obtener una idea, si existe una relación directa con los principales lineamiento y estructuras existentes en la zona.

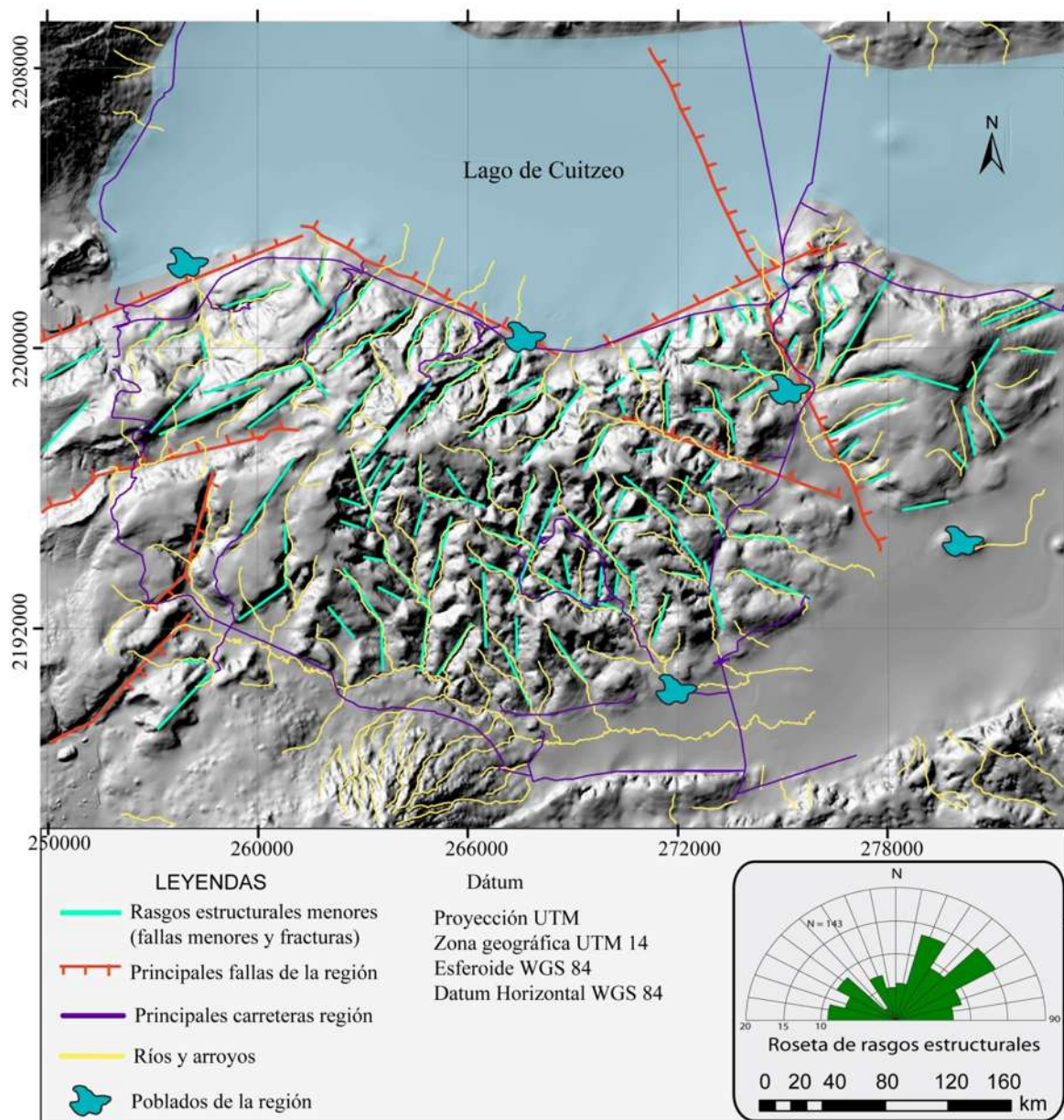


Figura 13. Mapa de rasgos estructurales de la parte sur del lago de Cuitzeo. El mapa se obtuvo a partir de un MDE, en donde se trazan los principales rasgos estructurales existentes en la región.

En la Figura 13 se muestran los principales rasgos estructurales de mayor y menor grado de la zona de estudio, los lineamientos presentan diferentes direcciones, los cuales fueron trazados en ArcMap 10 y los datos fueron analizados en EstereoNet. En este mapa se observan las principales fallas y los principales lineamientos, donde según el diagrama de rosas tienen una dirección preferencia NNE.

### **5.1.3 Petrografía y mineralogía**

Los resultados de estas pruebas fueron descritos en campo, siguiendo el procedimiento del capítulo 5.1 (Color, estructura, textura y mineralogía), donde se describe las litofacies de los afloramientos y estos datos de campo fueron corroborados en láminas delgadas. La razón de realizar descripciones macro y microscópicas es analizar cuantitativamente los porcentajes de los componentes de cada muestra, ya que la composición de un material puede variar la resistencia mecánica y cambiar el comportamiento físico de los materiales (p. ej. densidad).

En la Figura 14b, se muestra los materiales encontrados del punto CZ-02, donde la abreviatura IP es la Ignimbrita con pómez. En la figura 14a, se muestran los materiales estudiados del punto CZ-29, se observan tres tipos de materiales donde las abreviaturas significan: IE-A e IE-B = Ignimbríticas Estratificadas; IH = ignimbrita Homogénea. Las descripciones de estos puntos se hacen en el capítulo siguiente (5.1.3.1 Descripción de litofacies caracterizadas).

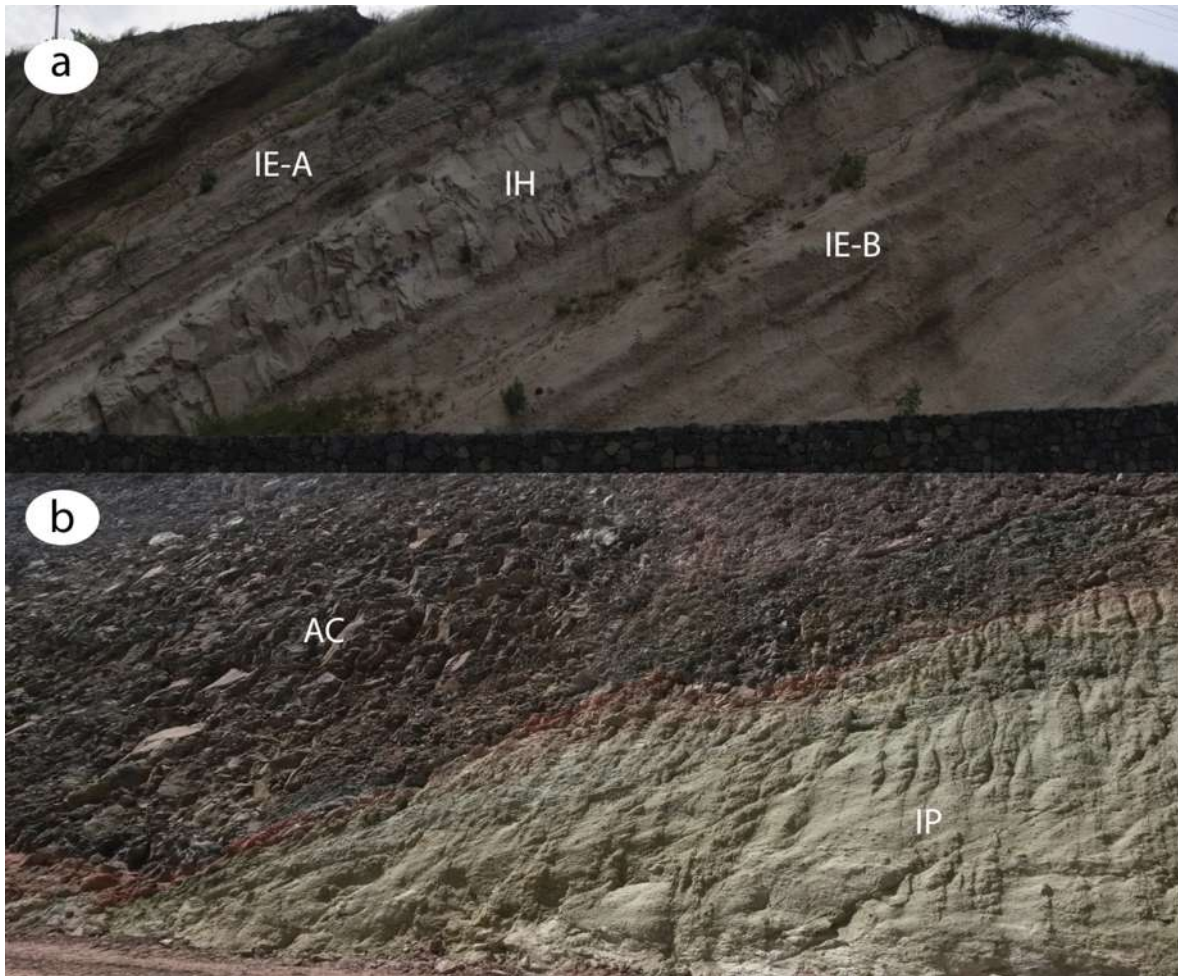


Figura 14. Afloramiento de las litofacies caracterizadas. Dónde las abreviaturas son: IE-A E IE-B= Ignimbrita Estratificada A y B; IH=Ignimbrita Homogénea; IP = Ignimbrita con Pómez; AC = Andesita de Cuitzeo.

### 5.1.3.1 Litofacie estratificada (IE-A)

En muestra de mano se observa una ignimbrita compuesta por una secuencia de estratos de color gris claro y negro a rojizo, la matriz es ceniza muy fina (<1 mm). Las tonalidades de las estratificaciones se deben en gran parte al alto contenido de líticos. Algunos de los estratos están compuestos por grano soportado con pómez de diferentes tamaños (1 mm - 1 cm).

En la descripción microscópica de lámina delgada (Figura 15), se observa una ignimbrita hipocristalina inequigranular, con textura piroclástica fragmental poco soldada, con un contenido aproximado de 50-55% de vidrio, 35-40% de fragmentos de rocas o líticos, y un 5–10% de cristales. Se observan también algunos fenocristales de plagioclasas

(Plg) y piroxenos (Px) en forma subhedral y anhedral, así como una matriz arcillosa alterada.

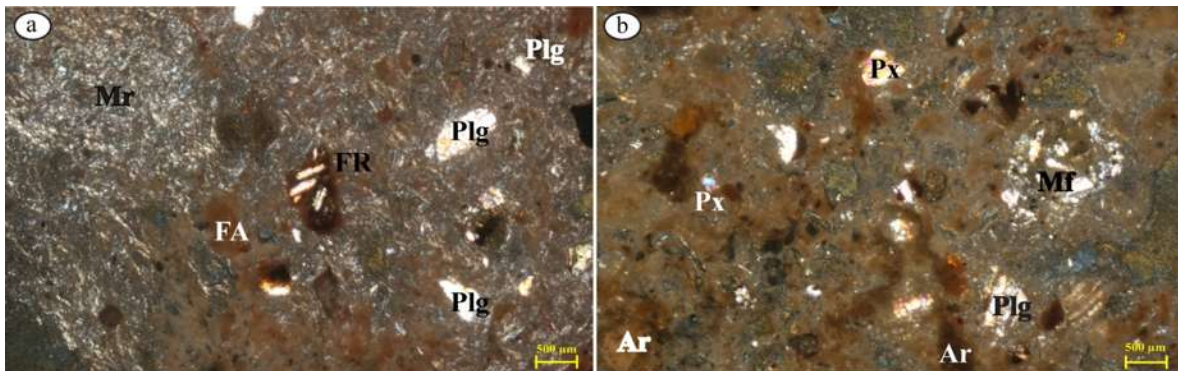


Figura 15. Fotografía de lámina delgada de la IE-A. En estas imágenes micrográficas se observan los componentes de la ignimbrita IE-A. Imagen a) se observan tres componentes principales (plagioclasas, vidrio y fragmentos de roca) y recristalización de la matriz, las nomenclaturas significan: Mr, Matriz de la muestra recristalizada; FR, fragmento de roca con fenocristales; Plg, Plagioclasas. En la imagen b) se observa un alto grado de alteración de la muestra, con nomenclatura: Ar, arcillas producto de la alteración hidrotermal: también se observan algunos piroxenos (Px) y minerales fracturadas (Mf).

### 5.1.3.2 Litofacie (IP)

En muestra de mano se observa una roca ignimbrítica de color gris claro y verdoso, con matriz de grano soportado y alto grado de alteración. Se observa un 60% de pómez de distintos tamaños (2 mm - 1.50 cm); en la matriz hay presencia de líticos de color rojizo y negro, la tonalidad de los líticos se debe al alto grado de alteración hidrotermal, también se observan cloritas y epidotas de color verde intenso, así como algunos fenocristales de plagioclasas y cuarzos.

En la descripción en lámina delgada se observa un muestra hipocristalina inequigranular, con textura piroclástica fragmental mal soldada, con un alto contenido de vidrio de un 70 - 80%, 10 - 15% de líticos y 10 - 15% de cristales; en la matriz se observan fenocristales de plagioclasa, cuarzo y cloritas con formas subhedral y anhedral. La matriz de la roca es arcillosa altamente alterada.

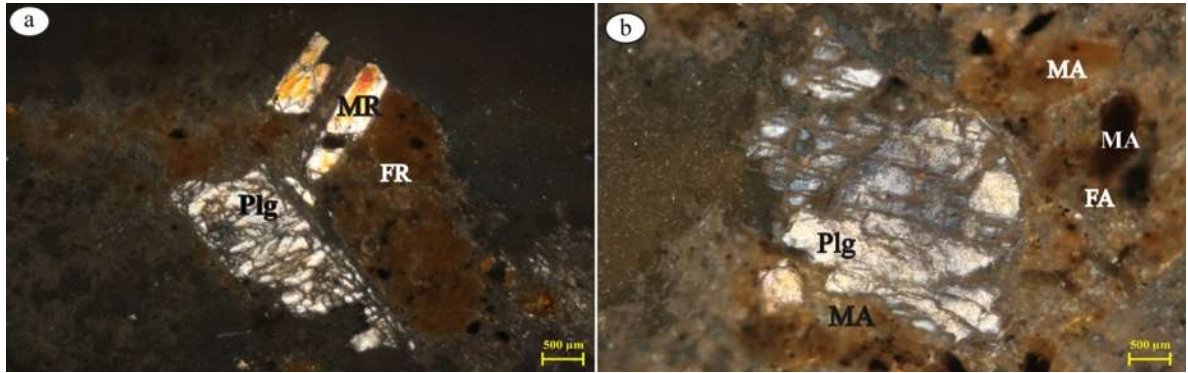


Figura 16. Fotografías en láminas delgadas de componentes IP. En esta imagen micrográfica se observan los diferentes componentes de la ignimbrita IP. Imagen a) se observa una plagioclasa altamente fracturada y con fragmento de roca alterada (FR), con un mineral embebido en su matriz (MR); en la imagen b) se observa una plagioclasa (plg). MA es la matriz arcillosa de la ignimbrita producto de la alteración hidrotermal.

### 5.1.3.3 Litofacie (IH)

En muestra de mano se observa una ignimbrita de color gris claro con textura piroclástica, matriz soportado, con 5 - 10% de pómez muy vesiculada de diferentes tamaños (2 a 5 mm); la roca presenta líticos de color negro y rojizo. El material tiene una matriz muy deleznable y con presencia de alteración hidrotermal, en los fenocristales presentes se observan plagioclasas y cuarzos.

En lámina delgada se observa una ignimbrita hipocristalina inequigranular con textura pilotaxítica a eutaxítica, con un contenido de 40% de cristales, 50% de vidrio y 10% de líticos. En la matriz se observan fiammes fibrosos algunos con fenocristales de plagioclasas con forma subhedral y anhedral muy fracturadas, la matriz es microlítica compuesta por algunos óxidos y fragmentos de rocas.

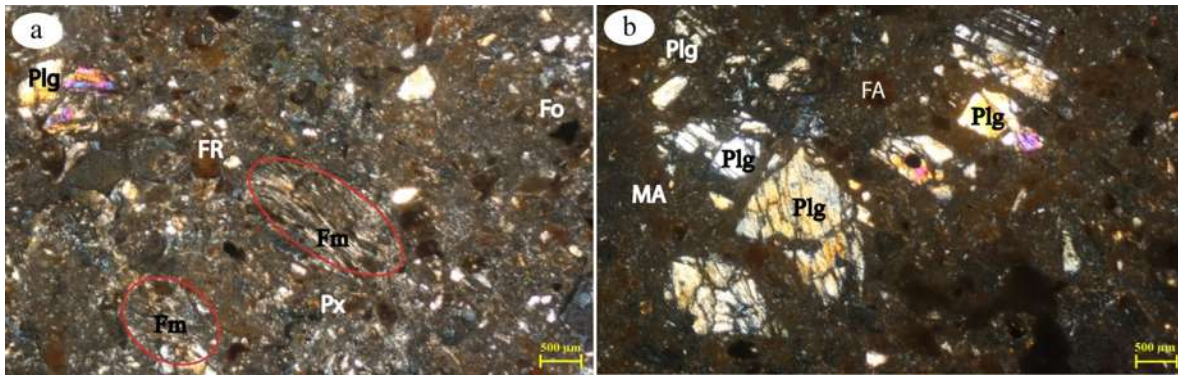


Figura 17. Imagen de componentes de la muestra IH. En la imagen a) se ve la presencia de fiammes vesiculadas (Fm), fragmentos de roca alterada (FR), óxidos (Fo) y también se observan algunos fenocristales de plagioclasas y piroxenos; En la imagen b) se observa fenocristales de plagioclasas fracturadas (plg) y una matriz vítrea de la roca con fragmentos de rocas alteradas (FA).

#### 5.1.3.4 Litofacie rosa (IR)

La muestra fue recolectada en el punto CZ- 27. La descripción en muestra de mano se observa un material de color rosa, con textura piroclástica fragmental y matriz soportado, también se observan fiammes muy vesiculadas de hasta 1 cm. La matriz de la roca es arcillosa, compuesta por líticos de color negro, café y rojizos, también se observan algunos fenocristales como plagioclasas, anfíboles y cuarzos.

En lámina delgada se observa una roca hipocristalina inequigranular, con textura pilotaxítica a eutaxítica, con 50% de vidrio, 30% de líticos y 20% de cristales. En la matriz de la roca se observa un alto contenido de arcillas y fragmentos de rocas alteradas, es microlítica compuesta principalmente por plagioclasas, óxidos y un mínimo porcentaje de anfíboles. Los fenocristales tienen formas subhedral y anhedral. La roca es medianamente soldada, con cristales muy fracturados (Figura 18 derecha).

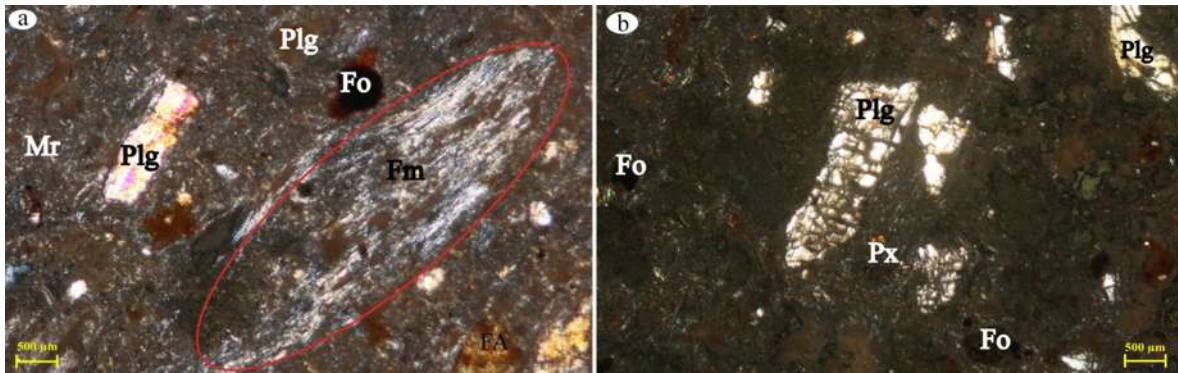


Figura 18. Componentes principales de la ignimbrita rosa (IR). En la imagen a) se observan cinco principales componentes de la muestra: fiammes (Fm) vesiculadas de aproximadamente 5 mm, fragmentos de roca oxidada (Fo), Fragmento de roca alterada (FA); en la matriz de la roca se observa una recrystalización (Mr). En la imagen b) se observan algunos minerales de plagioclasas (plg) muy fracturadas, piroxenos (px) y algunos óxidos (Fo).

### 5.1.3.5 Litofacie (IGP)

La muestra fue recolectada en el punto CZ-11. En muestra de mano se observa una ignimbrita de color gris claro con textura piroclástica bien soldada, con alto contenido de pómez muy vesiculada y alterada de diferentes tamaños (3 mm - 7 cm); la pómez está compuesta de plagioclasas, cuarzo y anfíboles. En la matriz de la roca se observan fenocristales de plagioclasas, anfíboles y cuarzos, también se observan líticos de color negro.

En lámina delgada se observa una ignimbrita hipocristalina inequigranular con textura pilotaxítica; la matriz es microlítica medianamente soldada con algunos fenocristales de plagioclasas y cuarzos, con forma subhedral y anhedral. En la roca se observa mayor cantidad de plagioclasa que cuarzo. Los porcentajes de componentes son 80% de vidrio, 10% de cristales y 10% de líticos con algunos óxidos.



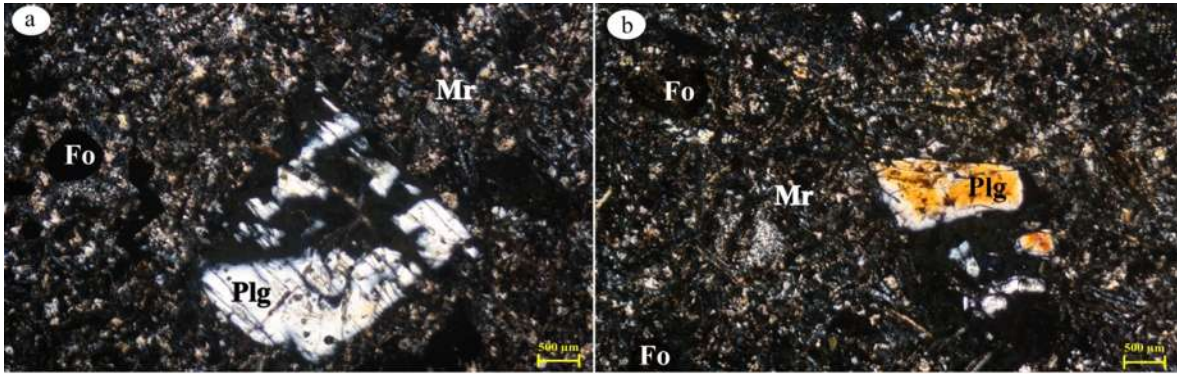


Figura 19. Imagen micrográfica de la ignimbrita IGP. En la imagen a) se observa un fenocristal de plagioclasa (plg), óxidos (Fo) y recristalización de la matriz (Mr); En la imagen b) se observan dos óxidos (Fo) y un mineral de plagioclasa (plg).

### 5.1.4 Análisis de difracción de rayos X

Esta prueba es una técnica experimental para el estudio y análisis de la mineralogía y composición química de un material. Los resultados de esta prueba se incluyen en las Tablas (3 y 4), donde se observa que las muestras están compuestas principalmente por feldespatos, ópalos y filossilicatos que juega un papel importante en los valores finales de densidad de una roca.

Tabla 3. Resultados de mineralogía total.

Muestra	Fases identificadas	observación	Cristalinidad
IP	Feldespatos de tipo plagioclasa intermedia: (Ca,Na)(SiAl)4O8 Ópalo: SiO <sub>2</sub> xH <sub>2</sub> O Filossilicatos a ~14-15Å (ver tabla de arcilla)	Importante proporción de arcilla y material amorfo	C=27
IH	Feldespatos de tipo plagioclasa intermedia: (Ca,Na)(SiAl)4O8 Ópalo: SiO <sub>2</sub> xH <sub>2</sub> O Filossilicatos a ~14-15Å (ver tabla de arcilla)	Importante proporción de arcilla y material amorfo	C=28
IE-A	Feldespatos de tipo plagioclasa intermedia: (Ca,Na)(SiAl)4O8 Ópalo: SiO <sub>2</sub> xH <sub>2</sub> O Calcita: CaCO <sub>3</sub> Filossilicatos a ~14-15Å (ver tabla de arcilla)	Importante proporción de arcilla y material amorfo	C=21

*Tabla 4. Los resultados de mineralogía de fracción arcilla (< 2micras).*

Muestra	Picos sin tratamiento	Picos muestra Glicolada	Picos a 550°C	Fases sin tratamiento	Observaciones
IP	~14-15Å	~17Å	~10Å	Esmectita de tipo montmorillonita	Arcilla de tipo expansible
IH	~14-15Å	~17Å	~10Å	Esmectita de tipo montmorillonita	Arcilla de tipo expansible
IE-A	~14-15Å	~17Å	~10Å	Esmectita de tipo montmorillonita	Arcilla de tipo expansible

## 5.2 Análisis de laboratorio

Los resultados del análisis de laboratorio son particularmente importantes para la construcción de escenarios futuros de inestabilidad de los cortes ubicados a lo largo de la carretera Morelia – Guadalajara. Cabe resaltar que la construcción de un escenario se realiza con base en la evolución e historia geológica de cada sitio.

Los resultados de este capítulo incluyen valores promedios y desviaciones estándares. El estudio de la caracterización física y mecánica de rocas ígneas de la región de Cuitzeo, evidenció la calidad de los materiales rocosos, así como los efectos que han tenido los fluidos hidrotermales en su evolución mecánica. Otra importancia del estudio fue la predicción de taludes propensos a deslizamientos en conjunto con el análisis de fracturas y fallas y de la propia estratificación de los productos volcánicos.

### 5.2.1 Dimensionamiento de muestras

Los especímenes de roca se prepararon de acuerdo con lo establecido en los estándares de laboratorio (ASTM D4543-01 2005, Navarro et al., 2011). Se obtuvieron un promedio de 6 cilindros de roca por cada unidad con dimensiones aproximados de 30 x 30 mm, 25 cubos (5 x 5 x 5 cm) para las pruebas de capilaridad y absorción, por último se elaboraron 12 discos (9 x 30 mm) para prueba a tracción (Tabla 5).

Tabla 5. Dimensiones de materiales usados en las pruebas de caracterización. En la tabla a) se tienen las dimensiones de muestras cilíndricas que fueron usadas para pruebas a compresión simple y velocidad de ondas P y S; en la tabla b) se tiene las dimensiones de las muestras en forma de discos, usadas en pruebas a tensión.

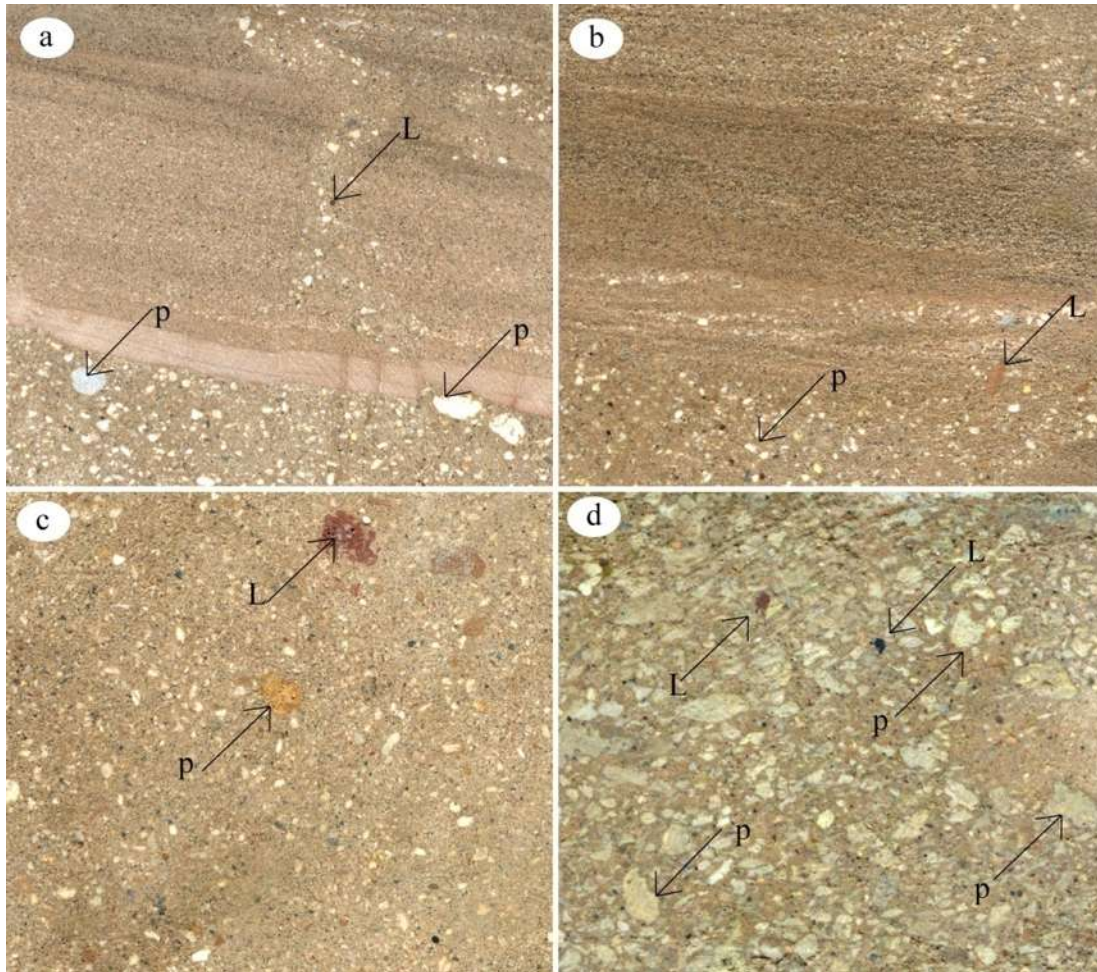
a)					b)				
Forma	Muestras	Masa (g)	H *(mm)	D*(mm)	Forma	Muestras	Masa (g)	H *(mm)	D*(mm)
Cilindro	IE-A1	29.85	29.85	29.85	Disco	IE-B12	9.78	9.45	30.74
Cilindro	IE-A2	28.95	28.95	28.95	Disco	IE-B13	8.53	7.72	30.48
Cilindro	IE-A3	28.54	28.54	28.54	Disco	IE-B14	10.44	9.29	30.75
Cilindro	IE-A4	30.92	30.92	30.92	Disco	IE-T18	9.24	9.13	30.59
Cilindro	IE-B1	31.24	29.75	30.82	Disco	IE-T19	8.89	7.71	30.54
Cilindro	IE-B2	33.35	30.02	30.81	Disco	IE-T20	10.3	9.04	30.57
Cilindro	IE-B3	32.44	29.73	30.78	Disco	IE-T21	10.74	9.29	30.51
Cilindro	IE-B4	29.95	29.73	30.73	Disco	IP-14	10.27	9.35	30.82
Cilindro	IE-B5	31.89	29.63	30.78	Disco	IP-15	9.74	9.57	30.29
Cilindro	IE-B6	32.88	29.09	30.83	Disco	IP-16	8.97	9.25	30.33
Cilindro	IE-B11	30.5	29.68	30.85	Disco	IP-17	9.75	9.37	30.60
Cilindro	IH-T1	35.71	30.18	30.80	Disco	IP-18	10.5	9.53	30.54
Cilindro	IH-T2	32.94	27.15	30.78	Disco	IP-19	10.16	9.19	30.31
Cilindro	IH-T3	29.72	25.49	30.65	Disco	IP-20	10.03	9.12	30.71
Cilindro	IH-T4	31.94	26.20	30.87	Disco	IP-21	11.48	11.53	30.48
Cilindro	IH-T5	33.08	27.12	30.88	Disco	IP-22	10.14	9.55	30.53
Cilindro	IH-T6	31.75	26.65	30.75					
Cilindro	IH-T10	34.54	28.93	30.76					
Cilindro	IP-1	31.98	29.16	30.41					
Cilindro	IP-3	33.86	29.36	30.81					
Cilindro	IP-6	33.83	29.56	30.75					

\* Valores obtenidos en un promedio de tres mediciones en cada muestra.

## 5.2.2 Análisis textural

La composición textural fue obtenida con base en el procesamiento de imágenes por medio del programa ImageJ. Se obtuvieron los porcentajes totales de líticos y pómez con

respecto al área total de la muestra analizada, (Tabla 6 y 7). En la Figura 20, se muestran las cuatro diferentes litofacies analizadas (IE-A, IE-B, IH e IP). En esta figura se observan las composiciones texturales de cada litofacie, por ejemplo en la muestra IP, se observan pómez de gran tamaño y en las muestras IE-A y B, se muestran espécimenes estratificadas. El método de obtención de resultados es a través de la separación de pómez y líticos, ver imágenes procesadas, figura (21c y 21d).



*Figura 20. Imágenes obtenidas en el escaneo de los especímenes de roca. a) Se muestran las texturas estratificadas de la litofacie IE-A, donde las abreviaturas significan; P = pómez; L = líticos; figura b) se evidencia la textura de la litofacie IE-B que contiene menor porcentaje de pómez y líticos; figura c) se observan las características y texturas de la litofacie IH que contiene algunos líticos de color rojizo de mayor tamaño que las pómez; figura d) principales componentes de la litofacie IP.*

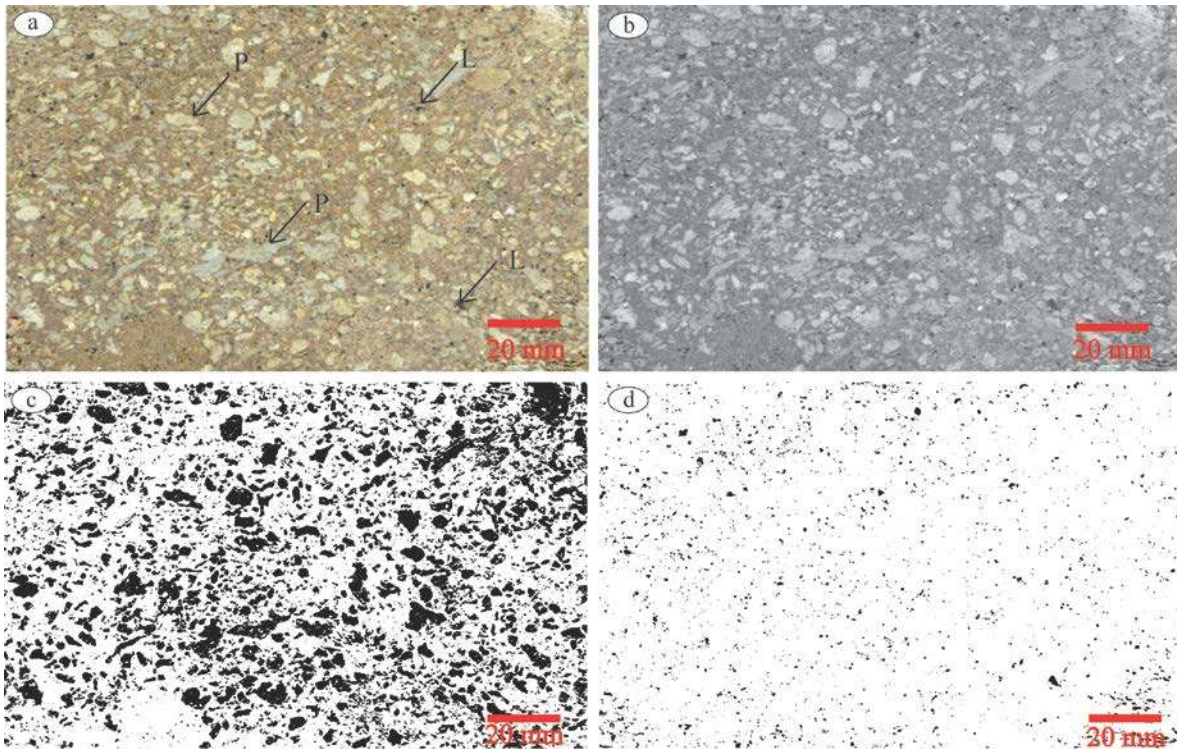


Figura 21. Imágenes procesadas en ImageJ. En la figura se muestran cuatro imágenes que a continuación se describen; a) Fotografía de la roca original, en la matriz se observan dos pómez (P) y dos lítico (L); imagen b) escala de grises en 32 bits; c) imagen procesada con la herramienta Threshold y ajustada a la escala de colores de los pómez; d) imagen procesada en la herramienta Threshold y ajustado a la escala de colores de los líticos.

Tabla 6. Promedio de resultados texturales (porcentajes de pómez, líticos y matrices de los materiales). En esta tabla se muestran los resultados obtenidos los procesamientos de imágenes. En ImageJ.

MUESTRA	Áreas(cm <sup>2</sup> )			Porcentajes totales (%)		
	Total	Pómez	Lítico	Pómez	Lítico	Matriz
IE-A	103.98±15.31	6.37±3.88	2.63±1.39	6.68±5.28	2.47±1	90.85±4.67
IE-B	92.74±18.95	7.21±3.68	4.34±2.41	7.82±3.72	5.14±2.76	87.04±4.00
IH	76.9±9.20	8.55±2.66	8.05±3.81	11.19±3.00	10.23±3.96	78.58±4.30
IP	111.3±29.24	37.41±11.86	5.92±2.58	35.38±6.79	5.46±1.27	59.16±7.03

Tabla 7. Resultados texturales (pómez y líticos) en diferentes tamaños en la muestra. Los valores calculados en esta tabla se obtuvieron promediando los resultados de cuatro a cinco muestras de cada litofacie.

Muestra	Proporción de pómez (%)					Proporción de líticos (%)				
	GG	GGM	GM	GF	GMF	GG	GGM	GM	GF	GMF
IE-A	0.52±0.083	0.7±0.19	0.68±0.18	0.44±0.077	N/V	N/V	0.03±0.014	0.16±0.09	0.22±0.077	0.40±0.046
IE-B	0.13±0.049	0.36±0.081	0.41±0.098	0.41±0.11	N/V	N/V	0.015±0.007	0.042±0.010	0.14±0.031	1.0±0.075
IH	1.02±0.26	1.02±0.22	1.35±0.41	1.11±0.26	N/V	0.1±0.051	0.21±0.06	0.33±0.084	0.45±0.092	1.97±0.66
IP	4.8±0.11	2.96±0.066	1.67±0.23	1.09±0.17	N/V	0.15±0.035	0.20±0.047	0.49±0.37	0.59±0.14	1.02±0.036

GG = Grano grueso de 2.1-4 mm<sup>2</sup>, GGM = Grano grueso medio de 1.1-2 mm<sup>2</sup>, GM = Grano medio de 0.51-1 mm<sup>2</sup>, GF = Grano fino. 0.07-0.5, GMF = Grano muy fino 0.06>mm<sup>2</sup>.

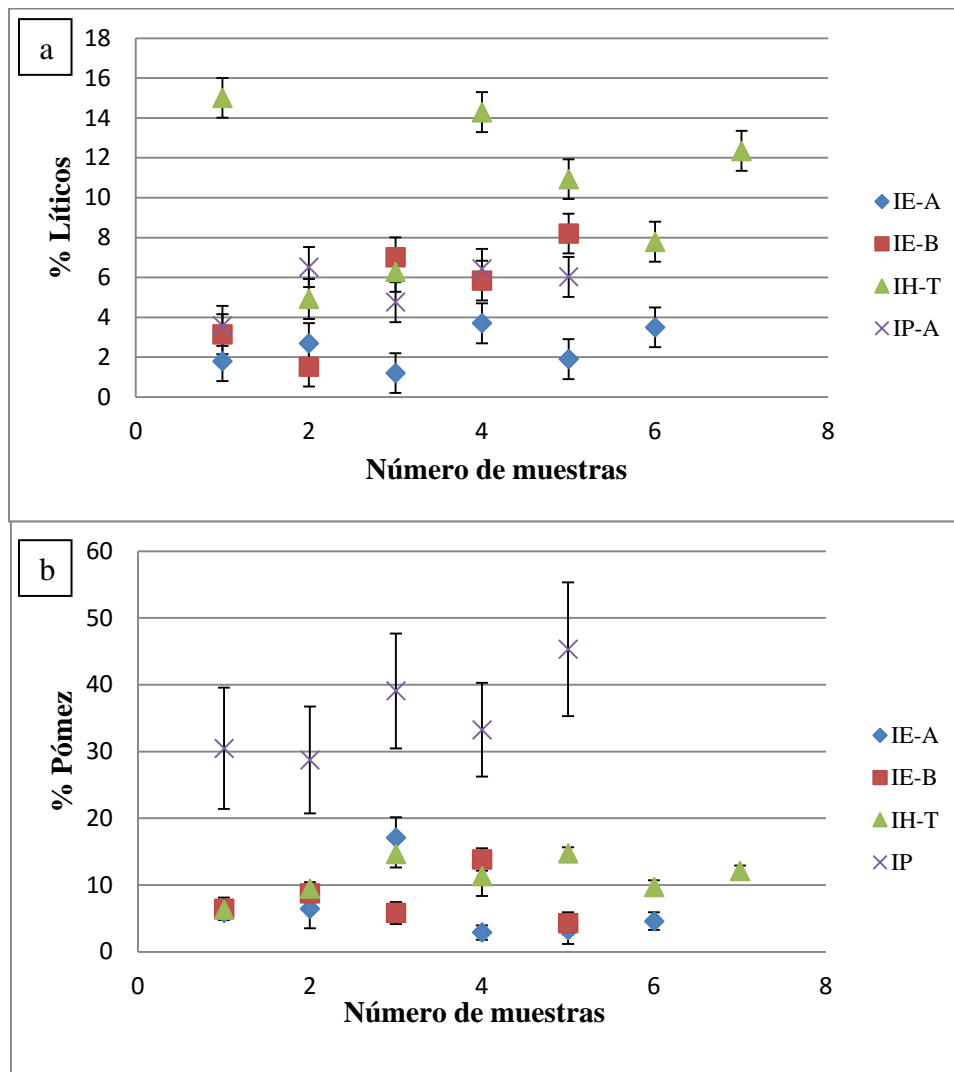


Figura 22. Gráfica de porcentajes de pómez y líticos. En estas gráficas se observa que IP tienen un alto porcentaje de pómez e IH-T con alto porcentaje de líticos.

En las Tablas (6 y 7) y Figura 22, se muestran los porcentajes obtenidos de pómez y líticos en las rocas ignimbríticas, IP es uno de los materiales con alto contenido de pómez llegando a tener un promedio de 35%, en cambio los materiales IH contienen un alto porcentaje de líticos llegando a tener hasta un 10%, estos resultados podrían afectar fuertemente las propiedades mecánicas y también se puede decir que los materiales analizados provienen de distintas fuentes, por el hecho de que tienen distintas composiciones texturales.

### **5.2.3 Caracterización física**

Los resultados de las pruebas físicas representan un primer parámetro necesario para la formulación de una primera hipótesis acerca de la estructura interna de la roca. Parámetros como la densidad y el porcentaje de poros, nos dan un idea de la calidad del material; estos fueron descritos y comparado en tablas y gráficas.

#### **5.2.3.1 Masa y Densidad**

La masa es un parámetro importante para lograr calcular la densidad de los materiales, algunos otros usos de la masa es para el análisis de la humedad y cantidad de absorción. Los resultados se presentan en graficas comparativas de masa & densidad, así como densidad & porcentos de pómez (Figura 23).

Estas gráficas nos sirven para evidenciar los efectos que tiene la densidad en la masa, así como los efectos que tiene el porcentaje de pómez en la densidad.

En la Figura 23 gráfica a), se observa los resultados comparativo entre masa y densidad, donde se ve la relación que existe entre estas dos propiedades ya que se ve, que entre mayor es la masa, mayor es su densidad; para la gráfica b), se observa que la cantidad de pómez en una material no es el único componente que tiene efecto en la densidad de los materiales, tal es el caso de IE-B, que a pesar de que contiene entre 10 y 15 % de pómez, presenta valores altos de densidad. Algunos factores que influyen en esta característica es el grado de compactación, porcentaje de líticos y minerales.

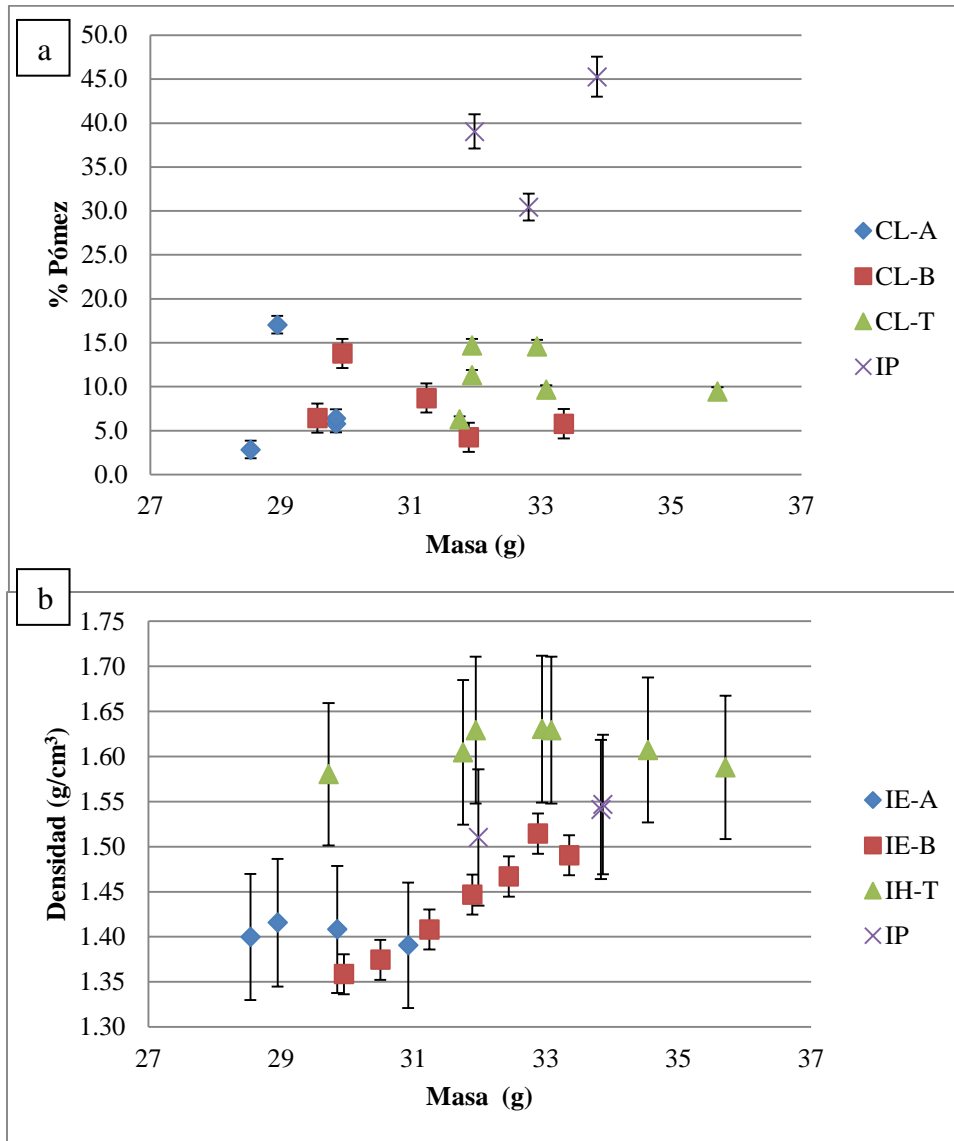
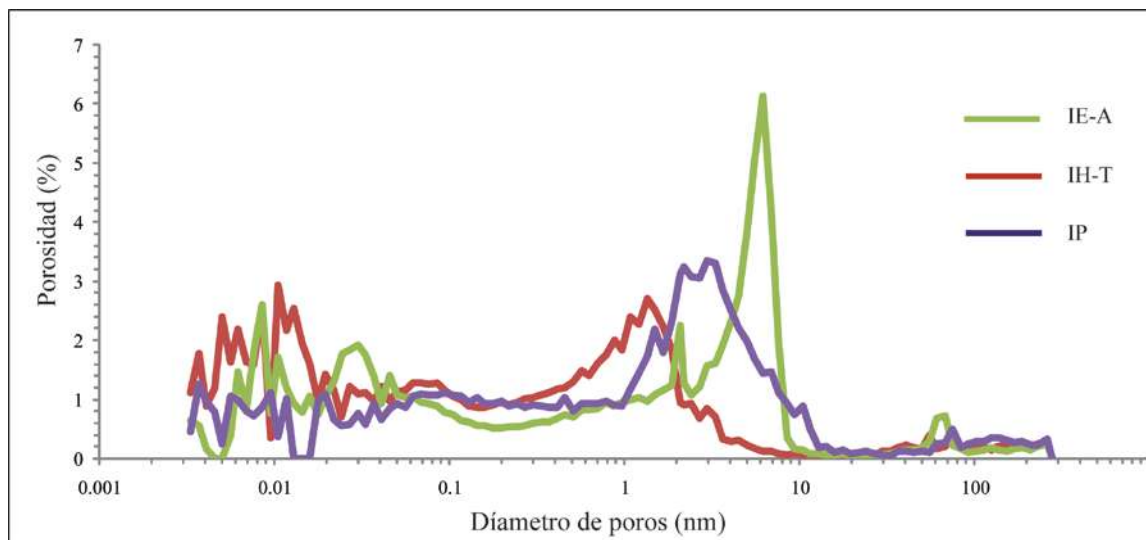


Figura 23. Gráficas comparativas (% de Pómez con Densidad) y (Masa con Densidad).

### 5.2.3.2 Porosidad

El análisis de los espacios vacíos en los materiales, nos proporcionan datos importantes como el arreglo, tamaño y distribución del sistema poroso. Un efecto importante de la porosidad es en las propiedades hídricas, ya que la porosidad hace que circule o retenga agua en su interior. La porosidad se analizó por medio de la prueba de intrusión de mercurio que nos brinda mejor información para las porosidades reales y su distribución.





*Figura 24. Gráfica de resultados de porosidad por intrusión de mercurio. En la gráfica se observa el comportamiento de la porosidad presente en los materiales probados, se observa que los materiales tienen menos porcentajes de macroporosidades.*

En la Figura 24, se tiene una gráfica de los porcentajes de los diferentes diámetros de porosidades existentes en las litofacies (IE-B, IE-T e IP). Se observa que en los espécimenes analizados tienen un alto porcentaje y una distribución homogénea de microporosidades en la matriz. La observación general de esta prueba es, que las litofacies tienen un alto porcentaje de retención de líquidos por el alto contenido de microporosidades.

### 5.2.3.3 Velocidad de ondas sísmicas

Los resultados obtenidos en esta prueba nos brinda información sobre la calidad del material, ya que las ondas emitidas viajan de diferentes maneras (longitudinales y transversales) y un ejemplo es la onda P que viaja en cuerpos sólidos. Otros parámetros que nos proporcionan las ondas sísmicas, es la obtención del módulo de Young dinámico y el coeficiente de Poisson, estos datos se presentan en la tabla 8 y se analiza el comportamiento de las ondas P y S en la Figura 25.

Tabla 8. Resultados de las velocidades de las ondas P y S, coeficiente de Poisson y módulo de Young dinámico.

Especímen	Velocidades de ondas en estado seco				Velocidades de ondas en estado húmedo			
	Vp (km/s)	Vs (km/s)	V	E(GPa)	Vp (km/s)	Vs (km/s)	V	E(GPa)
IE-A	2.15±0.14	1.25±0.15	0.24±0.07	5.47±1	2.17±0.05	1.04±0.07	0.35±0.04	4.09±0.5
IE-B	2.02±0.08	1.25±0.05	0.19±0.03	5.33±0.48	1.9±0.09	0.96±0.05	0.33±0.01	3.51±0.46
IH	1.66±0.06	0.93±0.02	0.27±0.02	3.55±0.22	1.47±0.06	0.77±0.01	0.31±0.01	2.44±0.16
IP	1.48±0.08	0.8±0.04	0.29±0.05	2.51±0.21	1.05±0.05	0.54±0.04	0.33±0.02	1.22±0.2

$V_p$ = velocidad de ondas P;  $V_s$ = Velocidad de ondas S; V = Coeficiente de Poisson; E = Módulo de Young dinámico.

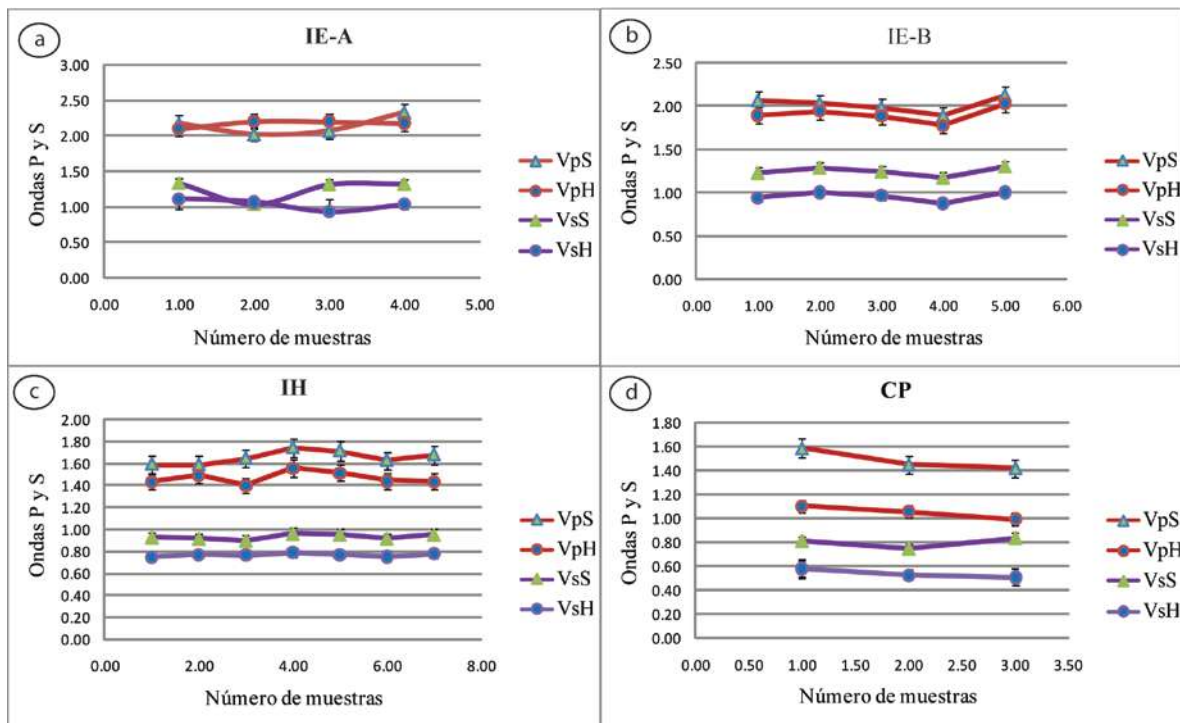


Figura 25. Gráficas comparativas de velocidades de ondas P y S. A los materiales se les realizaron pruebas en estado seco y húmedo. En estas gráficas se observa cómo se reducen las ondas P y S en un material húmedo; las nomenclaturas en gráficas son descritas de la siguiente manera:  $V_pS$  = Velocidad de ondas P en estado seco;  $V_pH$  = Velocidad de ondas P en estado húmedo;  $V_sS$  = Velocidad de ondas S en estado seco;  $V_sH$  = Velocidad de ondas S en estado húmedo.

En las gráficas (a, b, c y d) de la Figura 25, se observan los resultados de las ondas P y S, en rocas en estado seco y húmedo, el comportamiento de ellas son de diferentes formas para cada espécimen, esto es debido a la composición textural, arreglo de minerales y el grado de compactación, por ejemplo las litofacies IE-A e IE-B tuvieron menor porcentaje

de pómez y con densidad alta, los resultado de estos materiales fueron mejores en las velocidades de ondas P, se sabe que entre mayor densidad y compactación, mejor es la calidad del material.

Como observación general de las ondas P y S de acuerdo a las gráficas anteriores, tenemos mejores resultados en las muestras ignimbríticos IE-B e IE-A.

En la figura 26, gráficas comparativas a y b, se presentan la relación que existe entre las resistencias máximas con respecto a las velocidades de ondas P y S. En estas gráficas se observa una tendencia que entre mayores son las ondas sísmicas, las resistencias máximas son mejores, como observación general, tenemos que, las ondas P y S pueden ser un buen parámetro para definir la calidad de un material rocoso.

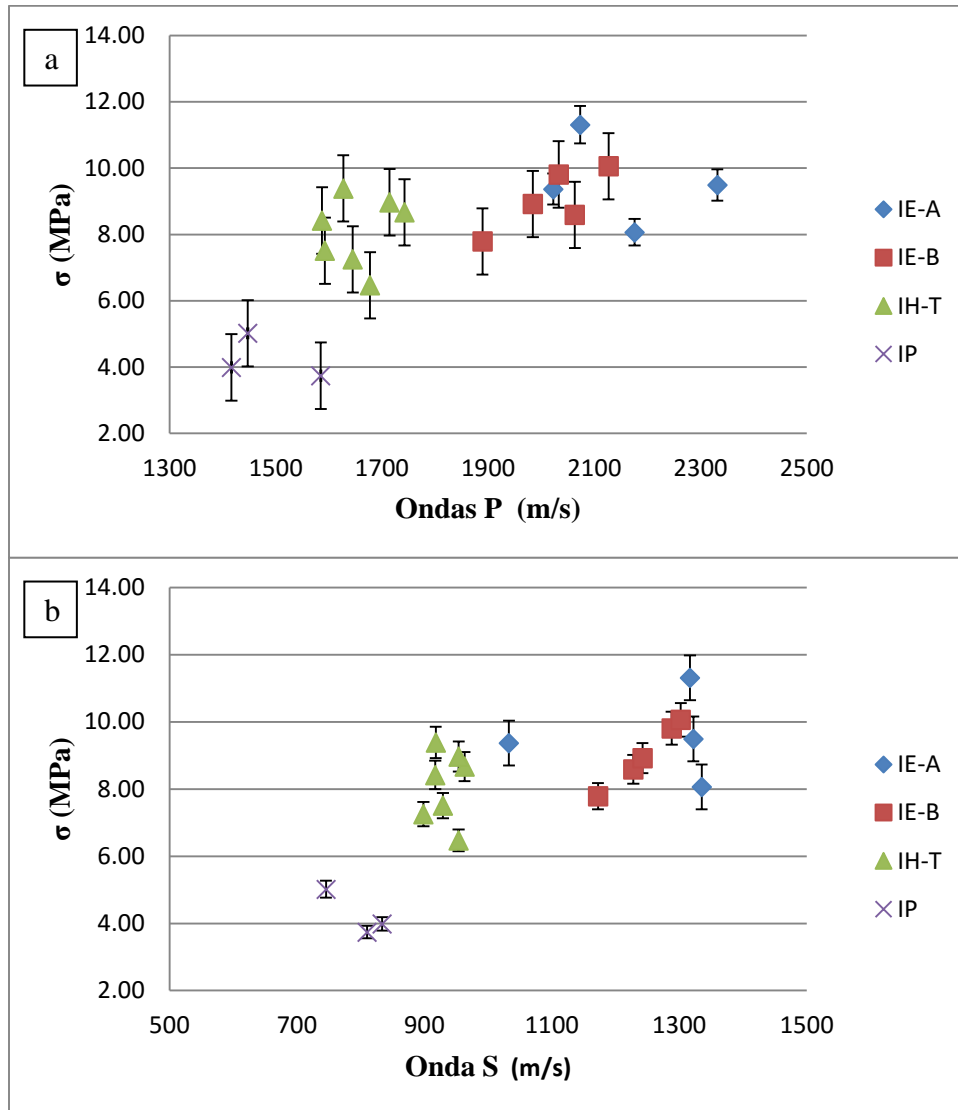


Figura 26. Gráficas comparativas de la relación de resistencia a compresión simple y velocidades de pulso. Se observa que, entre más altos son los valores de ondas P y S, mayores son los valores de resistencia a compresión simple.

En esta figura 27, se presenta una gráfica comparativa entre % de pómez y ondas p, en donde se tiene que, entre mayor es el porcentaje de pómez las velocidades de onda P, son menores como en el caso del material IP, la tendencia de la recta en la gráfica es, entre menor es el porcentaje de pómez, las velocidades de ondas P son mejores, ya que los pómez contienen un alto porcentaje de espacio vacíos, en donde las velocidades de ondas se atenúan.

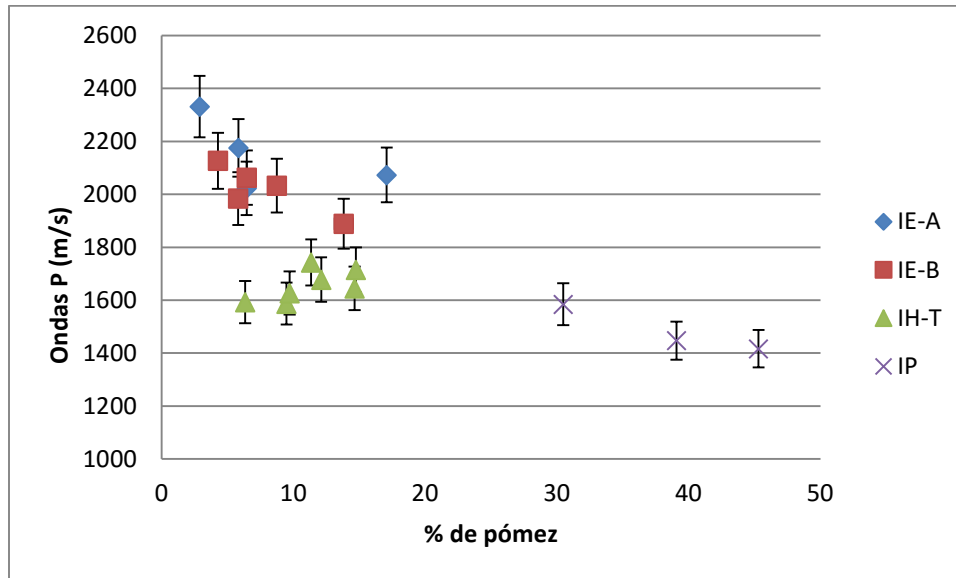


Figura 27. Gráfica comparativa de velocidades de ondas P y porcentaje de pómez. En esta gráfica se hace una comparación de cómo afecta el porcentaje de pómez en las ondas P.

## 5.2.4 Caracterización mecánica.

Los resultados de las pruebas mecánicas en rocas nos dan un parámetro amplio para conocer la resistencia máxima, cuando una roca sufre cambios en su estructura provocados por agentes externos (p.ej. sismos o fallamientos geológicos) sus propiedades disminuyen. Los resultados de estas pruebas fueron principalmente: gráficas de esfuerzo y deformación, resistencias máximas a compresión simple, esfuerzos nominales a tensión, resistencia a desgaste y módulo de elasticidad. Los datos obtenidos en estas pruebas son analizados en Gráficas de las Figuras (28, 29, 30, 31 y 32) y Tablas (9, 10 y 11).

### 5.2.4.1 Compresión simple

Los resultados a compresión simple fueron analizados en la Tabla 9 y en las Figuras 28a, 28b, 29a y 29b, todos ellos se comportaron de diferentes formas, ya que la composición y textura son diferentes, ver Figura 28 y 29.

Tabla 9. Resultados de resistencia máxima a compresión simple y resultados del módulo de elasticidad al 50%.

ESPECIMEN	$\sigma$ (MPa)	Promedio	$\epsilon$ (Gpa)	Promedio
IE-A1	8.067±2.58	9.55±1.33	0.59±0.13	0.67±0.12
IE-A2	9.37±3.33		0.63±0.11	
IE-A3	11.31±3.84		0.86±0.18	
IE-A4	9.49±3.21		0.62±0.13	
IE-B1	8.59±3.49	9.03±0.82	0.51±0.20	0.53±0.22
IE-B2	9.81±3.53		0.18±0.11	
IE-B3	8.92±3.24		0.49±0.2	
IE-B4	7.79±2.70		0.52±0.09	
IE-B6	10.06±3.78		0.88±0.3	
IE-B11	8.99±3.36		0.58±0.22	
IH-T1	7.51±2.66	8.09±1.04	0.3731±0.08	0.33±0.08
IH-T2	8.42±3.24		0.31±0.07	
IH-T3	7.25±2.33		0.23±0.13	
IH-T4	8.67±3.0		0.39±0.07	
IH-T5	8.97±3.13		0.35±0.08	
IH-T6	9.39±3.29		0.45±0.07	
IH-T10	6.47±2.29		0.24±0.06	
IP-A1	3.74±1.22	4.39±0.62	0.19±0.03	0.19±0.03
IP-A3	5.02±1.69		0.20±0.05	
IP-A4	4.83±1.58		0.23±0.05	
IP-A6	3.99±1.43		0.16±0.05	

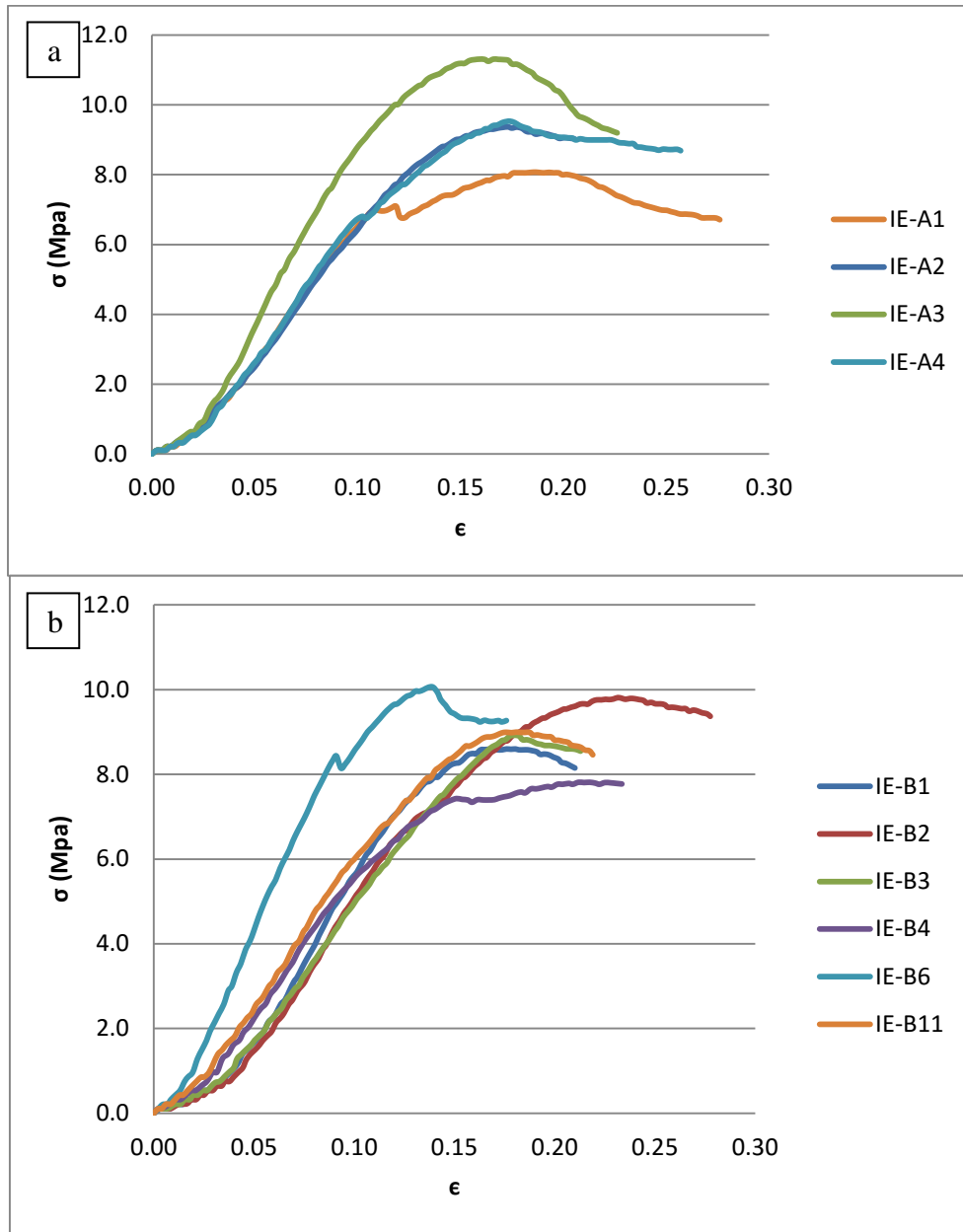


Figura 28. Gráfica de resultados de especímenes de las litofacies IE-A e IE-B. La gráfica de estos especímenes presenta mayor resistencia.

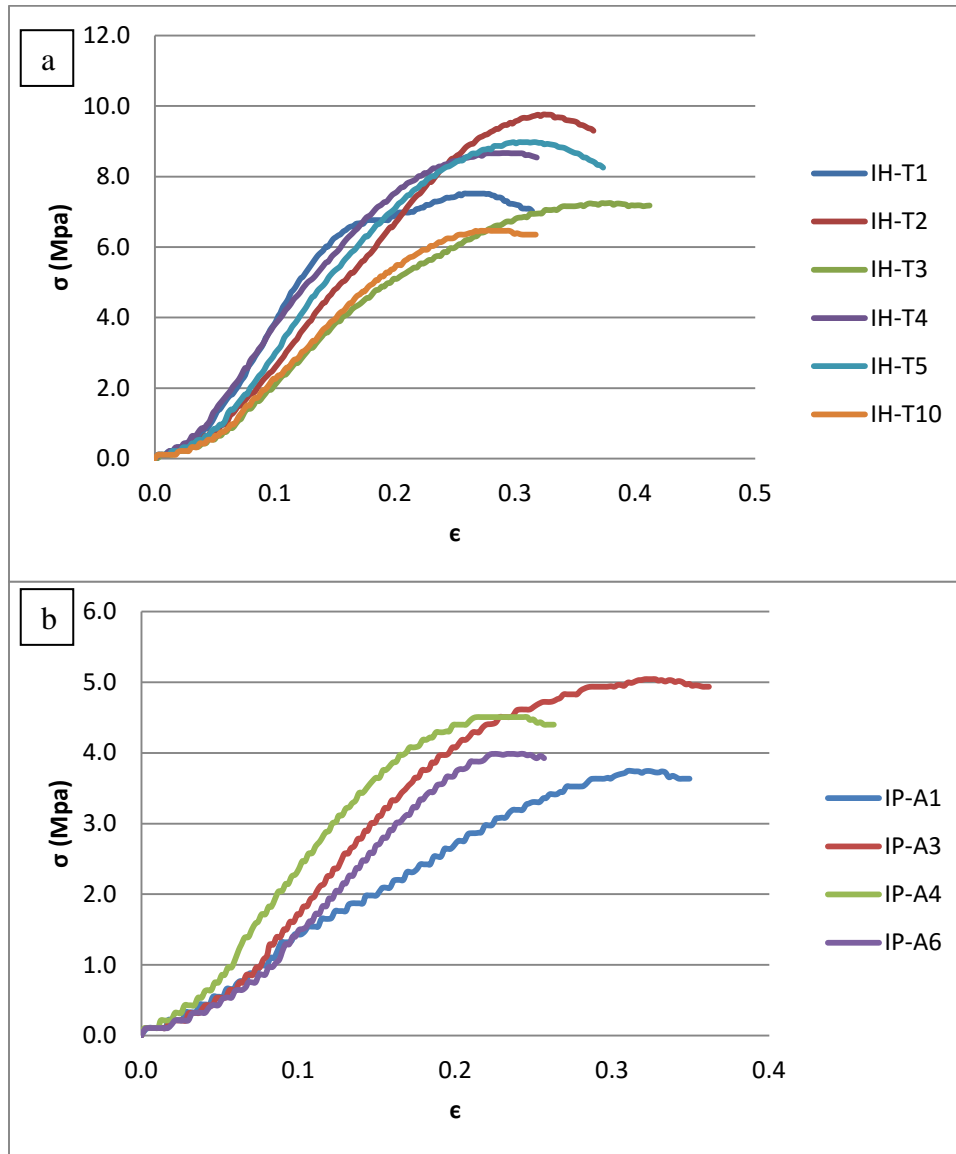


Figura 29. Gráfica de resultados de especímenes de las litofacies IH-T e IP. En las gráficas se observa el comportamiento de las muestras sometidas a cargas constantes; en la segunda gráfica se observa que las resistencias son menores. Causa de ello son el alto porcentaje de pómez según resultados de análisis de imágenes.

En las dos figuras anteriores se observan cuatro gráficas de esfuerzo y deformación, en donde se observa que, IE-B tienen menor deformación, y la ignimbrita IH soporta mayor deformación. Otro dato que nos proporciona estas gráficas es el área de cerramiento de grietas o poros, donde IP según gráficas tienen una pendiente muy suave antes de las rectas tangentes.



La comparación de la resistencia máxima con otros valores máximos (p. ej. % de pómez) nos dan una idea de la variación que hay en las características mecánicas conforme a sus característica físicas. Un ejemplo es el alto porcentaje de pómez o alto porcentaje de porosidad, esto cambios se ven reflejados haciendo gráficas comparativas (ver Figuras 30 y 31).

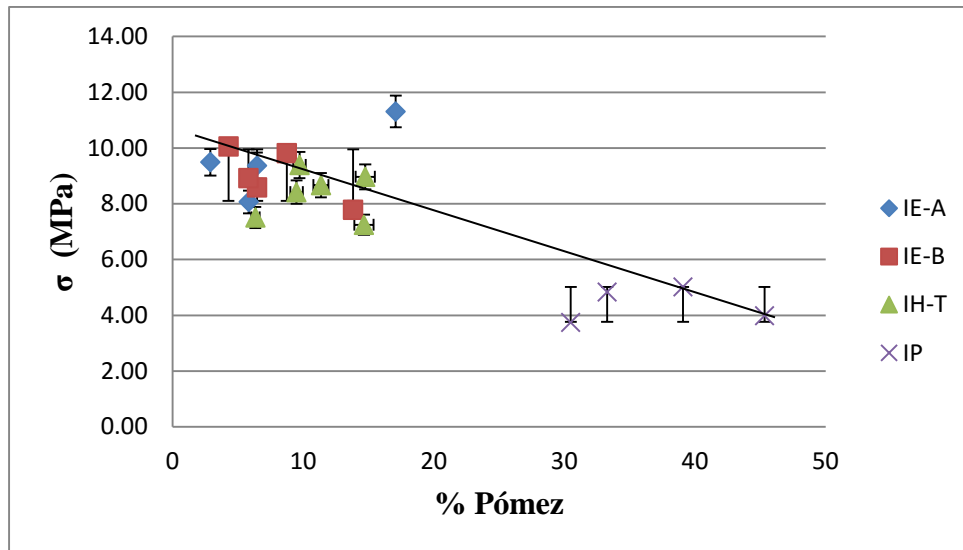


Figura 30. Gráfica de resistencia a compresión simple vs porcentaje de pómez. En esta gráfica se observa el efecto del porcentaje de pómez en la resistencia máxima.

En la Figura 30, de la gráfica comparativa porcentaje de pómez y resistencia máxima, se observa la relación que existe entre la cantidad de pómez con los esfuerzos, en los resultado tenemos que la tendencia de la recta es, entre menor es el porcentaje de pómez, mayor es la resistencia máxima. El efecto del porcentaje de pómez en la resistencia se observan principalmente en los materiales IP, donde alcanza un 30% de pómez en la matriz rocosa.

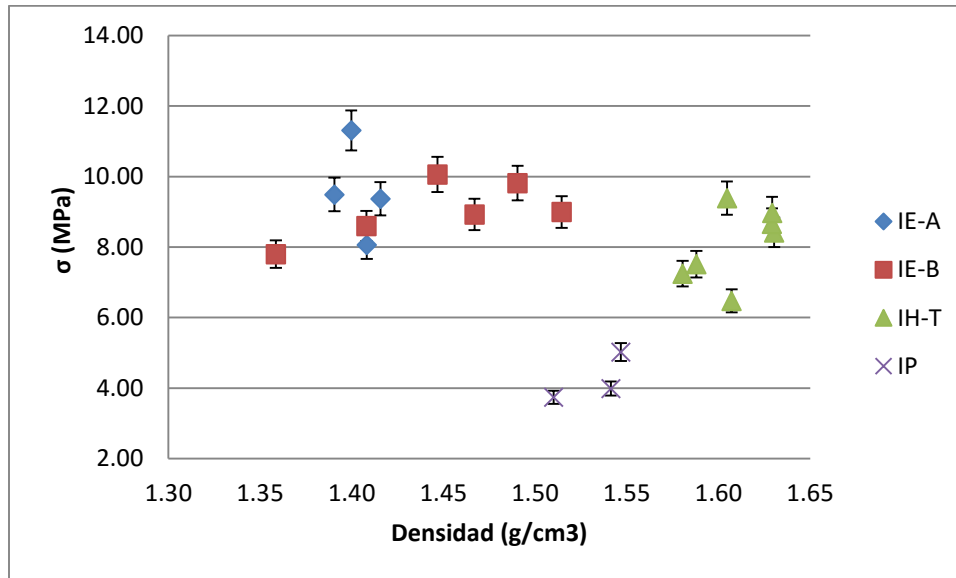


Figura 31. Gráfica de la resistencia máxima a compresión simple vs densidades máximas. En la gráfica se observa una relación entre la propiedad física y la propiedad mecánica. En la gráfica se observa la variación de la resistencia máxima con la densidad.

Otra forma de ver la relación que existe entre las propiedades físicas y mecánicas es hacer una gráfica comparativa entre densidad y resistencia máxima, donde la figura 31, nos muestra una gráfica comparativa de las propiedades mencionadas y tenemos que entre mayor es la densidad, las resistencias son mejores, la densidad nos da parámetros sobre el estado de compactación del material, por lo tanto las partículas son más unidas y el estado de cohesión es de alto grado.

#### 5.2.4.2 Resistencia a la tracción

Los resultados de las rocas ignimbríticas sometidas a pruebas de tracción indirecta, varían conforme a sus estructuras internas ya que como se observa en la Tabla 11, los valores de la litofacie IE-B soportan mayor tensión. Esto significa mayor homogeneidad y que las partículas tienen mayor uniformidad con respecto a los otros materiales.

Los resultados de tensión nominal (Tabla 10) son los valores máximos durante la aplicación de una carga constante en un espécimen, es decir los especímenes soportan tensiones no mayores a los valores expresados en la tabla siguiente. Otros parámetros calculados en esta prueba son: los valores del módulo de Young dinámico y fueron calculados al 50% con respecto a la tangente principal de la gráfica de esfuerzos nominal (NR) con las deformaciones ( $\epsilon$ ).

Tabla 10. Resultados a tensión nominal y módulo de elasticidad dinámico.

Espécimen	$\sigma$ NR	Promedio	E (Gpa)	Promedio
IE-B12	1.4± 0.4	1.52±0.56	0.23	0.19±0.05
IE-B13	1.03±0.55		0.30	
IE-B14	2.13±0.58		0.03	
IH-T18	1.08± 0.31	0.95±0.25	0.51	0.37±0.17
IH-T19	1.08± 0.26		0.66	
IH-T20	0.55± 0.21		0.02	
IH-T21	1.08± 0.31		0.31	
IP-14	0.53± 0.13	0.34±0.12	0.03	0.16±0.09
IP-15	0.18± 0.09		0.03	
IP-16	0.36± 0.10		0.16	
IP-17	0.30± 0.05		0.20	
IP-18	0.52± 0.14		0.34	
IP-19	0.18± 0.03		0.22	
IP-20	0.36± 0.11		0.14	
IP-21	0.29± 0.08		0.17	
IP-22	0.35±0.10		0.18	

$\sigma$  NR = Tensión nominal máxima

E = Módulo de Young dinámico

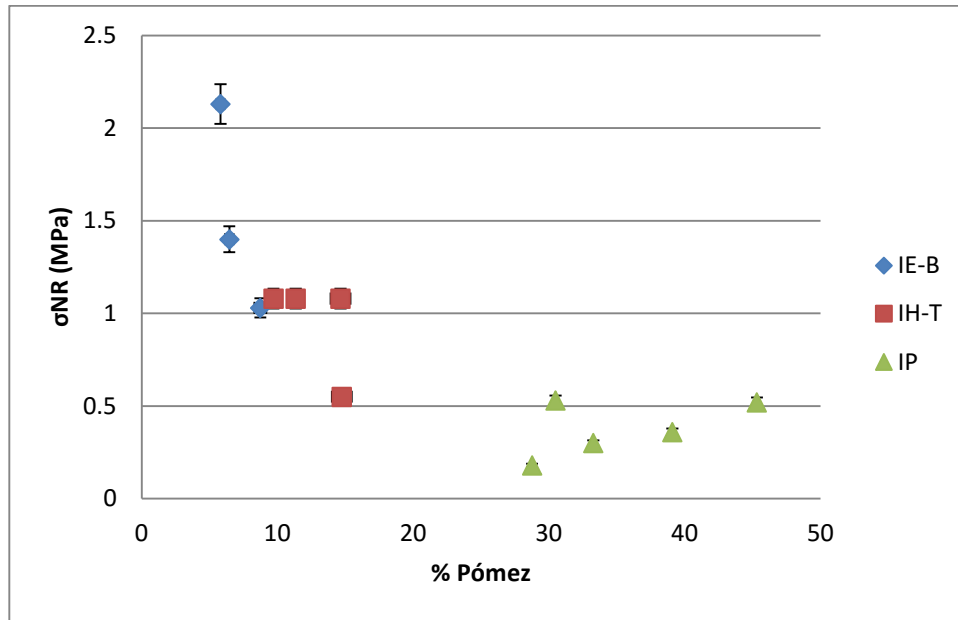


Figura 32. Gráfica comparativa de resistencia a tensión nominal vs porcentaje de pómez.

En la Figura 32, se tiene una gráfica comparativa entre porcentaje de pómez y resistencias máxima a tensión, en esta gráfica se observa que entre menor cantidad de pómez mayor es la resistencia a tensión. Otra observación es, entre mejor es el estado de compactación o soldamiento de un material, mejores son los resultados a tracción.

### 5.2.4.3 Prueba de durabilidad

Los resultados de esta prueba son aplicables en el análisis de resistencia de materiales al someterlos a fricción. Algunos materiales como las ignimbritas dependen mucho de su grado de soldamiento ya que entre más compacto esté, mayor será el número de ciclos de desgaste que soporta.

*Tabla 11. Resultados en prueba de durabilidad. En la tabla se observan los resultados a desgaste en ocho repeticiones.*

Muestra	NC	Masa (g)	Desgaste (g)	Muestra	NC	Masa (g)	desgaste (g)	Muestra	NC	Masa (g)	Desgaste (g)
IE-A	0	377.73	0	IH	0	542	0	IP	0	589.92	0
	1	348.19	29.54		1	490.73	51.27		1	295.34	294.58
	2	333.98	14.21		2	459.78	30.95		2	160.14	135.2
	3	323.26	10.72		3	425.12	34.66		3	115.56	44.58
	4	298.33	24.93		4	375.84	49.28		4	94.84	20.72
	5	286.38	11.95		5	341.79	34.05		5	74.18	20.66
	6	274.56	11.82		6	305.58	36.21		6	57.62	16.56
	7	262.2	12.36		7	269.62	35.96		7	45.19	12.43
8	251.02	11.18	8	238.38	31.24	8	37.02	8.17			

*NC = Número de desgastes sometidos cada muestra.*

Los valores presentados en la tabla 11, son de resultados de someter una muestra de roca en la máquina de desgaste durante un determinado tiempo y ciclo. En la tabla se observan tres tipos de materiales con diferente resistencia al desgaste. La litofacie (IP) presenta una baja resistencia al desgaste ya que por ocho ciclos el material redujo su masa por más del 90 %.

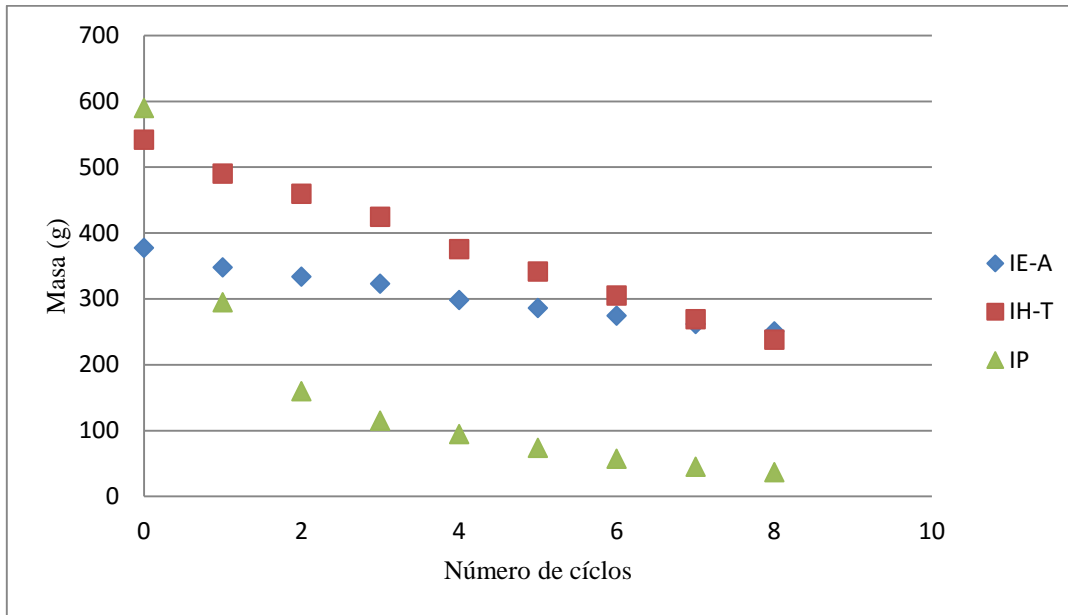


Figura 33. Gráfica de resultados de pruebas de durabilidad.

En la figura 33, gráfica de resultados en prueba de desgaste, se observan los comportamientos de las rocas, donde IP es el más propenso a un desgaste inmediato, ya que este material es de densidad muy baja a comparación con los materiales como IH-T e IE-A, estos valores demuestran, cómo alto porcentaje de pómez y el grado de alteración, afecta en un 50% en la resistencia de los materiales.

### 5.2.5 Propiedades hídricas de las rocas

La propiedad hídrica de los materiales sólidos, son en su mayoría los principales agentes que permiten el alto o bajo grado de alteración de los materiales rocosos. Cuando un líquido fluye a través de la matriz de una roca altera las propiedades físicas como lo son: mineralogía, densidad y porosidad, estos cambios producen desprendimiento en las paredes de los poros. Algunas pruebas para obtener estos parámetros son capilaridad y filtración, estas pruebas nos dan un resultado de la capacidad de fluir líquido en el interior de una roca.

### 5.2.5.1 Prueba de capilaridad

Los resultados de capilaridad serán analizadas en Tablas (12 y 13) y Gráfica (Figura 33). En las tablas se analizan los volúmenes absorbidos de cada material en ml (Tabla 12) y la succión en  $g/cm^2$  (Tabla 13), estos valores también fueron evidenciados en gráfica (ver Figura 34).

\*\* Las tablas y gráficas de volúmenes absorbidos en los diferentes tiempos que duró el análisis, se describen en el anexo 3.

Tabla 12. Resultados de volumen absorbido de los distintos materiales sometidos a capilaridad.

Muestras	IE-B7	IE-B8	IE-B9	IE-B10						
VG	6.92	2.02	1.97	2.19						
Muestras	IH-T7	IH-T8	IH-T9	IH-T11	IH-T12	IH-T13	IH-T14	IH-T15	IH-T16	IH-T17
VG	5.49	4.64	5.37	4.98	6.21	6.03	6.26	5.74	6.05	1.76
Muestras	IP5	IP7	IP8	IP9	IP10	IP11	IP12	IP13		
VG	6.42	5.43	6.28	7.8	6.95	6.78	5.8	2.31		

VG = Volumen Absorbido (ml)

Tabla 13. Resultados de succión capilar de los materiales de la región de Cuitzeo.

Muestras	IE-B7	IE-B8	IE-B9	IE-B10						
SA	2.50	1.58	1.55	1.69						
Muestras	IH-T7	IH-T8	IH-T9	IH-T11	IH-T12	IH-T13	IH-T14	IH-T15	IH-T16	IH-T17
SA	1.82	1.86	1.77	1.83	2.12	2.16	2.18	2.09	2.10	1.44
Muestras	IP5	IP7	IP8	IP9	IP10	IP11	IP12	IP13		
SA	2.16	1.80	1.98	2.73	2.43	2.46	1.97	1.82		

SA= masa de agua succionada en ( $g/cm^2$ )

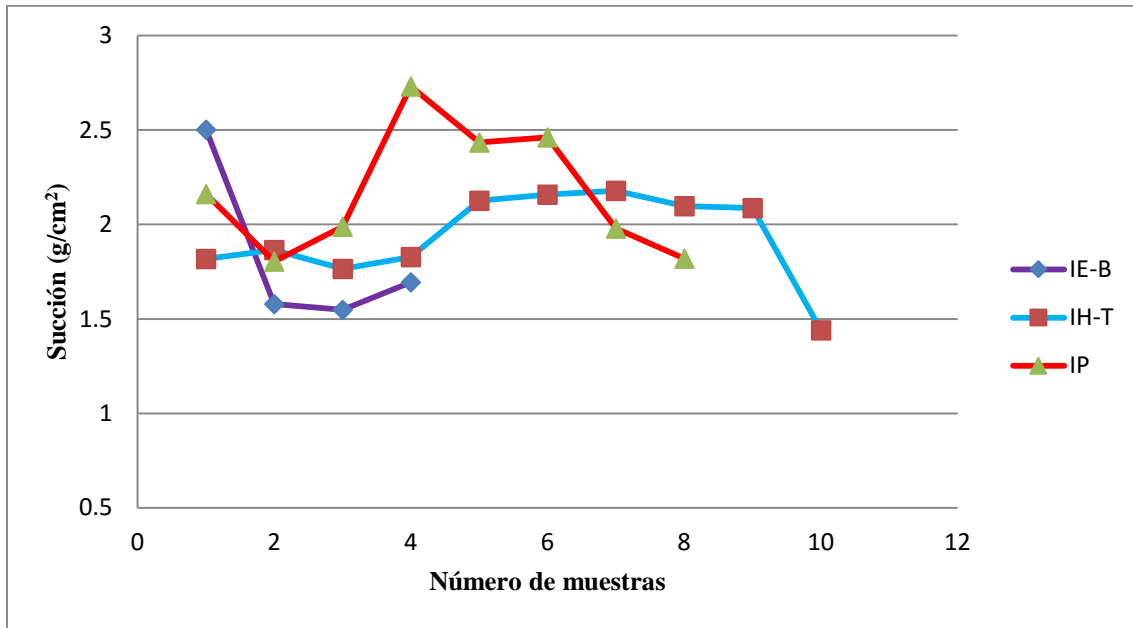


Figura 34. Gráfica de succión capilar de los materiales ignimbríticos. En esta gráfica se observa que las litofacies IP e IH-T son los materiales que más capilaridad tienen.

En la Figura 34, se observa una gráfica que describe el comportamiento de cada material, en donde se observa que IP es un material con gran propiedad hídrica, por tanto se puede decir que es un material con alto porcentaje de microporosidades, ya que estos poros son los que favorecen la capilaridad de una roca.



## 6. Discusiones

Con base en la discusión de los resultados obtenidos por medio de las pruebas de laboratorio (p. ej. físicas, mecánicas, petrográficas), se pretenden relacionar diferentes características físicas con la evolución en el comportamiento mecánico de cada litofacie. El contexto global de nuestros resultados se establecerá mediante la comparación con diferentes trabajos científicos.

Las grandes masas de rocas en zonas tectónicamente activas (p. ej. CVTM y CVMG) son complejas, debido principalmente a su historia geológica. Las unidades de roca involucradas presentan rasgos estructurales directamente relacionados con la evolución en el estado de esfuerzos. Particularmente, en la zona de estudio, [Garduño-Morony et al. \(2009\)](#) afirman que es una zona altamente activa con un sistema de fallas normales principales con orientación NW-SE. Con base en lo anteriormente descrito se hace evidente la importancia de la caracterización geomecánica de los materiales en esta zona. En particular, el arreglo estructural en conjunto con la actividad antrópica, ha generado inestabilidad sobre todo a lo largo de la carretera Morelia – Guadalajara.

El análisis de los rasgos estructurales tanto regionales, locales y de afloramientos, sugieren orientaciones preferenciales NE-SW, los cuales coinciden con las direcciones publicadas por [Garduño-Monroy, et al. \(2009\)](#). Los autores relacionan estas estructuras con la formación del semigraben de Cuitzeo y la falla de Copándaro, que a su vez están estrechamente ligados a la evolución del sistema de fallas Morelia-Acambay ([Jonson y Harrison, 1989](#); [Garduño-Monroy et al., 2009](#); [Langridge et al., 2000](#)).

En particular, el análisis de los rasgos estructurales a nivel afloramiento sugieren dos direcciones preferenciales, una dirección NE-SO y otra con dirección NO-SE, que pueden ser relacionadas con fallas y deformaciones locales que incluyen basculamientos de 5 – 30° hacia el sur ([Garduño-Monroy et al., 2002](#); [Israde-Alcántara et al., 2008](#)).

### 6.1 Caracterización física y dinámicas

La importancia de analizar las propiedades físicas, es para encontrar o cuantificar otras características de las rocas como por ejemplo las propiedades mecánicas. Autores como [Al-Harhi et al. \(1999\)](#) y [Dunn et al. \(1973\)](#) mencionan que la densidad y la porosidad son un primer parámetro para conocer otras características como lo son: la

resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson y velocidades de ondas sísmicas (P y S).

La evolución de las características físicas heredadas de la génesis de las rocas y dependen en gran medida del ambiente geológico en el que se depositaron. En ambientes volcánicos es común que estas características cambien drásticamente, debido a la circulación de fluidos muchas veces calientes y ácidos. *Frolova et al. (2014)* mencionan que la alteración de los minerales cambia las propiedades físicas y la evolución mecánicas de la roca, y que los fluidos a altas temperaturas ayudan a la creación de porosidades secundarias, disminuyendo la densidad del material.

El efecto de las alteraciones y meteorizaciones en los materiales rocosos es a través de la porosidad (*Ceryan, et al. 2008*), esto modifica en gran medida la densidad de los materiales, por ejemplo IH que es menos alterada tiene una densidad de  $1.61\text{kg/cm}^3$  y el material IP que es un material con más alteración y con alto porcentaje de pómez tiene una densidad de  $1.53\text{ kg/cm}^3$ . Estas densidades son bajas comparados con los resultados de otros autores por ejemplo *Carreón Nieto,(2002)*, obtuvo 1.9 y  $1.5\text{ kg/cm}^3$  en materiales ignimbríticos usados construcción, *Villaseñor Reyes, (2014)* obtuvo  $2.14\text{ kg/cm}^3$  en rocas ignimbríticas de Morelia; otro ejemplo en los materiales IP, donde según Tabla 6 estos especímenes contienen un alto porcentaje de pómez, y se sabe que los pómez su principal característica es el alto porcentaje de vesicularidades o espacios vacíos, estos resultados se ven reflejados en el análisis en porosimetría de mercurio en donde las muestras IP obtienen un total de  $5.99\text{ mL/ g}$ , siendo el valor más alto en comparación con los otros resultados.

Los materiales como las litofacies IH e IP fueron los más evidentes en la caracterización física y mecánica, estos materiales presentaron un grado mayor de alteración y esto se observa analizando los resultados en las ondas P y S. Se sabe que estas pruebas nos dan una idea de la calidad de los materiales, por ejemplo los especímenes mencionados fueron los más bajo en comparación con otros resultados de otros autores en pruebas de ondas P, por ejemplo *Pola et al., (2014)* obtuvo 2250, 1136 y  $1350\text{m/s}$  en tobas e ignimbritas, *Frolova et al., (2014)*,  $1800\text{m/s}$  en tobas y *Villaseñor reyes, (2014)*,  $3010\text{ m/s}$  en ignimbritas de Morelia, México. Otro ejemplo de las velocidades de ondas sísmicas es en los especímenes de la litofacie IE-A, en los cuales aumentó un 1.58% la velocidad de

onda P en estado húmedo, este material es uno de los más homogéneos y estables o con menor alteración.

Algunos otros resultados de ondas sísmicas publicados por otros autores como *Pola et al., (2014)*, tuvieron un promedio de resultado de 900 m/s en ondas S, y *Villaseñor-reyes, (2014)*, obtuvo un promedio de 1758 m/s en ondas S, estos valores es mayor al de la región de Cuitzeo; cabe mencionar que las ignimbritas de esta autora son de la región Morelia Michoacán, cercano a la zona de estudio.

En la Tabla 14, se muestra los resultados promedios de las velocidades de onda P y S, también se muestra los resultados esperados en velocidades de ondas P, y se obtiene multiplicando las velocidades de ondas S por la raíz cuadrada de 3. Los materiales analizados en estado seco muestran datos cercanos a lo esperado, esto significa que no existen errores en la realización de la prueba. Para el caso de los materiales analizados en estado húmedo, en algunos materiales presentan una diferencia del 10%, estos resultados pudo haber tenido influencia la forma de saturación.

En la Tabla 15 se hace una comparación de resultados obtenidos en la región de Cuitzeo, con resultados publicados por otros autores, y se observa que los resultados obtenidos en velocidades de ondas P son semejantes.

*Tabla 14. Resultados promedio de velocidades de ondas P y S, en estado seco y húmedo.*

Espécimen	VpS(m/s)	VsS(m/s)	VsS*	VpH(m/s)	VsH(m/s)	VsH*
IE-A	2150±0.14	1250±0.15	2165.06	2170±0.05	1040±0.07	1801.33
IE-A	2020±0.09	1250±0.05	2165.06	1900±0.09	960±0.05	1662.77
IH	1660±0.06	930±0.02	1610.81	1470±0.06	770±0.01	1333.68
IP	1500±0.07	790±0.06	1368.32	1050±0.05	540±0.04	935.31

*V\* = Las velocidades de ondas con un asterisco son los resultados esperados, se obtuvo de la multiplicación de las velocidades de ondas S por la raíz cuadrada de tres.*

Tabla 15. Resultados de ondas P de diferentes autores & materiales de Cuitzeo.

Promedio de Vp obtenido por otro autores			Vp Cuitzeo Michoacán			
Materiales	*Vp (m/s)	Autores	IE-A	IE-B	IH	IP
(*)Toba	1140	<i>Pola et al., 2014</i>				
Toba	2250	<i>Pola et al., 2014</i>				
Toba	1800	<i>Frolova et al., 2014</i>				
(*)Ignimbrita	1350	<i>Pola et al., 2014</i>	2150	2020	1660	1480
Lava	4700	<i>Frolova et al., 20014</i>				
Calcoarenita	3200	<i>Vasanelli et al., 2013</i>				

En la tabla se hace una comparación de los resultados obtenidos, con diferentes materiales y autores, en donde (\*Vp) = Promedio de velocidades de ondas P de otros autores; (\*) porcentaje con mejores resultados que la de los otros autores.

En la Tabla 16, se muestra resultados de módulos de Poisson, de distintos materiales, y los obtenidos en la región de Cuitzeo, en esta tabla se observa que los materiales analizados se comportan como materiales arcillosos, por lo tanto se puede considerar como una roca Poissoniana (rocas Poissonianas  $\nu = 0.1-0.4$ ), aunque no cumpla con las condiciones, que deben de ser isotrópicas, homogéneas y continuas.

Tabla 16. Tabla comparativa módulo de Poisson de las rocas ignimbríticas de Cuitzeo y Módulo de Poisson de otros materiales

Especimen	Ignimbritas de Cuitzeo				Distintos tipos de materiales (Acevedo-Aguirre, 2009).					
	IE-A	IE-B	IH	IP	ANS	AA	Limos	ADP	Basalto	suelos
$\nu$	0.24	0.19	0.27	0.29	0.1-0.3	0.2-0.3	0.3-0.35	0.15-0.30	0.2-0.3	0.3

ANS = Arcillas saturadas; AA; Arcillas arenosas; ADN = Arcillas duras preconsolidadas.

## 6.2 Caracterización Mecánica

Una de las características más importantes para ver la resistencia y durabilidad de una roca son las mecánicas, ya que en ellas se pueden apreciar las resistencia máximas antes del fallamiento y esto se puede analizar mediante pruebas destructivas como lo son la resistencia a compresión simple, la resistencia a tracción y la prueba de durabilidad o de desgaste.

Las pruebas mencionadas varían conforme al tipo de material, también pueden variar por el estado actual, por ejemplo si el material tiene un alto grado de alteración o tiene un alto porcentaje de porosidad, [Hudyma et al. \(2004\)](#) menciona que el incremento del grado o el porcentaje de porosidad de un material, la dureza y resistencia tienen un decremento significativo, otros autores ([Benavente, 2002](#); [Bell, 1993](#); [Jefferson, 1993](#)) justifican el efecto de la porosidad en las propiedades mecánicas y señalan que la durabilidad de las rocas está estrechamente relacionada con el balance del agua en el interior de la roca, que depende principalmente del sistema poroso y también de la naturaleza de la disolución en los poros (salmuera). Los fluidos como salmueras o agua, son transportados a través del sistema de poros o simplemente son estables en la matriz de una roca. Estos fluidos estables son generados por la capilaridad del material, [Camuffo, \(1998\)](#) y [Benavente, \(2002\)](#) le denominan a este punto como zona de avance capilar y que depende principalmente del tamaño del poro.

Los materiales analizados son de diferente grado de alteración, por ejemplo IE-A y IE-B tienen un alteración media ya que aún conservan algunas características primarias de sus componentes por ejemplo mineralogía; y las muestras IP tienen una alteración alta debido a su composición primaria, por ejemplo líticos alterados y minerales que se han convertido en cloritas y zeolitas.

Los resultados obtenidos a compresión simple son variables, por ejemplo IP que tiene alto grado de alteración y alto porcentaje de pómez, es de los materiales con resultados más desfavorables comparados con las demás muestras analizadas y promediando estos resultados tenemos que IE-A tiene 9.56 MPa, IE-B tiene 9.03 MPa, IH tiene 8.10 MPa y por último IP es de 4.40 MPa.

Los resultados obtenidos (promedios) en los materiales ignimbríticos de Cuitzeo se compararon con datos publicados de otros autores del mismo material (Tabla 17), esto nos sirve para ver el efecto de las alteraciones presentes en los materiales, por ejemplo *Price et al. (1985)* y *Avar, (2002)* presentan resultados de tobas poco alteradas y *Pola et al. (2014)* presenta resultados de tobas e ignimbritas con alto grado de alteración. Algunos otros autores que han trabajado con ignimbritas en la región de Morelia (cercanos a la zona de estudio) han obtenido mejores resultados que el de los materiales analizados, por ejemplo *Alonso-Guzmán, (1996)* 2.45, 4.13 y 5 Mpa, *Carreón-Nieto, (2002)*, 17, 20 y 37 Mpa, *Bigioggero et al. 2004*, 2.2 y 7.8 Mpa, en rocas ignimbríticos usados como cantera de Morelia y *Villaseñor-reyes, (2014)*, 9.27 y 29 Mpa. Los datos de *Carreón-Nieto, (2002)* y *Villaseñor-reyes, (2014)* son más altos que las ignimbritas de Cuitzeo, ya que los materiales de los autores son rocas sanas y con alto grado de soldamiento. En la Tabla 17 se presenta la diferencia en porcentajes de los resultados de otros autores con los resultados de las ignimbritas de Cuitzeo, Michoacán.

Tabla 17. Comparación de resistencias máximas a compresión simple con resultados de Cuitzeo y resultados de otros autores.

ROCA	$\sigma$ (MPa)	Autor	Promedios a compresión simple $\sigma$ (Mpa)			
			IE-A	IE-B	IH	IP
Toba	16.24	<i>Price et al., 1985</i>				
Toba	19.57	<i>Avar, 2002</i>				
Toba	24.25	<i>Hudyma et al., 2004</i>				
Andesita B.	91.09	<i>Sonmez et al. 2004</i>				
Andesita P.	48.85	<i>Sonmez et al. 2004</i>	9.55 ± 1.33	9.03 ± 0.82	8.09 ± 1.04	4.39 ± 0.62
Toba	10.55	<i>Sonmez et al. 2004</i>				
Toba *	10.25	<i>Sonmez et al. 2006</i>				
Toba	5.7	<i>Pola et al., 2014</i>				
Toba	16.3	<i>Pola et al., 2015</i>				
Ignimbrita	6.83	<i>Pola et al., 2016</i>				
Ignimbrita	3.47	<i>Pola et al., 2017</i>				

Los valores obtenidos en la zona de estudio y comparados con los resultados de los demás autores son en su mayoría mejores, como se mencionó anteriormente, los especímenes probados contienen un grado de alteración, lo que desencadena desequilibrios en la matriz, haciendo que el grado de soldamiento disminuya. Otra prueba analizada en este trabajo es la prueba de durabilidad o desgaste, en donde los resultados fueron predecibles por el tipo de material, su composición y su grado de alteración.

La composición de estos materiales son el altos porcentajes de materiales pumicíticos, los cuales no ayudan en las características mecánicas, por lo mismo de que los pómez tienen alto porcentaje de porosidad, en la prueba de desgaste estos materiales tienden a desmoronarse con facilidad. En la Tabla 17, se muestra el comportamiento de los materiales probados, en donde se observa el porcentaje de desgaste de cada uno de ellos, comparando estos resultados con la de [Alonso-Guzmán, \(1996\)](#) donde obtuvo 41, 48 y 35%, los materiales de esta autora son mejores, ya que provienen de bancos de materiales usados para rocas ornamentales.

*Tabla 18. Porcentajes desgastados de los materiales sometidos a la prueba de durabilidad.*

Muestra	Mi(g)	Mf (g)	%D
IE-A	377.73	251	33.54
IH-T	542	238.4	56.02
IP	589.92	37.02	93.72

*Mi = Masa inicial; Mf = Masa final; %D = Porcentaje desgastada*

## 7 Conclusiones

Cuitzeo es una zona muy habitada con infraestructura importante (p.ej. carreteras tipo A y puentes) y con una zona geotérmica potencialmente explotable. La planificación del territorio en la zona, así como el diseño y construcción de cualquier obra civil (instalaciones geotérmicas) requieren de estudios geológicos - geomecánicos a detalle, que en conjunto sean la base en la construcción de escenarios de los fenómenos geológicos comunes en la zona (p. ej. deslizamientos de laderas).

La evolución en el comportamiento mecánico de cada material, así como el modo de fracturamiento de cada espécimen, presentan una estrecha relación con las características texturales y de sus componentes, particularmente con el contenido de fragmentos de pómez, caracterizado por un alto porcentaje de vacíos. El estudio del sistema poroso es muy importante en la cuantificación del comportamiento mecánico de cada material. Se resalta que un sistema compuesto por poros o cavidades interconectadas tendrá una mayor permeabilidad.

Los resultados más sobresalientes de la caracterización geomecánica detallada de algunas litofacies de la zona de Cuitzeo, Michoacán, se describen a continuación:

- En general, la región de Cuitzeo es afectada por al menos tres sistemas de fallas y fracturas asociadas: 1) sistema de fallas con orientación preferencial NE-SO, posiblemente asociadas al sistema de fallas Morelia – Acamba y (Martínez-Reyes y Nieto-Samaniego, 1990; Suter et al., 1995; Suter et al., 2001); 2) sistema de fallas locales posiblemente afectadas por los graben y semigraben de Cuitzeo con dirección NE-SW y E-W (Israde-Alcantara., 2002); 3) sistema de fallas menores NE-SW, las cuales se encuentran cortando a toda la secuencia del depósito Ignimbrítico.
- El estado de esfuerzos en la zona está promoviendo el ascenso de los fluidos hidrotermales. En particular, en la zona de San Agustín del Maíz y Copándaro de Galeana se encontraron rocas de mayor alteración hidrotermal. Se resalta el alto contenido de cloritas, indicitas y minerales asociados.



- Gran parte de la degradación mecánica de las litofacies se debe al alto contenido de minerales de arcilla, en particular la litofacie IP. De acuerdo a estudios geoquímicos (difracción de rayos X) está constituida por fragmentos de pómez inmersos en una matriz compuesta principalmente de minerales de montmorillonita, este tipo de arcillas su característica particular es la expansión.
- La expansión de los materiales arcillosos contribuye en gran parte en el comportamiento mecánico de cualquier material. Algunos autores como [Arancilla-Galleguillos \(2003\)](#), [López et al. \(2006\)](#) mencionan que las arcillas al saturarse presentan un aumento o disminución de volumen, como resultado se generan microfracturas que pueden terminar en desprendimientos locales de material. En la zona de estudio los materiales con alto grado de expansión se encuentran en los puntos CZ-01, CZ-02, CZ-25, CZ-26 y CZ-29, algunos de estos afloramientos se encuentran en taludes de carreteras, donde han presentado algunas inestabilidades y derrumbes.
- De acuerdo a la figura 23 los materiales analizados tienen una gran cantidad de microporos, que facilitan la absorción y la capilaridad. Usando la fórmula de succión propuesta por [Navarro et al., \(2011\)](#), se tiene que las ignimbritas de Cuitzeo pueden llegar a succionar hasta  $2.7 \text{ g/cm}^2$ . Con base en estos resultados se concluye que los materiales de la región son altamente propensos a saturación y por consiguiente al comportamiento mecánico de las rocas se ve disminuido.
- Las ignimbritas de la región tienen una importante heterogeneidad en la matriz. La heterogeneidad en la textura, porosidad y el hidrotermalismo, hacen que la resistencia máxima a compresión simple disminuya más del 50%, analizando los promedio de las litofacies IE-A, IE-B e IH, considerados como materiales de menor alteración son de 8.91 MPa y el material IP promedia 4.40 MPa, este material contiene alto grado de cloritización. Los resultados de IP son similares a los resultados de otros autores como [Sonmez et al., \(2004,2006\)](#) y [Pola et al., \(2014\)](#).

- Las alteraciones tienen efecto en las propiedades físicas, al fluir agua o vapor dentro de la matriz rocosa generan porosidades secundarias. La porosidad es una propiedad física que disminuye drásticamente la resistencia a compresión y tensión, un ejemplo de ella se observa en las muestras IP que tienen gran cantidad de pómez porosa y la resistencia tiene un decremento importante de más del 50 % en pruebas a tensión.
- Los resultados mecánicos a compresión, tracción y durabilidad, nos dan parámetros de cómo es el estado actual de los materiales. Con base en los resultados físicos y mecánicos se tiene que las litofacies IE-A e IE-B son los materiales más estables y, las ignimbritas IP son los materiales más propensos a inestabilidad.
- El trabajo realizado en la región de Cuitzeo, Michoacán cumple con los objetivos trazados. El amplio conocimiento del lugar y con base a datos obtenidos en cada prueba, se puede interpretar los efectos de las propiedades físicas a las propiedades mecánicas.
- Como conclusión general se tiene que el hidrotermalismo presente en la región ha afectado a los materiales rocosos usados en las construcciones ingenieriles.

## Referencias

- ASTM D854-02 (2005) Test method for specific gravity of soils by water pycnometer.
- ASTM D445 2- 85R02E01 (2005) Text method for x-ray radiography of soils samples.
- ASTM D4511-00 Test method for hydraulic conductivity for essentially saturated peat.
- ASTM D4531-86r02 (2005) Test method for bulk density of peat and peat products.
- ASTM D6473-99 (2005) Test method for specific gravity and absorption of rock for erosion control.
- ASTM D2113-99 (2005) Practice for rock core drilling and sampling of rock for site investigation.
- ASTM D2845-00R04E01 (2005) Test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constant of rock.
- ASTM D2936-95R04E01 (2005) Test method for direct tensile strength of intact rock core specimens.
- ASTM D4543-04 (2005) Practice for preparing rock core specimens and determining dimension and shape tolerance.
- ASTM D2938-95R02 Test method for unconfined compressive strength of rock intact core specimen.
- ASTM D3148-02 (2005) Test method for elastic moduli of intact rock core specimens in uniaxial compression.
- ASTM D4341-03 (2005) Test method for creep of hard rock core specimen in uniaxial compression at ambient or elevated temperature.
- ASTM D4404-84r04 (2005) Test method for determination of pore volume and pore volume distribution of soil and rock by mercury intrusion porosimetry.
- ASTM D4555-01 (2005) Test method for determining deformability and strength of weak rock by in situ uniaxial compressive test.
- ASTM D2325-68R00 (2005) Test method for capillarity-moisture relationship for coarse and medium texture soil.
- ASTM D2980-04 (2005) Test method for volume mass, moisture-holding capacity and porosity of saturated peat materials.

- ASTM D4525-04 (2005) Test method for permeability of rock by flowing.
- ASTM D5030-04 (2005) Test method for density of soil and rock in place by the water replacement method in a test peat.
- ASTM C0469-02 (2005) Test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression.
- ASTM C0496-C0496M-04 (2005) Standard Test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimen.
- ASTM D3967-95AR04 (2005) Test method for splitting tensile strength of intact rock core specimen.
- Acevedo-Aguirre O. D., 2009. Determinación de la magnitud de esfuerzos in SITU. Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, División de Ciencias de la Tierra Facultad de Ingeniería, Ingeniería Petrolera. México, Distrito Federal. P. 11-20.
- Aduvire O., López Jimeno C., Llopis G., 1992. Arranque y Ripado de Macizos Rocosos. INGEOPRES N° (2), P. 32 – 40.
- Al-Harathi A.A., Al-Amri R.M., Shehata W.M. 1999. The porosity and engineering properties of vesicular basalt in Saudi Arabia. Engineering Geology (54). P. 313–320.
- Alonso- Guzmán E.M. 1996. Propiedades física y mecánicas de ignombritas del municipio de Morelia. Tesis de maestría, Instituto de investigaciones metalúrgicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Avar, B., Hudyma, N., Karakouzian, M., 2003. Porosity dependence of the elastic modulus of lithophysae-rich tuff: numerical and experimental investigations. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences (40), P. 919– 928.
- Arancilla-Galleguillos C.A. 2003. Arcillas Expansivas: Comportamiento, identificación y su relación mediante ensayos de fácil ejecución. Tesis de licenciatura, escuela de ingeniería, Universidad Austral de Chile.
- Benavente D., 2006. Propiedades físicas y utilización de rocas ornamentales. Utilización de rocas y minerales industriales / ed. M<sup>a</sup> Ángeles García del Cura y Juan Carlos Cañaveras. Alicante, Universidad de Alicante. Seminarios de la Sociedad Española de Mineralogía (2) p. 123-153.
- Bell. F.G., 1993. Durability of carbonate rock as building stone with comments on its preservation. Environmental Geology, Vol. 21, P. 187-200.

- Bigioggero B., Corona-Chavez P., Garduño-Monroy V.H., Carrara E., Lanza L., 2004. La "piedra de cantera" de Morelia desarrollo entre la tradición y la cultura: un acercamiento geológico y una alternativa. Contribución a la geología e impacto ambiental de Morelia, Vol. 01, P. 14-42.
- Brotóns V., Tomás R., Ivorra S., Alarcón J.C., 2013. Temperature influence on the physical and mechanical properties of a porous rock: San Julian's calcarenite. *Engineering Geology* (167), P. 117–127.
- Buenrostro Delgado O., 2004. Los tiraderos municipales de los residuos sólidos de la cuenca del lago de Cuitzeo, México. Contribución a la geología e impacto ambiental de Morelia Vol.1, P. 89-104.
- Camuffo, D. 1998. *Microclimate for cultural heritage*. Elsevier, Amsterdam, P. 415.
- Cadena Sánchez A. O., Conde Rivera L.R., Velásquez J.J., 2011. Análisis petrográfico de carbones colombianos mediante análisis de imágenes. III Congreso Brasileiro de Carvão Mineral, Gramado (RS), Brasil, realizado del 21 al 24 de agosto de 2011.
- Canova C. A., Fraga H.R., 2004. Propiedades Elásticas de las Rocas. Departamento de Ciencias Geológicas. Escuela de agrimensura Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura Universidad Nacional de Rosario.
- Castillo-Castañeda E., Courtois, F., Relkin, P., 2006. Cuantificación de la persistencia y homogeneidad de espumas mediante procesamiento de imágenes. *Ciencia Tecnología Alimenticia*. Vol. 5(2) P. 147-155.
- Carreón Nieto H., Garduño Monroy V.H., Ostrooumov Fink M., Carreón Nieto M.C., 2004. Análisis litológico, geoquímico y efectos de intemperismo del ex-convento de San Francisco, Morelia Michoacán, México: una propuesta metodológica para su restauración. Contribución a la geología e impacto ambiental de Morelia Vol.1, P. 43-56.
- Carreón Nieto H., 2002. Estudio mineralógico, geoquímico y mecánico de los bancos y el ex convento de San Francisco de la ciudad de Morelia Michoacán, México. Para determinar una restauración adecuada. Tesis de maestría, Instituto de investigaciones metalúrgicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Ceryan S. Tudes S., Ceryan N., 200. A new quantitative weathering classification for igneous rocks. *Environ Geology*, Vol. (55), P. 1319–1336.
- Chávez García H.L., (2011). Análisis comparativo entre técnicas no destructivas y destructivas aplicadas a la caracterización del concreto hidráulico elaborado con agregados volcánicos locales y cemento CPC30R RS, tesis de doctorado en ciencias del Centro de Investigación y Desarrollo del Estado de Michoacán

- Dullien F.A.L., 1992. Porous Media Fluid Transport and Pore Structure. Academic Press, San Diego, P. 574.
- Erguler Z.A., R.Ulusay R., 2009. Water induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* Vol. (46), P. 355–370.
- Frolova J., Ladygin V., Rychagov S., Zukhubaya D., 2014. Effects of hydrothermal alterations on physical and mechanical properties of rocks in the Kuril–Kamchatka island arc. *Engineering Geology* 183, P. 80–95.
- Reyes Agustín G., 2015. Estratigrafía, Petrografía y Geoquímica de las secuencias Valentín y Cuauhtemoc del Volcán Tlaloc. Tesis de maestría UMICH, Morelia Michoacán.
- García San Millán, Kern H., Tubía J.M, Mainprice D. 1996. Velocidades de transmisión de ondas P y S en rocas máficas y ultramáficas. Datos obtenidos experimentalmente y calculados. Macizo de Sierra Alpujata. (Cordillera Béticas). *GEOGACETA*, Vol. 20 (4), P. 988-991
- Garduño Monroy, V.H., Israde Alcántara, I., Arreygue Rocha, E., 2002. La inquietante evolución de las cuencas lacustres en zonas volcánicas: ejemplo, la cuenca de Pátzcuaro, Michoacán, México, Aportes al proyecto Pátzcuaro, Estudios, propuestas y avances para la restauración de la cuenca del lago de Pátzcuaro: México, Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza, A.C. y Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Delegación Michoacán, P. 25–62.
- Garduño Monroy V.H., Chávez Hernández J., Aguirre González J., Vásquez Rosas R., Mijares Arellano H., Israde Alcántara I., Hernández Madrigal V.M., Rodríguez Pascua, M.A., Pérez López R., 2009. Zonificación de los periodos naturales de oscilación superficial en la ciudad de Pátzcuaro, Mich., México, con base en microtemores y estudios de paleosismología. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 26 (3) P. 623-637.
- 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., Mora Chaparro J. C., 2009. Paleoseismology of the southwestern Morelia-Acambay fault system, central Mexico. *Geofísica Internacional* Vol. 48 (3), P. 321-335.
- Garduño Monroy V.H., 1999. El vulcanismo del mioceno-pliocuaternario de Michoacán. Carta geológica de Michoacán, UMSNH-IIM, Departamento de Geología, Morelia Michoacán, México. P. 27-45.

- Garduño-Monroy V.H. 1999., Marco tectónico del estado de Michoacán. Carta geológica de Michoacán, UMSNH-IIM, Departamento de Geología, Morelia Michoacán, México. P. 1-19.
- Gómez-tuena A., Orozco, T., Ferrari, L., 2005. Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana, revista: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, LVII (3), 228-229.
- Hasenka T., Carmichael I.S.E., 1985. Copilation of location, size, and geomorphological parameters of volcanoes of the Michoacán-Guanajuato volcanic fields, central México. Revista: Geofica. int. Vol. 24-4; P. 578-58.
- Hatzor, Y. H., Palchik, V. 1997. The influence of grain size and porosity on crack initiation stress and critical length in dolomites. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 34(5), p. 805-816.
- Hudyma N., Avar. B. Karakouzian M., 2004. Topopah Spring Tuff specimens and analog models containing cavities; Engineering Geology, Vol. (73), P. 179–190.
- Hsieh A., Dyskin A.V., Dight P., 2014. The increase in Young's modulus of rocks under uniaxial compression. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. (70), P. 425–434.
- Hiriart L. B. G. Gutierrez-Negrín L., Cuijano-Leon J.L., Ornelas-Selis A., Salvador-Espindola, Hernandez I., 2011. Evaluación de la Energía Geotermica de México; Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía; Mexico Distrito federal.
- Instituto Mexicano del Petróleo, 1986. Estudio Petrogenético de las rocas ígneas de la porción central del eje neovolcánico. Proyecto C-2006. Instituto Mexicano del Petróleo, Internal Report P. 30.
- Israde Alcántara I., Buenrostro Delgado O., Garduño Monroy V. H., Hernández Madrigal V. M., López Granados E., 2008. Problemática geológico-ambiental de los tiraderos de la Cuenca de Cuitzeo, norte del estado de Michoacán, Sociedad Geológica Mexicana Vol.60 (2) México.
- Israde Alcantara I., Garduño Monroy V. H., Ortega Murill R., 2002. Paleoambiente lacustre del cuaternario tardío en el centro del lago de cuitzeo. Revista-Hidrobiología, Vol. (1), P.62-63.
- Israde- Alcantara I., Garduño-Monroy V.H., 2004. Geología de Morelia. Contribución a la geología e impacto ambiental de Morelia Vol.1, P. 01-13.
- Johnson, C.A., Harrison, C.G.A., 1989. Tectonics and Volcanism in Central Mexico: A Landsat Thematic Mapper Perspective. Remote Environ, Vol. (28), P. 273-286.

- Jefferson, D. O., 1993. Building the geological dimension. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, Vol. (26), P. 305-319.
- Langridge, R.M., Weldon, R.J., Moya, J.C., Suárez, G., 2000. Paleoseismology of the 1912 Acambay earthquake and the Acambay-Tixmadejé fault, Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal Geophysic Researsh*, Vol. 105 (B2), p. 3019-3037.
- Loughnan, F. C. 1969. *Chemical Weathering of the Silicate Minerals*, Elsevier, Amsterdam.
- López L.T., Pérez-R. M., Zepeda G. J., Aragón M.J., 2006. Comportamiento del contenido de agua en arcillas modificadas. Segundo Congreso Internacional de Ingeniería, UAQ.
- Luhr F., Simkin T., 1993, Paricutín, the Volcano born in a Mexican cornfield. *Geocience Press Phoenix, Arizona*, P.424
- Pradal, E., Robin, C., 1994. Long lived magmatic phases at Los Azufres volcanic center, México: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. (63), 201-215.
- Malhotra V. M. y Carino N. J., 2004, *Handbook on nondestructive testing of concrete*, CRC Press, Boca Raton, U.S.A. P. 189-205
- Martínez Nistal Á., Alonso Guervós M., 2013. Manual de usuario del programa Confocal Uniovi ImageJ (Versión 1.51), Servicios Científico-Técnicos Servicio de Microscopía Fotónica y Proceso de Imágenes, Universidad de Oviedo.
- MacKenzie W.S., Adams A.E. 1997. *Atlas en Color de Rocas y Minerales en Lámina Delgada*. Editorial MASSON, S.A. Barcelona España. ISBN 84-458-0425-1. P. 67-104
- Martínez-Reyes, J., Nieto-Samaniego, A.F., 1990. Efectos geológicos de la tectónica reciente en la parte central de México. UNAM, Instituto de Geología, *Revista 9* (1), P. 33- 50.
- Mennella L., Garduño V.H., Bonassi O., 2000. Fault-slip analysis in the basal units of the Mexican Volcanic Belt on the eastern flank of the Tzitzio Anticline, Michoacan Mexico. P. 237-246.
- Mendoza M., López E., Bocco G., 2004-A. Evaluación del efecto del cambio de cobertura vegetal y uso de suelo en el balance hídrico de grandes cuencas. En el caso de la cuenca de lago de Cuitzeo, Michoacán México. *Contribución a la geología e impacto ambiental de Morelia Vol.1*, P. 67-79.
- Mendoza M., López E., Bocco G., 2004-B. Erosión en la cuenca de Cuitzeo un análisis espacial a nivel regional. *Contribución a la geología e impacto ambiental de Morelia Vol.1*, P. 80-88.



- M.MMP 4 04 003/02 Manual de Método de Muestreo y Pruebas de Materiales. Materiales para Mezclas Asfálticas. Densidad Relativa de Pétreos para Mezclas Asfálticas. Densidad.
- Raith M.M., Raase P., Reinhardt J., 2012. Guía Para la Microscopía de minerales en Lámina Delgada. ISBN 978-3-00-040623-2.
- Navarrete M., Martínez W., Alonso E., Lara C., Bedolla A., Chávez H., Delgado D., Arteaga J. C., 2013. Caracterización de propiedades físico-mecánicas de rocas ígneas utilizadas en obras de infraestructura., Revista ALCONPAT, Vol. 3(2), Mayo - Agosto, P.133 - 143.
- Navarro Sánchez L.M., Martínez Molina W., Espinoza Mandujano A., 2011. Análisis de Materiales, Resistencia de Materiales, Tercera Edición, ISBN 978-970-703-551-5., UMSNH, FIC, Departamento de Materiales, Laboratorio de Resistencia de Materiales "Ing. Luís Silva Ruelas", Morelia, Michoacán México.
- Ostrooumov Fink M., Cappelletti P., Gennaro R., 2012, Mineralogical study of zeolite from New Mexican deposits (Cuitzeo area, Michoacan, Mexico). Applied Clay Science Vol. 55. P. 27–35.
- Pasquare G., Ferrari L., Garduno-Monroy V. H., Tibaldi A., Vezzoli I. 1991. Geology of the central sector of the Mexican Volcanic Belt, states of Guanajuato and Michoacan: Boulder, Geological Society of America, Map and Chart series, MCH072, 1 mapa con texto.
- Pola A., Crosta G.B., Fusi N., Castellanza N., 2014. General characterization of the mechanical behaviour of different volcanic rocks with respect to alteration; Engineering Geology 16 (9), P. 1–13.
- Price, R.H., Nimick, F.B., Connolly, J.R., Keil, K., Schwartz, B.M., Spence, S.J., 1985. Preliminary Characterization of the Petrologic, Bulk, and Mechanical Properties of a Lithophysal Zone within the Topopah Spring Member of the Paintbrush Tuff. Sandia National Labs Report, SAND84-0860.
- Pérez Esquivias H., Macías Vázquez, J.L., Garduño Monroy, V. H., Arce Saldaña J.L., García Tenorio F., Castro Govea R., Layer P., Saucedo Girón, R., Carlos Martínez, A., Jiménez Haro, Gabriel Valdés, Lorenzo Meriggi, Hernández, R., 2010. Estudio vulcanológico y estructural de la secuencia estratigráfica Mil Cumbres y del campo geotérmico de Los Azufres, Mich. Revista Geotermia Vol. 23(2).
- Quintero Legorreta, O., 2008., Análisis estructural de fallas potencialmente activas. Boletín de la sociedad geológica mexicana 4 (1), P. 2-6.
- Quintero Legorreta O., 2002. Análisis estructural de fallas potencialmente activas; Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, tomo IV (1), P. 1-11.

- Sandoz J.L.; 1996: Ultrasonics solid wood evaluation in industrial applications. In: Proc. 10th Int. Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Lausanne (CH), P. 16-28
- Shi-Liu y Jinyu-Xu, 2014. An experimental study on the physico-mechanical properties of two posthigh temperature rocks, *Engineering Geology*.
- Sonmez H., Gokceoglu C., Tuncay E., Medley E., Nefeslioglu HA., 2004. Relationships between volumetric block proportions and overall UCS of a volcanic Bimrock. *Felsbau Rock Soil Engineering* (5), P. 34–7.
- Sonmez H., Gokceoglu C., Tuncay E., Medley E., Nefeslioglu HA., 2006. Estimating the uniaxial compressive strength of a volcanic bimrock; *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* (43), P. 554–561.
- SUMA, 2002-2008. Ordenamientos ecológico territorial de la cuenca de Cuitzeo, Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente, Dirección de Ordenamiento y Gestión Ambiental, Departamento de Ordenamiento Ecológico Territorial, Morelia, Michoacán, México.
- Suter M., López-Martínez M., Quintero-Legorreta O., Carrillo- Martínez M., 2001. Quaternary intra-arc extension in the central Trans-Mexican volcanic belt: *Geological Society of America Bulletin*, (113), P.693-703.
- Suter, M., Quintero, O., López, M., Aguirre, G., Ferrar, E., 1995. The Acambay graben: Active intraarc extension in the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Tectonics* (14), P. 1245-1262.
- Tian H., Ziegler M., Kempka T., 2014. Physical and mechanical behavior of clay stone exposed to temperatures up to 1000. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* (70), P. 144–153.
- Vasanelli E., Sileo M., Calia A., Aiello M.A., 2013. Non-destructive techniques to assess mechanical and physical properties of soft calcarenitic stones; *Procedia Chemistry* (8), P. 35 – 44.
- Vishnu C.S., Mamtani M A., Arindam B., 2010. AMS, ultrasonic P-wave velocity and rock strength analysis in quartzites devoid of mesoscopic foliations – implications for rock mechanics studies.
- Vasconcelos G., Lourenco P.B., Alves C.A.S., Pamplona J., 2008. Ultrasonic evaluation of the physical and mechanical properties of granites., *Ultrasonics* (48), P. 453–466.
- Villaseñor Reyes C. I., 2014. Caracterización geomecánica y estudio del deslizamiento el campestre, Morelia, Michoacán. Tesis de maestría Instituto de Investigaciones

Metalúrgicas, departamento de geología y mineralogía, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia Michoacán.

Zhaoping-Meng y Jienan-Pan, 2007. Correlation between petrographic characteristics and failure duration in clastic rocks. *Engineering Geology* (89), P. 258–265.

## Anexos

### Anexo 1.

Tabla 19. Resumen petrográfico de las secciones delgadas realizadas en las muestras sometidas a pruebas físicas y mecánicas.

Unidad	Muestra	Coordenadas		Tipo de roca	Cristalinidad	Granularidad	Textura	Mineralogía	Observaciones
		x	y						
CZ-11	IGP	270279	2196516	Ignimbrita	Hipocristalina	Inequigranular	Pilotaxítica	Minerales= 10% Plg= 6% Qz=3% Ox = 1%	Fenocristales de cuarzo con forma subhedrale y anhedral, con una matriz compuesta por microlitos de Plagioclasas y óxidos
CZ-29	IE-A	274916	2200479	Ignimbrita	Hipocristalina	Inequigranular	Piroclástico fragmental	Minerales = 10% Plg=8% Px=1% Ox=0.5% Px=0.5%	Se observan plagioclasa angulares y con maclas, piroxenos muy pequeños algunos fragmentos de roca fracturada también se observan una matriz arcillosa
CZ-27	IR	270690	2199042	Ignimbrita	Hipocristalina	Inequigranular	Pilotaxítica a Eutaxítica	Minerales = 20% Plg = 15% Cuarzo= 3% Anfibol = 1% óxidos = 1%	Se observa algunos cristales de plagioclasa, cuarzos, fracturadas con forma subhedral y anhedral, la matriz de la roca es alterada medianamente soldada, también se observa líticos alterados y óxidos.
CZ-28	IH-T	270699	2191033	Ignimbrita	Hipocristalina	Inequigranular	Pilotaxítica a Eutaxítica	Minerales = 20% Plg = 15% Cuarzo= 2% Piroxenos = 2% óxidos = 1%	En la matriz de la roca se observan Fiammes, óxidos algunos fenocristales de plagioclasas, cuarzos con forma anhedral y subhedral, algunos de estos fenocristales presentan fracturas, la matriz es microlítica compuesto por plagioclasa y cuarzos.
CZ-30	IP	275325	2201275	Ignimbrita	Hipocristalina	Inequigranular	Piroclástico fragmental	Minerales = 15% Clorita =10% Plagioclasa = 4% Cuarzo = 0.5% Epidota = 0.5%	En la matriz se observa recristalización con algunos fenocristales de Plagioclasas Cuarzo, rocas alteradas y óxidos los fenocristales tienen forma nahedral y subhedral.

Anexo 2

Tabla 20. Resultados texturales obtenidos en imageJ.

Muestra	Áreas (cm <sup>2</sup> )			Porcentajes totales (%)		
	Total	Pómez	Lítico	Pómez	Lítico	Matriz
IE-A1	122.29	7.13	2.25	5.83	1.8	92.37
IE-A2	168.05	10.84	4.48	6.45	2.7	90.85
IE-A3	98.67	2.85	1.17	17.08	1.2	81.72
IE-A4	74.51	10.91	2.75	2.88	3.7	93.42
IE-A5	66.56	2.17	1.35	3.26	1.9	94.84
IE-A6	93.8	4.32	3.39	4.6	3.5	91.9
<b>Promedio</b>	<b>103.98</b>	<b>6.37</b>	<b>2.63</b>	<b>6.68</b>	<b>2.47</b>	<b>90.85</b>
IE-B1	110.42	7.13	3.48	6.46	3.15	90.39
IE-B2	124.06	10.84	1.88	8.74	1.52	89.75
IE-B3	49.07	2.85	3.44	5.81	7.01	87.18
IE-B4	78.97	10.91	4.61	13.82	5.84	80.35
IE-B6	101.2	4.32	8.3	4.27	8.2	87.53
<b>Promedio</b>	<b>92.74</b>	<b>7.21</b>	<b>4.34</b>	<b>7.82</b>	<b>5.14</b>	<b>87.04</b>
IH-A1	70.34	4.45	10.56	6.33	15.01	78.66
IH-A2	85.1	8.07	4.19	9.48	4.92	85.59
IH-A3	49.88	7.3	3.13	14.64	6.28	79.09
IH-A4	95.79	10.87	13.69	11.35	14.29	74.36
IH-A5	84.41	12.44	9.23	14.74	10.93	74.33
IH-A6	73.15	7.1	5.7	9.71	7.79	82.5
IH-B1	79.61	9.64	9.83	12.11	12.35	75.54
<b>Promedio</b>	<b>76.9</b>	<b>8.55</b>	<b>8.05</b>	<b>11.19</b>	<b>10.23</b>	<b>78.58</b>
IP-A1	161.22	49.14	5.76	30.48	3.57	65.94
IP-A2	106.23	30.54	6.93	28.75	6.52	64.73
IP-A3	87.01	34	4.14	39.08	4.76	56.17
IP-A4	150.94	50.21	9.71	33.26	6.43	60.3
IP-A6	51.11	23.16	3.08	45.31	6.03	48.66
<b>Promedio</b>	<b>111.3</b>	<b>37.41</b>	<b>5.92</b>	<b>35.38</b>	<b>5.46</b>	<b>59.16</b>

Tabla 21. Resultados de velocidades de ondas P y S, coeficiente de Poisson y módulo de Young dinámico.

Especimen	Velocidades de ondas en estado seco				Velocidades de ondas en estado húmedo			
	Vp (km/s)	Vs (Km/s)	V	E(GPa)	Vp (km/s)	Vs (Km/s)	V	E(GPa)
IE-A1	2.18	1.34	0.20	6.01	2.10	1.11	0.30	4.55
IE-A2	2.02	1.03	0.32	4.00	2.20	1.07	0.35	4.36
IE-A3	2.07	1.32	0.16	5.64	2.20	0.94	0.39	3.41
IE-A4	2.33	1.32	0.26	6.22	2.18	1.04	0.35	4.04
Promedio	<b>2.15</b>	<b>1.25</b>	<b>0.24</b>	<b>5.47</b>	<b>2.17</b>	<b>1.04</b>	<b>0.35</b>	<b>4.09</b>
IE-B1	2.06	1.23	0.23	5.51	1.89	0.94	0.34	3.33
IE-B2	2.03	1.29	0.16	5.67	1.94	1.00	0.32	3.95
IE-B3	1.98	1.24	0.18	4.94	1.88	0.97	0.32	3.62
IE-B4	1.89	1.17	0.19	4.72	1.78	0.88	0.34	2.80
IE-B5	2.13	1.30	0.20	5.84	2.02	1.00	0.34	3.86
Promedio	<b>2.02</b>	<b>1.25</b>	<b>0.19</b>	<b>5.33</b>	<b>1.90</b>	<b>0.96</b>	<b>0.33</b>	<b>3.51</b>
IH-T1	1.59	0.93	0.24	3.40	1.43	0.75	0.31	2.10
IH-T2	1.59	0.92	0.25	3.42	1.49	0.77	0.32	2.48
IH-T3	1.64	0.90	0.29	3.28	1.40	0.77	0.29	2.46
IH-T4	1.74	0.96	0.28	3.87	1.56	0.79	0.33	2.60
IH-T5	1.71	0.95	0.28	3.78	1.52	0.77	0.33	2.56
IH-T6	1.63	0.92	0.27	3.42	1.44	0.75	0.31	2.40
IH-T10	1.68	0.95	0.26	3.69	1.43	0.78	0.29	2.50
Promedio	<b>1.66</b>	<b>0.93</b>	<b>0.27</b>	<b>3.55</b>	<b>1.47</b>	<b>0.77</b>	<b>0.31</b>	<b>2.44</b>
IP1	1.58	0.81	0.32	2.62	1.10	0.58	0.30	1.43
IP3	1.45	0.75	0.32	2.27	1.05	0.52	0.34	1.11
IP6	1.42	0.83	0.23	2.65	0.99	0.51	0.34	1.13
Prom	<b>1.48</b>	<b>0.80</b>	<b>0.29</b>	<b>2.51</b>	<b>1.05</b>	<b>0.54</b>	<b>0.33</b>	<b>1.22</b>

Anexo 3

*Tabla 22. Resultado de capilaridad de la litofacie IE-B.*

Tiempo (min)	Masa (g)			
	IE-B7	IE-B8	IE-B9	IE-B10
0	38.3	11.46	11.5	10.66
2	40.15	12.3	12.06	11.81
5	41.71	12.92	12.55	12.25
10	42.16	12.98	12.83	12.41
15	42.94	13.16	12.97	12.67
30	43.88	13.27	13.15	12.66
60	44.64	13.37	13.27	12.71
90	44.84	13.37	13.41	12.74
120	44.88	13.44	13.49	12.8
150	45.01	13.46	13.42	12.85
180	44.95	13.39	13.43	12.77
210	45.05	13.4	13.48	12.87
435	45.22	13.48	13.47	12.85

*Tabla 23. Resultado de capilaridad de la litofacie IH-T.*

Tiempo (min)	Masa (g)									
	IH-T7	IH-T8	IH-T9	IH-T11	IH-T12	IH-T13	IH-T14	IH-T15	IH-T16	IH-T17
0	35.47	28.69	35.22	29.19	40.19	40.18	40.75	38.73	37.64	11.29
2	37.65	30.78	37.18	31.74	42.6	42.11	43.4	40.99	39.69	12.37
5	38.51	31.53	38.16	32.95	43.47	42.8	44.26	41.32	40.05	12.43
10	39.14	31.81	38.62	33.06	44.51	43.44	44.85	41.61	40.44	12.58
15	39.73	32.32	39.38	33.45	44.86	44.16	45.44	42.1	41.12	12.74
30	40.23	32.87	39.91	33.76	45.48	45.28	46.22	42.84	41.88	12.75
60	40.34	33.08	40.3	33.85	45.76	45.8	46.62	43.41	42.77	12.83
90	40.57	33.18	40.49	34.03	45.9	45.93	46.69	43.89	43.27	12.92
120	40.72	33.16	40.48	34	46.13	45.97	46.8	44.1	43.37	12.91
150	40.69	33.16	40.58	34.12	46.19	46.06	46.78	44.28	43.44	12.99
180	40.7	33.21	40.51	34	46.22	46.02	46.78	44.26	43.48	12.98
210	40.75	33.22	40.58	34.22	46.25	46.09	46.82	44.44	43.45	12.99
435	40.96	33.33	40.59	34.17	46.4	46.21	47.01	44.47	43.69	13.05

*Tabla 24. Resultado de capilaridad de la litofacie IP.*

Tiempo (min)	Masa (g)							
	IP5	IP7	IP8	IP9	IP10	IP11	IP12	IP13
0	31.04	28.04	31.46	37.37	39.32	38.06	31.48	10.27
2	37.19	32.73	36.8	44.37	45.19	43.9	37.99	11.34
5	36.94	32.89	37.13	44.23	45.57	44.12	38.19	12.25
10	36.85	32.8	36.98	44.22	45.55	44.09	38.03	12.26
15	36.97	32.9	37.05	44.29	45.61	44.25	37.93	12.34
30	36.93	32.95	37.2	44.38	45.59	44.24	37.88	12.43
60	37.13	33.11	37.2	44.46	45.71	44.32	38.09	12.38
90	37.2	33.37	37.31	44.72	45.88	44.44	38.47	12.42
120	37.33	33.31	37.35	44.76	45.92	44.6	38.53	12.51
150	37.28	33.39	37.67	44.79	46.04	44.53	38.41	12.42
180	37.29	33.28	37.47	44.76	46.01	44.6	38.16	12.48
210	37.33	33.32	37.5	44.92	46.04	44.62	37.13	12.49
435	37.46	33.47	37.74	45.17	46.27	44.84	37.28	12.58



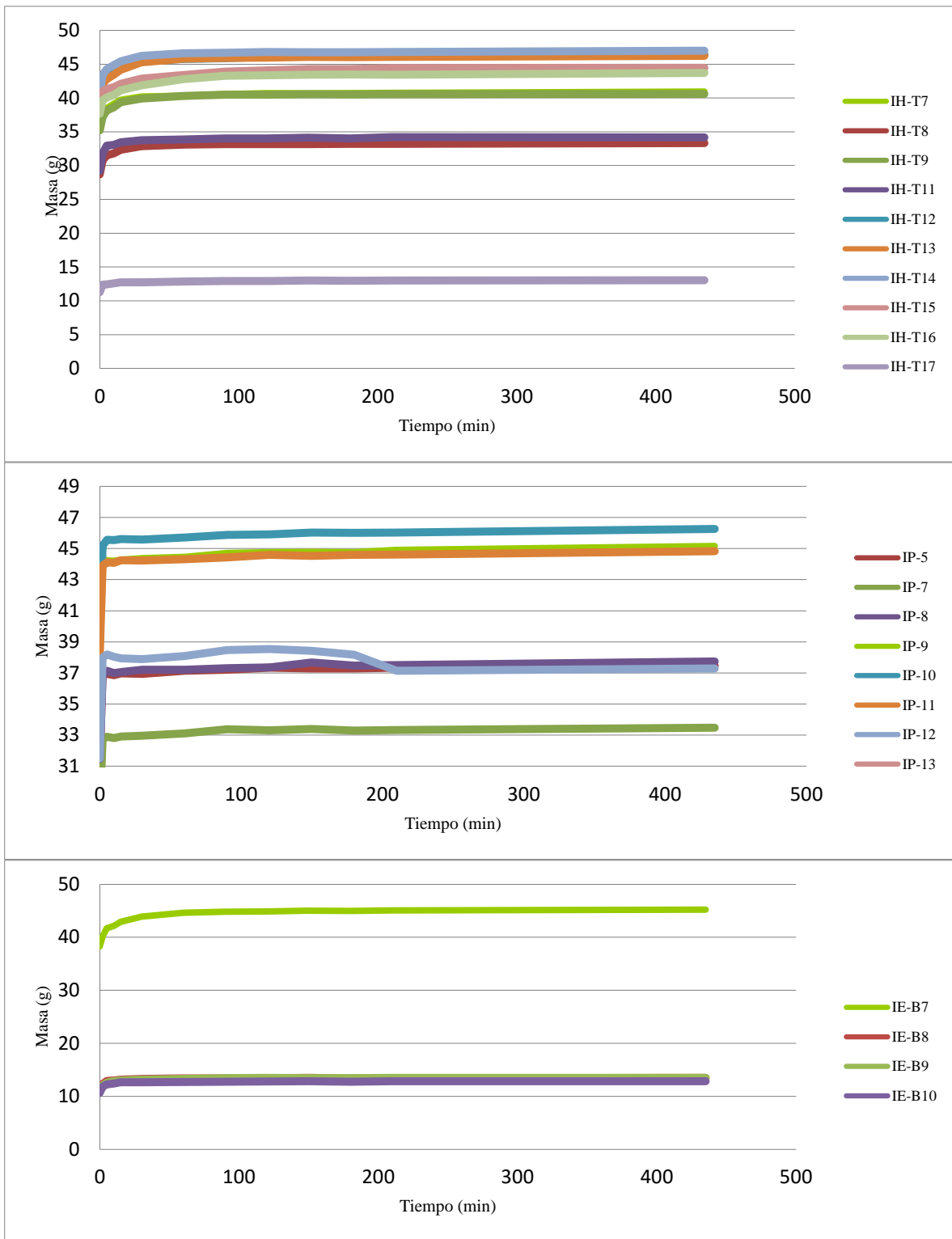


Figura 35. Gráficas de capilaridad de las litofacies (IH-T, IP, IE-B)