



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**Escuela Nacional de Estudios Superiores,
Unidad Morelia**

**Caracterización petrofísica de una de
las litofacies de la secuencia
ignimbrítica de Cuitzeo, Michoacán**

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN GEOCIENCIAS

P R E S E N T A

José Guadalupe Correa Gómez

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Antonio Pola Villaseñor

MORELIA, MICHOACÁN.

Marzo, 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES, UNIDAD MORELIA
SECRETARÍA GENERAL
SERVICIOS ESCOLARES

LIC. IVONNE RAMÍREZ WENCE
DIRECTORA
DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
PRESENTE

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 11** del **H. Consejo Técnico** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad Morelia celebrada el día **06 de noviembre del 2018**, acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional del alumno **José Guadalupe Correa Gómez** de la Licenciatura en **Geociencias**, con número de cuenta **413095969**, con el trabajo profesional titulado: "Caracterización petrofísica de una de las litofacies de la secuencia ignimbrítica de Cuitzeo, Michoacán.", bajo la dirección como **tutor** del Dr. Antonio Pola Villaseñor..

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

Presidente:	Dra. María del Sol Hernández Bernal
Vocal:	Dr. Gabriel Vázquez Castro
Secretario:	Dr. Antonio Pola Villaseñor
Suplente 1:	Dr. Luis Rafael Olmos Navarrete
Suplente 2:	Dr. Denis Ramón Avellán López

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Morelia, Michoacán a, 23 de noviembre del 2018.



DR. VÍCTOR HUGO ANAYA MUÑOZ
SECRETARIO GENERAL

Agradecimientos

Agradezco de todo corazón a la **Universidad Nacional Autónoma de México** por haberme permitido formarme en sus aulas dentro de **la Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia** y proporcionarme las herramientas, oportunidades y conocimientos necesarios para llegar a ser un geocientífico, así como el permitirme conocer a las muchas de las personas que han sido un ejemplo a seguir y sobre todo un gran apoyo a lo largo de mi caminar universitario.

Agradezco a mi asesor de tesis el **Dr. Antonio Pola Villaseñor** por dirigir esta tesis, brindarme su apoyo, su tiempo, su conocimiento y su confianza a lo largo de este trabajo de tesis.

Al **Proyecto PAPIIT (IA105016)** Estratigrafía general y caracterización geológica-geomecánica de flujos ignimbríticos de la zona de Cuitzeo y su relación con la inestabilidad de taludes, por brindarme el apoyo para realizar este trabajo de tesis.

Gracias a **la Unidad de petrofísica** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores - unidad Morelia y al **Laboratorio de petrografía** del Instituto de Geofísica Unidad Michoacán, UNAM Campus Morelia por permitirme la realización de las diferentes pruebas que involucro la realización de mi trabajo de tesis.

Gracias a mis sinodales, la **Dra. María del Sol Hernández, el Dr. Gabriel Vázquez, el Dr. Luis Olmos, el Dr. Denis Avellán y el Dr. Antonio Pola**, por sus valiosos comentarios, por sus sugerencias y por tomarse el tiempo de revisar este trabajo, que sin duda enriquecieron.

Agradezco al **Dr. José Luis Macías** por el apoyo, confianza y por la oportunidad de desenvolverme en una formación profesional.

Nuevamente agradezco a la **Dra. María del Sol Hernández** por ser un gran apoyo, por su confianza, por los consejos, los regaños, por la motivación transmitida y sobre todo gracias por ser una de las mejores personas que pude conocer durante mi vida académica. Además, por convertirse en un ejemplo de vida para mí.

Gracias al **M.I. Pedro Martín Pacheco Valdovinos** por convertirse en mi guía en el trabajo, por las enseñanzas en la vida, por hacerme ver mis errores, por ser como un padre para mí y muchas gracias por la amistad brindada. Además, por la motivación y el no dejarme vencer cuando tuve mis problemas existenciales.

Dedicatoria

Esta tesis está dedicada a la memoria de mi abuelita **Reynalda López**, quien me animo a seguir adelante, por esas tardes donde escuchábamos la radio mientras me enseñaba las matemáticas básicas, por su apoyo en todo lo que hacía, por sus cuidados en mis momentos de travesuras, por su amor y por ser el pilar más importante en mi vida.

A mi madre **Crecenciana Gómez** por todo el esfuerzo, motivación, cariño, amistad y por el gran apoyo que ha sido y será a lo largo de toda mi vida.

A **Coni** por todo el apoyo brindado, por esos mensajes de motivación, por tener confianza en mí.

A mi tío **J. Guadalupe Gómez** por apoyarme en los momentos difíciles, por comprenderme y por darme la motivación que a veces sentía perdida.

Agradezco a **Samira Torres** por su apoyo, sus consejos, por los momentos de diversión y de aventura, sobre todo por su amistad brindada a lo largo de todo este tiempo.

Muchas gracias a **Laura, Susana, Silver, Guillermo y Gabriela** por su apoyo, sus consejos, su motivación y sus enseñanzas a lo largo de mi estadía universitaria.

Muchas gracias a mis amigos y compañeros de carrera, **Vane, Liz, Homero, Dani, Paulina, Luz y Andrés**, por los momentos de diversión, por la motivación, por sus consejos, por esos momentos alegres, tristes, desafortunados y sobre todo por brindarme su apoyo a lo largo de toda la carrera.

Quiero agradecer a mis amigos y compañeros de laboratorio, **Itzayana Torres, Ángel Ramírez, Hugo Sereno y Carmen Ávila**, por su apoyo, por los momentos de diversión, por sus conocimientos y por su motivación a seguir adelante.

Gracias a mis compañeros y amigos, **Miguel López, Anna Aguilera, Jesús García, Guillermo García, Luis Miranda, Omar Viva, Anacelia Rodríguez, Carlos Rodríguez, Tomas Alegre, Josue Plaza y Jonatan Rosales** por esos momentos de diversión, de estrés, y sobre todo por estar allí en el momento que necesitaba unas buenas risas.

Agradezco a mí familia por el apoyo brindado, por su confianza, por su motivación y por su cariño brindado durante toda la vida.

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

Índice

Resumen

Abstract

1. Introducción	1
1.1 Justificación	4
1.2 Objetivos.....	5
2. Marco geológico estructural general.....	6
Localización.....	9
3. Metodología.....	13
3.1 Trabajo de gabinete	13
Mapa base	14
3.2 Trabajo de Campo	15
3.3 Trabajo de Laboratorio.....	16
3.3.1 Corte y preparación de especímenes.....	17
3.3.2 Caracterización Petrográfica.....	19
Descripción Macroscópica.....	20
Descripción microscópica.....	20
Elaboración de láminas delgadas.....	21
3.3.3 Caracterización Física	23
Estudios texturales con base en análisis de imágenes.....	23
Densidad.....	26
Método del picnómetro de helio.....	26
Porosidad	28
Método de saturación de Barnes a presión atmosférica.....	29
Método de saturación de Barnes a vacío.....	31
Método de inyección de mercurio.....	33
3.3.4 Caracterización Hídrica.....	35
Capilaridad	35
Evaporación.....	37
Permeabilidad.....	38

4.	Resultados y discusiones	41
4.1	Descripción de campo	41
4.2	Caracterización Petrográfica.....	49
4.3	Caracterización Física	55
	Estudio textural con base en análisis de imágenes (estereología).....	55
	Densidad por medio de picnómetro de helio	57
	Porosidad Efectiva.....	58
	Método de saturación de Barnes a presión atmosférica	59
	Método de saturación de Barnes al vacío	59
	Porosimetría por inclusión de mercurio.....	60
	Porosidad Total	62
	Porosidad Cerrada.....	63
4.4	Caracterización Hídrica.....	64
	Capilaridad	64
	Evaporación	66
	Permeabilidad.....	68
5.	Conclusiones.....	72
	Anexo 1: Dimensiones, peso y volumen de especímenes cilíndricos y cúbicos. ...	80
	Anexo 2: Mapa del menú del picnómetro	81
	Anexo 3: Tablas de porcentaje de los diferentes componentes identificados en los especímenes	82
	Anexo 4: Reportes del Picnómetro	84
	Anexo 5: Reportes del Porosímetro	91
	Anexo 6: Tablas y Gráficas de Capilaridad.....	120
	Anexo 7: Tabla y Gráficas de Evaporación	128
	Anexo 8: Tabla y gráficas de Permeabilidad	136

Lista de Figuras

- Fig. 1 Localización división y distribución de la FVTM (polígono gris). SOc: Sector Occidental, SC: Sector Central, SO: Sector Oriental, Tep: Tepic, Gdl: Guadalajara, Mor: Morelia, Qro: Queretaro, CDMX: Ciudad de México, Pue: Puebla..... 7
- Fig. 2 a) Mapa ilustrativo de la porción central de la república mexicana y ubicación de las provincias fisiográfica que rodean la FVTM, línea verde punteada representa la delimitación de la macro-cuenca Lerma, construido con base en imágenes landsat. b) mapa ilustrativo de la región de Cuitzeo donde se incluyen las zonas urbanas cercanas a la zona de estudio. c) delimitación de la zona de estudio y visualización de las vías de acceso. SMOc: Sierra Madre Occidental. MC: Mesa Central. SMOr: Sierra Madre Oriental. LLCP: Llanura Costera del Pacifico. LLCGn: Llanura Costera del Golfo norte SMS: Sierra Madre del Sur. FVTM: Faja Volcánica Trans-Mexicana. LLCGs: Llanura Costera del Golfo sur. SAM: San Agustín del Maíz. 10
- Fig. 3 Mapa geológico de la zona sur del lago de Cuitzeo (tomado de Trujillo-Hernández), el recuadro amarillo representa la delimitación de la zona de estudio de este trabajo de tesis. 12
- Fig. 4 Mapa ilustrativo de la zona de estudios construido con base en imágenes landsat. a) distribución de las 14 estaciones geológicas. b) y c) acercamiento de las estaciones geológicas para una mejor visualización. 16
- Fig. 5 Especímenes cortados para las diferentes pruebas. a) especímenes cúbicos y rectángulas. b) especímenes cilíndricos para permeabilidad. c) Secciones planas. d) Especímenes cilíndricos para picnometría y porosimetría. e) Testigos de rocas para laminas delgadas..... 18
- Fig. 6 Equipo de corte y preparación de muestras. a) rectificadora de especímenes (55-C0201/3). b) cortadora de testigos y esmeriladora (45-D0536/AZ). c) nucleadora o extractora de núcleos (C0330/Z). d) sierra de banco (55-C02010/DZ)..... 19
- Fig. 7 Microscopio marca OPTIKA B-1000OPOL..... 21
- Fig. 8 Equipo de corte y preparación de secciones delgadas a) Cortadora de mesa Powerfeed Trim Saw 10” /254 mm, b) Ultrasonido Fisher Scientific, c) Cortadora de precisión Struers Accutom-50, d) Plancha Isotemp..... 23

Fig. 9 Muestra de roca Cut-07-2 escaneada de 9 x 9 cm (600 ppp). b) matriz de roca separada de elementos. c) Elementos que constituyen la muestra.	25
Fig. 10 Interfaz del software Image J y visualización de una imagen (clasificada).	25
Fig. 11 a) Picnómetro de Helio modelo Ultrapyc 1200e. b) válvulas de presión. c) entradas del equipo para conexiones externas (por ejemplo, puertos USB).....	28
Fig. 12 Especímenes cúbicos y rectangulares de la muestra de roca Cut-07. a) y b) especímenes antes de que se realizara la prueba. c) y d) especímenes a mitad de la saturación para prueba de porosidad a presión atmosférica. e) y f) especímenes totalmente saturados y en espera para la medición.....	30
Fig. 13 Cámara de vacío Plas Labs (800-VAC/S).....	32
Fig. 14 Desarrollo de la prueba de saturación de Barnes a vacío. a) colocación de las muestras cúbicas dentro de la cámara de vacío. b) extracción del aire que se encuentra dentro de la cámara. c) introducción de agua a la cámara de vacío. d) llenado de la cámara manteniendo la presión de vacío. e) muestras después de 24 h de estar saturadas. f) muestra donde se observa las burbujas de aire que son extraídas durante el vacío.....	33
Fig. 15 Porosímetro de mercurio marca Quantachrome modelo Poremaster® 60. a) vista general del equipo. b) vista de las cámaras de vacío de baja presión. c) accesorios del equipo (por ejemplo, macro celdas).	35
Fig. 16 Especímenes cúbicos de la muestra de roca Cut-07. a) especímenes antes de que se realizara la prueba de capilaridad. b) y c) especímenes después de 30 min de haber iniciado la prueba. d) y e) especímenes después de 144 hrs de haber iniciado la prueba.	37
Fig. 17 Especímenes cúbicos. a) especímenes saturados en agua destilada. b) especímenes a mitad de la prueba de evaporación.	38
Fig. 18 a) Permeámetro de gas GasPermProd modelo Ap-123-002-0. b) Interfaz del programa <i>GasPerm Prod</i>	40
Fig. 19 Estación geológica Cut-01. Unidad 1: Basalto masivo y fracturado con coloración gris al fresco y tonos verde a la intemperie. Unidad 2: Depósito aluvial conformado por material matriz-soportados presenta un color café. Unidad 3: Capa de suelo de color café obscuro.....	42

Fig. 20 Estación geológica Cut-03. Unidad 1: Material brechoso masivo constituido por bloques angulosos a subangulosos de color grisáceo. Unidad 2: Depósito aluvial con una matriz de color cafe oscuro y fragmentos subredondeados a subangulosos. Unidad 3: Capa de suelo de color oscuro (por humedad) con presencia de fragmentos de roca.	43
Fig. 21 Estación geológica Cut-05. Unidad 1: Ignimbrita masiva de color cafe, deleznable y alterada. Unidad 2: Material brechoso masivo con bloques angulosos a subangulosos y su coloración es gris oscuro y verde.	44
Fig. 22 Estación geológica Cut-07. a) afloramiento de donde se extrajo la ignimbrita base de este trabajo. b) visualización del contacto entre la ignimbrita y la lava. Unidad 1: Ignimbrita color amarillo-naranja claro, con textura piroclástica. Unidad 2: Lava de textura afanítica levemente fracturada.	45
Fig. 23 Estación geológica Cut-08. Delimitación de la cuña y material de roca caído visibles en el lugar.	46
Fig. 24 Estación geológica Cut-10. Unidad 1: Ignimbrita de color naranja- rosáceo alterada. Unidad 2: Ignimbrita masiva de color blanco, constituida por fragmentos líticos. Unidad 3: Roca afanítica de color rojizo-morado, presenta estratificación. Unidad 4: Roca estratificada de color café -rosáceo. Unidad 5: Roca estratificada color rojizo. Unidad 6: Roca masiva fracturada de color café rosáceo. Unidad 7: Roca estratificada de color café claro. Unidad 8: Roca masiva no consolidada de color café, constituida por clastos.	47
Fig. 25 Estación geológica Cut-12. Falla normal con dirección NW-SE. Ignimbrita fallada que presenta tonalidad rosácea en zonas de menor alteración y en zonas de mayor alteración presenta un color negro verdoso.	48
Fig. 26 Estación geológica Cut-13. Roca fracturada con variaciones de color, textura piroclástica, presenta al menos dos tipos de fragmentos de líticos y se observan caídos de rocas.	49
Fig. 27 Secciones planas donde se aprecia la orientación y la variación en el tamaño de las <i>fiames</i> , las <i>fiames</i> nos permiten inferir la dirección del depósito, así como el grado de aplastamiento.	50

- Fig. 28 Textura de la muestra de roca Cut-07. a) detalle de los elementos que componen la muestra. b) detalle de las pómez alteradas y de las pómez no alteradas. c) variación de la irregularidad de los líticos d) variación entre los líticos de los líticos grises. Se muestra la forma equidimensional. 52
- Fig. 29 Las imágenes con número 1 son imágenes de láminas delgadas en polarización cruzada y con número 2 son imágenes de láminas en luz paralela., a1 y a2) lítico con textura microlítica con presencia de óxidos y plagioclasas. b1 y b2) lítico rojo con diferencias texturales: Derecha Textura microlítica e izquierda textura afanítica con recristalización de plagioclasa c1 y c2) lítico rojo, sobre un lítico café, presencia de plagioclasas con formas anhedral a subhedral. Abreviaciones: lítico café (lc), óxidos (ox), plagioclasas (Pl), vesícula (vs), recristalización de plagioclasa (rPl). 53
- Fig. 30 Imágenes de láminas delgadas de la muestra Cut-07 donde se observa la porosidad presente en la misma. a) vista en polarización cruzada donde se muestran los diferentes tamaños de poros visibles en lámina delgada. b) vista en luz paralela donde se observan fisuras que conectan diferentes porosos: c) visualización de vesícula irregular que está conectada con otra por un pequeño tramo. d) vista en polarización cruzada donde se observan poros de diferentes tamaños y algunos alargados. e) visualización de las diferentes formas de los poros visibles en lámina. f) conexión de diferentes poros por medio de una fractura. Abreviaciones: lítico rojo (lr), óxidos (ox), plagioclasas (Pl), vesícula (vs), recristalización de plagioclasa (rPl), Matriz (mt), fractura (f). 54
- Fig. 31 Clasificación de la roca Cut-07 por medio del programa ImageJ y Photoshop. a) Muestra de roca Cut-07. b) Matriz de roca. c) Líticos presentes en la sección de roca. d) Fiamas donde se observa una orientación. e) Pómez encontradas en la sección de roca. 56
- Fig. 32 Representación gráfica de la porosidad por inclusión de mercurio de la muestra Cut-07. a) Gráfica del espécimen 1. b) Gráfica del espécimen 2. c) Gráfica del espécimen 3. 61
- Fig. 33 a) Especímenes de roca cilíndricas. b) especímenes después de la prueba de porosimetría, es visible el mercurio en ellas, los especímenes fueron entregados a una compañía que se encarga del manejo de residuos radioactivos..... 62

Fig. 34 Gráfica de capilaridad que ilustra la variación de la masa absorbida respecto al tiempo. Los especímenes fueron comparados con una riolita alterada y otra fracturada. La primera pendiente (zona verde) representa una absorción rápida de agua en muy poco tiempo, segunda pendiente (zona azul) representa una absorción lenta en un tiempo más prolongado, casi hasta llegar al punto de la saturación.	65
Fig. 35 Representación gráfica de la prueba de evaporación de los especímenes de la muestra Cut-07, rectángulo morado zona del contenido crítico de agua.	67
Fig. 36 Comparación de la permeabilidad de diferentes rocas incluida la ignimbrita en estudio, Basalto: Roca de color negro-grisáceo, su matriz presenta una textura porfídica, se observan pequeñas fracturas y vesículas (algunas rellenas de sílice). Caliza: Roca de color gris oscuro, de textura mudstone con poca alteración y fracturas rellenas de calcita. Pómez: Roca masiva de color gris amarillento y naranja pálido, con textura porfídica, presenta vesículas de tamaño menor a 7 mm. Riolita altera: roca de color blanco con manchas grises, con textura afanítica con fenocristales alterados y con algunas fracturas.	70
Fig. 37 Datos de permeabilidad medidos en laboratorio comparados con la porosidad efectiva de distintas rocas volcánicas obtenidos de bibliografía. Modificado de Heap et al., 2016.	71

Lista de Tablas

Tabla 1 puntos limitantes de la zona de estudio en coordenadas UTM.	9
Tabla 2 Resumen del número y dimensiones de especímenes para pruebas de laboratorio.	17
Tabla 3 Porcentajes de los componentes para el 100% de la muestra.	56
Tabla 4. Porcentaje del tamaño de Fiamas, Líticos y Pómez que presenta la muestra de roca Cut-07. P= guijarros (>4 mm). Gr= granulo (4-2 mm). CoS= arena gruesa (2-0.5 mm). MeS= arena media (0.5-0.25 mm). FiS= Arena fina (0.25-0.06 mm). Si= limo (< 0.06 mm).....	57
Tabla 5 Datos resumidos de la prueba de picnometría de la muestra Cut- 07. Vol. Prom: volumen promedio, ρ -prom: Densidad promedio.	58

Tabla 6 Porcentaje de la porosidad a presión atmosférica de los especímenes seleccionados de la muestra Cut-07. md: masa seca del espécimen. ms: masa saturada del espécimen. C_{abs} : coeficiente de absorción. mh: masa hidrostática. η_e : porosidad accesible.....	59
Tabla 7 Porcentaje de la porosidad a vacío de los especímenes seleccionados de la muestra Cut-07. Md: masa seca del espécimen. Ms: masa saturada del espécimen. C_{abs} : coeficiente de absorción. Mh: masa hidrostática. pa: densidad aparente. pr: densidad real. η_e : porosidad accesible.	60
Tabla 8 frecuencia en porcentaje de los diferentes radios de poros de los especímenes de la muestra Cut-07	61
Tabla 9 Porosidad total de los especímenes. ρ_a es la densidad aparente. ρ_r es la densidad real. η_T es la porosidad total.	63
Tabla 10 Porosidad cerrada de las muestras de roca Cut-07. η_e es la porosidad efectiva. η_T es la porosidad total. η_c es la porosidad cerrada.	64
Tabla 11 Coeficiente capilar (C_c) de las dos pendientes presentes en cada espécimen.....	66
Tabla 12 Contenido crítico de los diferentes especímenes de la muestra Cut-07 donde se representa el tiempo crítico y el grado de evaporación.	67
Tabla 13 Permeabilidad promedio e individual de los diferentes especímenes en mD y m ² 71	

Resumen

La caracterización petrofísica de cualquier unidad de roca es fundamental en la construcción de modelos (conceptual, numérico, físico) geológicos. En particular, las propiedades petrofísicas en ambientes volcánicos son muy difíciles de evaluar ya que cambian completamente en poca distancia además de ser muy heterogéneas y anisótropas. En general, el estudio de la heterogeneidad y anisotropía de los depósitos se ve reflejada en la implementación de una gran diversidad y cantidad de pruebas de laboratorio.

En este trabajo se describen los resultados petrográficos, físicos e hídricos de una de las litofacies correspondientes a un flujo piroclástico, el cual pertenece a la Secuencia de San Agustín del Maíz, en el margen sur del lago de Cuitzeo. Entre otras cosas, la permeabilidad se ha caracterizado mediante el uso de un permeámetro de intrusión de gas, los resultados se han comparado globalmente. El porcentaje de poros y sistema poroso se ha caracterizado con base en la implementación de diferentes métodos, se resalta el uso del porosímetro de intrusión de mercurio que además de dar resultados de porcentaje, nos da resultados de tamaño de poros y distribución.

Se resalta la relación directa que existe entre la porosidad y microfracturamiento con las propiedades hídricas (p. ej. absorción). La capilaridad está directamente relacionada con el tamaño de poros, que en general se concentran en un grupo que va de 0.1 a 1 μm . Finalmente, el análisis textural sugiere que la permeabilidad y porosidad es controlada principalmente por la proporción de elementos (p. ej. pómez, fiames, líticos) con respecto a la matriz.

Abstract

The petrophysical characterization of rocks is highly important in the construction of any geological model (e.g. conceptual, numeric and physical). Specifically, petrophysical features on volcanic environment are so difficult to evaluate, due to the big changes from heterogeneous to anisotropic masses in short distances. In general, the study of heterogeneity and anisotropy's deposits is reflected in the implementation many specific laboratory tests. This work describes the petrographic, physical and hydrological results taken from one of the lithofacies of San Agustín del Maíz, located in the south shore of the Cuitzeo Lake; where there is found a pyroclastic flow. Among other things, permeability has been measured with the gas intrusion technique and results have been compared with others around the world. Porosity and porous system have been characterized by using several methods such as mercury intrusion, not only does it give us information about the porosity, but it also give us the porous size and the size distribution. Results indicate a direct relation between porosity, micro-fracturing and hydrological properties. (e.g. absorption). In addition, capillarity is directly related with porous size, which is concentrated in a range of 0.1-1 μm . In conclusion, textural analysis suggests that permeability and porosity are mainly controlled by the proportions of pumice, fiammes and lithic, according to the rock matrix.

1. Introducción

Las erupciones volcánicas se consideran unas de las exhibiciones más poderosas e impresionantes de la naturaleza. La vulcanología es la rama de la geología que estudia el origen y ascenso de los magmas a través del manto y la corteza, así como las erupciones en la superficie del planeta. De manera detallada, la vulcanología se encarga de estudiar la evolución física y química de los magmas, incluyendo su ascenso, tasa eruptiva, dinámica de transporte de las erupciones, y la formación de los depósitos volcánicos en la superficie del planeta (Sigurdsson, 2015). En la Vulcanología, como en muchas de las ramas de la geología, es necesario la descripción de la estructura, textura y composición de los depósitos, que conlleva a la mejor comprensión de los mecanismos asociados a los eventos que intervienen en la dinámica de transporte y deposición (Murcia et al., 2013). Debido a las formas como se transportan y depositan algunas secuencias volcánicas en superficie, particularmente las secuencias piroclásticas, guardan una estrecha relación a las formas como se transportan y depositan las secuencias sedimentarias, es la razón por la que, la metodología de levantamiento estratigráfico de estudio en ambos ambientes tanto volcánico y sedimentario es muy similar, ya que en ambos casos existe el mismo propósito, el de establecer correlaciones y secuencias temporales verticales. Además de determinar cambios de facies, tales como en el caso de los depósitos volcanoclásticos, los que se describen siguiendo los procedimientos sedimentológicos tradicionales considerando la identificación de capas, geometría, espesor, continuidad de los contactos, estructura, estratificación, gradación, estructuras sedimentarias que indiquen dirección de transporte o cualquier característica sedimentaria relevante (Fisher y Schmincke, 1984). La observación de los procesos volcánicos explosivos y la evolución de la vulcanología como disciplina han permitido diferenciar diferentes tipos de depósitos volcanoclásticos con base en su origen, además de las implicaciones directas con respecto a la dinámica de transporte de las partículas (Murcia et al., 2013), teniendo como resultado depósitos de caída piroclástica, corrientes de densidad piroclásticas, avalancha de escombros, esto por mencionar algunos.

Las corrientes de densidad piroclásticas (*PDC's*, por su siglas en inglés) forman parte de los fenómenos volcánicos más peligrosos para las poblaciones que viven cerca a edificios volcánicos (Dufek et al., 2015). Las *PDC's* son mezclas no homogéneas de partículas volcánicas y gases que fluyen de acuerdo con su densidad relativa al fluido circundante

(generalmente la atmósfera) y principalmente debido a la gravedad de la Tierra. Pueden originarse de varias maneras, destacando el colapso de una columna eruptiva formada por la desintegración explosiva de magma y roca en un conducto volcánico. Las *PDC*'s en general se han clasificado de acuerdo con la litología y estructura sedimentaria, como ignimbritas, flujos de bloques y cenizas (Schmid, 1981).

Los depósitos ignimbríticos están formados principalmente por fragmentos de pómez, líticos accidentales arrancados del sustrato rocoso y ceniza (que en su mayoría son cristales sueltos, pómez, esquirlas y líticos accidentales), que son emplazados como un flujo concentrado de partículas calientes y secos. A su vez son depósitos de gran volumen que tiende a modificar la paleotopografía preexistente registrando una sedimentación rápida a partir de las *PDC*'s catastróficas (Moon, 1993; Walker, 1983).

La modelación análoga y experimental del comportamiento de las *PDC*'s y su sedimentación han complementado recientemente el trabajo de campo, para entender dichos procesos. Ahora existe una gran cantidad de esquemas de clasificación de ignimbritas, modelos de emplazamiento e interpretaciones de depósitos (por ejemplo Gravley et al., 2016), generando desconcierto acerca de cuál es la verdadera clasificación (por ejemplo; Schmid, 1981 Walker, 1983; Dufek et al., 2015). Por lo anterior, es oportuno hacer un balance, sintetizar la comprensión moderna y, en particular, considerar cómo las investigaciones de campo de las litofacies ignimbríticas pueden ser utilizadas tanto para inferir la dinámica de transporte de las partículas que conforman dicho depósito, como para restringir o probar los diversos modelos. Una mirada al emplazamiento de la ignimbrita es aún más importante con el reconocimiento de que muchas ignimbritas pueden relacionarse con erupciones con magnitudes suficientemente grandes para modificar momentáneamente el clima global. Es importante considerar cómo las investigaciones de campo de las litofacies de ignimbrita se pueden usar tanto para inferir el comportamiento real de las corrientes piroclásticas de densidad como para restringir o probar los diversos modelos. El término litofacie se refiere al carácter de un depósito, o parte de un depósito, que es distinto de acuerdo con la combinación de la estratificación, tamaño del grano, forma de grano, clasificación, fabrica y composición (Branney y Kokelaar, 2002).

El estudio de las propiedades petrofísicas en rocas volcánicas resulta importante para entender el sistema poroso que presentan las rocas. Así como para interpretar el proceso que

le dio origen a dicha porosidad. El estudio de las propiedades petrofísicas de los materiales rocosos constituye un reconocido campo de investigación básica y aplicada. Durante las últimas décadas dichos estudios han experimentado un importante desarrollo, impulsados por la prospección geológica - geofísica de los recursos naturales principalmente en la exploración de petróleo y para la caracterización de los materiales rocosos en sitios donde se albergarán residuos radioactivos de alta actividad (Montoto y Esbert, 1999). Los materiales rocosos, muestran propiedades físicas muy diferentes (estado de alteración porosidad, entre otras), las cuales se determinan a partir de ensayos normalizados y se expresan mediante parámetros cuantificables.

En particular, el estudio de las características petrofísicas se basa en pruebas de laboratorio (por ejemplo, densidad, transmisión de onda P y S, porosidad y capilaridad). La interpretación petrofísica no siempre resulta fácil, debido a que las rocas son poco homogéneas, polifásicas y con abundantes discontinuidades (Montoto y Esbert, 1999). En particular los depósitos ignimbríticos han sido siempre difíciles de evaluar debido a las características geométricas de los fragmentos, así como por su heterogeneidad, anisotropía, grado de fracturamiento y grado de soldamiento. Algunos trabajos evidencian la importancia de conocer las propiedades petrofísicas de los materiales rocosos, por ejemplo, Sousa et al. (2005) describieron la influencia de la porosidad y del fracturamiento en el comportamiento de las ondas P y S, y los relaciona con su comportamiento mecánico con pruebas uniaxiales, en diferentes especímenes extraídos de rocas graníticas. Alonso et al., (1987) realizaron una caracterización del sistema poroso de ocho muestras de rocas carbonatadas, analizándose la estrecha relación del sistema poroso con sus características petrográficas, tales como su mineralogía y grado de cristalinidad. Pola et al. (2016) caracterizaron el comportamiento físico, mecánico e hídrico de diferentes litofacies en ignimbritas donde observaron que las propiedades petrofísicas muestran que existe una dependencia de las características textural particularmente debido a la presencia de fragmentos de pómez. Esbert et al., (2008) resaltan la importancia de la petrofísica en la interpretación del deterioro y la conservación de la piedra de edificación, en especial en la fase de aplicación de productos de tratamiento ya que es donde ocurre una variación de algunas propiedades (por ejemplo, ángulo de contacto y la permeabilidad al vapor de agua).

De todos los afloramientos de ignimbritas de la zona en estudio se eligió el afloramiento Cut-07 como el más apropiado para la obtención de las muestras de roca, estas muestras de roca fueron utilizadas para la realización de las diferentes pruebas que se mencionan en este trabajo de tesis.

1.1 Justificación

La petrofísica es una especialidad que se vincula con los procesos de la ingeniería en petróleo, geofísica y geología, la cual determina cuantitativamente las propiedades físicas (por ejemplo, porosidad, densidad) y texturales de las rocas, especialmente la distribución de los poros. En la geotecnia, la importancia de conocer las propiedades físicas de las rocas radica en la aplicación y/o uso que se le vaya a dar a las rocas (esto en conjunto con la mecánica de rocas), ya que es el material sobre el que se realiza obras de ingeniería civil (p. ej. edificios, túneles, presas, carreteras). La petrofísica aplicada en cuestiones geotécnicas para ser más específicos en la estabilidad de taludes es muy poca utilizada, lo que conlleva a que algunas obras viales presenten desprendimientos de bloques de rocas lo que genera un riesgo para la población. En el caso de la geotermia el conocer las propiedades petrofísicas (porosidad y sistema poroso) y en relación con las propiedades hídricas (permeabilidad) entre otras ayudan a comprender como será la transmisión del fluido (agua y vapor de agua) a través de la roca, así como para estimar el potencial energético de cada sitio. Para el uso en el patrimonio arquitectónico; las propiedades petrofísicas ayudan a conocer como es el comportamiento de las edificaciones y/o monumentos antes, durante y después de algún trabajo de restauración y cómo se comporta el material respecto al tiempo y a la intemperie.

La zona de estudio es un lugar adecuado debido a que ya han ocurrido algunos desprendimientos de rocas y se encuentra constituida por unidades volcánicas resaltando los productos piroclásticos, estos productos piroclásticos son poco estudiados debido a su comportamiento vulcano-sedimentario lo que hace de ellos un excelente material geológico para estudiar, así como la poca información que existe sobre la caracterización de propiedades petrofísicas de la zona, además de que es considerado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) un lugar de interés en energía geotérmica.

Se eligió un flujo piroclástico (ignimbrita) que pertenece a la secuencia de San Agustín del Maíz debido al grado de soldamiento, grado de alteración, variaciones en el contenido y

tamaño de sus componentes (fiames, pómez y lítico) y a su importancia para la energía geotérmica.

Además de lo anterior este trabajo de tesis prevé formar parte de una base de datos la cual será de utilidad para la evaluación preliminar de diferentes fenómenos geológicos, tales como la estabilidad de laderas, distribución de agua, calor a través del medio rocoso y entender los procesos volcánicos involucrados.

1.2 Objetivos

Este trabajo de investigación tiene como objetivo principal hacer una caracterización petrofísica de una litofacie de la secuencia de flujos ignimbríticos de Cuitzeo, teniendo un enfoque en una litofacie correspondientes a un flujo piroclástico que pertenece a la secuencia de San Agustín del Maíz.

Objetivos particulares

- Describir de forma general la ignimbrita en estudio mediante descripciones macroscópicas y microscópicas (petrografía) con la finalidad de conocer las variaciones que puedan existir tanto en muestra de mano como en lámina delgada.
- Caracterizar el sistema poroso (porcentaje, tamaño, forma y distribución de los poros) con base en pruebas de laboratorio para conocer como es la variación entre una prueba de obtención de porosidad, así como conocer el comportamiento y las familias principales de poros.
- Identificar relaciones directas entre las diferentes propiedades físicas de la roca en estudio con base en el análisis de datos con la finalidad de saber cómo una propiedad puede afectar a las demás propiedades.
- Enriquecer la base de datos de pruebas de laboratorio de la Unidad de Petrofísica con la finalidad de ser utilizados para la evaluación preliminar de diferentes fenómenos geológicos.

2. Marco geológico estructural general

De manera general y de acuerdo con varios autores (por ejemplo Martínez & Nieto-Samaniego, 1990; Garduño-Monroy & Gutiérrez-Negrín, 1992; Ferrari, 2000; García-Palomo et al., 2008; Pérez-López et al., 2011b; Gómez-Vasconcelos, 2012) la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM), es un arco magmático continental relacionado con la subducción de las placas Cocos y Rivera que subducen por debajo de la placa Norteamericana a lo largo de la Trinchera Mesoamericana. La FVTM está conformada por más de 8,000 estructuras, tales como estratovolcanes, campos volcánicos monogenéticos (por ejemplo campo volcánicos Michoacán – Guanajuato y Chichinautzin) y algunos cuerpos intrusivos, que están distribuidos a lo largo de ~1,000 km (Mori y Gomez-Tuena, 2007). Además, constituye uno de los arcos volcánicos más complejos y variados del cinturón de fuego del Pacífico (Ferrari, 2000), ya que su distribución no presenta una dirección paralela a la trinchera Mesoamericana; por el contrario, presenta una dirección NW-SE desde el margen oeste del Pacífico hasta su parte central (Ban et al., 1992). La FVTM es un arco volcánico de edad Neógeno-Cuaternario (Pasquarè et al., 1991), que está constituido por rocas calcialcalinas en su sector central, el sector occidental muestra una sobreposición con la provincia de la Sierra Madre Occidental (secuencia de eventos calcialcalinos de edad terciaria) (Garduño-Monroy y Gutiérrez-Negrín, 1992)). De acuerdo a la diferencia en los procesos volcánicos y estudios geoquímicos la FVTM se puede dividir en tres diferentes sectores (Fig. 1) (Ferrari, 2000; García-Palomo et al., 2008; Gómez-Vasconcelos, 2012; Martínez & Nieto-Samaniego, 1990; Pérez-López et al., 2011b):

a) **Sector occidental**, ubicado hacia el oeste de la Sierra Madre Occidental y relacionado con el bloque Jalisco. Su característica principal es una tendencia estructural predominantemente E-W, así como la interacción de tres fosas tectónicas denominadas Tepic, Colima y Chapala (Ferrari, 2000).

b) **Sector central**, se define como una franja y está acotado por el graben de Colima al occidente y por el sistema de fallas Taxco-Querétaro al oriente. Esta constituido principalmente hasta un 90% por edificios monogenéticos, con morfología de conos de escoria, volcanes en escudo pequeño, flujos de lava y domos de composición basáltica a andesítica. Estos edificios volcánicos presentan una orientación bien definida, controlados

por fallas principalmente en dirección NE-SW. En este sector se ubica el Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG), (Ferrari, 2000; Gómez-Tuena et al., 2005a).

c) **Sector oriental**, al oriente del sistema de fallas Taxco-Querétaro. En esta región la mayor parte del vulcanismo está conformado por estratovolcanes, calderas, conos de escoria y domos de composición andesítica a riolítica. Este sector se caracteriza tanto por estar controlado por fallas con una orientación predominantemente E-W, aunque también existen fallas con dirección NE-SW y NW-SE. De las que se incluyen la falla Guadalupe, falla La Quebrada, falla Salitrillo, falla Santa María Ilucan y Falla Taxinay (Ferrari, 2000).

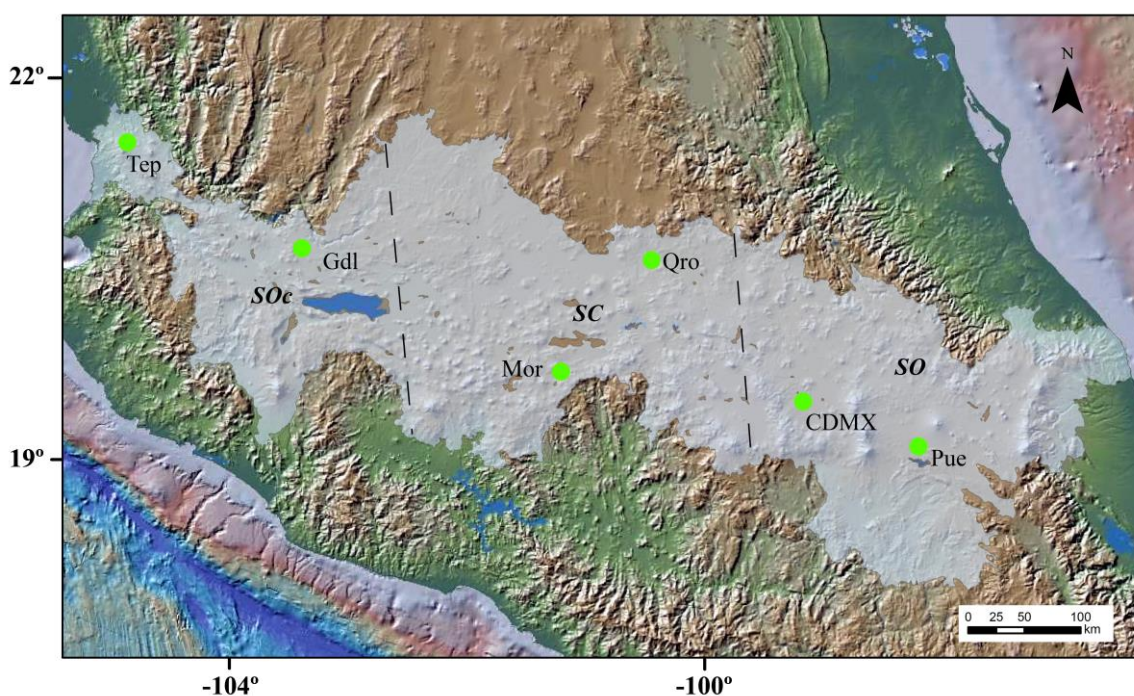


Fig. 1 Localización división y distribución de la FVTM (polígono gris). SOc: Sector Occidental, SC: Sector Central, SO: Sector Oriental, Tep: Tepic, Gdl: Guadalajara, Mor: Morelia, Qro: Querétaro, CDMX: Ciudad de México, Pue: Puebla.

El Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG) localizado en el sector central, es el más grande de los campos volcánicos monogenéticos de la FVTM; así como una de las regiones de vulcanismo monogenético más extensas ($> 40,000 \text{ km}^2$) a nivel mundial. Este campo volcánico, posee una densidad de aproximadamente 2.5 centros eruptivos por cada 100 km^2 (Osorio Ocampo, 2014). Este campo volcánico abarca desde la porción norte del estado de Michoacán hasta la porción sur del estado de Guanajuato. Según algunos autores

el CVMG incluye más de 900 conos de escoria y más de 100 volcanes de otro tipo tales como domos y flujos de lava, no asociados con conos y maares, más de 300 volcanes y algunos domos de lava coexisten en tiempo y espacio, hay pocos ejemplos de estratovolcanes (por ejemplo Tancítaro, Patamban) (Hasenaka, 1994; Gómez-Tuena et al., 2005b; Corona-Chávez et al., 2006; García-Quintana et al., 2016;). En el mismo campo volcánico se tienen los volcanes más jóvenes con erupciones históricas como Paricutín hace 75 años (Guilbaud et al., 2009) y el volcán Jorullo hace 260 años (Luhr y Carmichael, 1985; Guilbaud et al., 2011). Corona-Chávez et al. (2006) consideran que el vulcanismo monogenético del CVMG comenzó hace tres millones de años y muestra una tendencia de migración del frente volcánico activo hacia el suroeste. Salomón-Chida, (2012) menciona que las estructuras volcánicas se originaron hace más de cuarenta mil años y que los volcanes más antiguos se encuentran ubicados en la parte sureste del campo volcánico, mostrando lineamientos locales al noreste. El CVMG se ve afectado por los sistemas de fallas Morelia - Acambay, el cual consisten de una serie de fallas normales con una dirección E-W y NE-SW. Estos sistemas de fallas está asociados a la formación de las depresiones lacustres de Chapala, Zacapu, Cuitzeo, Maravatío y Acambay (Garduño-Monroy et al., 2009).

En una porción oriental del CVMG (entre las coordenadas UTM 334,000 E, 2'157,000 N y 239,000 E, 2'223,000 N) se encuentra la cuenca del lago de Cuitzeo. Esta cuenca forma parte de la macro-cuenca del río Lerma y abarca un área aproximada de 4,000 km². Dentro de la cuenca de Cuitzeo se localizan varias estructuras volcánicas pertenecientes al CVMG, como son el Complejo Volcánico Quinceo-Tetillas y volcanes más complejos como son La Sierra de Mil Cumbres, ambas próximas al área de estudio. En la parte sur de la cuenca se aprecia la Sierra de Mil Cumbres, y de acuerdo con Gómez-Vasconcelos, (2012), está constituida por lo menos tres estructuras de calderas volcánicas. Estas calderas están conformada principalmente por flujos de lava y domos de composición andesítica a dacítica y una afinidad calcialcalino. De igual manera por depósitos de ignimbrita de composición riolítica a rio-dacíticas, asociados al colapso de las calderas. El emplazamiento de estas calderas fue controlado por la tectónica regional y posteriormente los depósitos volcánicos fueron cortados por los sistemas de fallas más importantes de la región (NW-SE, NE-SW y E-W). Estos sistemas de fallas también controlan toda la tectónica regional de la zona de estudio. Por otra parte, el Complejo Volcánico Quinceo-Tetillas (CVQT) que se encuentra hacia el

noroeste de la ciudad de Morelia. De acuerdo a Cisneros-Máximo, (2016) este complejo volcánico está compuesto por dos grandes estructuras volcánicas (volcán en escudo pequeño Quinceo y Tetillas), que sobreyacen a una secuencia de flujos ignimbríticos y domos de lava de composición andesítica con edades entre 19 y 3 Ma (Ignimbrita Atécuaro e ignimbrita Cuitzeo). Finalmente, la porción sur del lago de Cuitzeo se caracteriza por poseer grandes flujos de lava de composición andesítica-basáltica a traquiandesítica, intercalados con ignimbritas (Trujillo-Hernández, 2017). Las ignimbritas y domos de lava que bordean la ribera del lago de Cuitzeo tienen un rango de edad entre 2.8 a 0.2 Ma. Las lavas andesíticas son anteriores al fallamiento E-W que origino el graben del lago de Cuitzeo con una edad de 8 ± 2 Ma., (Sánchez, 2011). En general, la margen sur del lago corresponde a una depresión formada por semigrabenos (Israde-Alcántara et al., 2002).

Localización

La zona de estudio se ubica en la región norte del estado de Michoacán, a lo largo del borde sur del lago de Cuitzeo, aproximadamente a 23 km de la ciudad de Morelia, capital del estado. La zona comprende un área aproximada de 19.8 km²; en la Tabla 1 se indican cuatro puntos, en coordenadas UTM, los que delimitan la zona de estudio. Las principales vías de acceso al sitio son las carreteras federales 43 y 15D. El Cut-07 se ubica aproximadamente a 310 m del entronque de las dos carreteras ya mencionadas (Fig. 2).

Tabla 1 Coordenadas limitantes de la zona de estudio (en el sistema de coordenadas UTM).

Coordenadas	1	2	3	4
X	271,183	271,424	276,054	276,070
Y	2'203,854	2'198,429	2'203,748	2'198,290

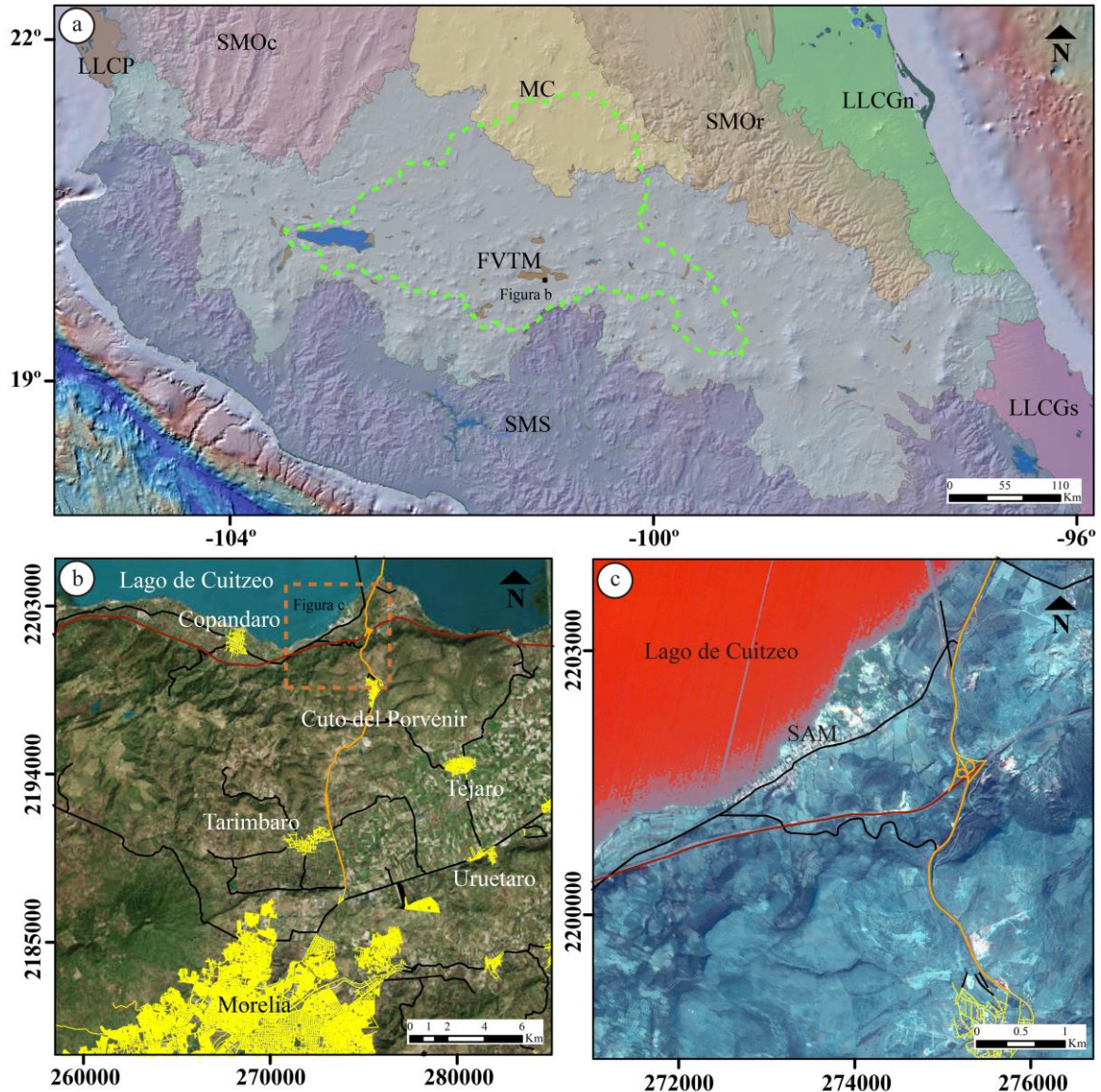


Fig. 2 a) Mapa ilustrativo de la porción central de la república mexicana y ubicación de las provincias fisiográficas que rodean la FVTM, línea verde punteada representa la delimitación de la macro-cuenca Lerma, construido con base en imágenes landsat. b) mapa ilustrativo de la región de Cuitzeo donde se incluyen las zonas urbanas cercanas a la zona de estudio. c) delimitación de la zona de estudio y visualización de las vías de acceso. SMOc: Sierra Madre Occidental. MC: Mesa Central. SMOr: Sierra Madre Oriental. LLCp: Llanura Costera del Pacifico. LLCGn: Llanura Costera del Golfo norte SMS: Sierra Madre del Sur. FVTM: Faja Volcánica Trans-Mexicana. LLCGs: Llanura Costera del Golfo sur. SAM: San Agustín del Maíz.

La geología detallada de la zona sur del lago de Cuitzeo es descrita por Trujillo-Hernández (2017). Mediante la correlación de secciones litológicas determino que la zona se encuentra formada por al menos siete secuencias volcánicas, las cuales se enlistan a continuación:

- a. Secuencia Mil Cumbres (SMC) (21.5 Ma)
- b. Secuencia Copándaro (SCo)
- c. Secuencia Tarímbaro (ST) (18.6 Ma)
- d. Secuencia Chucándiro (SCh) (17.1 Ma)
- e. Secuencia San Agustín del Maíz (SSAM)
- f. Secuencia Santa Rita (SSR) (13.96 y 8.34 Ma)
- g. Secuencia de Volcanes Monogenéticos (SVM) (8.11-0.175 Ma)

La zona de estudio correspondiente a este trabajo de tesis abarca dos de las siete secuencias descritas por Trujillo-Hernández, (2017) (Secuencia Tarímbaro y Secuencia San Agustín del Maíz).

Secuencia Tarímbaro (ST) (18.6 Ma)

Esta secuencia está representada por dos unidades litológicas; flujos de lava de composición andesita basáltica, que cubren toda la parte sur del área y flujos de lava de composición traquiandesítica que afloran en la zona norte dentro del municipio de Copándaro. Los flujos de lava andesita basálticos presentan un color verde, debido a la alteración hidrotermal con textura porfídica. Los flujos de lava traquiandesíticas son de coloración gris oscuro y café claro, por la alteración.

Secuencia San Agustín del Maíz (SSAM)

Esta secuencia está representada por una serie de depósitos de flujo piroclásticos de pómez soldada y no soldada, oleadas secas, diques y flujos de lavas andesita basálticos. Los flujos de lava andesitas basálticas presentan un color gris oscuro y en zonas alteradas presenta un color verde (debido a la alteración hidrotermal) con textura porfídica y gran cantidad de vesículas. Las ignimbritas tienen diferentes grados de soldamiento y compactación. Los depósitos mejor expuestos afloran al sur del poblado de San Agustín del Maíz.

Esta última secuencia ignimbrítica es el centro de investigación de esta tesis, ya que presenta una gama de cualidades las cuales resultan atractivas desde el punto de vista petrofísico.

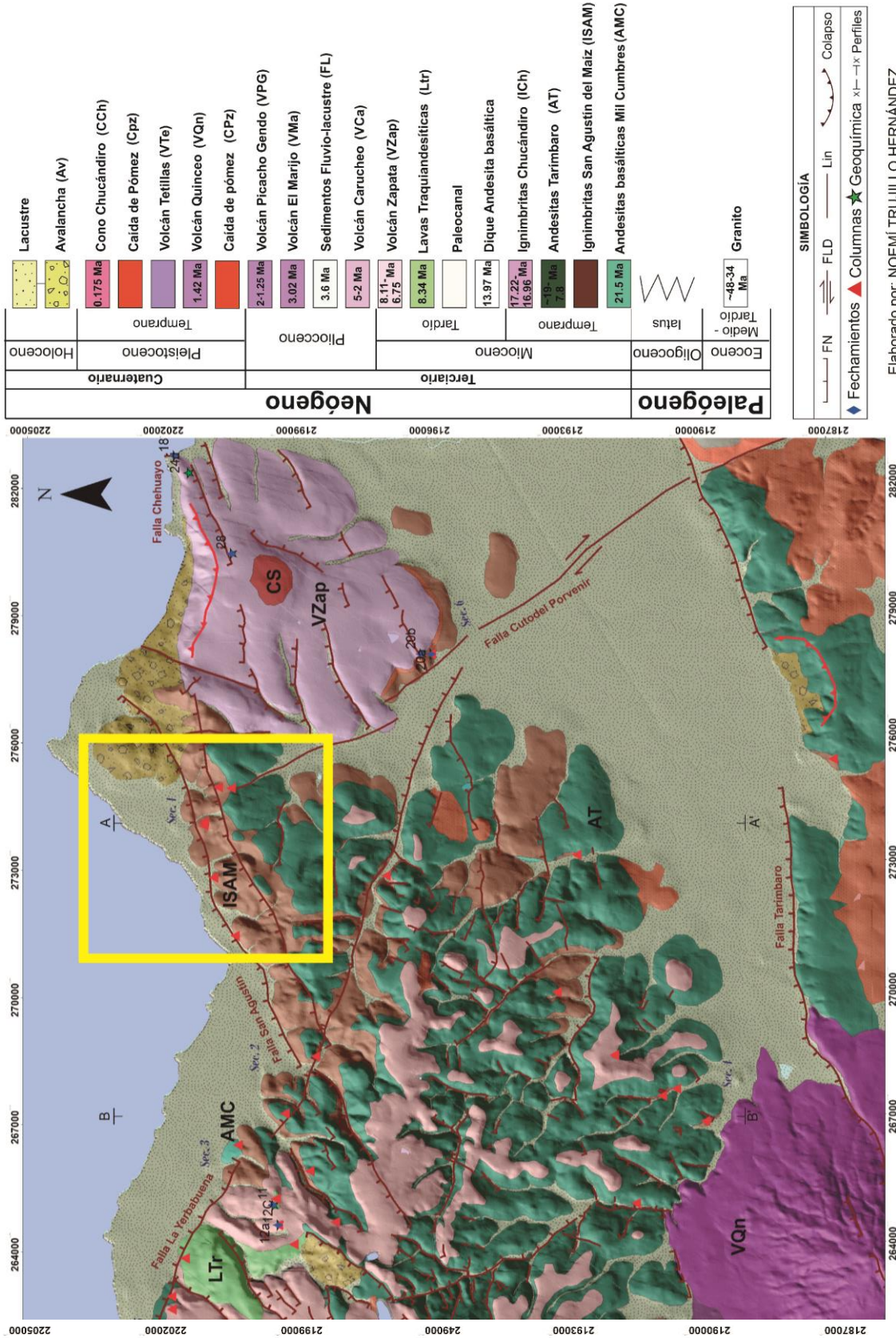


Fig. 3 Mapa geológico de la zona sur del lago de Cuitzeo (tomado de Trujillo-Hernández), el recuadro amarillo representa la delimitación de la zona estudio de este trabajo de tesis.

3. Metodología

La metodología de este trabajo de investigación se ha dividido de la siguiente manera: trabajo de gabinete, trabajo de campo, trabajo de laboratorio, análisis y tratamiento de resultados. La metodología empleada para cada prueba de laboratorio que se realizó está sujeta a normas internacionales (p. ej. ASTM, UNE-EN), las cuales están debidamente citadas dentro del cuerpo de este capítulo.

3.1 Trabajo de gabinete

Esta etapa consistió en la recopilación, revisión y búsqueda de información bibliográfica. La información bibliográfica incluye publicación científica relacionada con geología estructural, estratigrafía, vulcanología y geotecnia. Igualmente, se utilizaron cartas topográficas con numeración E14-A13 impresas y en formato digital, correspondientes a la zona de interés. Además de los datos vectoriales correspondientes a la zona (por ejemplo, caminos, carreteras, veredas, etc.) proyectados a una escala de 1:50,000 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). La recolección y almacenamiento bibliográfico se realizó con base en la construcción de una biblioteca virtual, elaborada mediante el uso del programa de acceso libre Mendeley (<https://www.mendeley.com>). Entre las herramientas más sobresalientes del programa está la modificación automática de las referencias al editar las citas, que incluye de manera inmediata los datos de cada manuscrito. El programa Mendeley es una aplicación web y de escritorio, que permite gestionar y compartir referencias bibliográficas y documentos de investigación.

El trabajo de gabinete incluye la reedición de mapas geológicos preliminares, construidos mediante la manipulación de modelos digitales de elevación y datos vectoriales. Algunas imágenes, como el mapa de localización, se construyeron mediante el programa de acceso libre GeoMapApp (<http://www.geomapapp.org/>), el cual es una aplicación de exploración y visualización de Ciencias de la Tierra, actualizada continuamente como parte del Sistema de Datos de Geociencias Marinas (*MGDS*, por sus siglas en inglés) del Observatorio de la Tierra Lamont-Doherty perteneciente a la Universidad de Columbia en Estados Unidos de América. La aplicación proporciona acceso directo a la compilación de Topografía Global de Múltiple Resolución (*GMRT*) que alberga batimetría de alta resolución (~ 100 m de espaciamiento de

nodos) a partir de datos de haz múltiple para áreas oceánicas y ASTER (*NDS*) y una base de datos topográficos para las masas terrestres globales.

Para realizar el proceso de edición y construcción de mapas con mayor detalle se utilizó ArcGis, el cual es un sistema completo que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica.

Mapa base

Una definición de mapa base de acuerdo al sitio web del software especializado en el campo de los Sistemas de Información Geográfica o SIG, ArcGis, es un mapa que se crea a partir de varias capas operativas (p. ej. vías de comunicación, entidades, topografía) que proporciona información espacial sobre las referencias de ubicación y visualizar información geográfica en formato digital correspondiente a un cierto tema en específico (ArcGis, 2018). El mapa base utilizado para los trabajos previos a la visita de campo se realizó bajo los siguientes pasos:

- Mediante el uso del programa GeoMapApp se obtuvo un Modelo Digital Elevación (*DEM*) de la zona en estudio, un *DEM* permite visualizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en él. Mediante el uso de las herramientas de digitalizar latitud, longitud y profundidad de este programa se ajusta el *DEM* hasta obtener una resolución y dimensiones necesarias que abarque las dimensiones de la zona en estudio. Posteriormente, el *DEM* se guardó en formato geotiff (este formato mantiene la información de la proyección de las coordenadas UTM) y se exporta para ser utilizado en un software de información geográfica llamado ArcGis.
- Una vez exportado el *DEM* al programa ArcGis se agregan los datos vectoriales correspondientes, tales como: curvas de nivel, caminos, carreteras y zonas urbanas entre otros.
- En la edición final del mapa base se incluyó el sistema de coordenadas en UTM, escala gráfica, símbolo de dirección norte y leyenda de las diferentes capas de información geográfica.

3.2 Trabajo de Campo

En ciencias de la Tierra el trabajo de campo se caracteriza por ser uno de los medios de estudio y de obtención de información mediante la realización de diferentes actividades y/o métodos utilizados en las condiciones naturales del terreno dependiendo de los objetivos del estudio que se esté realizando. De manera general el trabajo de campo básicos se puede separar en cuatro etapas:

Recolección y etiquetado de muestras a partir de la descripción de afloramientos.

Recolección de datos estructurales, se incluye la orientación de cualquier plano.

Medición de dimensiones y geometría del afloramiento y de cada unidad de roca (alto y ancho).

Construcción y verificación de mapas preliminares en sitio.

Para este trabajo de tesis se realizaron seis visitas de campo, durante las cuales se visitaron 14 afloramientos localizados en la parte sur del lago de Cuitzeo; en cada afloramiento se estableció una estación geológica (Fig. 4). En estas estaciones se recopiló la mayor cantidad de información geológica y estructural. En estas estaciones se observaron ignimbritas con diferentes grados de alteración y algunos basaltos. El trabajo de campo consistió en la verificación, rectificación y descripción estratigráfica de los mapas geológicos preexistentes (por ejemplo, Pola et al., 2016; Trujillo-Hernández, 2017). La descripción litológica consistió en determinar color, espesor, textura y gradación por mencionar algunas características. El material de campo utilizado, fueron:

Mapas topográficos.

GPS de alta precisión marca Trimble Nomad 900G.

Brújula estructural marca Brunton, modelo Truarc.

Herramientas básicas de mano empleados para la extracción de muestras de rocas de los afloramientos, tales como, pica de 24 onzas, cinceles y martillos.

Dos cintas métricas de 5 y 20 m.

Lupas de 10X y 20X para la visualización de minerales y características texturales de la roca en campo.

Carta de color *Munsell Rock Color Chart* utilizada para una clasificación visual precisa del color de las muestras de roca

Para describir la roca y los elementos que lo componen (por ejemplo, minerales y líticas) se tomó en cuenta la clasificación textural de varios autores (por ejemplo Powers, 1953; Fielding, 1997; Blair y McPherson, 1999; Silva-Romo y Mendoza-Rosales, 2011). Estas clasificaciones texturales fueron llevadas a campo y fueron utilizadas para describir diferentes características como forma, esfericidad, redondez de las muestras de rocas y de sus componentes

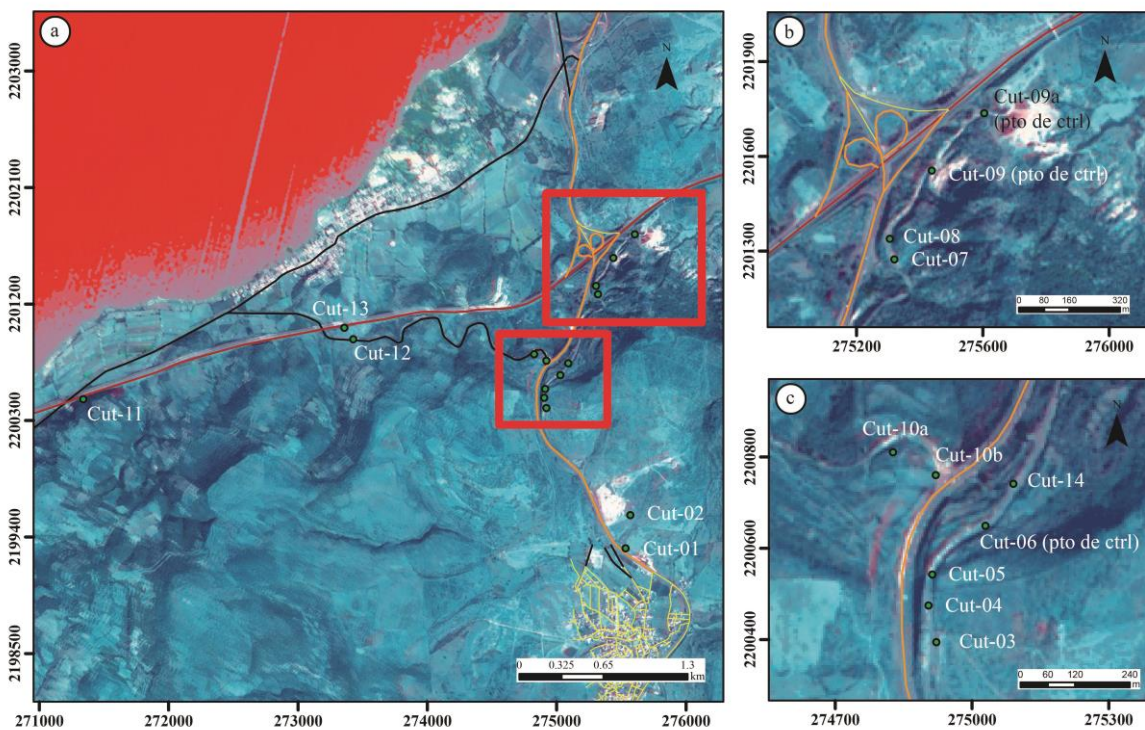


Fig. 4 Mapa ilustrativo de la zona de estudios construido con base en imágenes landsat. a) distribución de las 14 estaciones geológicas. b) y c) acercamiento de las estaciones geológicas para una mejor visualización.

3.3 Trabajo de Laboratorio

Los trabajos de laboratorio realizados para esta tesis, comprenden ensayos en especímenes de roca mediante el empleo de equipos especializados para la obtención de sus parámetros petrofísicos (por ejemplo, picnómetro de helio y porosímetro por inclusión de mercurio). Todos los ensayos se realizaron metodológicamente conforme a la normativa referente a cada

ensaye. Todos los ensayos de laboratorio realizados en este trabajo de tesis se describen a continuación:

3.3.1 Corte y preparación de especímenes

De las muestras obtenidas en campo se colectaron especímenes para los diferentes ensayos a realizar. Las muestras fueron llevadas al área de preparación y corte de especímenes de la Unidad de Petrofísica. La normativa de cada prueba indica las dimensiones máximas y mínimas de los especímenes, donde se considera su forma geométrica. En la Tabla 2 se indica el número de especímenes cortados, sus dimensiones, forma y prueba a realizar (para los especímenes cúbicos y cilíndricos se realizó una tabla con más detalles, ver Anexo 1). En la Fig. 5 se muestran dichos especímenes cortados.

Tabla 2 Resumen del número y dimensiones de especímenes para pruebas de laboratorio.

Tipo	Ensaye	Número de Especímenes	Forma	Dimensiones de especímenes (mm)				
				X	Y	Z	Diámetro	
Petrográfica	Descripción microscópica	8	Láminas delgadas	45	25	0.03	—	
	Descripción macroscópica	8	Prismas rectangulares	45	25	25	—	
Caracterización Física	Estereología	11	Secciones planas	120	100	20	—	
	Porosidad	Método de saturación de Barnes a presión atmosférica	7	Cubos	60	60	60	—
		Método de saturación de Barnes a vacío	8	Prismas rectangulares	35	35	71	—
		Método de saturación de Barnes a vacío	7	Cubos	60	60	60	—
		Método del Picnómetro de helio	7	Cilindros	—	—	25	25
		Método de inyección de mercurio	3	Cilindros	—	—	25	25
Caracterización Hídrica	Capilaridad	8	Cubos	60	60	60	—	
	Evaporación	7	Cubos	60	60	60	—	
		8	Prismas rectangulares	35	35	71	—	
	Permeabilidad	3	Cilindros	—	—	42	25.8	
		4	Cilindros	—	—	25	25	

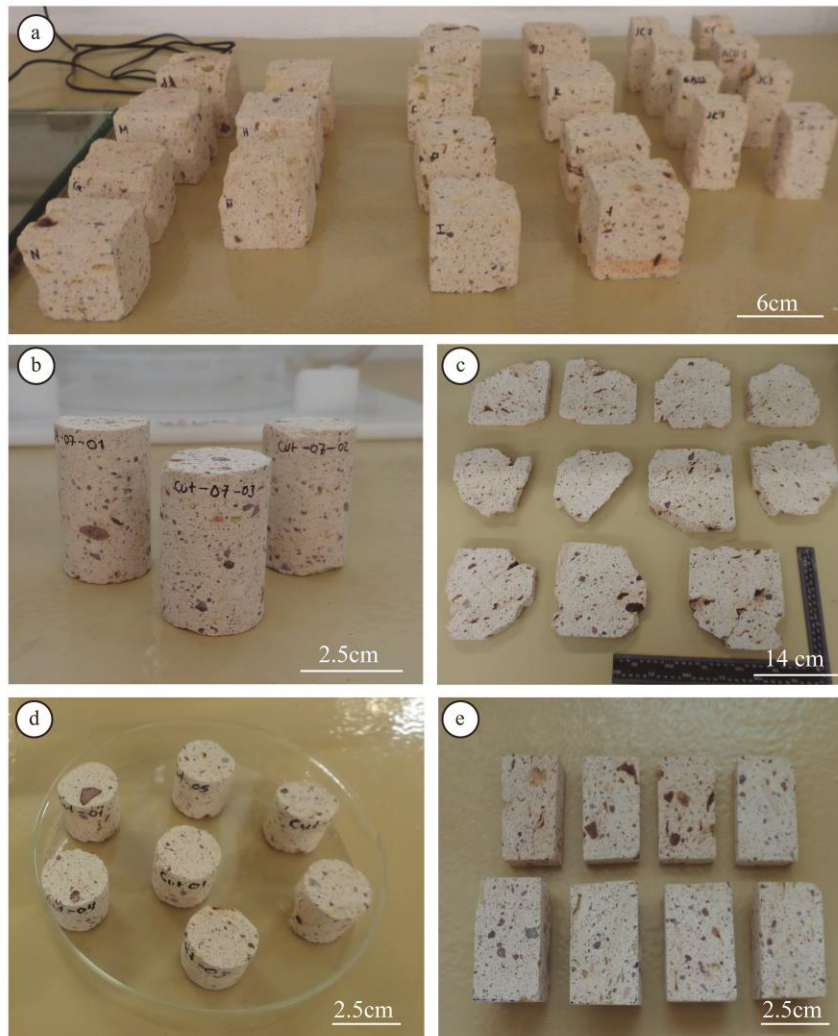


Fig. 5 Especímenes cortados para las diferentes pruebas. a) especímenes cúbicos y rectángulas. b) especímenes cilíndricos para permeabilidad. c) Secciones planas. d) Especímenes cilíndricos para picnometría y porosimetría. e) Testigos de rocas para laminas delgadas.

Todas las muestras fueron preparadas y cortadas siguiendo el procedimiento establecido por las normativas internacionales dadas por la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) y la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASMT por sus siglas en inglés). Los equipos utilizados para la realización de los cortes y formas de los especímenes se utilizaron los siguientes equipos de corte:

- Rectificadora de especímenes marca Controls modelo 55-C0201/3 (Fig. 6a)
- Cortadora de testigos y esmeriladora marca Controls modelo 45-D0536/AZ (Fig. 6b)
- Nucleadora o extractora de núcleos marca Controls modelo C0330/Z (Fig. 6c)
- Sierra cortadora de banco marca Controls modelo 55-C02010/DZ (Fig. 6d)

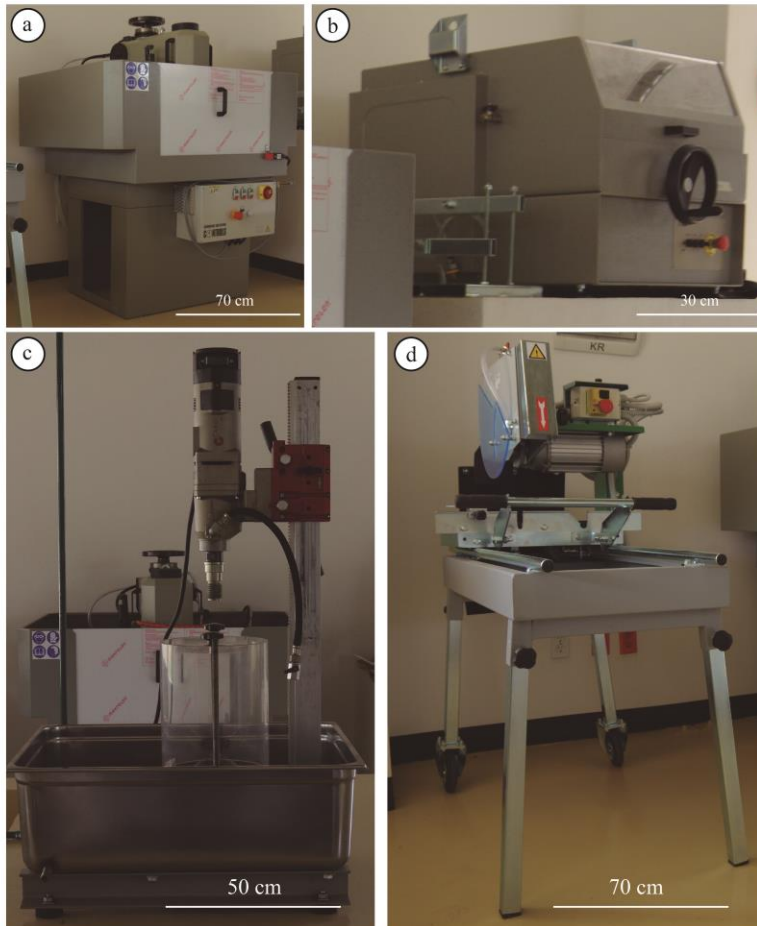


Fig. 6 Equipo de corte y preparación de muestras. a) rectificadora de especímenes (55-C0201/3). b) cortadora de testigos y esmeriladora (45-D0536/AZ). c) nucleadora o extractora de núcleos (C0330/Z). d) sierra de banco (55-C02010/DZ).

3.3.2 Caracterización Petrográfica

En esta tesis se presenta una descripción petrografía básica con base en la descripción macroscópica en muestra de mano y una descripción microscópica en láminas delgadas. Se describieron, entre otras cosas, la textura, los componentes y su distribución.

Descripción Macroscópica

La descripción macroscópica es el método descriptivo más simple, En esta etapa se realizó una descripción simple a los especímenes colectados y cortados, con la ayuda de lupa, ácido clorhídrico y tabla de colores. Dentro de las características que se observaron fueron: textura, fábrica, color, dureza, brillo, morfología, fractura y mineralogía.

Descripción microscópica

Durante esta investigación las láminas delgadas de la ignimbrita fueron clasificadas por su matriz y sus diferentes líticos observables. Esta clasificación fue realizada con base en algunos trabajos relacionados con el tema (por ejemplo, Mackenzie y Guilford, 2014; Patricia y Tirado, 2014). Para la observación de las láminas delgadas se utilizó un microscopio petrográfico marca OPTIKA B-1000OPOL (Fig. 7) de la Unidad de Petrofísica. Adicional a esto se efectuó una descripción de los poros apreciables en las láminas delgadas. Para esto, se realizó una adaptación de la clasificación de poros de Choquette y Pray (1970), la que incluye la descripción de la geometría de los poros y clasificación según su origen. Esta descripción de poros se llevó a cabo con la ayuda del microscopio OPTIKA B-1000OPOL con una capacidad de tomar imágenes de las secciones delgadas tanto con polarización plana y polarización cruzada, con un enfoque de 5X y 10X y resolución mínima de 300 puntos por pulgadas (ppp por sus siglas en inglés).



Fig. 7 Microscopio marca OPTIKA B-1000OPOL.

Elaboración de láminas delgadas

Se elaboraron ocho láminas delgadas de la litofaciedad perteneciente a la secuencia San Agustín del Maíz en la Unidad de petrofísica de la Escuela Nacional de Estudios Superiores - unidad Morelia y en el Laboratorio de petrografía del Instituto de Geofísica Unidad Michoacán, UNAM Campus Morelia. A continuación, se enlistan los pasos para la elaboración de láminas delgadas.

- 1) Se cortó una de las muestras en forma de tabletas aun tamaño aproximadamente de 45 x 25 x 25 mm, a estos pequeños fragmentos se les llama testigos de rocas, mediante el uso de una cortadora de sierra de banco marca Controls modelo 55-C02010/DZ. Posteriormente, el espesor de los testigos se redujo de 25 mm a 3 mm utilizando una cortadora de mesa (Powerfeed Trim Saw 10'' /254 mm) (Fig. 8a). Por último, se eligió una de las dos caras de mayor superficie del testigo, para luego desbastar empleando carburo de silicio Buehler (Nº 240) y agua sobre una base de vidrio. El carburo de silicio sirve como abrasivo.
- 2) Una vez obtenida una superficie uniforme en esta cara, es nuevamente desbastada con abrasivos más finos (Nº 400, 600 y 1000) los cuales generan cada vez una superficie

más lisa y semipulida. A la par, una de las caras de un portaobjetos es desbastada con abrasivo del N° 600 sobre una base de vidrio.

- 3) Una vez desbastadas las caras tanto del testigo de roca como del portaobjetos, se introdujo la muestra y el portaobjetos en un vaso de precipitado con agua en dentro del ultrasonido Fisher Scientific (Fig. 8b) para eliminar los residuos de abrasivo.
- 4) Al tener la muestra y portaobjetos limpios se pusieron a secar sobre una plancha Isotemp (Fig. 8d) por aproximadamente una hora a una temperatura de $\sim 100^{\circ}\text{C}$.
- 5) La cara semipulida, limpia y seca del testigo y el portaobjetos fueron pegadas entre sí. Para esto se utilizó resina UV, la cual tiene la particularidad de secar bajo los rayos del sol. Se debe tener especial cuidado de no dejar burbujas atrapadas en la resina al momento de pegar el testigo y el portaobjetos.
- 6) Una vez pegado el testigo al portaobjetos, se redujó el espesor de la muestra hasta 0.5 mm (500 μm), con una cortadora de precisión Struers Accutom-50 (Fig. 8c). Ya pegado el testigo al portaobjetos y con el espesor de ~ 0.5 mm (500 μm) la muestra se desbastó utilizando los abrasivos de carburo de silicio ya mencionados (N° 240, N° 400, N° 600 y/o N° 1000). Posteriormente la cara expuesta del testigo se le dió un desbaste final con un abrasivo de alúmina (5 μm) hasta que se obtuvo un espesor final de 0.03 mm (30 μm). El objetivo final del desbaste y pulida de la lámina fue para poder observar y describir las propiedades de los minerales bajo el microscopio petrográfico utilizando luz paralela y polarización cruzada a través de los minerales, Se desbastan a 0.03 mm (30 μm) porque es un valor estándar de comparación de la birrefringencia.

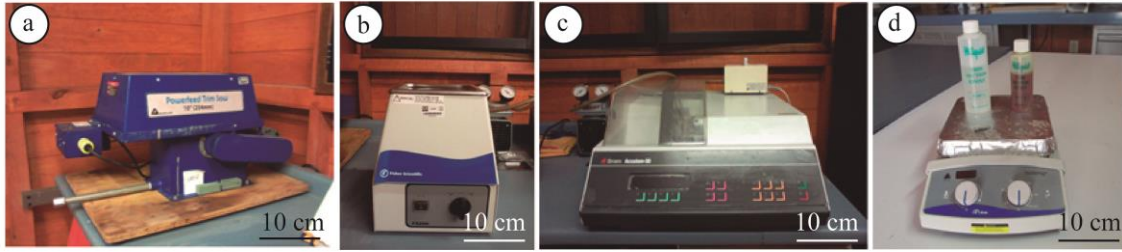


Fig. 8 Equipo de corte y preparación de secciones delgadas a) Cortadora de mesa Powerfeed Trim Saw 10''/254 mm, b) Ultrasonido Fisher Scientific, c) Cortadora de precisión Struers Accutom-50, d) Plancha Isotemp

3.3.3 Caracterización Física

La caracterización física incluye la descripción detallada de las distintas propiedades de la roca (por ejemplo, color, textura, porosidad, densidad), que son heredadas al momento del transporte y deposición de la unidad de roca que posteriormente son transformadas por procesos de meteorización o alteración. hidrotermal.

Estudios texturales con base en análisis de imágenes

El término “análisis de imagen” hace referencia al estudio realizado sobre la imagen con el fin de obtener información de ella. Se podría definir nuevamente el término de análisis de imagen como un proceso mediante el cual se extrae información cuantitativa de la imagen. Sin embargo, tal y como hoy en día es entendido, el análisis de imagen es un proceso llevado a cabo por un sistema informático capaz de extraer de forma casi instantánea toda la información relevante contenida en una imagen determinada (Grau, 2011). De acuerdo con Grau (2011) la estereología es considerada como un cuerpo de métodos matemáticos que relacionan parámetros tridimensionales, que definen la estructura, con medidas bidimensionales obtenidas de la selección de estructuras.

Para el análisis de las imágenes se utilizó el software de uso gratuito imageJ (<https://imagej.nih.gov/ij/>). Este software permite el procesado de imágenes con base en una serie de ajustes como el contraste, la binarización y el uso de filtros, además el programa permite obtener de manera automática diferentes características como: áreas, contornos, esfericidad, diámetros, además de ejecutar transformaciones geométricas (por ejemplo, rotar, escalar) y ventanas. ImageJ puede trabajar con un número ilimitado de imágenes

simultáneamente, guardar e imprimir imágenes de 8 bits (256 colores), 16 bits (miles de colores) y 32 bits (millones de colores). Puede leer casi cualquier tipo y formato (p. ej TIFF, PNG, GIF, JPEG, BMP, DICOM, FITS). Se resalta que la calidad en la obtención y el análisis de imágenes depende en gran medida de su adquisición (p. ej. escaneo).

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

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

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

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

- 1) Se cortaron once secciones planas de ~ 120 x 100 mm con un espesor de ~ 20 mm. Una de sus superficies es desbastada en una base de vidrio mediante el uso de agua y abrasivo de carburo de silicio Buehler (Nº 240, 400 y 600) con la finalidad de obtener una superficie homogénea y lisa que favorezca el escaneo. Para el escaneo, las secciones planas deben ser humedecidas para homogeneizar el contraste de colores de la imagen digitalizada, además de evidenciar sus elementos. Las imágenes fueron escaneadas utilizando un escáner Hp Modelo Scanjet 300 a una resolución de 600 ppp.
- 2) El segundo paso básico es el tratamiento de las imágenes mediante el uso de herramientas básicas (por ejemplo, varita mágica) para la separación de los diferentes elementos presentes en la muestra (matriz, líticos, fiamas, pómez; Fig. 9).
- 3) Una vez que son obtenidas las secciones planas digitalizadas y los elementos de la roca ya agrupados, se introducen al programa (ImageJ) para realizar un conteo de las dimensiones y distribución correspondientes a cada uno de los elementos. Los elementos con respecto a su tamaño y porcentaje se obtendrán con las herramientas básicas de binarización y umbral (en inglés “Threshold”). Después de este proceso, la imagen queda lista para el análisis de las partículas, el cual se realiza con la

herramienta “Analyze Particles” y los resultados se obtienen con la herramienta “Summarize”. Finalmente, el manejo y análisis de resultados se hace mediante el uso del programa Excel, utilizando la escala de tamaños de granos de Fielding, (1997) se hace la clasificación de los diferentes elementos presentes.

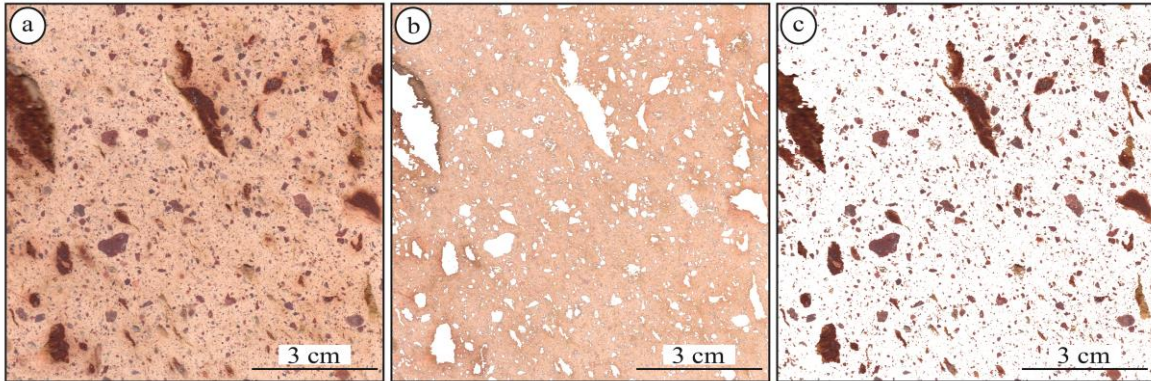


Fig. 9 Muestra de roca Cut-07-2 escaneada de 9 x 9 cm (600 ppp). b) matriz de roca separada de elementos. c) Elementos que constituyen la muestra.

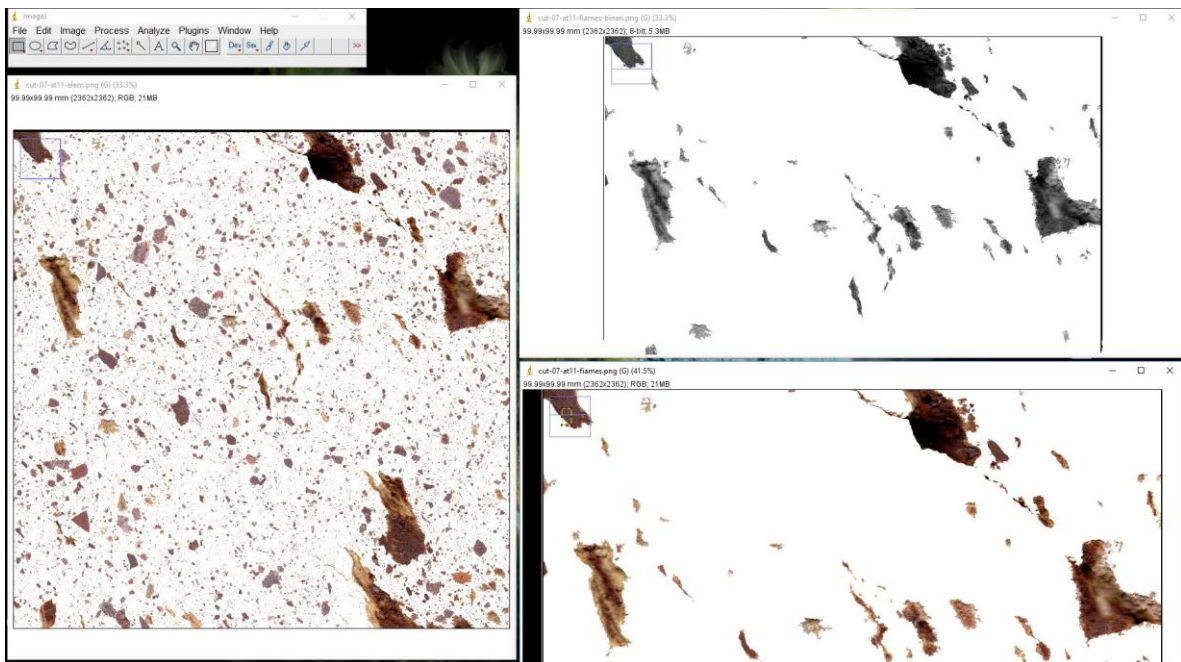


Fig. 10 Interfaz del software Image J y visualización de una imagen (clasificada).

Densidad

La densidad es una propiedad (de los sólidos, líquidos y gases) de alta importancia debido a que no varía su valor a pesar del tamaño del objeto o la cantidad de sustancia, es una medida de cuanto material se encuentra en un espacio determinado, lo que quiere decir que es la cantidad de masa por unidad de volumen. La densidad se clasifica en dos tipos:

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

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

Donde ρ es la densidad aparente, m es la masa y v es el volumen del determinado cuerpo.

- **Densidad real**, es la densidad del material sólido, excluyendo el volumen de cualquier poro abierto y cerrado, en otras palabras, es la relación entre la masa del espécimen seco y el volumen de su parte sólida y tiene unidades kg/m^3 (en el Sistema Internacional).

Método del picnómetro de helio

La picnometría de gases (helio en nuestro caso) es un método basado en el desplazamiento de volúmenes para medir con gran precisión el volumen del esqueleto sólido de cualquier tipo de material. Los picnómetros de Helio son capaces de medir el volumen real de materiales sólidos (ya sean polvos o sólidos porosos), estos equipos se basan en la técnica de desplazamiento de gases y en la Ley de Boyle. Esta ley establece que la presión de un gas en un recipiente cerrado es inversamente proporcional al volumen del recipiente, cuando la temperatura es constante. Se utiliza Helio ya que es un gas inerte que además puede penetrar en poros de diámetros muy pequeños (hasta 2 Angstroms).

Para realizar la prueba de densidad real (o densidad de sólidos) se utilizó el picnómetro de Helio modelo Ultrapyc 1200e (Fig. 11), la metodología corresponde a la descrita en la norma ASTM D5550-06, este instrumento es un picnómetro de gas automatizado diseñado para

medir el volumen y densidad verdadera de sólidos, este equipo se caracteriza por el modo de medición automático “repeat run” hasta que los resultados caen dentro de una tolerancia específica. Se prepararon siete especímenes cilíndricos de aproximadamente 2.5 cm de diámetro, a los cuales se les cortaron la cara superior e inferior a manera de obtener paralelismo entre ellas.

Los pasos para la elaboración de esta prueba se describen a continuación:

1. Verificar que la presión de helio de entrada al picnómetro no exceda los 26.5 psi, se enciende el picnómetro y por defecto este muestra el *MAIN MENU* (ver Anexo 2). En este menú aparecen varias opciones de las cuales seleccionaremos *1-RUN*, al hacer esto aparecerá el primer submenú llamado *RUN MENU*, se elige *1-RUN PARAMETERS* donde aparecerán otras opciones seleccionamos *3-PURGE* y después *1-FLOW*. Presionando el botón *ENTER/RETURN*, nos podremos regresar a los menús anteriores
2. Después de purgar se revisa el número de corridas (*4-MÁXIMUM RUNS*) donde se especifica si se hará una (*1-SINGLE*) o múltiples (*2- MULTI RUN*) mediciones.
 - a. En caso de seleccionar *2-MULTI RUN*, se debe de elegir el criterio para realizar las mediciones: *MAX RUNS*: Se selecciona el número total de corridas, *RUNS TO AVERAGE*: El equipo crea un número determinado de mediciones automáticamente y genera un promedio, se introduce una desviación estándar y el picnómetro determinará el número de corridas hasta que la desviación sea menor o igual a la que selecciono el usuario.
3. Se especifica el tamaño de la celda (*5-CELL SIZE*) con la que se trabajará, seguido de *6-PRINT/SEND REPORTS* y elegimos *USB MEMORY KEY*. Regresando a *RUN MENU* nos vamos a *2-SAMPLE PARAMETERS* seleccionamos *SAMPLE WEIGHT* e introducimos el peso de la muestra y posteriormente en el mismo menú seleccionamos *SAMPLE ID* e ingresamos el nombre del espécimen.
4. Finalmente vamos al *RUN MENU* y pulsamos *3-START*. Al finalizar nos permitirá visualizar los resultados en la pantalla del equipo y automáticamente

guardará los resultados en una USB, para finalizar presionamos *ENTER* y regresaremos al menú principal.

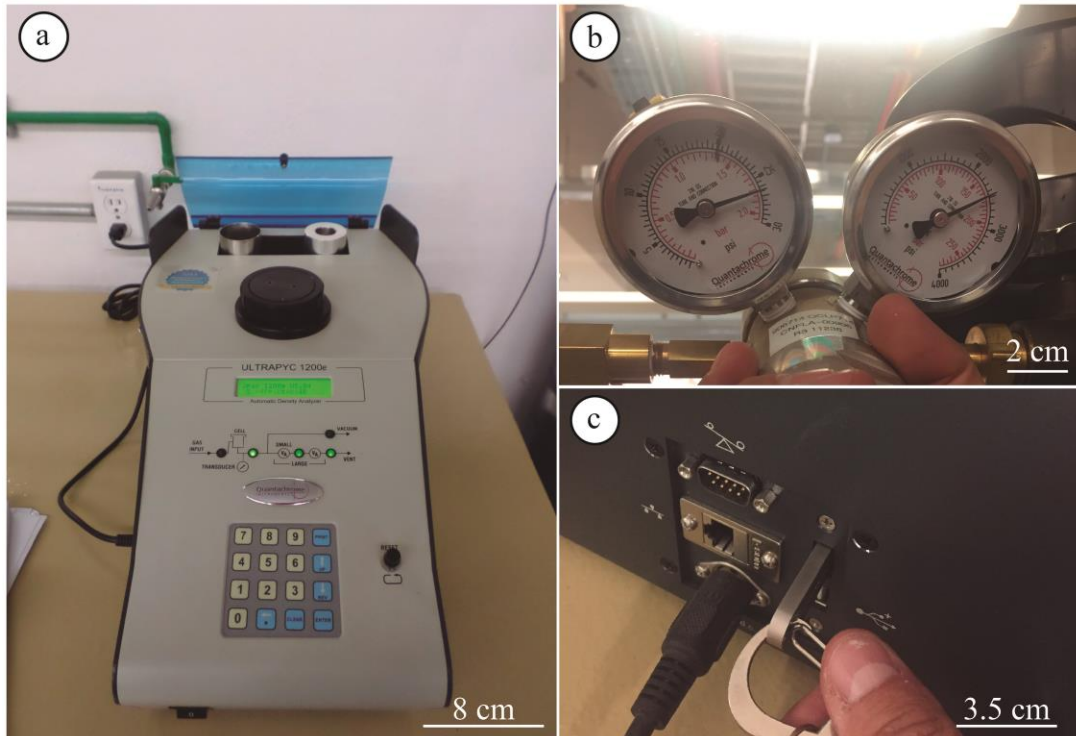


Fig. 11 a) Picnómetro de Helio modelo Ultracyc 1200e. b) válvulas de presión. c) entradas del equipo para conexiones externas (por ejemplo, puertos USB)

Porosidad

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

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

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

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

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

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

Donde: η_T es la porosidad total, ρ_a es densidad aparente, ρ_r es la densidad real.

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

Para obtener la porosidad efectiva se utilizaron tres diferentes métodos los cuales son porosidad a presión atmosférica, porosidad por medio de vacío y porosidad por inclusión de mercurio. En cada una de las pruebas se especifica la metodología empleada.

Método de saturación de Barnes a presión atmosférica

Para esta prueba se utilizó la norma UNE-EN 13755 (2002). En esta se describe que especímenes deberán tener una forma cilíndrica, cúbica o prismática de entre 70 ± 5 mm y 50 ± 5 mm, además, deberán obtenerse con una sierra de diamante o por extractora de testigos. Se usaron 7 especímenes cúbicos de aproximadamente 60 mm por lado.

Los pasos básicos para implementar el ensaye se describen a continuación:

1. Los especímenes son puestos a secar en horno ventilado a una temperatura de 70 ± 5 °C hasta tener una masa constante (se considera que ha alcanzado la masa constante cuando la diferencia entre dos pesadas efectuadas en un intervalo de 24 h no es superior al 0.1 % de la masa del espécimen.
2. Se pesan los especímenes después de secar con una precisión de 0.01 g, se colocan los especímenes en el recipiente sobre los apoyos disponibles. Cada espécimen debe de estar como mínimo a 15 mm entre ellos, se agrega agua hasta la mitad de la altura de los especímenes (contando como tiempo cero). Transcurrido 60 ± 5 min de haber agregado agua, se añade más agua hasta alcanzar las tres cuartas partes de la altura de los especímenes (Fig. 12).

- Después de 120 ± 5 min (dos horas) se añade agua hasta que los especímenes queden totalmente sumergidas bajo una lámina de agua de 25 ± 5 mm de espesor. El agua deberá de estar libre de cualquier impureza que pudiera afectar significativamente a su densidad.

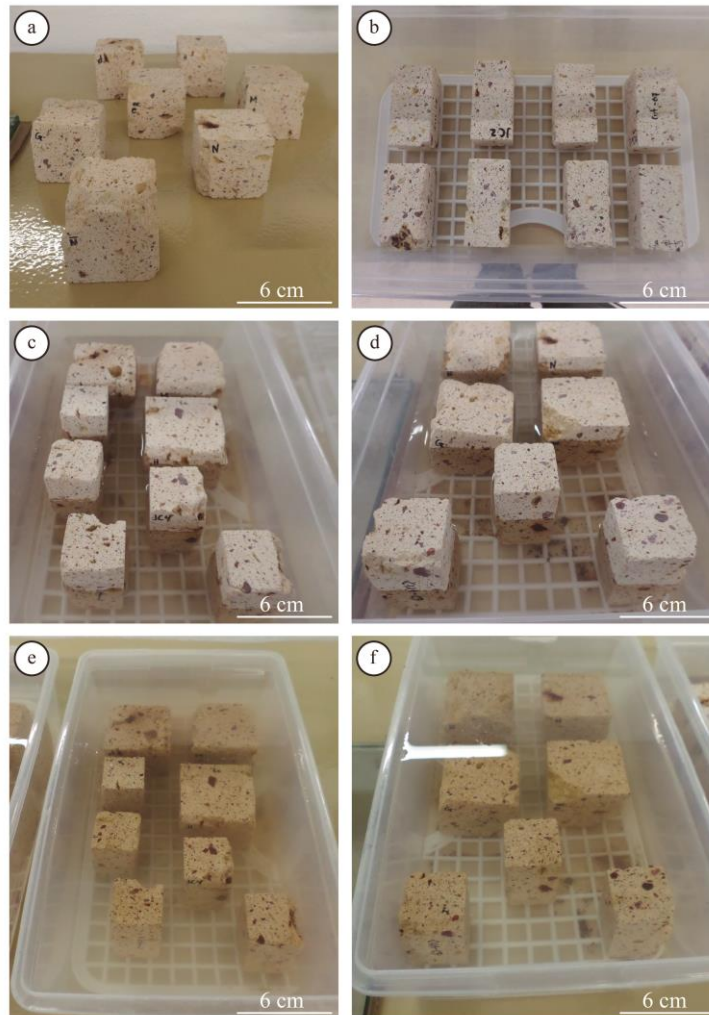


Fig. 12 Especímenes cúbicos y rectangulares de la muestra de roca Cut-07. a) y b) especímenes antes de que se realizara la prueba. c) y d) especímenes a mitad de la saturación para prueba de porosidad a presión atmosférica. e) y f) especímenes totalmente saturados y en espera para la medición.

- Después de 48 ± 2 h del inicio del experimento se sacarán los especímenes del agua, se quitará rápidamente el excedente de agua con un trapo húmedo y en un intervalo de un minuto se pesarán con una precisión de 0.01g
- Realizado el paso anterior, los especímenes son sumergidas nuevamente en el agua y se continua el ensayo. Cada 24 ± 2 h estos se sacarán del agua, se quitará

el excedente rápidamente igual que en el paso anterior hasta alcanzar una masa constante, es decir, cuando la diferencia entre dos pesadas sucesivas no supera el 0.1% de la masa del espécimen.

6. Al momento de que los especímenes alcanzan la masa constante, se pesarán sumergidos en agua determinando la masa de la muestra sumergida en agua, parámetro que se utiliza para obtener el coeficiente de absorción, el cual se calcula mediante la siguiente ecuación:

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

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

Método de saturación de Barnes a vacío

Esta porosidad se determina normalmente empleando técnicas experimentales, basadas en introducir un fluido en los poros por medio de una cámara de vacío y cuantificar el volumen de estos (Alonso, 2013). Para realizar esta prueba se utilizó una cámara de vacío Plas Labs (800-VAC/S; Fig. 13) y la metodología empleada es la referente a la norma UNE-EN 1936 (2007) en la que se describe la preparación de los especímenes así como los pasos a seguir, a continuación se describe el ensaye:

1. Los especímenes son puestos a secar en horno ventilado a una temperatura de 70 ± 5 °C hasta tener una masa constante (se considera que ha alcanzado la masa contante cuando la diferencia entre dos pesadas efectuadas en un intervalo de 24 h no es superior al 0.1 % de la masa del espécimen).
2. Una vez secos los especímenes se colocan dentro de una cámara de vacío (Fig. 14a, b) y se disminuye gradualmente la presión hasta alcanzar una presión de 2 kPa o 15 mm Hg, esta presión se mantiene por 2 ± 0.2 h para eliminar el aire de los poros.
3. Transcurridas las 2 h se introduce agua destilada lentamente en el recipiente de vacío (en un tiempo mínimo de 15 min) manteniendo la presión de 2 kPa (Fig. 14c). Una vez que todos los especímenes están sumergidos totalmente se

reestablece la presión atmosférica del recipiente y se mantienen sumergidos a presión atmosférica por otras 24 h (Fig. 14d).

4. Después de las 24 h, se determina el peso sumergido de los especímenes (Fig. 14e), así como también se pesan en condiciones ambientales lo más rápidamente posible para obtener la masa saturada.
5. Ya obtenida la masa saturada de todos los especímenes se procede a obtener el coeficiente de absorción mediante la siguiente ecuación:

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

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



Fig. 13 Cámara de vacío Plas Labs (800-VAC/S)

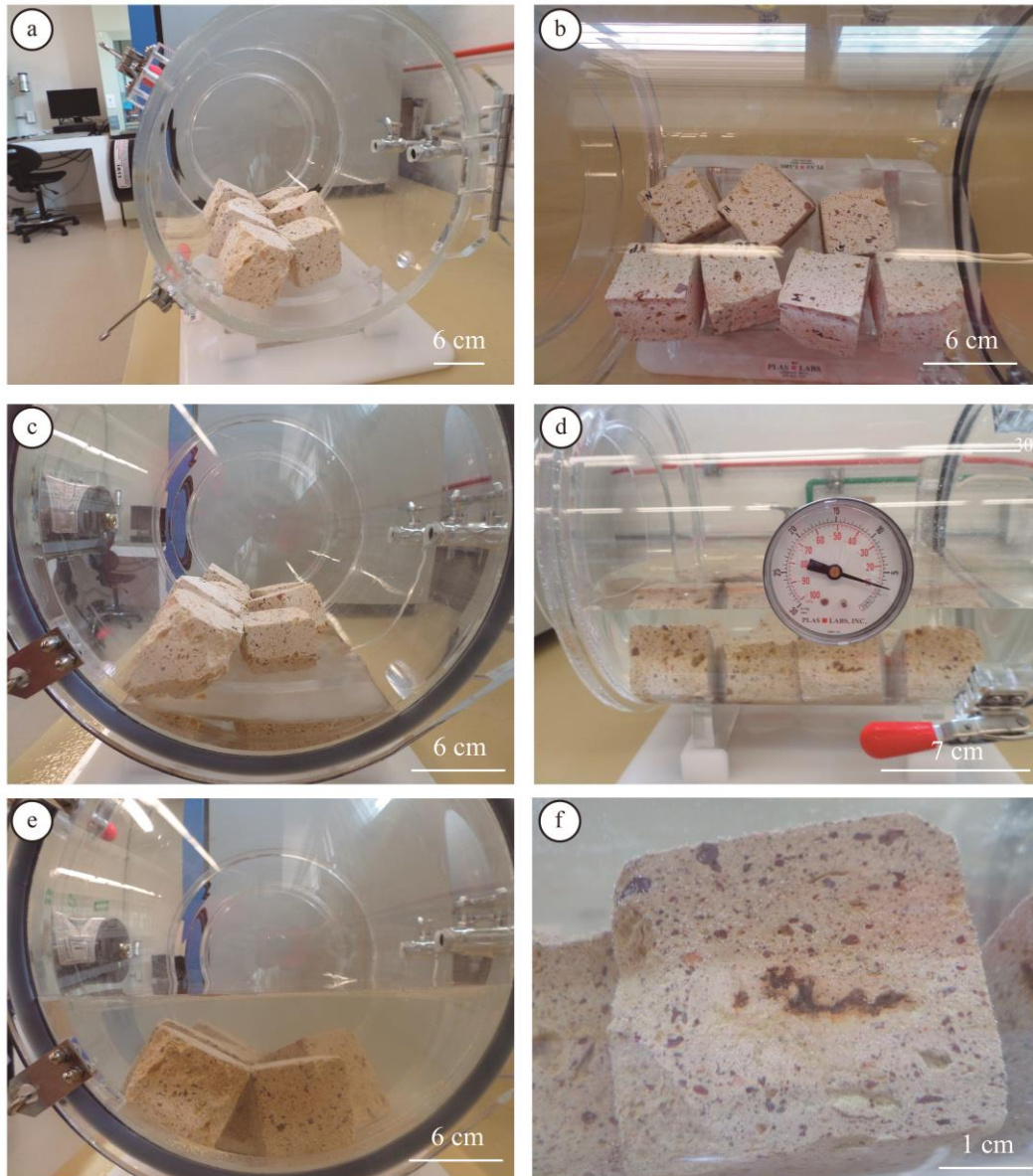


Fig. 14 Desarrollo de la prueba de saturación de Barnes a vacío. a) colocación de las muestras cúbicas dentro de la cámara de vacío. b) extracción del aire que se encuentra dentro de la cámara. c) introducción de agua a la cámara de vacío. d) llenado de la cámara manteniendo la presión de vacío. e) muestras después de 24 h de estar saturadas. f) muestra donde se observa las burbujas de aire que son extraídas durante el vacío.

Método de inyección de mercurio

La porosimetría por intrusión de mercurio constituye una de las técnicas más eficientes para realizar la caracterización de la estructura porosa de los materiales, basándose en la propiedad físicas del mercurio. La porosimetría permite conocer no solo la porosidad a la cual es

accesible el mercurio, sino también la distribución de los tamaños de poro, lo cual es útil al momento de caracterizar determinados comportamientos de los materiales.

Para realizar esta prueba se utilizó el porosímetro Quantachrome Poremaster-33 (Fig. 15), este porosímetro está diseñado para medir volúmenes de poros en un rango de aproximadamente 1000 a 0.0070 μm (70 Å) de diámetro y alcanza presiones de intrusión de 140 kPa a 231 MPa (20 – 33000 psi), también se utilizó la norma ASTM D 4404-84 . La metodología para realizar la prueba se describe a continuación:

1. Se miden las muestras para obtener sus dimensiones y así calcular el volumen aparente, las muestras son puestas a secar en horno ventilado a una temperatura de 70 ± 5 °C hasta tener una masa constante, se pesa la muestra seca y se coloca en una celda de cristal (la muestra debe llevarse lo más rápido posible ya que puede absorber humedad del ambiente).
2. Una vez colocada la muestra en la celda, se coloca una tapa de metal sellada con grasa de vacío, posteriormente la celda y la tapa son encamisadas con una cubierta plástica a medida la cual está constituida por dos piezas.
3. Ya lista la celda se procede a retirar el sistema de protección que se encuentra en el porosímetro en la sección de baja presión y se coloca la celda con sus aditamentos, después se procede a ingresar los datos que el programa *PoreMaster* requiere (este programa es la interface para que el usuario controle el porosímetro).
4. En el programa se puede indicar si se pretende realizar baja o alta presión. Primero se realiza la baja presión y al finalizar esta el equipo rellena la celda para que el usuario pueda colocar la celda en la cámara de alta presión y realizar la respectiva prueba.
5. Una vez finalizada la baja y alta presión la interface proporciona una tabla y gráficos con los resultados de la porosimetría obtenidos.

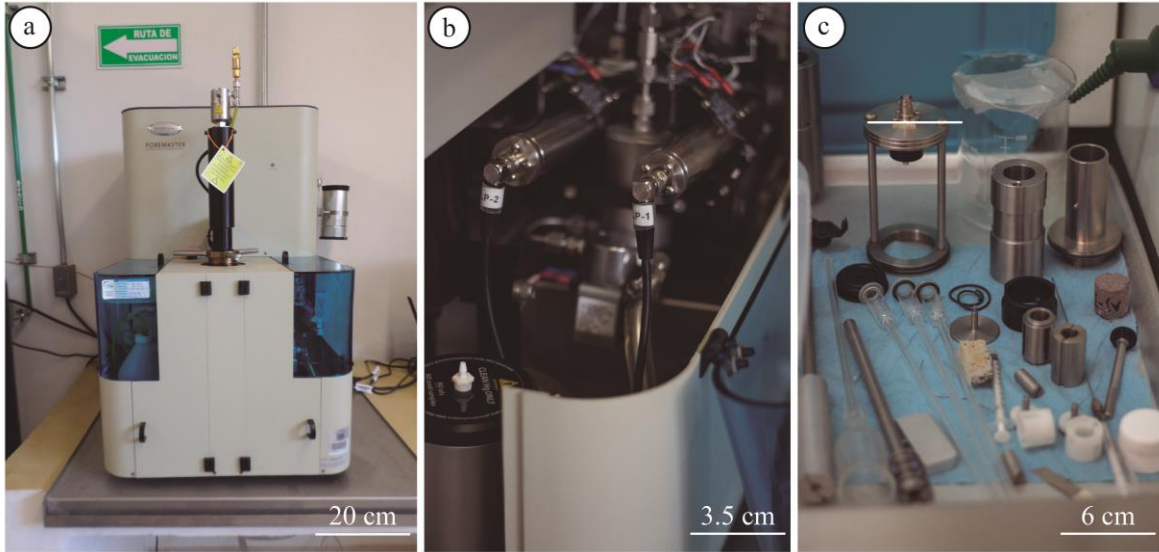


Fig. 15 Porosímetro de mercurio marca Quantachrome modelo Poremaster® 60. a) vista general del equipo. b) vista de las cámaras de vacío de baja presión. c) accesorios del equipo (por ejemplo, macro celdas).

3.3.4 Caracterización Hídrica

La caracterización hídrica incluye la descripción de la metodología que se siguió para realizar las pruebas de capilaridad, evaporación y permeabilidad, así como la definición de cada una de estas.

Capilaridad

La capilaridad es una propiedad de los líquidos que depende de su tensión superficial (la cual a su vez depende de la cohesión o fuerza intermolecular del líquido), que le da la capacidad de subir o bajar por un tubo capilar. Así debido a la presencia de esta interfase existe una diferencia de presión dentro y fuera del líquido.

La prueba de capilaridad se realizó con base a la norma europea UNE-EN 1925, en esta se describe la preparación de los especímenes y la realización del ensaye. Los especímenes deben ser cortados en forma de cubos de entre 70 ± 5 mm a 50 ± 5 mm de lado o bien cilindros rectos de base circular cuyo diámetro y altura sean iguales a 70 ± 5 mm ó 50 ± 5 mm. Para realizar esta prueba se obtuvieron 8 muestras cúbicas de roca (aproximadamente de 60 x 60 x 60 mm).

1. Los especímenes son puestos a secar en horno ventilado a una temperatura de 70 ± 5 °C hasta tener una masa constante (se considera que ha alcanzado la

masa contante cuando la diferencia entre dos pesadas efectuadas en un intervalo de 24 hrs no es superior al 0.1 % de la masa del espécimen).

2. Se pesa la muestra después de secarla con una precisión de 0.01 g y se calcula el área de la base a sumergir por medición de dos medianas con una aproximación de 0.1 mm (el área se expresa en m^2).
3. Los especímenes se colocan en un tanque sobre los pequeños apoyos, de manera que solo descansen parcialmente sobre su base. Se sumerge la base en agua hasta una profundidad de 3 ± 1 mm.
4. Se pone en marcha el cronómetro con un nivel de agua constante a lo largo del ensaye. Se tendrá que añadir agua si fuera necesario, además de cerrar el tanque para evitar la evaporación en los especímenes humedecidos.
5. Cada cierto intervalo de tiempo (en nuestro caso: 3, 5, 8, 12, 16, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 90, 120, 180, 240, 480, 1440, 1920, 2880, 4320 min) al principio corto y luego más largo, se saca sucesivamente cada espécimen, se seca ligeramente la parte sumergida utilizando un trapo húmedo para eliminar el excedente de gotas de agua y proceder inmediatamente al pesado, a continuación se vuelve a colocar el espécimen en el recipiente, se registra el tiempo transcurrido desde el comienzo del ensayo hasta el momento en el que se realiza la medición de cada peso.
6. La información obtenida durante este ensaye se ordena en tablas y estas sirven para la construcción de gráficas, en estas últimas es posible visualizar el comportamiento de los capilares y su interacción con el agua a través del tiempo. Algunos parámetros obtenidos son la variación de la masa de agua absorbida (en gramos) dividida por el área de la base sumergida de la probeta (en m^2) en función de la raíz del tiempo (en segundos).

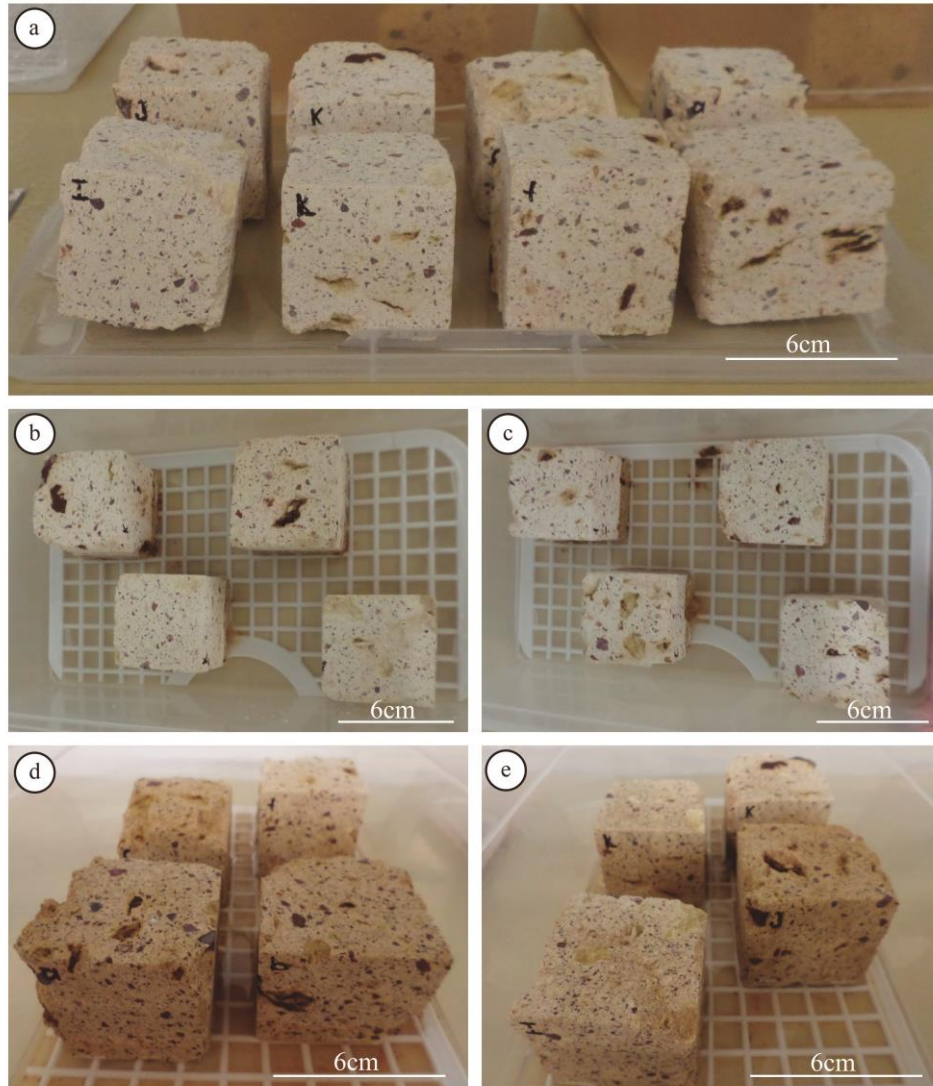


Fig. 16 Especímenes cúbicos de la muestra de roca Cut-07. a) especímenes antes de que se realizara la prueba de capilaridad. b) y c) especímenes después de 30 min de haber iniciado la prueba. d) y e) especímenes después de 144 hrs de haber iniciado la prueba.

Evaporación

La evaporación es un proceso físico por el cual cualquier sustancia líquida pasa del estado líquido al estado gaseoso, este proceso solo ocurre en la superficie de los especímenes entre el líquido y el gas, existiendo un movimiento de agua líquida de zonas internas a externas favorecido por el sistema poroso. La evaporación es más compleja que la absorción de agua puesto que es necesario romper la atracción entre las moléculas de agua y la superficie del sólido; siendo influenciado por las condiciones ambientales (por ejemplo, la temperatura,

humedad, velocidad del viento). Para realizar la prueba de evaporación se siguió la siguiente metodología:

1. Las muestras deben estar totalmente saturadas en agua a presión atmosférica, para realizar la primera medición se debe retirar el exceso de agua de las muestras utilizando un trapo o pañuelo. La primera medición será el inicio del ensaye marcado con el tiempo cero (t_0).
2. Posterior a la primera medición los especímenes se colocan en una superficie plana sobre los pequeños apoyos, de manera que solo descansen parcialmente sobre su base (en un ambiente de temperatura controlada).
3. Cada cierto intervalo de tiempo (en nuestro caso: 3, 5, 8, 12, 16, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 90, 120, 180, 240, 480, 1440, 1920, 2880, 4320 min) al principio corto y luego más largo, Se realizará el pesado de las muestras para saber cuánto está variando la masa, se dejará de realizar el pesado hasta tener una masa constante (se considera que ha alcanzado la masa contante cuando la diferencia entre dos pesadas efectuadas en un intervalo de 24 hrs no es superior al 0.1 % de la masa del espécimen).

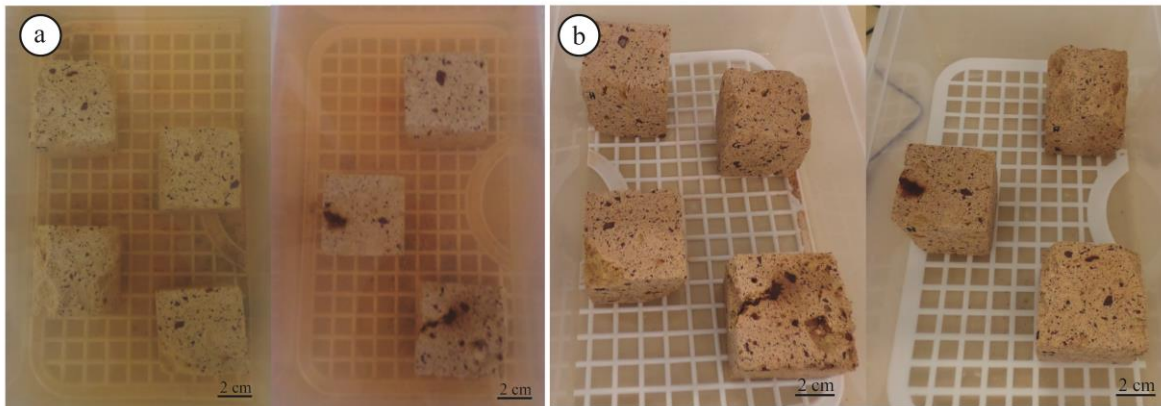


Fig. 17 Especímenes cúbicos. a) especímenes saturados en agua destilada. b) especímenes a mitad de la prueba de evaporación.

Permeabilidad.

La permeabilidad (k) se define como la propiedad de un material que permite que los fluidos (p. ej. agua, vapor de agua) lo atraviesen sin alterar su estructura interna. Esta propiedad depende de la porosidad efectiva (η_e), además de la distribución, del tamaño y forma de los poros.

Para determinar la permeabilidad se utilizó el permeámetro de gas GasPermProd modelo Ap-123-002-0 (Fig. 18), el cual está diseñado para determinar la permeabilidad por medio de la intrusión de gas inerte (p. ej. nitrógeno). La adquisición y manipulación de datos se realizó con base en la norma ASTM D 4525-08. El cálculo de la permeabilidad se deriva de la ley de Darcy (este cálculo lo realizó el programa automáticamente), utilizando la ecuación de Darcy para el flujo laminar horizontal ideal de gas bajo condiciones isotérmicas, en estado estacionario se expresa de la siguiente manera:

$$K_g = \frac{2\mu Z T P_b Q_b L}{A T_b (P_1^2 - P_2^2)}$$

Donde: K_g es la permeabilidad del gas, μ es la viscosidad del gas, Z es el factor promedio de compresibilidad del gas, T es la temperatura media del flujo de gas, P_b es la presión atmosférica o barométrica, Q_b es el caudal de gas atmosférico en P_b , L es la longitud del espécimen, A es el área del cilindro en una sección transversal, T_b es la temperatura base y P_1, P_2 son aguas arriba y aguas abajo absolutas.

La metodología que se usó es la siguiente:

1. Se prepara un espécimen cilíndrico de una pulgada de diámetro con altura variable de entre 1 a 3 veces su diámetro. Cada espécimen se seca en un horno ventilado a una temperatura de 70 ± 5 °C hasta tener una masa constante (se considera que ha alcanzado la masa constante cuando la diferencia entre dos pesadas efectuadas en un intervalo de 24 hrs no es superior al 0.1 % de la masa del espécimen).
2. El espécimen es pesado para obtener su masa al momento de realizar la prueba, en seguida se abren las válvulas del tanque almacenador del gas nitrógeno, se abre el programa *GasPerm Prod* el cual es una interface que sirve para que el usuario pueda controlar el permeámetro. Dentro del programa se debe actualizar el valor de la presión atmosférica (antes de actualizar la presión se debe tener la precaución de tener la celda de confinamiento abierta de lo contrario la actualización de la presión atmosférica será errónea). El permeámetro se apaga y se procede a colocar el espécimen, los aditamentos de confinamiento y se agregan los datos del ensaye y espécimen (p. ej. usuario, nomenclatura del espécimen, dimensiones, peso, presión de confinamiento) al programa.

- Una vez agregados los datos se inicia la prueba: se abre la válvula de presión del permeámetro, se enciende el equipo, se selecciona el modo de prueba (a cinco puntos) y se pone en marcha el equipo. La interface permite al usuario modificar el flujo el cual es variable de 0 a 600 Ncc/min, lo cual puede hacer variar la presión de entrada al espécimen variando de 0.5 a 150 psi.
- Para la prueba de cinco puntos al tener una presión estable (con poca variación), se indica al equipo inicie el proceso de estabilidad, mediante el cual se calcula la permeabilidad. Una vez alcanzado los cinco puntos de presión y permeabilidad los datos se expresan en formato de macros en Excel.

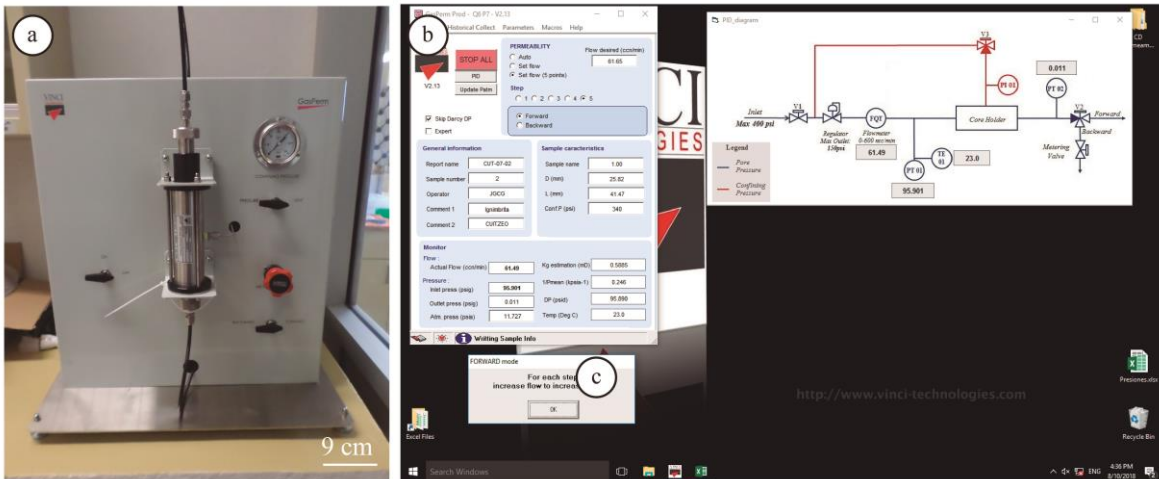


Fig. 18 a) Permeámetro de gas GasPermProd modelo Ap-123-002-0. b) Interfaz del programa *GasPerm Prod*

4. Resultados y discusiones

En este capítulo se expresan los resultados obtenidos en los diversos trabajos de campo y de laboratorio realizados para este trabajo de tesis. Por una parte, se destacan las observaciones y descripción realizadas en campo, en muestra de mano y en lámina delgada, así como también se destacan las características físicas e hídricas determinadas en laboratorio enfocadas al sistema poroso de la roca en estudio. Dicho enfoque clasifica el tamaño y la forma de los poros, así como la conectividad entre estos.

4.1 Descripción de campo

En esta sección se describe de manera general la información recabada durante los trabajos de campo realizados por medio de las estaciones geológicas ubicadas a lo largo de la margen sur del lago de Cuitzeo. La descripción que a continuación se muestra corresponde a los afloramientos más representativos de la zona.

- **Cut-01**

En este afloramiento se identificaron dos principales unidades litológicas, las cuales podemos nombrar como inferior y superior. La unidad inferior corresponde a un basalto masivo y muy fracturado con un espesor de 3.4 m aproximadamente además el basalto presenta un color gris al fresco y coloraciones verde a verde oscuro a la intemperie y se le denominó como Unidad 1 (U1). La unidad superior corresponde a un depósito aluvial y no se observa gradación, presenta un espesor promedio de 1.6 m. Esta unidad está conformada por material matriz-soportados (areno-limosa), la matriz presenta un color café. Los clastos están constituidos por fragmentos de diferentes tamaños (entre 2 mm a 30 cm), los fragmentos tienen baja esfericidad y la forma va de redondeado a subredondeado, esta pobremente clasificado con un porcentaje de 40% matriz y 60% clastos y se le denominó como Unidad 2 (U2). El contacto entre las unidades 1 y 2 es un contacto de tipo erosivo. Estas unidades se encuentran coronadas por una capa de suelo al cual se le denominó Unidad 3. Esta capa presenta un espesor promedio de 25 cm aproximadamente de color café oscuro, con presencia de fragmentos de roca, materia orgánica y escasa vegetación.



Fig. 19 Estación geológica Cut-01. Unidad 1: Basalto masivo y fracturado con coloración gris al fresco y tonos verde a la intemperie. Unidad 2: Depósito aluvial conformado por material matriz-soportados presenta un color café. Unidad 3: Capa de suelo de color café oscuro.

- **Cut-03**

En este afloramiento se visualizan dos unidades litológicas, las cuales se denominan como inferior y superior. La unidad inferior corresponde a un depósito conformado por material brechoso masivo de aproximadamente 3.7 m de espesor, el cual está constituido por bloques angulosos a subangulosos de color grisáceo y se denominó como Unidad (U1). La unidad superior corresponde a un depósito aluvial de aproximadamente 1 m de espesor, el cual presenta una matriz de color café oscuro y fragmentos de roca menores a 15 cm, presentando una forma subredondeada a subangulosa, de coloración variable entre gris y verde. A toda esta unidad se le denominó Unidad 2 (U2): el contacto entre las unidades 1 y 2 corresponde a un contacto de tipo erosivo. Coronando a todo el depósito se observa una capa de suelo al cual se le denominó Unidad 3 (U3) de aproximadamente 30 cm de espesor, de color oscuro (por humedad) con presencia de fragmentos de roca, materia orgánica y escasa vegetación.



Fig. 20 Estación geológica Cut-03. Unidad 1: Material brechoso masivo constituido por bloques angulosos a subangulosos de color grisáceo. Unidad 2: Depósito aluvial con una matriz de color cafe oscuro y fragmentos subredondeados a subangulosos. Unidad 3: Capa de suelo de color oscuro (por humedad) con presencia de fragmentos de roca.

- **Cut-05**

En este afloramiento se visualizan dos unidades litológicas, las cuales se denominan inferior y superior. La unidad inferior corresponde a una ignimbrita masiva de color café, deleznable y alterada y se denominó como Unidad 1 (U1). La unidad superior corresponde a un depósito conformado por material brechoso masivo con bloques de 5 cm hasta 30 cm, la forma de los bloques varia de angulosos a subangulosos y su coloración es gris oscuro y verde, y se denominó como Unidad 2 (U2). La unidad 1 y 2 se encuentran en contacto concordante.



Fig. 21 Estación geológica Cut-05. Unidad 1: Ignimbrita masiva de color cafe, deleznable y alterada. Unidad 2: Material brechoso masivo con bloques angulosos a subangulosos y su coloración es gris oscuro y verde.

- **Cut-07**

En este afloramiento se observan dos unidades litológicas divididas en inferior y superior. La unidad inferior corresponde a una ignimbrita color amarillo-naranja claro, con textura piroclástica. Presenta un espesor aproximado de 8.3 m, con al menos 4 tipos de líticos diferentes y se denominó como Unidad (U1). La unidad superior corresponde a una lava de textura afanítica levemente fracturada, en la parte expuesta se observa un color rojizo, mientras que en otras partes se observa con un color gris claro, se distinguen pequeñas zonas con tonalidades verdes los cuales pueden ser zonas de mayor grado de alteración y se denominó como Unidad 2 (U2).

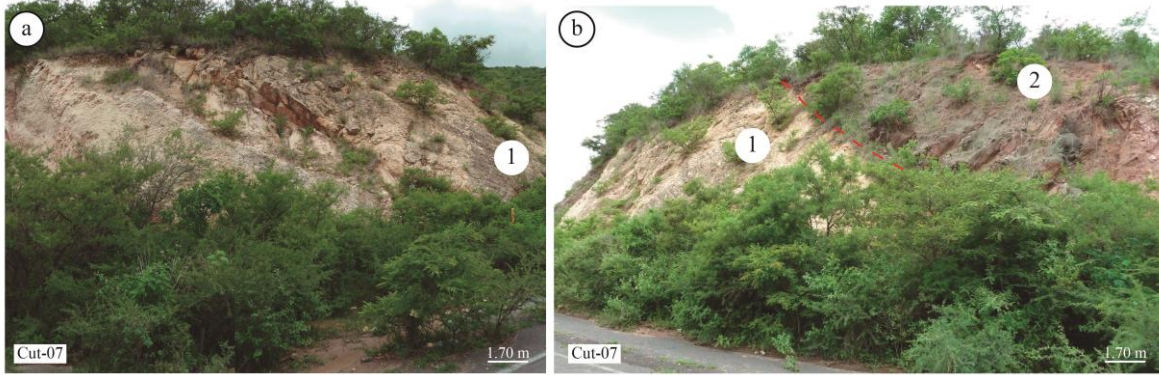


Fig. 22 Estación geológica Cut-07. a) afloramiento de donde se extrajo la ignimbrita base de este trabajo. b) visualización del contacto entre la ignimbrita y la lava. Unidad 1: Ignimbrita color amarillo-naranja claro, con textura piroclástica. Unidad 2: Lava de textura afanítica levemente fracturada.

- **Cut-08**

En este afloramiento continua la secuencia de ignimbritas que se describieron en el afloramiento CUT-07, pero se observó una formación de una cuña en el macizo rocoso. Se formó una cuña por 3 discontinuidades en la dirección del echado/ echado, $259^{\circ}/60^{\circ}$ con un espaciamiento de 2 m, $290^{\circ}/40^{\circ}$ con un espaciamiento de 4.20 m, $226^{\circ}/65^{\circ}$ con un espaciamiento de 3 metros. La cuña tiene una longitud de 5 metros, en el centro de la cuña se observa material deslizado. Se observa una pseudoestratificación, el talud tiene una dirección del echado/ echado de $248^{\circ}/75^{\circ}$. El tamaño de los bloques producto del deslizamiento varían de 2 cm a 1.5 m.

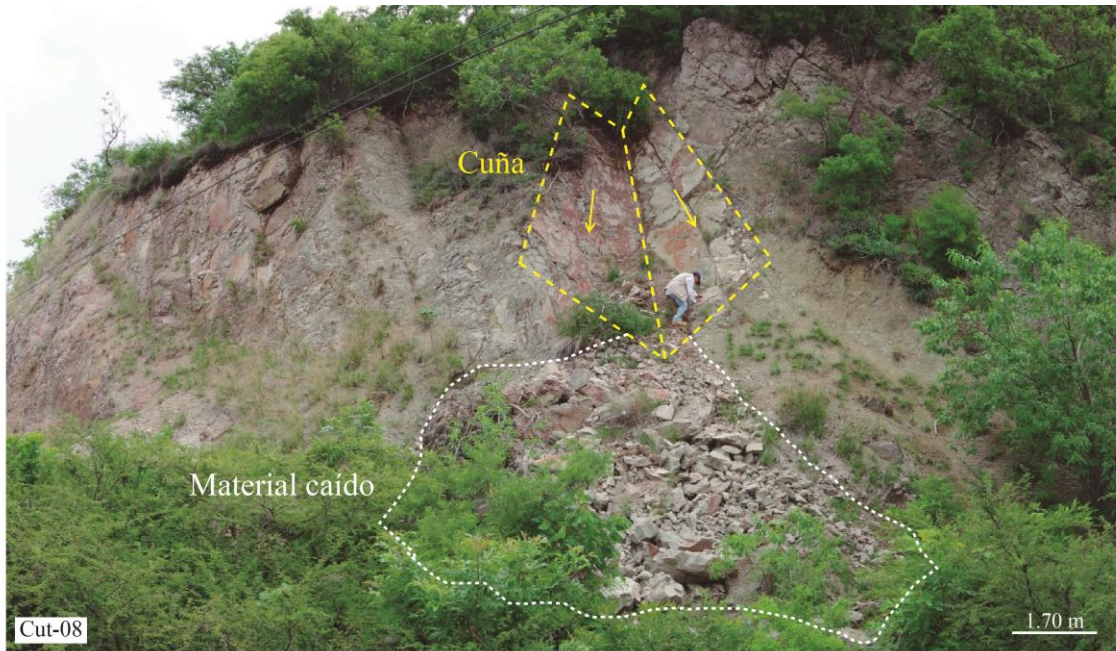


Fig. 23 Estación geológica Cut-08. Delimitación de la cuña y material de roca caído visibles en el lugar.

- **Cut-10**

Este afloramiento se dividió basándose en las características que presenta cada uno de las unidades de la siguiente manera: Unidad 1) ignimbrita de color naranja- rosáceo alterada de textura afanítica con presencia de plagioclasas, Unidad 2) Ignimbrita masiva de color blanco, constituida por fragmentos líticos los cuales presentan colores negros, rojos y grises con un tamaño menor e igual a 2 mm. Unidad 3) Paquete de roca afanítica de color rojizo-morado, presenta estratificación, variando el espesor de los estratos de 2 a 10 cm, presentando alternancia de materiales consolidados y material deleznable. Unidad 4) Paquete de roca estratificada de color café -rosáceo. Los estratos presentan espesores de 1.5 a 3 cm. La roca contiene fragmentos alterados posiblemente de pómez, estos fragmentos tienen una orientación preferencial paralela a la dirección de los estratos. Unidad 5) Roca estratificada color rojizo, presenta estratificación planar paralela. El espesor de los estratos varía de 1 a 7 cm. Unidad 6) Roca masiva de color café rosáceo, se observan fracturas irregulares. Unidad 7) Roca estratificada (consolidada) de color café claro, en algunas partes presenta un color naranja esto debido a la meteorización. La estratificación que presenta tiene espesores de 2 a 6 cm. Unidad 8) Roca masiva no consolidada de color café, está constituida por clastos mayores a 3.2 cm y pobremente clasificados.

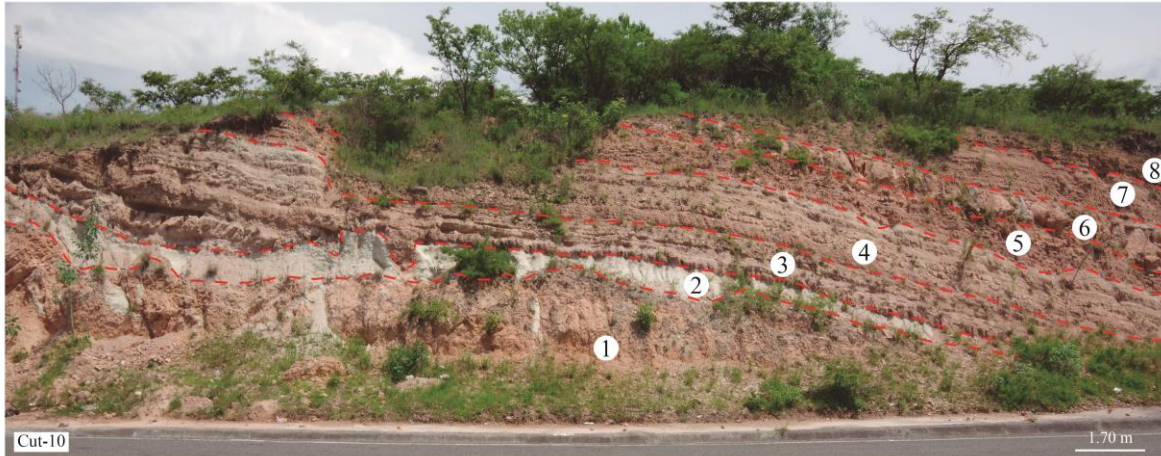


Fig. 24 Estación geológica Cut-10. Unidad 1: Ignimbrita de color naranja- rosáceo alterada. Unidad 2: Ignimbrita masiva de color blanco, constituida por fragmentos líticos. Unidad 3: Roca afanítica de color rojizo- morado, presenta estratificación. Unidad 4: Roca estratificada de color café -rosáceo. Unidad 5: Roca estratificada color rojizo. Unidad 6: Roca masiva fracturada de color café rosáceo. Unidad 7: Roca estratificada de color café claro. Unidad 8: Roca masiva no consolidada de color café, constituida por clastos.

- **Cut-12**

Afloramiento fallado de ignimbrita que presenta variaciones de color que van de tonalidad rosácea en zonas de menor alteración y en zonas de mayor alteración presenta un color negro verdoso. En algunas partes se observan vesículas, el fracturamiento es prácticamente vertical y horizontal predominando el fracturamiento verticales (tipo columnar), se encuentran por lo menos dos familias de discontinuidades con orientación NW-SE y NE-SW. En la Fig. 25 se observa una falla normal con dirección NW-SE. En muestra de mano la roca presenta pómez de color blanco de forma irregular 2.5 cm. Matriz volcánica de color rosácea, líticos de color rojo y algunos oscuros subangulosos-angulosos menores a 3 mm presenta cristales menores a 2 mm la muestra se encuentra soldada, los cristales son transparentes y algunos opacos.

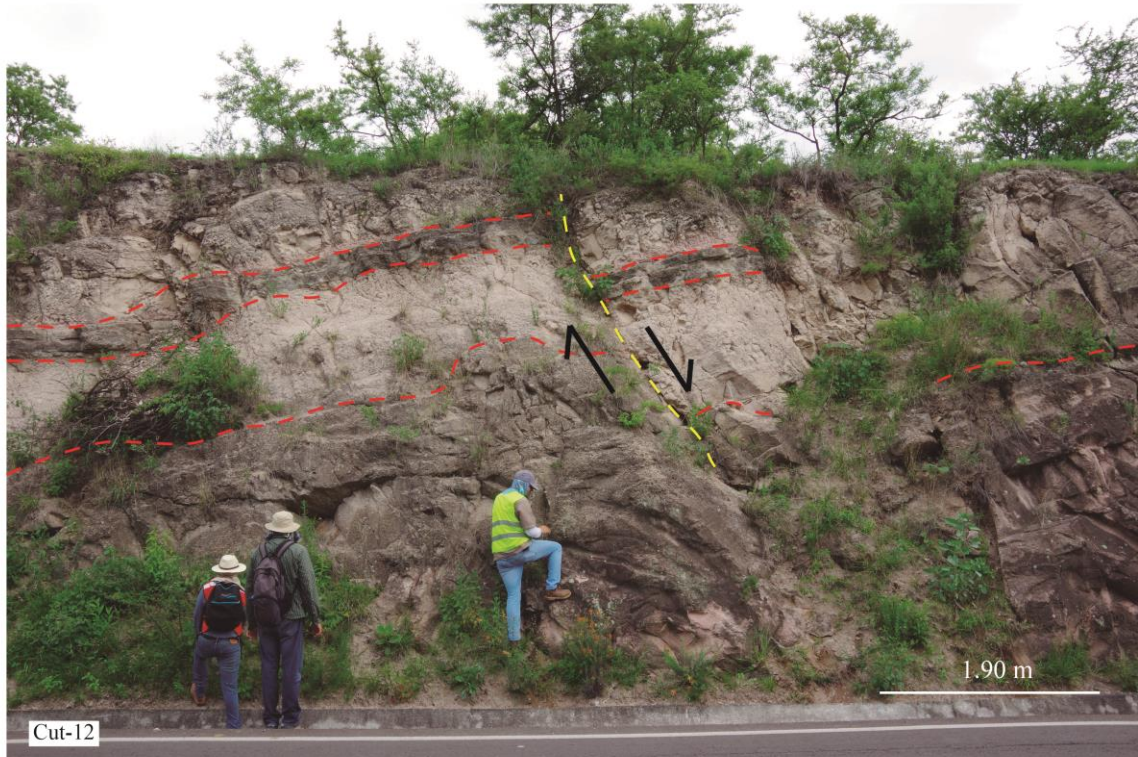


Fig. 25 Estación geológica Cut-12. Falla normal con dirección NW-SE. Ignimbrita fallada que presenta tonalidad rosácea en zonas de menor alteración y en zonas de mayor alteración presenta un color negro verdoso.

Cut-13

Roca fracturada que presenta variaciones de color (en zonas alteradas tiene colores amarillos claro con tonalidad rosácea, en algunas zonas presenta colores oscuros y en la zona de menor alteración se observa una tonalidad rosácea). Roca volcánica con textura piroclástica, presenta al menos dos tipos de fragmentos de líticos, se observa pómez, plagioclasas, cuarzo, minerales oscuros. Los fragmentos líticos y de pómez, tiene forma sub-angulosa a sub-redondeada. Se observa un horizonte clasto soportado moderadamente clasificado, de tamaño de arenas gruesas, se observan discontinuidades. Se observan depósitos de grano fino con una tonalidad rosácea y contiene fragmentos de pómez. En la parte inferior se observa un mayor contenido de clastos y pómez.



Fig. 26 Estación geológica Cut-13. Roca fracturada con variaciones de color, textura piroclástica, presenta al menos dos tipos de fragmentos de líticos y se observan caídos de rocas.

Las estaciones geológicas Cut-9, Cut-11 y Cut-14 son puntos de control donde no se realizó una descripción debido que se observaba una continuación de los mismo y/o no eran accesibles.

4.2 Caracterización Petrográfica

De acuerdo con la sección de metodología la unidad de roca Cut-07 se describe con base en diferentes características tanto en muestra de mano como en lámina delgada:

En muestra de mano la roca se describe como masiva de color naranja-amarillento pálido (10YR 2/2, Munsell 2009), presenta una textura piroclástica compuesta por diferentes elementos: líticos con diferentes características físicas (por ejemplo, forma), pómez y *fiamas*. Estos elementos están distribuidos en toda la superficie de la roca, sin una orientación específica, sin embargo, en algunas muestras las *fiamas* muestran una orientación (Fig. 27), están mal clasificados y soportados por una matriz poco soldada compuesta principalmente de vidrio.

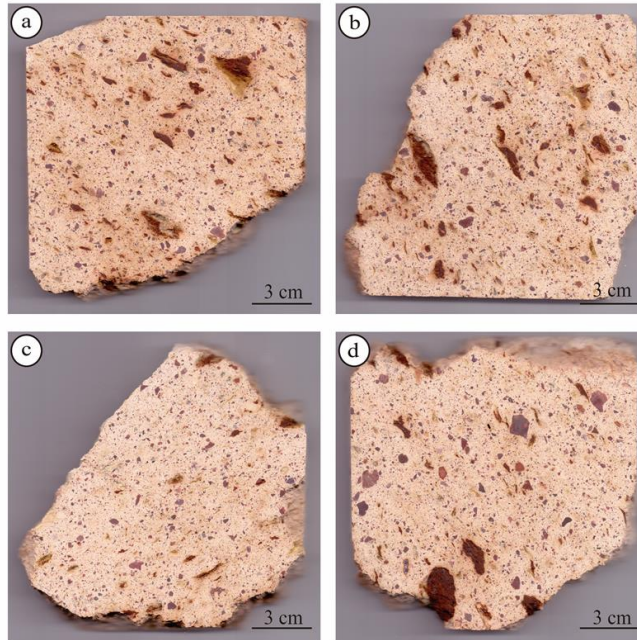


Fig. 27 Secciones planas donde se aprecia la orientación y la variación en el tamaño de las *fiames*, las *fiames* nos permiten inferir la dirección del depósito, así como el grado de aplastamiento.

Los elementos presentan las siguientes características:

Pómez

Los fragmentos de pómez presentan diferentes tonalidades, de acuerdo a la ficha de colores propuesta por Munsell, que van desde transparente, blanco (N9), moderadamente amarillo (5Y 7/6) rosa moderadamente naranja (5Y 8/4) y moderadamente café (5YR 4/4). En la muestra se observan principalmente dos clases de pómez: 1) pómez no alteradas y 2) *Fiames* (pómez alteradas) que van cambiando de tonalidades claras (para pómez con poca alteración) a oscuras (para pómez alteradas, posiblemente a minerales de arcilla) según el grado de alteración:

1. Inalterada (pna): presenta tamaños ≤ 1.2 cm, la mayoría de estos elementos tienen forma discoidal, pero se distinguen otras con forma esférica, redondeadas a sub-angulosas con baja esfericidad (Fig. 28b).

2. Alterada (pa): presenta tamaños ≤ 3.2 cm, en las de mayor alteración se observa presencia de arcilla, tienen forma prolada y cilíndrica, sub-angulosas con baja esfericidad, en la mayor de las veces deleznales al tacto (Fig. 28b).

Líticos

La muestra presenta 6 diferentes tipos de líticos, algunos muy vesiculados con variación en características físicas (p. ej. color, tamaño forma, esfericidad y redondez). Los clastos identificados en muestra de mano se mencionan en orden de mayor a menor abundancia.

1. Rojo y gris (lrg): Clastos de forma equidimensional, tabular y elipsoidal, con alta y baja esfericidad, sub-angular. Presentan un tamaño de ≤ 2 cm. Se caracteriza por tener manchas de tonalidades rojas (5R 5/4) y gris verde claro (5G 8/1; Fig. 28).

2. Grises (lg): Clastos con variación de forma tabular, equidimensional y cilíndrico con una esfericidad baja, subangular y sub-redondeada. Presentan tamaño que va de 0.1 a 1 cm. Algunos de los elementos se caracterizan por presentar bandas con tonalidades grises moderadamente azulados (5B 5/1) y grises rosados (5YR 8/1; Fig. 28).

3. Rojo(lr): Clastos de forma tabular, equidimensional, cilíndrica y elipsoidal, con una esfericidad alta y baja, sub angular. Presentan un tamaño ≤ 2 cm. Se caracterizan por la presencia de algunas partículas de menos tamaño de color negro, la mayoría de los clastos varían en tonalidades de rojo oscuro a moderado (5R 2/6 y 5R 4/6, respectivamente; Fig. 28).

4. Rosa (lrs): Clastos de forma tabular, con esfericidad baja, subangular. Presentan un tamaño que va de 0.05 a 5 cm. Estos líticos presentan variaciones en el color de rosa moderadamente naranja (10R 7/4) y ligeramente rojo (5R 6/6). Se caracteriza por la presencia de vesículas más pequeñas que el resto de los líticos y sobre la superficie de algunos elementos se observan partículas ligeramente rojas (5R 6/6), negro (N1) y negro marrón (5YR 2/1; Fig. 28).

5. Verde (lv): Clastos de forma tabular, con una esfericidad baja y sub-redondeado, presentan un tamaño ≤ 0.4 cm. Se caracterizan por la presencia de algunas partículas de tonalidad gris verdoso (5GY 6/1; Fig. 28).

6. Negro (ln): Clastos de forma tabular y elipsoidal, con baja esfericidad, sub-angulosa y sub-redondeada. Presentan un tamaño ≤ 0.4 cm. Estas partículas se aprecian de un color negro (N1;Fig. 28).

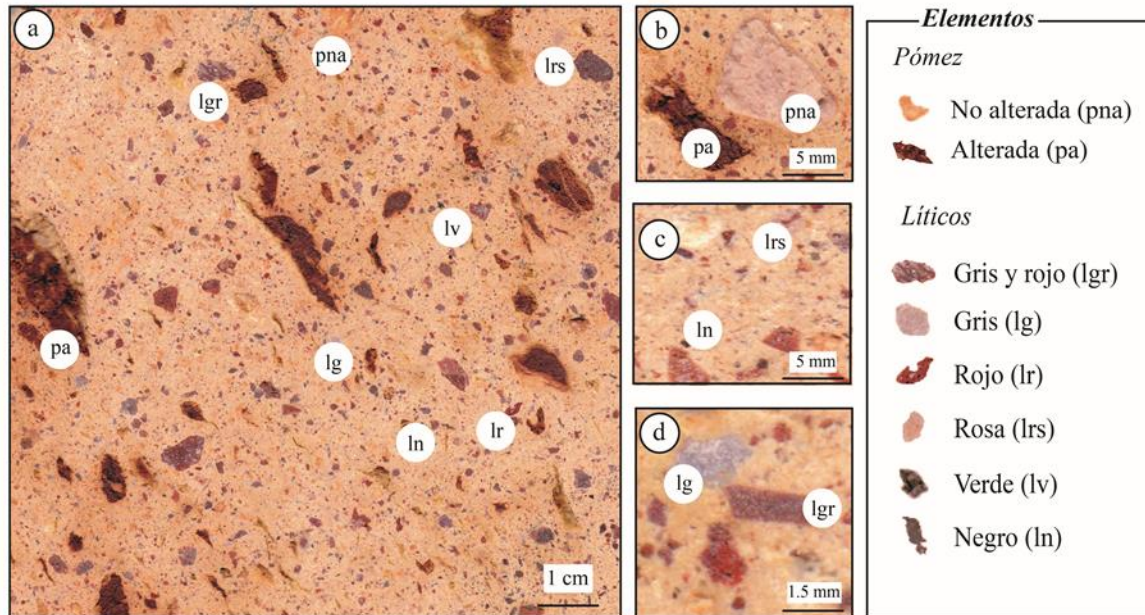


Fig. 28 Textura de la muestra de roca Cut-07. a) detalle de los elementos que componen la muestra. b) detalle de las pómez alteradas y de las pómez no alteradas. c) variación de la irregularidad de los líticos d) variación entre los líticos de los líticos grises. Se muestra la forma equidimensional.

Las muestras de roca en láminas delgadas presentan una textura hipocrystalina y vesiculada (Fig. 29), compuesta por cristales de plagioclasa con forma subhedral hasta anhedral, las cuales la mayoría están fracturadas. Se observan 3 diferentes tipos de líticos, los cuales fueron observados con luz paralela y polarización cruzada.

- 1) Lítico Rojo: se observan 2 diferentes tipos de líticos variando en su textura y en el grado de alteración.
 - a. Con una textura microlítica de plagioclasa, subredondeado con baja esfericidad, alargado y presenta óxidos.
 - b. Con textura afanítica. Varía de subangular a subredondeado con baja esfericidad.

- 2) Lítico Café: Presenta una textura microlítica de plagioclasa. Varía de subangular a subredondeada con baja esfericidad, alargado y presencia de óxidos.
- 3) Lítico Gris: Presenta una textura microlítica de plagioclasa. Varía de subangular a subredondeado con baja esfericidad y presencia de óxidos.

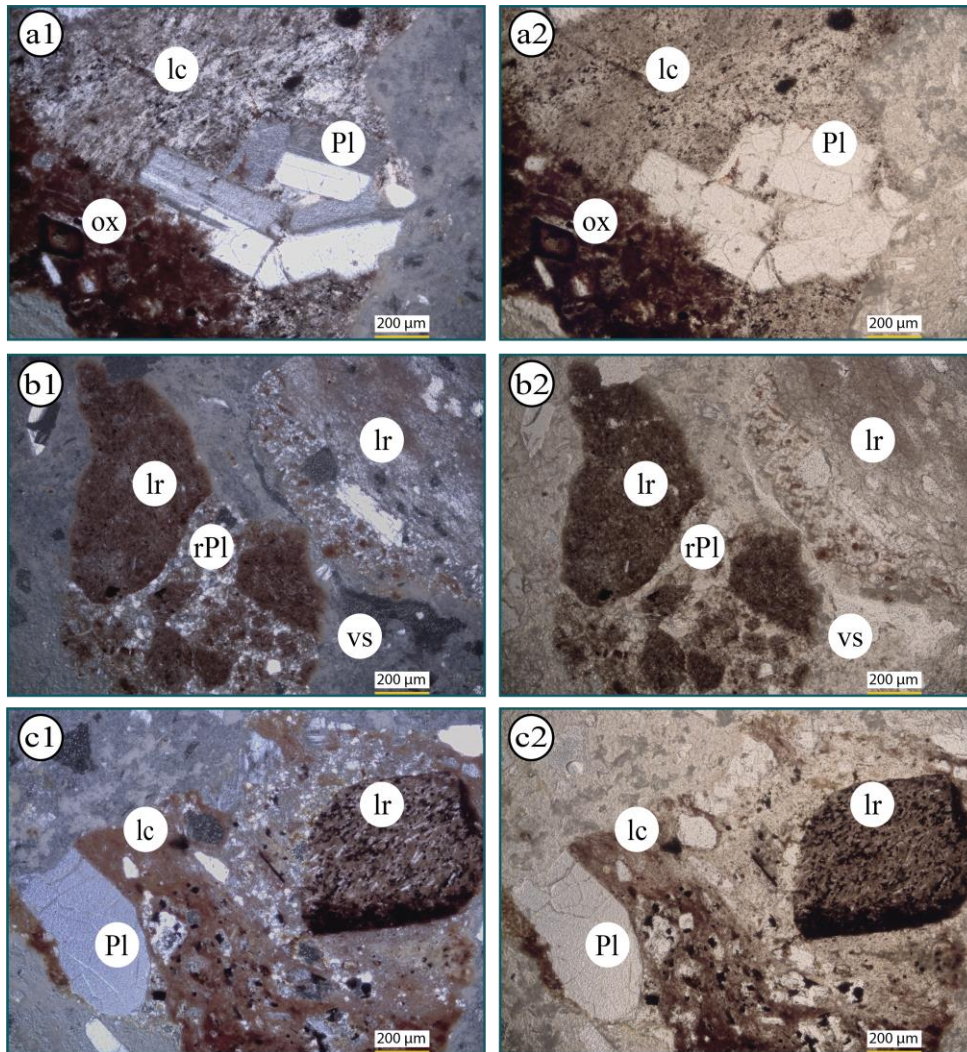


Fig. 29 Las imágenes con número 1 son imágenes de láminas delgadas en polarización cruzada y con número 2 son imágenes de láminas en luz paralela., a1 y a2) lítico con textura microlítica con presencia de óxidos y plagioclasas. b1 y b2) lítico rojo con diferencias texturales: Derecha Textura microlítica e izquierda textura afanítica con recristalización de plagioclasa c1 y c2) lítico rojo, sobre un lítico café, presencia de plagioclasas con formas anhedral a subhedral. Abreviaciones: lítico café (lc), óxidos (ox), plagioclasas (Pl), vesícula (vs), recristalización de plagioclasa (rPl).

La ignimbrita presenta una porosidad similar a la interpartícula e intrapartícula de Choquette y Pray (1970), presentando una mayor preferencia hacia la porosidad interpartícula. Los poros en su mayoría presentan formas irregulares y alargadas, algunos se encuentran conectados por pequeñas zonas de contacto y algunas microfisuras presentes en la roca (Fig. 30).

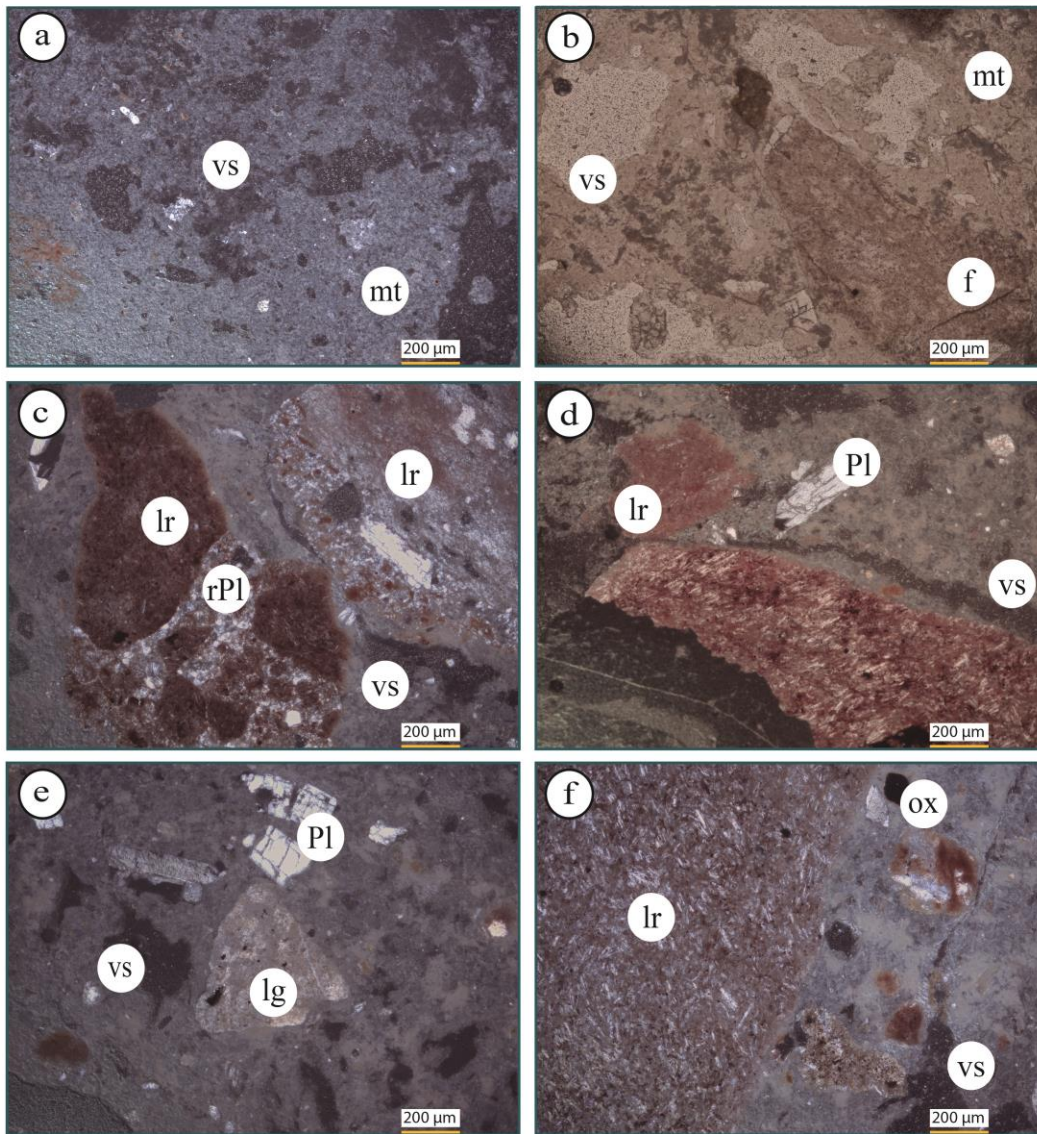


Fig. 30 Imágenes de láminas delgadas de la muestra Cut-07 donde se observa la porosidad presente en la misma. a) vista en polarización cruzada donde se muestran los diferentes tamaños de poros visibles en lámina delgada. b) vista en luz paralela donde se observan fisuras que conectan diferentes porosos: c) visualización de vesícula irregular que está conectada con otra por un pequeño tramo. d) vista en polarización cruzada donde se observan poros de diferentes tamaños y algunos alargados. e) visualización de las diferentes formas de los poros visibles en lámina. f) conexión de diferentes poros por medio de una fractura. Abreviaciones: lítico rojo (lr), óxidos (ox), plagioclasas (Pl), vesícula (vs), recristalización de plagioclasa (rPl), Matriz (mt), fractura (f).

4.3 Caracterización Física

La caracterización física se ha hecho con base en diferentes pruebas de laboratorio, las cuales incluyen análisis textural con base en el análisis de imágenes en dos dimensiones, análisis de la porosidad y sistema poroso (por ejemplo, intrusión de mercurio, saturación atmosférica) y densidad por intrusión de Helio. Los resultados se discuten en las siguientes secciones. De manera general, los valores de porosidad de la muestra varían de 29 a 35 % y son similares a los que se describen en bibliografía (por ejemplo, Pola et al., 2016) para el mismo tipo de roca. Cabe resaltar que los valores de densidad se mantienen en un promedio de 2.3. Para comparar los resultados, se resalta que el valor de densidad real promedio de una caliza es de 2.7, mientras que el valor promedio de una pómez llega a ser de 1.6, la densidad de sólido de la ignimbrita llega a variar dependiendo de los componentes que le integren es decir a la abundancia y tamaño de líticos, pómez, *fiames* y del contenido de arcillas que puedan presentar los especímenes.

Estudio textural con base en análisis de imágenes (estereología)

Para el análisis textural se analizaron once secciones planas (Fig. 5c) por medio del software libre imageJ. El análisis consistió en una primera clasificación de las componentes de la roca, las cuales fueron divididas en *fiames*, líticos, pómez y matriz (Fig. 31). La Tabla 3 muestra los porcentajes de cada elemento presente en los diferentes especímenes. Una segunda clasificación consistió en obtener el diámetro de los componentes y calcular el porcentaje de acuerdo al tamaño de partícula basada en la escala de tamaño de grano de Dorrick, (2010) (ver Anexo 3). La Tabla 4 muestra la distribución de partícula de cada componente, incluida su desviación estándar.

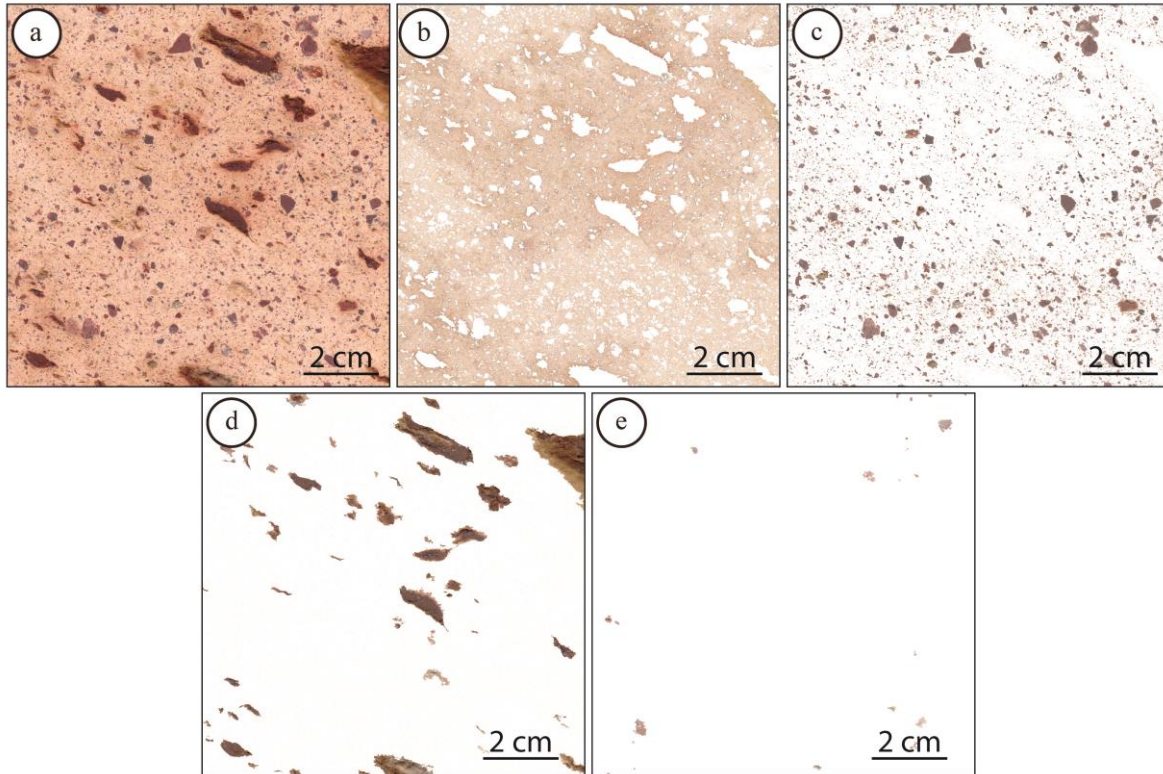


Fig. 31 Clasificación de la roca Cut-07 por medio del programa ImageJ y Photoshop. a) Muestra de roca Cut-07. b) Matriz de roca. c) Líticos presentes en la sección de roca. d) Fiamas donde se observa una orientación. e) Pómez encontradas en la sección de roca.

Tabla 3 Conteo de componentes de la muestra Cut-07.

Espécimen	Fiames %	Líticos %	Pómez %	Matriz %
at1	7.26	10.49	0.54	81.71
at2	16.62	10.54	0.00	72.84
at3	2.04	10.90	0.56	86.50
at4	3.39	15.69	0.85	80.07
at5	2.02	15.18	1.25	81.55
at6	2.82	14.71	0.78	81.70
at7	5.35	12.53	0.76	81.36
at8	3.97	13.48	2.10	80.45
at9	5.35	16.65	2.89	75.11
at10	6.24	24.55	1.16	68.05
at11	8.33	17.17	1.49	73.01

Los porcentajes de los componentes obtenidos a partir de las secciones planas, fueron tratados con la ecuación de Delesse la cual permite cuantificar el volumen de una partícula a

partir de una sección plana. La Tabla 3 muestra que los fragmentos líticos son más abundantes, mientras que los fragmentos de pómez presentan menor abundancia.

Tabla 4. Porcentaje del tamaño de Fiamas, Líticos y Pómez que presenta la muestra de roca Cut-07 obtenidos a partir del programa ImageJ. P= guijarros (>4 mm). Gr= granulo (4-2 mm). CoS= arena gruesa (2-0.5 mm). MeS= arena media (0.5-0.25 mm). FiS= Arena fina (0.25-0.06 mm). Si= limo (< 0.06 mm). La clasificación utilizada fue la escala de tamaño de grano de Dorrick, (2010).

Muestra	Fiamas %					
	P (mm)	Gr (mm)	CoS (mm)	MeS (mm)	FiS (mm)	SI (mm)
Cut-07	2.687 ± 1.963	1.406 ± 0.618	1.1126 ± 0.217	0.024 ± 0.031	0.836 ± 2.627	0.004 ± 0.007
Muestra	Líticos %					
	P (mm)	Gr (mm)	CoS (mm)	MeS (mm)	FiS (mm)	SI (mm)
Cut-07	1.048 ± 0.844	1.838 ± 0.535	6.244 ± 1.633	2.724 ± 0.649	2.558 ± 0.708	0.400 ± 0.171
Muestra	Pómez %					
	P (mm)	Gr (mm)	CoS (mm)	MeS (mm)	FiS (mm)	SI (mm)
Cut-07	0.587 ± 0.649	0.274 ± 0.201	0.628 ± 0.193	0.031 ± 0.036	0.004 ± 0.007	0.007 ± 0.020

En la Tabla 4 se muestra la abundancia (en porcentaje) de los diferentes componentes (exceptuando la matriz) a partir de la clasificación de tamaño presentes en las muestras de rocas. Esta roca presenta una mayor abundancia en líticos, seguido de las *fiamas* y por ultimo las pómez, presenta una variación grande en los diferentes tamaños de los mismos, el porcentaje restante pertenece a la matriz.

Se resalta que la relación en el contenido de componentes de una roca ignimbrítica depende en gran medida del volumen emitido, explosividad y profundidad del evento, mientras que la formación de fiamas depende del volumen, temperatura y de la posición en la que se encuentre dentro del flujo. En resumen, la textura, estructura y en general las propiedades físicas de un material piroclástico depende del proceso de soldamiento que promueve, entre otras cosas, la sinterización, compactación y aplanamiento de los fragmentos de pómez.

Densidad por medio de picnómetro de helio

Para la realización de esta prueba se seleccionaron siete especímenes cilíndricos los cuales tienen dimensiones aproximadamente de 25 mm de diámetro y 25 mm de altura.

En general, el método indica resultados confiables (ver Anexo 4), ya que hace diferentes mediciones hasta obtener una desviación estándar apegada a las normas internacionales

(ASTM). Como se muestra en la Tabla 5 los valores de densidad real varían de 2.3713 a 2.3814 con un promedio general y desviación estándar de 2.3724 ± 0.0005 . La densidad real de los especímenes cambia debido a diferentes factores como la mineralogía y contenido de fragmentos.

Tabla 5 Datos resumidos de la prueba de picnometría de la muestra Cut- 07. Vol. Prom: volumen promedio, ρ -prom: Densidad promedio.

Espécimen	Peso (g)	Corridas	Vol. Prom. (cm³)	ρ prom. (g/cm³)
Cut-07-1	18.8261	3	7.9391 ± 0.0024	2.3713 ± 0.0007
Cut-07-2	17.9382	4	7.5645 ± 0.0002	2.3714 ± 0.0001
Cut-07-3	19.6388	5	8.2466 ± 0.0021	2.3814 ± 0.0006
Cut-07-4	17.9959	6	7.6264 ± 0.0011	2.3597 ± 0.0003
Cut-07-5	19.8459	5	8.3586 ± 0.0009	2.3743 ± 0.0003
Cut-07-6	19.1940	7	8.0880 ± 0.0019	2.3732 ± 0.0006
Cut-07-7	19.6814	9	8.2850 ± 0.0026	2.3756 ± 0.0007
			Promedio	2.3724 ± 0.0005

Porosidad Efectiva

De acuerdo con lo que se describe en el capítulo de metodología, la porosidad efectiva se obtuvo con base en la implementación de tres diferentes pruebas de laboratorio: 1) Saturación de Barnes a presión atmosférica, 2) saturación de Barnes al vacío y 3) porosimetría por inclusión de mercurio. La prueba más sencilla es la de saturación atmosférica ya que no involucra un equipo muy sofisticado, por el contrario, uno de los inconvenientes de su implementación es la cantidad de tiempo invertida en la implementación. A su vez, la saturación al vacío involucra un menor tiempo de realización, pero se necesita el uso de una bomba y cámara para la obtener el vacío. Estas dos pruebas pueden ser comparadas para calcular la variación de la porosidad efectiva, es decir, la diferencia de como el agua accede a presión atmosférica a los poros y cómo lo hace en condiciones de vacío. En general, y como se puede esperar, la porosidad aumenta al aumentar la presión de vacío. La prueba de inclusión de mercurio lleva menos tiempo en su realización, pero involucra un equipo más sofisticado y es la prueba que proporciona datos relacionados con el sistema poroso.

Método de saturación de Barnes a presión atmosférica

Se seleccionaron siete especímenes para realizar esta prueba. Como se ha descrito en la sección de metodología: los especímenes se pesaron cada 24 horas hasta que la determinación de la masa fuera constante (lo que asegura una saturación total de los especímenes; Tabla 6). Como características importantes se puede mencionar que durante la prueba algunos elementos se disgregaron, lo que pudiera reflejarse en una pérdida de masa (fragmentos de estas eran visibles en el agua y en el fondo del recipiente; Fig. 12) y aumentar el error en los resultados finales.

Tabla 6 Porcentaje de la porosidad a presión atmosférica de los especímenes seleccionados de la muestra Cut-07. md: masa seca del espécimen. ms: masa saturada del espécimen. C_{abs} : coeficiente de absorción. mh: masa hidrostática. η_e : porosidad accesible.

Cut-07-	md (g)	ms (g)	C_{abs} (%)	mh (g)	η_e (%)
d	340.38	409.25	20.23	188.17	31.15
e	290.46	347.4	19.60	160.8	30.51
g	293.07	351.76	20.03	163.17	31.12
h	346.94	418.37	20.59	192.72	31.66
m	338.25	405.43	19.86	186.3	30.66
n	293.2	351.61	19.92	161.76	30.77
ñ	321.53	386.09	20.08	176.62	30.82
Promedio					30.96
Desviación estándar					0.36

Método de saturación de Barnes al vacío

Para realizar esta prueba se utilizaron siete muestras cúbicas las cuales fueron introducidas en una cámara de vacío (Fig. 14). Algunas muestras se deterioraron por estar en contacto con el agua. No fue posible alcanzar la presión de vacío deseada (2 kPa de presión o 15 mm de mercurio) debido a las características del equipo. En la Tabla 7 se muestran los diferentes resultados obtenidos en esta prueba para cada espécimen.

En general, los resultados de la porosidad efectiva obtenida por los métodos por saturación (Tabla 6 y Tabla 7) varían en un rango $< 3\%$, se tiene que considerar que la porosidad efectiva obtenida por el método al vacío no cumplió con todos los estándares (2 kPa de presión o 15

mm de mercurio) por lo que se considera que la porosidad podría ser mayor a la que se muestra en la Tabla 7, teniendo en cuenta que la porosidad por el método de vacío siempre será mayor que el método a presión atmosférica.

Tabla 7 Porcentaje de la porosidad al vacío de los especímenes seleccionados de la muestra Cut-07. Md: masa seca del espécimen. Ms: masa saturada del espécimen. C_{abs} : coeficiente de absorción. Mh: masa hidrostática. ρ_a : densidad aparente. ρ_r : densidad real. η_c : porosidad accesible.

Cut-07-	md (g)	ms (g)	C_{abs} (%)	mh (g)	□_e (%)
d	327.71	401.22	22.43	185.76	34.12
e	283.89	346.02	21.89	159.79	33.36
g	288.38	350.53	21.55	162.3	33.02
h	337.5	414.73	22.88	189.8	34.34
m	331.95	404.9	21.98	186.1	33.34
n	286.12	350.02	22.33	160.8	33.77
ñ	312.99	382.12	22.09	175.3	33.43
Promedio					33.63
Desviación estándar					0.44

Porosimetría por inclusión de mercurio

De acuerdo a los resultados, gráficamente descritos (Fig. 32 y Tabla 8) se pueden observar al menos tres familias o grupos de poros. Para cada uno de los especímenes la familia principal de poros comprende un rango de 0.1 a 1 μm (> 50% poros), en las familias secundarias existe una variación entre los especímenes ya que para el espécimen uno su familia secundaria se concentra entre 0.01 a 0.1 μm , mientras que el segundo y tercero se concentra entre 1 a 10 μm . Para la tercera familia el espécimen uno presenta su concentración en 1 a 10 μm y el segundo al igual que el tercero su concentración se encuentra 0.01 a 0.1 μm .

Como se podría esperar, en la familia principal se presenta un porcentaje mayor de intrusión de mercurio. Por otro lado, la recuperación del mercurio en las muestras fue mínima (<3%), quedándose el mercurio en los diferentes especímenes (Fig. 33). Todo lo anterior se expresa en las siguientes gráficas y tabla. En el Anexo 5 se muestra los resultados, así como de los gráficos que arroja el equipo al término de la prueba de porosimetría.

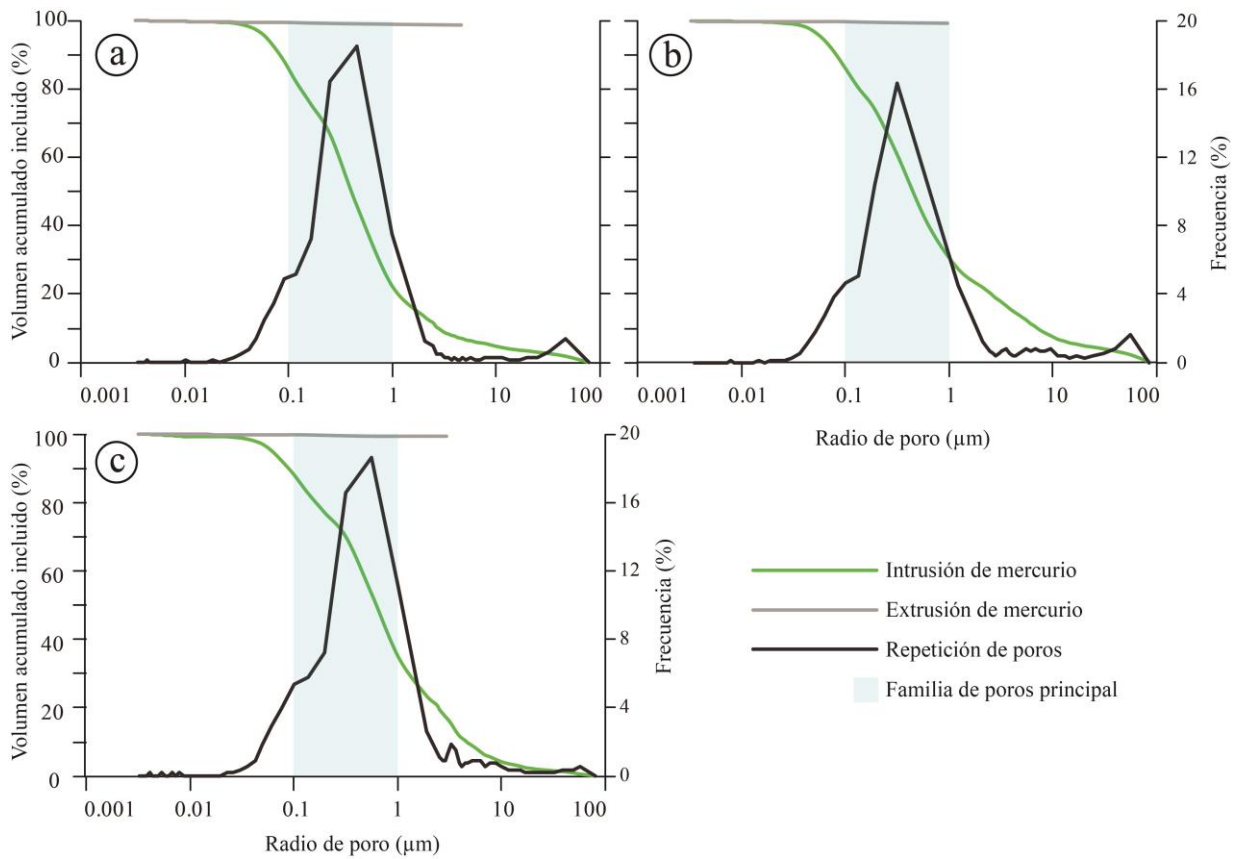


Fig. 32 Representación gráfica de la porosidad por inclusión de mercurio de la muestra Cut-07. a) Gráfica del espécimen 1. b) Gráfica del espécimen 2. c) Gráfica del espécimen 3.

Tabla 8 Frecuencia de los tamaños de radio de poro de los especímenes de la muestra Cut-07

Intervalos medio de Radios (µm)	Cut-07-1	Cut-07-2	Cut-07-3
	Frecuencia (%)	Frecuencia (%)	Frecuencia (%)
<0.01	0.2	0.2	0.7
0.01-0.1	17.8	19.4	11.0
0.1-1	68.6	52.8	53.6
1 a 10	8.8	20.8	30.4
10 - 100	4.3	6.5	4.1
>100	0.0	0.0	0.0
Total	99.8	99.7	99.8

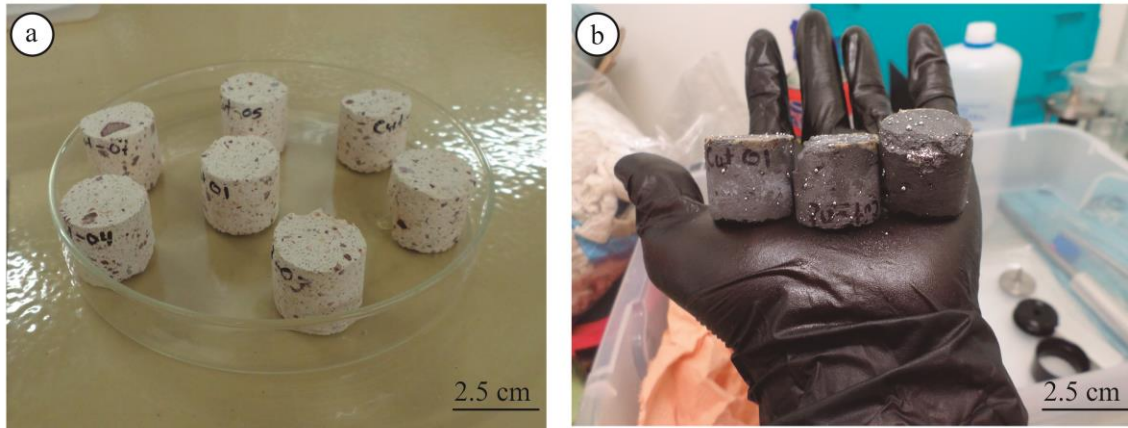


Fig. 33 a) Especímenes de roca cilíndricas. b) especímenes después de la prueba de porosimetría, es visible el mercurio en ellas, los especímenes fueron entregados a una compañía que se encarga del manejo de residuos radioactivos.

Se resalta la importancia de la caracterización de la porosidad con base en esta metodología, ya que se obtienen datos de distribución y en general del sistema poroso. El sistema poroso de las rocas se relaciona con muchas otras características como la permeabilidad y la resistencia de roca, por ejemplo, la distribución y tamaño de los poros influye en el fracturamiento cuando la roca está sometida a cargas. Algunos estudios recientes (Heap et al., 2016) resaltan que la resistencia de una roca disminuye por el contenido y distribución de sus componentes (cristales, poros), considerados como heterogeneidades de todo el sistema.

La porosidad y sistema poroso puede cambiar drásticamente debido al intemperismo y alteración hidrotermal. En general, una roca alterada o intemperizada tendría más porcentaje de poros que la roca original. Pola et al. (2014) afirman un aumento de porosidad de 10 a 30 % y una disminución de la resistencia de hasta un 85 %.

Porosidad Total

La porosidad total, como su nombre lo dice es la porosidad contenida en cada espécimen, involucra la porosidad efectiva y la porosidad cerrada. En general las características de la porosidad (porosidad, sistema poroso) son en gran medida heredadas de la génesis de cada depósito. Por ejemplo: las rocas volcánicas, en particular los flujos de lava presentan un sistema poroso derivado de su desgasificación. La distribución depende en gran medida del movimiento del flujo, temperatura y tiempo de solidificación. La proporción de la porosidad efectiva y la porosidad cerrada contenida en cada unidad en roca tiene influencia directa en

características como la permeabilidad, se tienen que recordar que la permeabilidad está directamente relacionada con la interconexión de los poros, por otro lado, y de acuerdo a lo que se describió en párrafos anteriores, la resistencia tiene relación directa con todo el sistema poroso, el cual incluye la porosidad abierta y cerrada. La porosidad total se obtuvo con base en los resultados de densidades (real y aparente) de cada uno de los especímenes (Tabla 9). A su vez, la densidad aparente (ρ_a) se obtuvo con base en el uso de la ecuación $\rho_a = \frac{m}{V_a}$, la cual involucra la división de la masa (m) y el volumen aparente (V_a).

Tabla 9 Porosidad total de los especímenes. ρ_a es la densidad aparente. ρ_r es la densidad real. η_T es la porosidad total.

Cut-07-	Presión atmosférica			Vacío		
	ρ_a (g/cm ³)	ρ_r (g/cm ³)	η_T (%)	ρ_a (g/cm ³)	ρ_r (g/cm ³)	η_T (%)
d	1.52	2.37	36.01	1.46	2.37	38.40
e	1.50		36.94	1.46		38.35
g	1.58		33.61	1.55		34.68
h	1.53		35.68	1.48		37.44
m	1.49		37.07	1.46		38.26
n	1.53		35.51	1.49		37.07
ñ	1.45		39.09	1.41		40.70
			Promedio	36.27		
		Desviación estándar	1.56		Desviación estándar	1.68

Comparando nuestros especímenes con especímenes descritos en bibliografía, podemos afirmar que nuestra roca es muy porosa. Solo para posicionar nuestros valores (entre 36.3 y 37.8) en un contexto global se menciona que la porosidad de una ignimbrita poco soldada podría alcanzar una porosidad total de hasta 60 %, mientras que una ignimbrita muy soldada presenta porcentajes muy bajos dentro de un rango de 5 y 10 %.

Porosidad Cerrada

La porosidad cerrada se obtuvo con la resta de la porosidad total y la efectiva, debido a que se obtuvieron dos porosidades totales y efectivas también se obtuvieron dos porosidades cerradas las cuales se expresan en la siguiente tabla:

Tabla 10 Porosidad cerrada de las muestras de roca Cut-07. η_e es la porosidad efectiva. η_T es la porosidad total. η_c es la porosidad cerrada.

Cut-07-	Presión atmosférica			Vacío		
	η_e (%)	η_T (%)	η_c (%)	η_e (%)	η_T (%)	η_c (%)
d	31.15	36.01	4.86	34.12	38.40	4.28
e	30.51	36.94	6.43	33.36	38.35	4.99
g	31.12	33.61	2.49	33.02	34.68	1.66
h	31.66	35.68	4.02	34.34	37.44	3.11
m	30.66	37.07	6.41	33.34	38.26	4.92
n	30.77	35.51	4.74	33.77	37.07	3.30
ñ	30.82	39.09	8.27	33.43	40.70	7.27
		Promedio	5.32		Promedio	4.22
		Desviación estándar	1.75		Desviación estándar	1.65

4.4 Caracterización Hídrica

En general, las características hídricas de cualquier material rocoso están condicionadas por el porcentaje de poros, su distribución y las características del sistema poroso. Por ejemplo: los valores de capilaridad están influenciados por el contenido de poros muy pequeños, mientras que la permeabilidad está influenciada por la interconexión y características geométricas de los poros y de su microfracturamiento, además de su estructura interna. Por ejemplo, Karagiannis et al., (2016) resaltan la importancia de hacer una buena caracterización de los valores de capilaridad en rocas usadas para la construcción ya que es una de las características que más influencia tiene en su degradación.

Capilaridad

Durante las dos primeras horas de iniciada la prueba, los especímenes presentaban una masa con una variación máxima de 2 g. Al seguir avanzando el experimento se notó un mayor aumento en la masa debido a la absorción del agua por parte de los diferentes componentes de la roca (por ejemplo, poros, lútics y arcillas) hasta alcanzar una masa casi constante; en algunas muestras el ascenso de agua era más marcado que en otras (ver Anexo 6). Los resultados representados gráficamente (Fig. 34) muestran dos pendientes (comportamiento similar en los diferentes especímenes) de absorción de agua. La primera pendiente (zona verde en la Fig. 34) representa la absorción rápida de agua, la segunda representa una

absorción lenta (zona azul en la Fig. 34), lo que podría verse reflejado en concentración de poros con un mismo tamaño, contenido de arcillas, fracturas que ayuden en el ascenso capilar, por mencionar algunas características. Para cada pendiente se calculó su coeficiente de capilaridad, este coeficiente nos expresa el aumento de masa (debido a la absorción de agua) de los especímenes (Tabla 11).

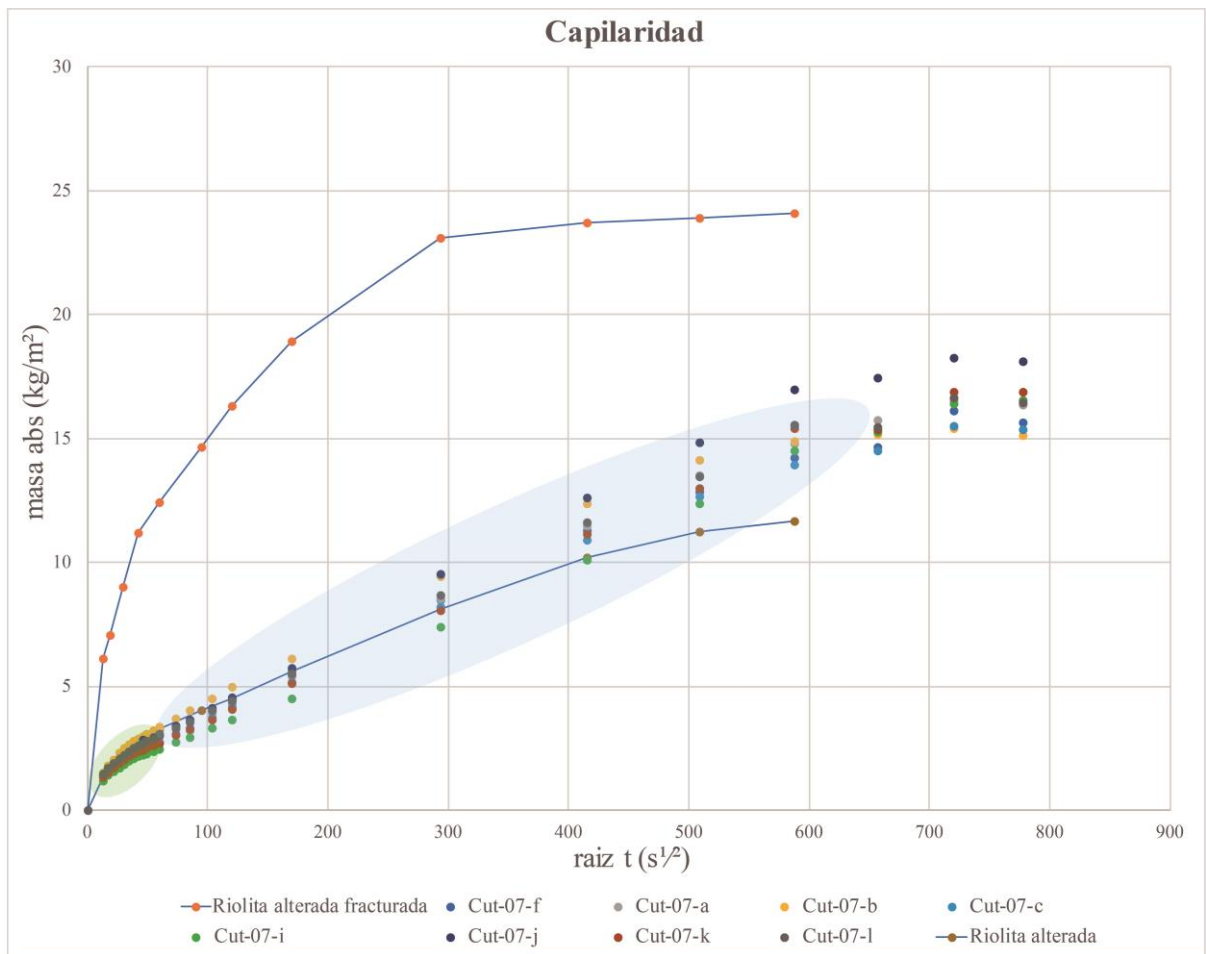


Fig. 34 Gráfica de capilaridad que ilustra la variación de la masa absorbida respecto al tiempo. Los especímenes fueron comparados con una riolita alterada y otra fracturada. La primera pendiente (zona verde) representa una absorción rápida de agua en muy poco tiempo, segunda pendiente (zona azul) representa una absorción lenta en un tiempo más prolongado, casi hasta llegar al punto de la saturación.

En la Fig. 34 se expresa la variación de la masa absorbida respecto una superficie contra la raíz del tiempo de una ignimbrita y de dos riolitas alteradas (solo que una de ellas presenta fracturas), se seleccionó la riolita por presentar una composición química similar (aunque sea una lava). En la misma figura se observa que la riolita alterada no fracturada presenta un

comportamiento de absorción similar a la ignimbrita, caso contrario con la otra riolita alterada y fracturada ya que su comportamiento de absorción es muy diferente debido a las fracturas que presentan, esto a que las fracturas ayudan al ascenso del agua a través de los capilares.

Tabla 11 Coeficiente capilar (Cc) de las dos pendientes presentes en cada espécimen. Coeficiente capilar de la pendiente 1 (Cc1), la cual es la pendiente de absorción rápida de agua. Coeficiente capilar de la pendiente 2 (Cc2), pendiente de absorción lenta.

Capilaridad		
Cut-07-	Cc 1 (kg/m²*s^{1/2})	Cc 2 (kg/m²*s^{1/2})
a	5.342	1.656
b	6.900	2.443
c	4.230	1.721
f	6.170	2.178
i	5.913	2.265
j	6.126	2.661
k	5.533	2.321
l	6.099	2.368
Promedio	5.789	2.202
Desviación estándar	0.784	0.347

Evaporación

Durante el desarrollo de la prueba los especímenes presentaron una variación de color de más oscuro a tonalidades claras. Presentan las mismas variaciones en la pendiente, donde se puede distinguir por lo menos 2 cambios antes del contenido crítico de agua y tender a una evaporación decreciente. A las 32 h (339.41 s^{1/2}) del experimento aparece el contenido crítico de agua cambiando la tendencia de evaporación constante a decreciente. En la gráfica (Fig. 35) se muestra el comportamiento, el grado de evaporación, así como la variación de la evaporación y en la Tabla 12 se muestra el contenido crítico de cada uno de los especímenes. Antes del punto crítico los especímenes presentan una evaporación que va aumentando, lo que significa que va liberando el excedente de agua en una mayor cantidad en poco tiempo, después del punto crítico la evaporación tiende a decrecer lo que significa que va perdiendo humedad en menor cantidad y en más tiempo (ver Anexo 7).

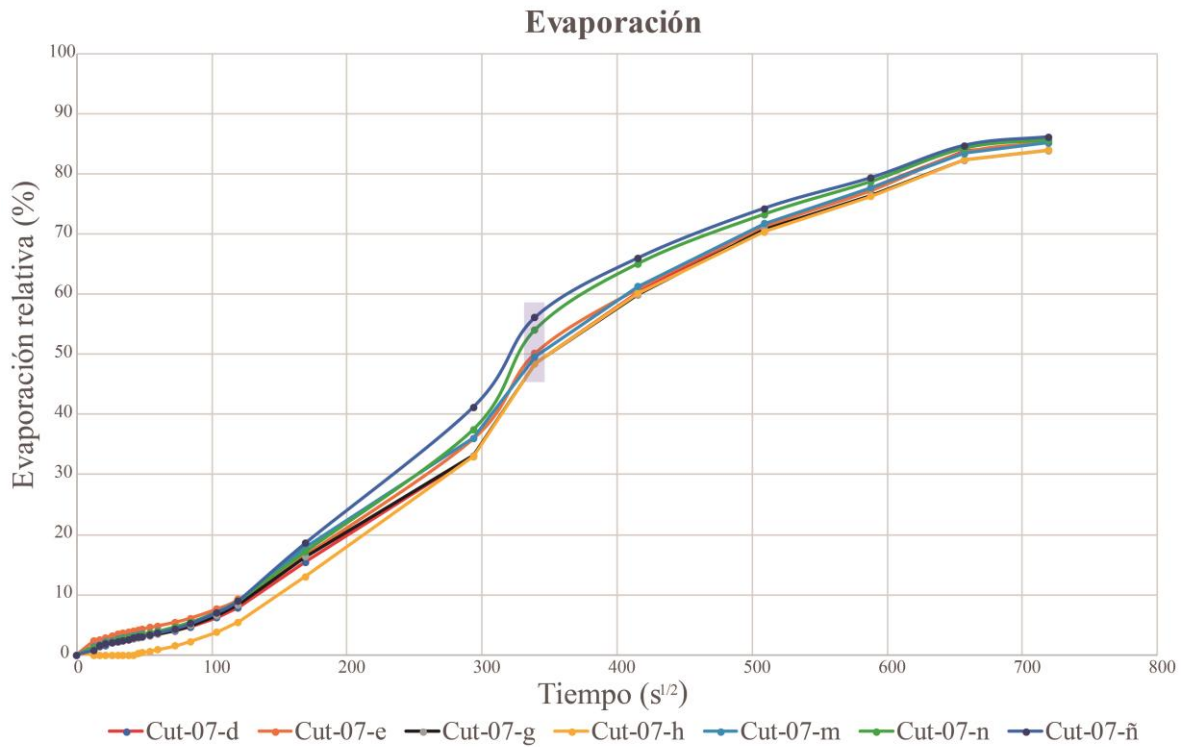


Fig. 35 Representación gráfica de la prueba de evaporación de los especímenes de la muestra Cut-07, rectángulo morado zona del contenido crítico de agua.

Tabla 12 Contenido crítico de los diferentes especímenes de la muestra Cut-07 donde se representa el tiempo crítico y el grado de evaporación.

Cut-07-	Contenido crítico de agua (Cca)		
		Tiempo crítico	Grado de evaporación
d	32 h	339.41 $s^{1/2}$	48 %
e	32 h	339.41 $s^{1/2}$	50 %
g	32 h	339.41 $s^{1/2}$	48 %
h	32 h	339.41 $s^{1/2}$	48 %
m	32 h	339.41 $s^{1/2}$	49 %
n	32 h	339.41 $s^{1/2}$	54 %
ñ	32 h	339.41 $s^{1/2}$	56 %
		Promedio	50.43
		Desviación estándar	3.26

Permeabilidad

El permeámetro de gas GasPermProd modelo Ap-123-002-0 está diseñado para determinar la permeabilidad por medio de la intrusión de un gas inerte (nitrógeno de alta pureza). La adquisición y manipulación de datos se realizó con base en la norma ASTM D 4525 (2008). En general, el diseño del equipo consiste en un regulador de presión de flujo ascendente, un medidor de flujo de masa de precisión con un rango de flujo doble, un transductor de presión aguas arriba, un transductor de presión aguas abajo con un sensor de temperatura integrado y una válvula dosificadora de precisión para control de contrapresión y para permitir una mejor interpolación. La consola también está equipada con un manómetro y una válvula de control para establecer la presión de confinamiento. El conjunto de elementos antes mencionados ha sido diseñado para hacer valer la ley de Darcy, la cual se aplica a un flujo laminar horizontal ideal de gas bajo condiciones isotérmicas y en estado estacionario.

Para la caracterización de nuestras muestras se utilizó el método de los cinco puntos, el cual consiste en aplicar cinco diferentes presiones y medir la permeabilidad del gas respectiva. Los datos se visualizan en un gráfico de permeabilidad del líquido (Kl) con respecto a 1 entre la presión del gas. La permeabilidad real del líquido será aquella donde la ecuación de la línea recta que representa la distribución de los datos corte el eje de las abscisas (ver Anexo 8). Se resalta que, a lo largo de la implementación de la prueba, se tiene que asegurar que la diferencia entre la presión de entrada y salida no resulte distante una de otra, además y con la finalidad de respetar las características de un flujo laminar: el gasto o fluido que se hará pasar a través de la muestra se tendrá que calibrar para cada tipo de roca. Para rocas muy porosas el flujo tendrá que ser menor y se verá reflejado en presiones bajas. La distribución de las presiones dependerá, en gran medida, tanto del tipo de roca como del sistema poroso particular de cada espécimen (Fig. 36). Los datos de permeabilidad varían de 0.155 a 0.310 con una desviación estándar de 0.05. Se resalta que rocas muy porosas como pómez y basaltos muy vesiculados varían en un rango de 0.02 a 4000 mD aproximadamente, mientras que rocas poco porosas como las calizas se encuentran en un rango de 0.0009 a 0.0024 mD. Como se puede ver en la Fig. 37 y en alguna referencia (Heap et al. 2016) las rocas poco porosas, normalmente están compuestas por poros pequeños poco conectados, con características de alta tortuosidad (relación del largo de la corriente natural de un fluido entre dos puntos y su distancia en línea recta). Por consiguiente, el fluido está obligado a viajar por

estrechas micro fracturas que podrían conectar los poros; a su vez, rocas volcánicas con moderada a alta porosidad casi siempre están conformadas por poros grandes muy bien conectados, algunas veces incluso forman grandes vesículas o canales. Por el contrario, algunos investigadores (por ejemplo, Lamur et al. 2017) afirman que no existe una relación lineal entre la porosidad y la permeabilidad, ya que ambas dependen de diferentes heterogeneidades como el grado de fracturamiento y su evolución, así como de las características particulares de cada ambiente, en nuestro caso ambiente volcánico.

De manera general las rocas con las que se compara la ignimbrita de estudio presentan las siguientes características:

- Basalto: Roca de color negro-grisáceo, su matriz presenta una textura porfídica, se observan pequeñas fracturas y vesículas (algunas rellenas de sílice).
- Caliza: Roca de color gris oscuro, de textura *mudstone* con poca alteración y presenta algunas fracturas rellenas de calcita.
- Pómez: Roca masiva de color gris amarillento y naranja pálido, con textura porfídica, presenta vesículas de tamaño menor a 7 mm, se distinguen algunos óxidos, cristales de anfíbol, cuarzo y plagioclasa.
- Riolita altera: roca de color blanco con manchas grises, con textura afanítica con fenocristales alterados y con algunas fracturas.

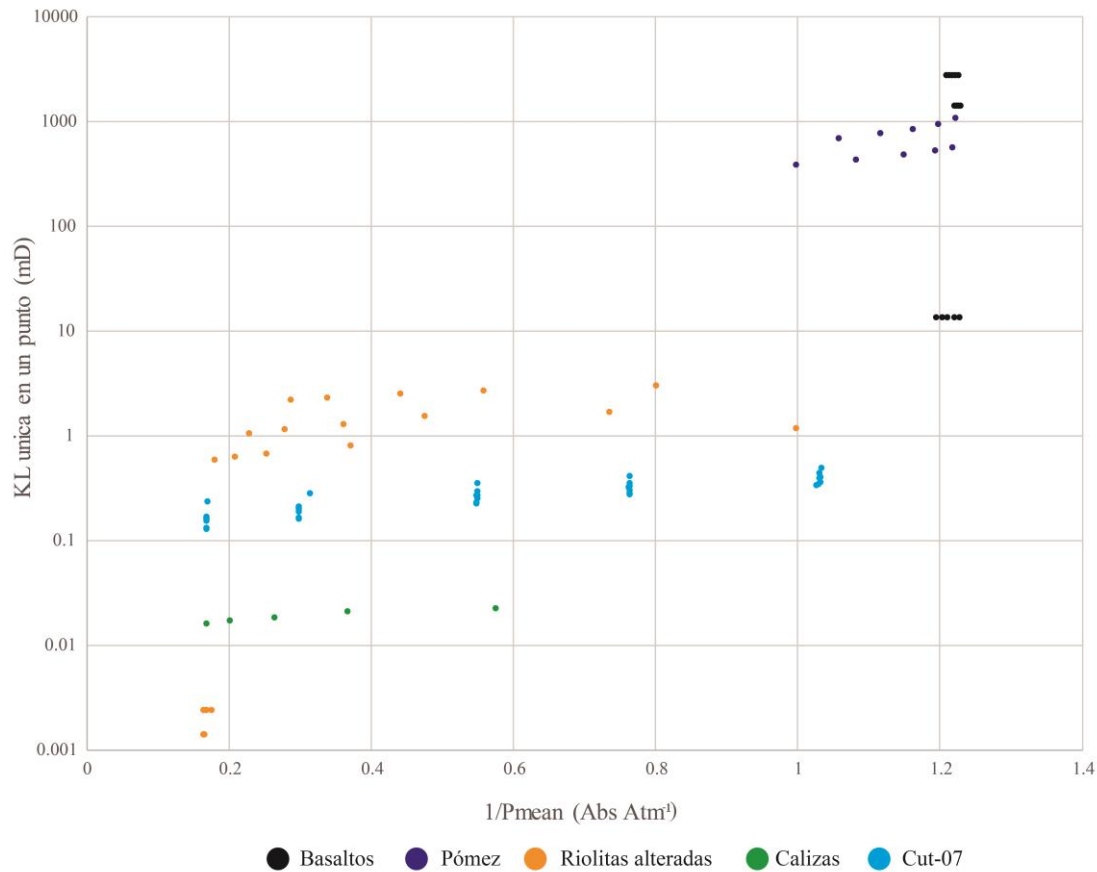


Fig. 36 Gráfica de la permeabilidad del fluido con respecto a la presión promedio entre uno. Se compara la permeabilidad de diferentes rocas incluida la ignimbrita en estudio. Basalto: Roca de color negro-grisáceo, su matriz presenta una textura porfídica, se observan pequeñas fracturas y vesículas (algunas rellenas de sílice). Caliza: Roca de color gris oscuro, de textura mudstone con poca alteración y fracturas rellenas de calcita. Pómez: Roca masiva de color gris amarillento y naranja pálido, con textura porfídica, presenta vesículas de tamaño menor a 7 mm. Riolita altera: roca de color blanco con manchas grises, con textura afanítica con fenocristales alterados y con algunas fracturas.

Entre otras cosas, lo que se puede identificar en la Fig. 37, es que rocas volcánicas similares con la misma porosidad efectiva podrían tener diferentes valores de permeabilidad. esto debido al tamaño de los poros presentes, es decir que las muestras con el mismo porcentaje de porosidad efectiva, pero con poros de mayor tamaño obtendrán una mayor permeabilidad, además la textura juega un papel importante debido a que incrementa la superficie específica del medio. Como se describe en párrafos anteriores esta relación no lineal podría estar muy relacionada con las características particulares de cada espécimen como características de su microtextura, el grado de microfracturamiento y sus orientaciones con respecto a la dirección del flujo del fluido.

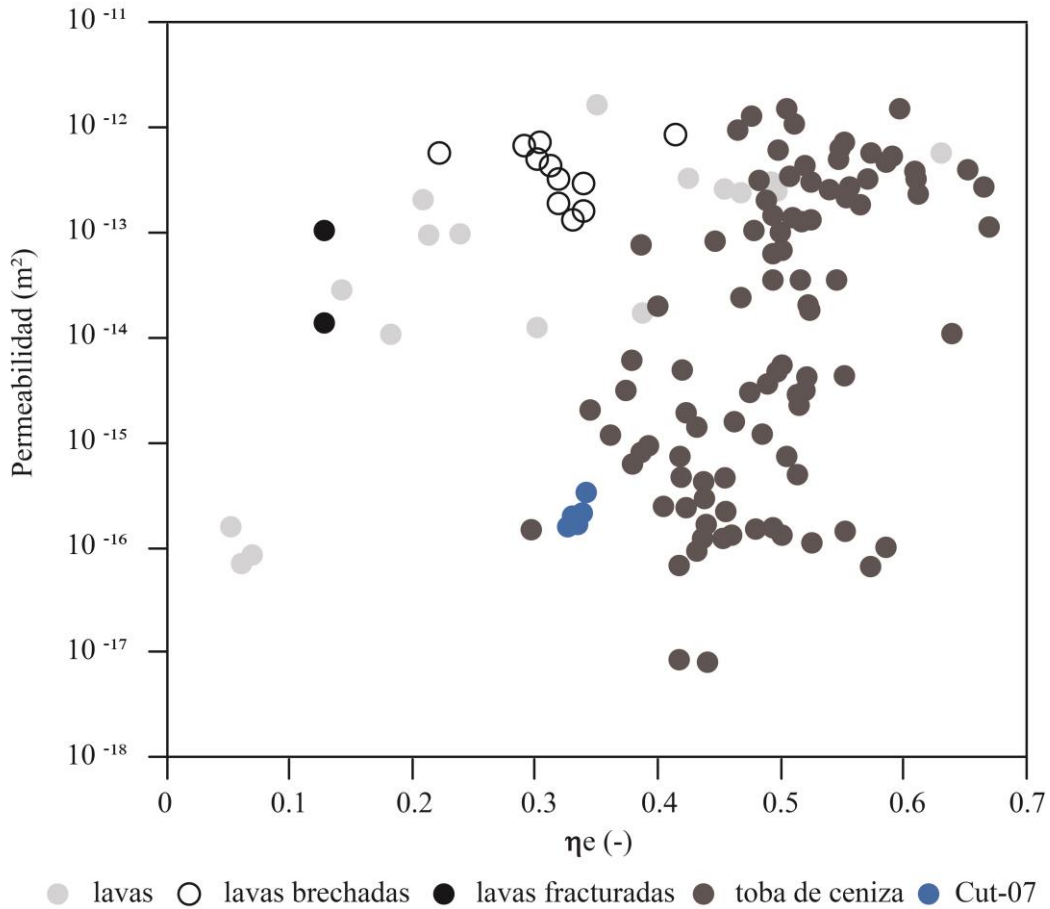


Fig. 37 Datos de permeabilidad medidos en laboratorio comparados con la porosidad efectiva de distintas rocas volcánicas obtenidos de bibliografía. Modificado de Heap et al., 2016.

Tabla 13 Permeabilidad promedio e individual de los diferentes especímenes en mD y m²

Especímen	Permeabilidad (mD)	Permeabilidad (m ²)
Cut-07-1	0.204	2.01332E-16
Cut-07-2	0.199	1.96398E-16
Cut-07-3	0.150	1.48038E-16
Cut-07-4	0.310	3.05946E-16
Cut-07-5	0.191	1.88502E-16
Cut-07-6	0.155	1.52973E-16
Cut-07-7	0.198	1.95411E-16
Promedio	0.20	1.98E-16
Desviación estándar	0.05	5.20986E-17

5. Conclusiones

- De los tres métodos para calcular el porcentaje de porosidad efectiva, el método de intrusión de mercurio fue el más eficaz. Proporcionó la cuantificación y la distribución de tamaño de poros, la cual está estrechamente vinculada con otras propiedades físicas e hídricas como la permeabilidad.
- La absorción en un espécimen de roca es más efectiva cuando la distribución de los poros se concentra en diámetros inferiores a 1 mm. Por otro lado, el contenido y tipo de minerales de arcillas de cada muestra tiene una gran influencia en la medición de absorción de agua.
- La ignimbrita en estudio al estar en contacto con agua en condiciones ambientales aumenta su masa en un 20% aproximadamente. Por otro lado, el tiempo de evaporación rápida es de 32 h, en el cual libera el 50.4% de humedad. Estas características están estrechamente vinculadas al tipo de minerales de arcilla. Existen arcillas como la montmorilonita con una gran superficie y una gran capacidad de expansión.
- La comparación de valores entre diferentes características petrofísicas resalta un carácter anisótropo y heterogéneo entre cada espécimen de las rocas analizadas. En particular, la porosidad efectiva con respecto a la permeabilidad muestra una relación no lineal. Por otro lado, se tiene que considerar que en la permeabilidad no solo intervienen los poros interconectados, además intervienen sus características geométricas y de tamaño.
- Se destaca que, a pesar del carácter heterogéneo de la ignimbrita en estudio, las propiedades petrofísicas (densidad, porosidad) presentan comportamientos similares, por lo que, mediante pruebas de laboratorio, se podría distinguir esta litofacie de otras en la región.
- La caracterización petrofísica de cualquier unidad de roca es fundamental en la construcción de un modelo conceptual de cualquier fenómeno geológico. Por ejemplo: para la distribución de agua y calor en un medio rocoso se requiere conocer características de permeabilidad tanto de la matriz rocosa como del fracturamiento.

- Las diferencias en las propiedades petrofísicas de los especímenes en estudio, están gobernadas por diversas características particulares como las microestructuras (fracturas), el tamaño de poros y su distribución espacial.
- Características físicas básicas como el color sugieren procesos de alteración y por consiguiente la presencia de arcillas (por ejemplo, Cut-07-f). Un estudio básico de la cantidad y tipo de arcillas podría justificar el comportamiento hídrico de los especímenes.
- Finalmente, los resultados que en este trabajo se presentan buscan ser parte de una base de datos o laboratorio virtual interactivo, útil para el estudio de las propiedades físicas y su evolución mecánica.

Referencia

- Alonso, F. J. (2013). Propiedades Físicas : Densidad Y Porosidad. *Departamento de Geología; Petrología y Geoquímica. Universidad de Oviedo.*, 2–5.
- Alonso, J. F., Eibert, R. M., & Ordaz, J. (1987). Caracterización del sistema poroso de calizas y dolomías. *Boletín Geológico y Minero*, 98(2), 226–237.
- ArcGis. (2018). Crear un mapa base personalizado. Recuperado de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/help/mapping/map-authoring/author-a-basemap.htm>
- ASTM. (1998). Standard Test Method for Determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry. En *Annual book of A.S.T.M. Standards* (Vol. 04.08, pp. 1–6).
- ASTM. (2001). Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer. *ASTM International*, 04, 1–4. <https://doi.org/10.1520/D5550-06.priate>
- ASTM. (2008). Standard Test Method for Permeability of Rocks by Flowing Air. *ASTM Standard Test Method, D4525-08(Reapproved)*, 1–5. <https://doi.org/10.1520/D4525-08.2>
- Ban, M., Hasenaka, T., Delgado-Granados, H., & Takaoka, N. (1992). K-Ar ages of lavas from shield volcanoes in the Michoacan-Guanajuato volcanic field, Mexico. *Geofísica Internacional*.
- Blair, T. C., & McPherson, J. G. (1999). Grain-size and textural classification of coarse sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Research*, 69(1), 6–19. <https://doi.org/10.2110/jsr.69.6>
- Branney, J. M., & Kokelaar, P. (2002). *Pyroclastic density currents and the sedimentation of ignimbrites. Geological Society Memoir No. 27.* <https://doi.org/10.1086/427850>
- Choquette, P. W., & Pray, L. C. (1970). Geologic nomenclature and classification of porosity insedimentary carbonates. *The American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, 54, 207–250. <https://doi.org/10.1306/5D25C98B-16C1-11D7-8645000102C1865D>
- Cisneros-Máximo, G. (2016). *Estudio Geológico-geomorfológico de los volcanes Tetillas-Quincie, Morelia, Michoacán. propuesta de Cartografía jerárquica.* Universidad Nacional Autónoma de México.
- Corona-Chávez, P., Reyes-Salas, M., Garduño-Monroy, V. H., Israde-Alcántara, I., Lozano-Santa Cruz, R., Morton-Bermea, O., & Hernández-Álvarez, E. (2006). Asimilación de

- xenolitos graníticos en el Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato: El caso de Arócutin Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 23(2), 233–245.
- Dorrick, A. V. (2010). *Sedimentary Rocks in the Field. Sedimentary Geology*. Manson.
- Dufek, J., Esposti Ongaro, T., & Roche, O. (2015). *Pyroclastic Density Currents. The Encyclopedia of Volcanoes* (Second Edi). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00035-3>
- Esbert, R. M., Alonso, F. J., & Ordaz, J. (2008). La petrofísica en la interpretación del deterioro y la conservación de la piedra de edificación. *Trabajos de Geología*, 28, 87–95.
- Ferrari, L. (2000). Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LIII, 84–92.
- Fielding, C. R. (1997). *Sedimentary Rocks in the Field. Sedimentary Geology* (Vol. 109). [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(96\)00039-5](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(96)00039-5)
- Fisher, R. V., & Schmincke, H.-U. (1984). Pyroclastic Flow Deposits. En *Pyroclastic Rocks* (pp. 186–230). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-74864-6_8
- García-Palomo, A., Zamorano, J. J., López-Miguel, C., Galván-García, A., Carlos-Valerio, V., Ortega, R., & Macías, J. L. (2008). El arreglo morfoestructural de la Sierra de Las Cruces, México central. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25(1), 158–178.
- García-Quintana, A., Goguitchaichvili, A., Morales, J., Cervantes Solano, M., Osorio-Ocampo, S., & Luis Macías Jaime Urrutia-Fucugauchi, J. (2016). Datación magnética de rocas volcánicas formadas durante el Holoceno: caso de flujos de lava alrededor del Lago de Pátzcuaro (campo volcánico Michoacán-Guanajuato). *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 33(2), 209–220. Recuperado de [http://satori.geociencias.unam.mx/33-2/\(06\)GarciaQuintana.pdf](http://satori.geociencias.unam.mx/33-2/(06)GarciaQuintana.pdf)
- Garduño-Monroy, V. H., & Gutierrez-Negrín, L. C. A. . (1992). Magmatismo, hiatus y tectonismo de la Sierra Madre Occidental y del Cinturón Volcánico Mexicano. *Geofísica Internacional*. Recuperado de <http://www.revistas.unam.mx/index.php/geofisica/article/view/39495>
- Garduño-Monroy, V. H., Pérez-Lopez, R., Israde-Alcantara, I., Rodríguez-Pascua, M. A.,

- Szynkaruk, E., Hernández-Madrigal, V. M., ... Mora Chaparro, J. C. (2009). Paleoseismology of the southwestern Morelia-Acambay fault system, central Mexico. *Geofísica Internacional*, 48(3), 319–335.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M., & Ferrari, L. (2005a). Petrogénesis ígnea de la faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LVII(3), 227–283. <https://doi.org/10.18268/BSGM2005v57n3a2>
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M., & Ferrari, L. (2005b). Petrogénesis ígnea de la faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LVII(3), 227–283.
- Gómez-Vasconcelos, M. G. (2012). *Geología y Estratigrafía volcánica de La Sierra de Mil Cumbres*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Grau, J. F. P. (2011). *Técnicas de análisis de imagen, (2a ed.): Aplicaciones en Biología*. Publicacions de la Universitat de València. Recuperado de <https://books.google.com.mx/books?id=2jxM6PkYQ-8C>
- Gravley, D. M., Deering, C. D., Leonard, G. S., & Rowland, J. V. (2016). Ignimbrite flare-ups and their drivers: A New Zealand perspective. *Earth-Science Reviews*, 162, 65–82. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.09.007>
- Guilbaud, M. N., Siebe, C., & Agustín-Flores, J. (2009). Eruptive style of the young high-Mg basaltic-andesite Pelagatos scoria cone, southeast of México City. *Bulletin of Volcanology*, 71(8), 859–880. <https://doi.org/10.1007/s00445-009-0271-0>
- Guilbaud, M. N., Siebe, C., Layer, P., Salinas, S., Castro-Govea, R., Garduño-Monroy, V. H., & Le Corvec, N. (2011). Geology, geochronology, and tectonic setting of the Jorullo Volcano region, Michoacán, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 201(1–4), 97–112. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.09.005>
- Hasenaka, T. (1994). Size, distribution, and magma output rate for shield volcanoes of the Michoacán-Guanajuato volcanic field, Central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 63(1–2), 13–31. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(94\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0377-0273(94)90016-7)
- Heap, M. J., Kennedy, B. M., Farquharson, J. I., Ashworth, J., Mayer, K., Letham-Brake, M., ... Dingwell, D. B. (2016). A multidisciplinary approach to quantify the permeability of the Whakaari/White Island volcanic hydrothermal system (Taupo Volcanic Zone, New Zealand). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 332(January), 88–

108. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.12.004>
- Israde-Alcántara, I., Garduño-Monroy, V. H., & Ortega Murillo, R. (2002). Late quaternary lacustrine paleoenvironment in the centre of lake Cuitzeo. *Hidrobiológica*, 12(1), 61–78. Recuperado de www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-88972002000100008
- Karagiannis, N., Karoglou, M., Bakolas, A., & Moropoulou, A. (2016). New Approaches to Building Pathology and Durability, 6. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-0648-7>
- Lamur, A., Kendrick, J. E., Eggertsson, G. H., Wall, R. J., Ashworth, J. D., & Lavallée, Y. (2017). The permeability of fractured rocks in pressurised volcanic and geothermal systems. *Scientific Reports*, 7(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05460-4>
- Luhr, J. F., & Carmichael, I. S. E. (1985). Jorullo Volcano, Michoacán, Mexico (1759-1774): The earliest stages of fractionation in calc-alkaline magmas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 90(2–3), 142–161. <https://doi.org/10.1007/BF00378256>
- Mackenzie, W. S., & Guilford, C. (2014). *Atlas of the Rock-Forming Minerals in Thin Section*.
- Mandarim-de-Lacerda, C. A. (2003). Stereological tools in biomedical research. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, 75(4), 469–486. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652003000400006>
- Martínez, J., & Nieto-Samaniego, Á. F. (1990). Efectos tectonicos recientes en el entro de mexico.
- Montoto, M., & Esbert, M. (1999). Petrofísica de la roca matriz, 239–252.
- Moon, V. G. (1993). Geotechnical characteristics of ignimbrite: A soft pyroclastic rock type. *Engineering Geology*, 35(1–2), 33–48. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(93\)90068-N](https://doi.org/10.1016/0013-7952(93)90068-N)
- Mori, L., & Gomez-Tuena, A. (2007). *Origen del magmatismo miocénico en el sector central de la FVTM y sus implicaciones en la evolución del sistema de subducción mexicano*. Centro de Geociencias. Universidad Nacional Autonoma de México.
- Munsell. (2009). *geological rock-color chart*. Geological Society of America.
- Murcia, H. F., Borrero, C. A., Pardo, N., Alvarado, G. E., Arnosio, M., & Scolamacchia, T. (2013). Depósitos Volcaniclásticos: Términos Y Conceptos Para Una Clasificación En Español Volcaniclastic Deposits: Terminology and Concepts for a Classification in Spanish. *Revista Geológica de América Central*, 48, 15–39.

<https://doi.org/10.15517/rgac.v0i48.12211>

- Osorio Ocampo, S. (2014). *Evolucion espacio temporal del vulcanismo alrededor del lago de Patzcuaro*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Pasquarè, G., Ferrari, L., Garduño-Monroy, V. H., Tibaldi, A., & Vezzoli, L. (1991). Geology of the central sector of the Mexican Volcanic belt, States of Guanajuato and Michoacán. *Geological Society of America Map and Chart series MCH072*, 22 p.
- Patricia, A., & Tirado, S. (2014). *Atlas digital de minerales en sección delgada*.
- Pérez-López, R., Legrand, D., Garduño-Monroy, V. H., Rodríguez-Pascua, M. A., & Giner-Robles, J. L. (2011a). Scaling laws of the size-distribution of monogenetic volcanoes within the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field (Mexico). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 201(1–4), 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.09.006>
- Pérez-López, R., Legrand, D., Garduño-Monroy, V. H., Rodríguez-Pascua, M. A., & Giner-Robles, J. L. (2011b). Scaling laws of the size-distribution of monogenetic volcanoes within the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field (Mexico). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 201(1–4), 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.09.006>
- Pola, A., Crosta, G. B., Fusi, N., & Castellanza, R. (2014). General characterization of the mechanical behaviour of different volcanic rocks with respect to alteration. *Engineering Geology*, 169. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.11.011>
- Pola, A., Martínez-Martínez, J., Macías, J. L., Fusi, N., Crosta, G., Garduño-Monroy, V. H., & Núñez-Hurtado, J. A. (2016). Geomechanical characterization of the Miocene Cuitzeo ignimbrites, Michoacán, Central Mexico. *Engineering Geology*, 214, 79–93. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.10.003>
- Powers, M. C. (1953). A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, 23(2), 117–119. <https://doi.org/10.1306/d4269567-2b26-11d7-8648000102c1865d>
- Salomón-Chida, J. I. (2012). *Metodología para el análisis de zonas inestables con clasificaciones geomecánicas empíricas. Ejemplo en zona sur de la Ciudad de Morelia, Michoacán*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Sanchez G, M. de J. (2011). *Descripcion del limite Pleistoceno-Holoceno en cuencas*

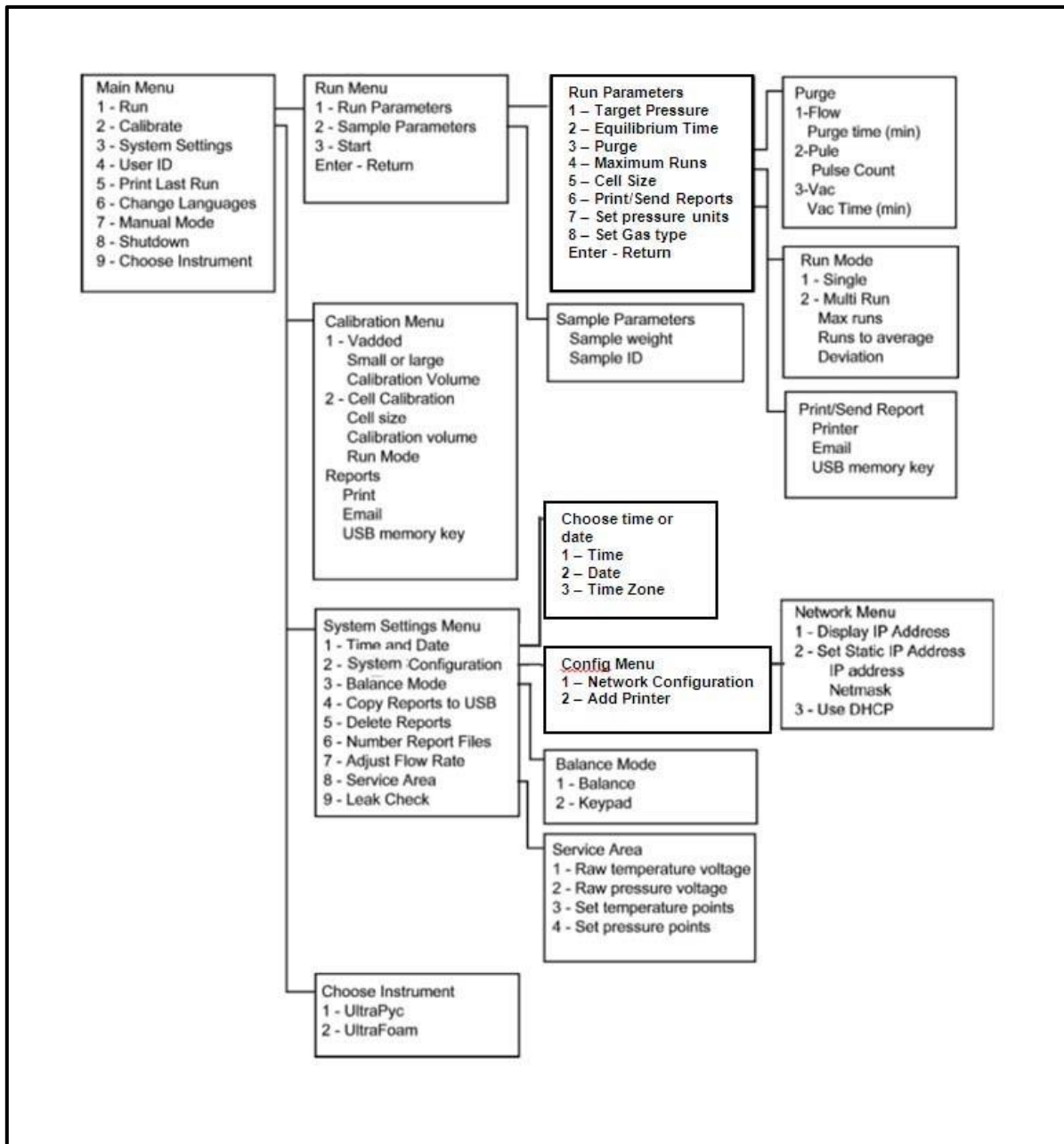
lacustres vulcano tectonicas, Zacapu y Cuitzeo, del norte del estado de Michoacán.
UNAM.

- Schmid, R. (1981). Descriptive nomenclature and classification of pyroclastic deposits and fragments - Recommendations of the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. *Geologische Rundschau*, 70(2), 794–799. <https://doi.org/10.1007/BF01822152>
- Sigurdsson, H. (2015). The Encyclopedia of Volcanoes. *The Encyclopedia of Volcanoes*, 1–12. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.02001-0>
- Silva Romo, G., & Mendoza Rosales, C. C. (2011). *Manual para el trabajo Geológico de Campo. Instituto de Ingeniería.*
- Sousa, L. M. O., Suárez del Río, L. M., Calleja, L., Ruiz de Argandoña, V. G., & Rodríguez Rey, A. (2005). Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites. *Engineering Geology*, 77(1–2), 153–168. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.10.001>
- Trujillo-Hernández, N. (2017). *Estudio geológico, geoquímico y mineralógico de las secuencias volcánicas de la porción suroeste del Lago de Cuitzeo, Michoacán, ligadas a la zona geotérmica de San Agustín del Maíz.* Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- UNE-EN 13755. (2002). Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica. *Documento de trabajo CTN 153*, 5–10. Recuperado de http://implantecoclear.org/documentos/accesibilidad/UNE_153010_2012.pdf
- UNE-EN 1925. (1999). Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad. *Comité Europeo de Normalización*, 13.
- UNE-EN 1936. (2007). Determinación de la densidad aparente, de la porosidad abierta y de la porosidad total, 5–12.
- Walker, G. P. L. (1983). Ignimbrite types and ignimbrite problems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 17(1–4), 65–88. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(83\)90062-8](https://doi.org/10.1016/0377-0273(83)90062-8)

Anexo 1: Dimensiones, peso y volumen de especímenes cilíndricos y cúbicos.

ID	Diámetro (\emptyset) (cm)	Dimensiones promedio (cm)			Peso (w) (g)	Volumen (V) (cm ³)
		x	y	z		
Cut-07-a		5.594	5.735	5.822	285.91	186.779
Cut-07-b		5.245	6.209	6.079	293.01	197.970
Cut-07-c		5.793	5.806	5.787	280.84	194.641
Cut-07-d		6.155	6.092	5.98	340.38	224.228
Cut-07-e		5.866	5.643	5.864	290.46	194.109
Cut-07-f		6.273	6.135	5.847	342.14	225.021
Cut-07-g		5.603	5.771	5.755	293.07	186.087
Cut-07-h		6.246	5.993	6.075	346.94	227.401
Cut-07-i		5.672	5.857	5.83	294.88	193.678
Cut-07-j		6.231	5.893	6.105	342.64	224.171
Cut-07-k		6.106	6.034	6.089	334.45	224.341
Cut-07-l		5.842	5.788	5.792	297.72	195.848
Cut-07-m		6.152	6.072	6.067	338.25	226.632
Cut-07-n		5.745	5.737	5.815	293.2	191.657
Cut-07-ñ		6.036	6.088	6.054	321.53	222.467
Cut-07-1	2.587			4.354	35.53	22.886
Cut-07-1a	2.584			2.339	18.83	12.266
Cut-07-2	2.582			4.147	33.28	21.714
Cut-07-2a	2.578			2.322	17.94	12.120
Cut-07-3	2.573			3.934	31.25	20.455
Cut-07-3a	2.587			2.46	19.64	12.931
Cut-07-4	2.574			2.281	18.00	11.870
Cut-07-5	2.581			2.446	19.85	12.797
Cut-07-6	2.581			2.438	19.19	12.756
Cut-07-7	2.582			2.455	19.68	12.854

Anexo 2: Mapa del menú del picnómetro



Ruta de acceso para introducir los parámetros del espécimen como son peso e identificación y ruta de acceso para iniciar la prueba.

- *RUN (MAIN MENU) > SAMPLE PARAMETERS (RUN MENU) > SAMPLE WEIGHT y SAMPLE ID*
- *RUN (MAIN MENU) > SAMPLE PARAMETERS (RUN MENU) > START*

Anexo 3: Tablas de porcentaje de los diferentes componentes identificados en los especímenes

Porcentaje del tamaño de Fiamas identificados en las once secciones planas de la muestra de roca Cut-07. P= guijarros (>4 mm). Gr= granulo (4-2 mm). CoS= arena gruesa (2-0.5 mm). MeS= arena media (0.5-0.25 mm). FiS= Arena fina (0.25-0.06 mm). Si= limo (< 0.06 mm).

Especímen	Fiamas %					
	P (mm)	Gr (mm)	CoS (mm)	MeS (mm)	FiS (mm)	SI (mm)
	>4	4-2	2-0.5	0.5-0.25	0.25-0.06	< 0.06
at1	4.49175	1.89527	0.82642	0.01265	0.00862	0.02414
at2	5.48381	1.52268	1.29580	0.00316	8.31217	0.00116
at3	0.77733	0.12410	1.08921	0.03678	0.00568	0.00208
at4	1.26493	1.22873	0.88853	0.00830	0.00233	0.00021
at5	-	0.63584	1.36186	0.01937	0.00114	0.00051
at6	0.43065	1.06508	1.30053	0.01963	-	-
at7	2.21442	1.78427	1.32532	0.02979	0.00053	0.00048
at8	1.37946	1.48370	0.96543	0.11095	0.02454	0.00721
at9	1.69573	2.24111	1.41080	0.00263	0.00088	0.00338
at10	3.36947	1.97069	0.89244	0.00246	0.00246	0.00059
at11	5.76074	1.51577	1.03110	0.01757	0.00145	0.00029
Promedio	2.68683	1.40611	1.12613	0.02394	0.83598	0.00400
Desviación estándar	1.96267	0.61762	0.21739	0.03093	2.62688	0.00740

Especímen	Líticos %					
	P (mm)	Gr (mm)	CoS (mm)	MeS (mm)	FiS (mm)	SI (mm)
	>4	4-2	2-0.5	0.5-0.25	0.25-0.06	< 0.06
at1	0.00002	1.57933	4.95527	2.12470	1.76920	0.06375
at2	0.51768	1.56043	5.11707	1.79214	1.35649	0.19246
at3	-	1.37427	5.16244	2.06824	1.96842	0.33133
at4	0.77475	1.62507	6.72433	3.14332	2.91335	0.50770
at5	1.39412	2.47967	5.80935	2.59498	2.54263	0.36233
at6	0.72892	1.72590	5.71714	3.05041	3.05041	0.43376
at7	1.89846	1.65980	4.57074	2.14289	1.95709	0.29880
at8	0.19940	1.47390	5.75204	2.72768	2.83857	0.48460
at9	1.17043	2.04907	7.04799	3.04498	2.83042	0.50289
at10	2.85399	3.15383	10.31397	3.90095	3.68340	0.64215
at11	0.93772	1.53770	7.51173	3.37865	3.22433	0.57945
Promedio	1.04755	1.83809	6.24382	2.72445	2.55766	0.39993
Desviación estándar	0.84380	0.53471	1.63272	0.64893	0.70760	0.17142

Porcentaje del tamaño de Pómez y porcentaje de Matriz encontrados en las once secciones planas de la muestra de roca Cut-07. P= guijarros (>4 mm). Gr= granulo (4-2 mm). CoS= arena gruesa (2-0.5 mm). MeS= arena media (0.5-0.25 mm). FiS= Arena fina (0.25-0.06 mm). Si= limo (< 0.06 mm).

Especimen	Pómez %					
	P (mm)	Gr (mm)	CoS (mm)	MeS (mm)	FiS (mm)	SI (mm)
	>4	4-2	2-0.5	0.5-0.25	0.25-0.06	< 0.06
at1	0.00002	0.02499	0.33222	0.09352	0.02235	0.06375
at2	-	-	-	-	-	-
at3	-	0.13565	0.38907	0.03064	0.00065	0.00006
at4	0.22700	0.10527	0.51236	0.00260	0.00119	0.00042
at5	-	0.42447	0.79049	0.02998	0.00008	0.00016
at6	-	0.13080	0.61776	0.02622	0.00198	0.00004
at7	-	0.23232	0.51167	0.01404	0.00016	0.00016
at8	1.10538	0.14717	0.74295	0.10037	0.00722	0.00156
at9	1.45277	0.62117	0.80800	0.00280	0.00341	0.00094
at10	-	0.50785	0.64647	0.00590	0.00208	0.00082
at11	0.14998	0.40978	0.92823	0.00415	0.00067	0.00035
Promedio	0.58703	0.27395	0.62792	0.03102	0.00398	0.00683
Desviación estándar	0.64873	0.20117	0.19267	0.03649	0.00679	0.02001

Anexo 4: Reportes del Picnómetro



QUANTACHROME CORPORATION
Upsc 1200e V5.04
Analysis Report

Thu Apr 26 08:06:38 2018
User ID: QA

Sample Parameters

Sample ID: CUT-07-1a
Weight: 18.8261 g

Analysis Parameters

Cell Size - Medium
V Added - Large: 81.2002 cc
V Cell: 58.4344 cc
Analysis Temperature: 21.0 C
Target Pressure: 131.0 kPa
Type of gas used: HELIO
Equilibration Time: Auto Vacuum
Purge: 1.0 min.
Maximum Runs: 15
Number Of Runs Averaged: 3
Deviation Requested: 0.0300 %

Analysis Results

Deviation Achieved: 0.0267 %
Average Volume: 7.9391 cc
Volume Std. Dev.: 0.0024 cc
Average Density: 2.3713 g/cc
Density Std. Dev.: 0.0007 g/cc
Coefficient of Variation: 0.0299 %

----- Run Data -----		
	VOLUME (cc)	DENSITY (g/cc)

1	7.9365	2.3721
	7.9422	2.3704
3	7.9384	2.3715



QUANTACHROME CORPORATION
Upyc 1200e V5.04
Analysis Report

Thu Apr 26 08:23:00 2018

User ID: QA

Sample Parameters

Sample ID: CUT-07-2a

Weight: 17.9382 g

Analysis Parameters

Cell Size - Medium

V Added - Large: 81.2002 cc

V Cell: 58.4344 cc

Analysis Temperature: 21.4 C

Target Pressure: 131.0 kPa

Type of gas used: HELIO

Equilibration Time: Auto Vacuum

Purge: 1.0 min.

Maximum Runs: 15

Number Of Runs Averaged: 3

Deviation Requested: 0.0300 %

Analysis Results

Deviation Achieved: 0.0021 %

Average Volume: 7.5645 cc

Volume Std. Dev.: 0.0002 cc

Average Density: 2.3714 g/cc

Density Std. Dev.: 0.0001 g/cc

Coefficient of Variation: 0.0024 %

Run Data

-----RUN

VOLUME (cc)	DENSITY (g/cc)
1	7.5760 2.3678 2
7.5642	2.3715 3 7.5647
	2.3713
4	7.5645 2.3714



QUANTACHROME CORPORATION
Upyc 1200e V5.04
Analysis Report

Thu Apr 26 10:46:30 2018

User ID: QA

Sample Parameters

Sample ID: CUT-07-3a

Weight: 19.6388 g

Analysis Parameters

Cell Size - Medium

V Added - Large: 81.2002 cc

V Cell: 58.4344 cc

Analysis Temperature: 23.1 C

Target Pressure: 131.0 kPa

Type of gas used: HELIO

Equilibration Time: Auto Vacuum

Purge: 1.0 min.

Maximum Runs: 15

Number Of Runs Averaged: 3

Deviation Requested: 0.0300 %

Analysis Results

Deviation Achieved: 0.0239 %

Average Volume: 8.2466 cc

Volume Std. Dev.: 0.0021 cc

Average Density: 2.3814 g/cc

Density Std. Dev.: 0.0006 g/cc

Coefficient of Variation: 0.0254 %

Run Data		

-----RUN		
VOLUME (cc)	DENSITY (g/cc)	

1	8.2321	2.3856
2	8.2377	2.3840
3	8.2450	2.3819
4	8.2453	2.3818
5	8.2496	2.3806



QUANTACHROME CORPORATION
Upsc 1200e V5.04
Analysis Report

Fri Apr 27 10:10:44 2018
User ID: QA

Sample Parameters

Sample ID: CUT-07-4
Weight: 17.9959 g

Analysis Parameters

Cell Size - Medium
V Added - Large: 81.2002 cc
V Cell: 58.4344 cc
Analysis Temperature: 21.9 C
Target Pressure: 131.0 kPa
Type of gas used: HELIO
Equilibration Time: Auto
Flow Purge: 1.0 min.
Maximum Runs: 15
Number Of Runs Averaged: 3
Deviation Requested: 0.0300 %

Analysis Results

Deviation Achieved: 0.0123 %
Average Volume: 7.6264 cc
Volume Std. Dev.: 0.0011 cc
Average Density: 2.3597 g/cc
Density Std. Dev.: 0.0003 g/cc
Coefficient of Variation: 0.0142 %

Run Data

	RUN	VOLUME (cc)	DENSITY (g/cc)
1	7.6548	2.3509	
2	7.6377	2.3562	
3	7.6317	2.3580	
4	7.6250	2.3601	
5	7.6276	2.3593	
6	7.6265	2.3596	



QUANTACHROME CORPORATION
Upsc 1200e V5.04
Analysis Report

Fri Apr 27 10:30:10 2018
User ID: QA

Sample Parameters

Sample ID: CUT-07-5
Weight: 19.8459 g

Analysis Parameters

Cell Size - Medium
V Added - Large: 81.2002 cc
V Cell: 58.4344 cc
Analysis Temperature: 22.5 C
Target Pressure: 131.0 kPa
Type of gas used: HELIO
Equilibration Time: Auto
Flow Purge: 1.0 min.
Maximum Runs: 15
Number Of Runs Averaged: 3
Deviation Requested: 0.0300 %

Analysis Results

Deviation Achieved: 0.0100 %
Average Volume: 8.3586 cc
Volume Std. Dev.: 0.0009 cc
Average Density: 2.3743 g/cc
Density Std. Dev.: 0.0003 g/cc
Coefficient of Variation: 0.0113 %

Run Data

	RUN	VOLUME (cc)	DENSITY (g/cc)
1	8.3890	2.3657	
2	8.3666	2.3720	
3	8.3596	2.3740	
4	8.3574	2.3747	
5	8.3588	2.3742	



QUANTACHROME CORPORATION
Upsc 1200e V5.04
Analysis Report

Sat Sep 15 12:05:53 2018

User ID: QA

Sample Parameters

Sample ID: CUT-07-6

Weight: 19.1940 g

Analysis Parameters

Cell Size - Medium

V Added - Large: 81.2002 cc

V Cell: 58.4344 cc

Analysis Temperature: 22.4 C

Target Pressure: 131.0 kPa

Type of gas used: HELIO

Equilibration Time: Auto Flow

Purge: 1.0 min.

Maximum Runs: 15

Number Of Runs Averaged: 3

Deviation Requested: 0.0300 %

Analysis Results

Deviation Achieved: 0.0207 %

Average Volume: 8.0880 cc

Volume Std. Dev.: 0.0019 cc

Average Density: 2.3732 g/cc

Density Std. Dev.: 0.0006 g/cc

Coefficient of Variation: 0.0237 %

Run Data

-----RUN		
VOLUME (cc)	DENSITY (g/cc)	
1	8.1522	2.3545
2	8.1145	2.3654
3	8.1013	2.3693
4	8.0941	2.3714
5	8.0901	2.3725
6	8.0855	2.3739
7	8.0883	2.3730



QUANTACHROME CORPORATION
Upsc 1200e V5.04
Analysis Report

Sat Sep 15 12:29:23 2018

User ID: QA

Sample Parameters

Sample ID: CUT-07-7

Weight: 19.6814 g

Analysis Parameters

Cell Size - Medium

V Added - Large: 81.2002 cc

V Cell: 58.4344 cc

Analysis Temperature: 22.7 C

Target Pressure: 131.0 kPa

Type of gas used: HELIO

Equilibration Time: Auto Flow

Purge: 1.0 min.

Maximum Runs: 15

Number Of Runs Averaged: 3

Deviation Requested: 0.0300 %

Analysis Results

Deviation Achieved: 0.0269 %

Average Volume: 8.2850 cc

Volume Std. Dev.: 0.0026 cc

Average Density: 2.3756 g/cc

Density Std. Dev.: 0.0007 g/cc

Coefficient of Variation: 0.0310 %

Run Data

-----RUN

	VOLUME (cc)	DENSITY (g/cc)
1	8.4957	2.3166
2	8.4028	2.3423
3	8.3502	2.3570
4	8.3216	2.3651
5	8.3056	2.3697
6	8.2963	2.3723
7	8.2883	2.3746
8	8.2845	2.3757
9	8.2821	2.3764

Anexo 5: Reportes del Porosímetro

Page 1

Report date: 04/28/2018

Merged File

Quantachrome Corporation
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
version 8.01

Sample ID	CUT-07-1 segundo	File Name	S842701H_Merged.PRM
Sample Weight	18.8261 grams	Bulk Sample Volume	12.4841 cc
Sample Description	Ignimbrtita		
Comments			
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm ²	Hg Contact Angle	(I)140.00°, (E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	Moving Point Avg.	11 (Scan Mode)
Operator	Guadalupe	Mercury volume normalized by sample weight.	

Enhanced Data Reduction Summary

Total Porosity	7.6843 %
Interparticle Porosity	1.0184 %
Intraparticle Porosity	6.6659 %
Mercury Intrusion Porosity	7.6843 %
Pore Tortuosity	2.1432
Permeability (neglecting tortuosity effects)	0.0387 nm ²
Permeability (accounting for tortuosity effects)	0.0362 nm ²
Characteristic Throat/Pore Ratio	39.8347
Fractal Dimension (I) =	; (E) = 3.2300
Solid Compressibility	m ² /N
Bulk Modulus of Elasticity	N/m ²
Particle Coordination Number	12.7709
Breakthrough Pressure	1.3547 PSI

Particle Size Distribution

	MS Theory	SS Theory
10% particles finer than [%cm]	34.3787	82.7559
50% particles finer than [%cm]	77.7777	250.1502
90% particles finer than [%cm]	813.9457	916.3092

Calculation Parameters

Ambient Pressure	14.6960 [PSIA]
Interparticle Filling Pressure Limit	50.0000 [PSIA]
Helium (True) Density	2.0000 [g/cc]
Bulk (Particle) Density	1.5080 [g/cc]
Pore Shape Exponent for tortuosity calculation	1.0000
Exposed Surface Area for tortuosity calculation	0.5069 [m ² /g]
Particle Size Distribution	
MS Proportionality Constant	10.7300
Particle Shape Factor (Intrusion)	1.0000
Particle Shape Factor (Extrusion)	1.0000
SS Default Accuracy	1.0000
SS Relaxation Parameter	0.5000
SS Regularization Parameter	-3.0000

Report date: 04/28/2018

Merged File

Quantachrome Corporation
Quantachrome Foremaster for Windows® Data Report
version 8.01

Sample ID	CUT-07-1 segundo	File Name	S842701H_Merged.PRM
Sample Weight	18.8261 grams	Bulk Sample Volume	12.4841 cc
Sample Description	Ignimbrtita		
Comments			
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm ²	Hg Contact Angle	(I)140.00°, (E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	Moving Point Avg.	11 (Scan Mode)
Operator	Guadalupe	Mercury volume normalized by sample weight.	

Standard Report

Data Acquisition Parameters

Density of Mercury 13.5000 [g/cc]
 Temperature 20.00 [°C]

High Pressure

Data File Name S842701H.PRM
 Analysis Date 04/27/2018
 # of repeat cycles 0
 Penetrometer Constant . 1597 [mV/cc]
 Auto-Oil Fill Time 5 [sec]
 Run Mode Fixed Speed
 Motor Speed 20

Low Pressure

Data File Name S8427011.PRM
 Analysis Date 04/27/2018
 # of repeat cycles 0
 Penetrometer Constant . 1613 [mV/cc]
 Evacuation Rate 5
 Fine Evac. Until 2.0000 [min.]
 Coarse Evac. Until 10.0000 [min.]

914 Points Acquired	619 Pts in Intrusion Range	295 Pts in Extrusion Range
909 Points Used	618 Intrusion Pts Used	291 Extrusion Pts Used

Report date: 04/28/2018

Merged File

Quantachrome Corporation
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
version 8.01

Sample ID	CUT-07-1 segundo	File Name	S842701H_Merged.PRM
Sample Weight	18.8261 grams	Bulk Sample Volume	12.4841 cc
Sample Description	Ignimbrtita		
Comments			
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm ²	Hg Contact Angle	(I)140.00°, (E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	Moving Point Avg.	11 (Scan Mode)
Operator	Guadalupe	Mercury volume normalized by sample weight.	

Standard Report

Intrusion Statistics

Pressure Range : 1.355 PSIA to 32723.756 PSIA
Pore Diameter Range : 157.470184 µm to 0.006519 µm

Pore Diameter Statistics Summary

	Mean	Mode (df/dD)	Median
Volume	3.668E-02 cc/g at a diameter of 4.017E-01 µm	6.155E-02 cc/(µm-g) at a diameter of 1.353E-01 µm	2.551E-02 cc/g at a diameter of 7.992E-01 µm
Surface Area	1.338E-01 m ² /g at a diameter of 4.017E-01 µm	1.551E+00 m ² /(µm-g) at a diameter of 8.629E-03 µm	2.534E-01 m ² /g at a diameter of 1.862E-01 µm
Pore Number Fraction	2.042E-03 at a diameter of 4.017E-01 µm	6.738E+01 at a diameter of 1.272E-01 µm	5.007E-01 at a diameter of 2.878E-02 µm

Mercury Porosimetry Data Summary

Total Intruded Volume	0.0510 cc/g	Bulk (Particle) Density	n/a [g/cc]
Total Surface Area	0.5069 m ² /g	Apparent Density	n/a [g/cc]

Report date: 04/28/2018

Merged File

Quantachrome Corporation
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
version 8.01

Sample ID	CUT-07-1 segundo	File Name	S842701H_Merged.PRM
Sample Weight	18.8261 grams	Bulk Sample Volume	12.4841 cc
Sample Description	Ignimbrtita		
Comments			
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm ²	Hg Contact Angle	(I)140.00°, (E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	Moving Point Avg.	11 (Scan Mode)
Operator	Guadalupe	Mercury volume normalized by sample weight.	

Pore Size Distribution By Volume - Intrusion

Printing one out of every 10 data points.

Pressure [PSI]	Pore Diameter [µm]	Volume Intruded [cc/g]	Delta Volume [cc/g]	% Volume Intruded %	Dv(d) [cc/(µm-g)]	-dV/d(log d) [cc/g]
1.355	1.575E+02	0.0001	0.0001	0.11	9.782E-06	3.984E-03
2.272	9.388E+01	0.0010	0.0010	2.01	1.525E-05	3.232E-03
3.301	6.462E+01	0.0014	0.0004	2.73	1.280E-05	1.887E-03
4.246	5.024E+01	0.0016	0.0002	3.12	1.652E-05	1.937E-03
5.350	3.988E+01	0.0018	0.0002	3.51	2.008E-05	1.851E-03
6.294	3.389E+01	0.0019	0.0001	3.75	2.381E-05	1.864E-03
7.049	3.026E+01	0.0020	0.0001	3.94	2.994E-05	2.102E-03
7.948	2.684E+01	0.0021	0.0001	4.20	4.219E-05	2.629E-03
9.295	2.295E+01	0.0023	0.0002	4.55	5.240E-05	2.792E-03
10.734	1.987E+01	0.0025	0.0002	4.92	6.939E-05	3.189E-03
12.105	1.762E+01	0.0027	0.0002	5.28	8.973E-05	3.662E-03
13.623	1.566E+01	0.0029	0.0002	5.62	8.475E-05	3.065E-03
15.155	1.408E+01	0.0030	0.0001	5.89	9.322E-05	3.031E-03
16.686	1.278E+01	0.0031	0.0001	6.14	1.051E-04	3.112E-03
18.535	1.151E+01	0.0033	0.0001	6.43	1.268E-04	3.380E-03
20.518	1.040E+01	0.0034	0.0002	6.74	1.552E-04	3.727E-03
22.175	9.620E+00	0.0036	0.0001	6.99	1.823E-04	4.055E-03
23.629	9.028E+00	0.0037	0.0001	7.24	2.410E-04	5.031E-03
25.109	8.496E+00	0.0038	0.0001	7.53	3.007E-04	5.896E-03
26.657	8.002E+00	0.0040	0.0001	7.81	2.871E-04	5.307E-03
28.436	7.502E+00	0.0041	0.0002	8.11	3.000E-04	5.197E-03
30.662	6.957E+00	0.0043	0.0002	8.45	3.901E-04	6.293E-03
33.089	6.447E+00	0.0045	0.0002	8.92	4.702E-04	6.992E-03
35.492	6.010E+00	0.0048	0.0002	9.35	6.564E-04	9.146E-03
37.798	5.644E+00	0.0051	0.0003	9.95	9.199E-04	1.199E-02
40.298	5.294E+00	0.0054	0.0004	10.66	1.171E-03	1.435E-02
43.242	4.933E+00	0.0060	0.0005	11.68	1.728E-03	1.974E-02
51.378	4.152E+00	0.0068	0.0009	13.36	1.107E-03	1.097E-02
108.381	1.968E+00	0.0116	0.0048	22.71	4.662E-03	2.323E-02
234.152	9.110E-01	0.0234	0.0119	46.01	1.969E-02	4.183E-02
420.782	5.070E-01	0.0339	0.0105	66.58	2.945E-02	3.347E-02
648.327	3.290E-01	0.0385	0.0046	75.54	2.855E-02	2.178E-02
898.552	2.374E-01	0.0418	0.0033	82.11	4.650E-02	2.570E-02
1174.210	1.817E-01	0.0449	0.0030	88.07	5.834E-02	2.446E-02
1478.818	1.443E-01	0.0471	0.0022	92.40	6.113E-02	2.038E-02
1814.974	1.175E-01	0.0487	0.0016	95.57	5.692E-02	1.538E-02
2185.580	9.760E-02	0.0496	0.0009	97.40	3.929E-02	8.789E-03
2590.928	8.233E-02	0.0501	0.0005	98.32	2.662E-02	5.039E-03
3049.910	6.994E-02	0.0504	0.0003	98.87	1.996E-02	3.213E-03
3585.886	5.949E-02	0.0506	0.0002	99.21	1.453E-02	1.987E-03
4209.036	5.068E-02	0.0507	0.0001	99.41	9.913E-03	1.156E-03
4911.447	4.343E-02	0.0507	0.0001	99.53	7.429E-03	7.421E-04
5684.979	3.752E-02	0.0508	0.0000	99.60	6.157E-03	5.334E-04

Report date: 04/28/2018

Merged File

Quantachrome Corporation
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
version 8.01

Sample ID CUT-07-1 segundo **File Name** S842701H_Merged.PRM
Sample Weight 18.8261 grams **Bulk Sample Volume** 12.4841 cc
Sample Description Ignimbrtita
Comments
Hg Surface Tension 480.00 erg/cm² **Hg Contact Angle** (I)140.00°, (E)140.00°
Minimum Delta Vol. 0.000 % FS **Moving Point Avg.** 11 (Scan Mode)
Operator Guadalupe **Mercury volume normalized by sample weight.**

Pore Size Distribution By Volume - Intrusion

Printing one out of every 10 data points.

Pressure [PSI]	Pore Diameter [µm]	Volume Intruded [cc/g]	Delta Volume [cc/g]	% Volume Intruded %	Dv(d) [cc/(µm-g)]	-dV/d(log d) [cc/g]
6519.958	3.272E-02	0.0508	0.0000	99.66	4.727E-03	3.557E-04
7412.388	2.878E-02	0.0508	0.0000	99.69	5.129E-03	3.430E-04
8358.147	2.552E-02	0.0508	0.0000	99.73	6.368E-03	3.746E-04
9357.059	2.280E-02	0.0508	0.0000	99.76	5.791E-03	3.061E-04
10403.649	2.050E-02	0.0509	0.0000	99.79	9.221E-03	4.385E-04
11496.812	1.855E-02	0.0509	0.0000	99.83	9.355E-03	3.999E-04
12635.118	1.688E-02	0.0509	0.0000	99.86	1.067E-02	4.169E-04
13814.934	1.544E-02	0.0509	0.0000	99.89	5.740E-03	2.029E-04
15037.237	1.419E-02	0.0509	0.0000	99.90	8.475E-03	2.792E-04
16300.435	1.309E-02	0.0509	0.0000	99.92	9.675E-03	2.921E-04
17603.219	1.212E-02	0.0509	0.0000	99.94	6.781E-03	1.889E-04
18947.252	1.126E-02	0.0509	0.0000	99.95	6.111E-03	1.591E-04
20332.195	1.049E-02	0.0509	0.0000	99.96	7.332E-03	1.778E-04
21756.977	9.805E-03	0.0509	0.0000	99.97	7.217E-03	1.629E-04
23218.877	9.187E-03	0.0509	0.0000	99.98	6.640E-03	1.414E-04
24720.949	8.629E-03	0.0510	0.0000	99.99	1.343E-02	2.676E-04
26266.561	8.121E-03	0.0510	0.0000	100.00	4.870E-03	8.985E-05
28093.086	7.593E-03	0.0510	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
30447.180	7.006E-03	0.0510	0.0000	100.00	5.738E-06	9.608E-08

Report date: 04/28/2018

Merged File

Quantachrome Corporation
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
version 8.01

Sample ID	CUT-07-1 segundo	File Name	S842701H_Merged.PRM
Sample Weight	18.8261 grams	Bulk Sample Volume	12.4841 cc
Sample Description	Ignimbrtita		
Comments			
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm ²	Hg Contact Angle	(I)140.00°, (E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	Moving Point Avg.	11 (Scan Mode)
Operator	Guadalupe	Mercury volume normalized by sample weight.	

Standard Report

Total Surface Area	0.5069 m ² /g	Apparent Density	n/a [g/cc]
--------------------	--------------------------	------------------	------------

Extrusion Statistics

Pressure Range : 32243.084 PSIA to 20.561 PSIA
Pore Diameter Range : 0.006616 µm to 10.375133 µm

Pore Diameter Statistics Summary

	Mean	Mode (df/dD)	Median
Volume	5.096E-02 cc/g	1.308E-02 cc/(µm-g)	5.064E-02 cc/g
	at a diameter of	at a diameter of	at a diameter of
	5.066E-02 µm	8.649E-03 µm	5.149E-02 µm
Surface Area	5.069E-01 m ² /g	1.518E+00 m ² /(µm-g)	4.823E-01 m ² /g
	at a diameter of	at a diameter of	at a diameter of
	5.066E-02 µm	8.649E-03 µm	1.736E-02 µm
Pore Number	1.138E-04	1.276E+02	5.019E-01
	at a diameter of	at a diameter of	at a diameter of
Fraction	5.066E-02 µm	8.649E-03 µm	1.311E-02 µm

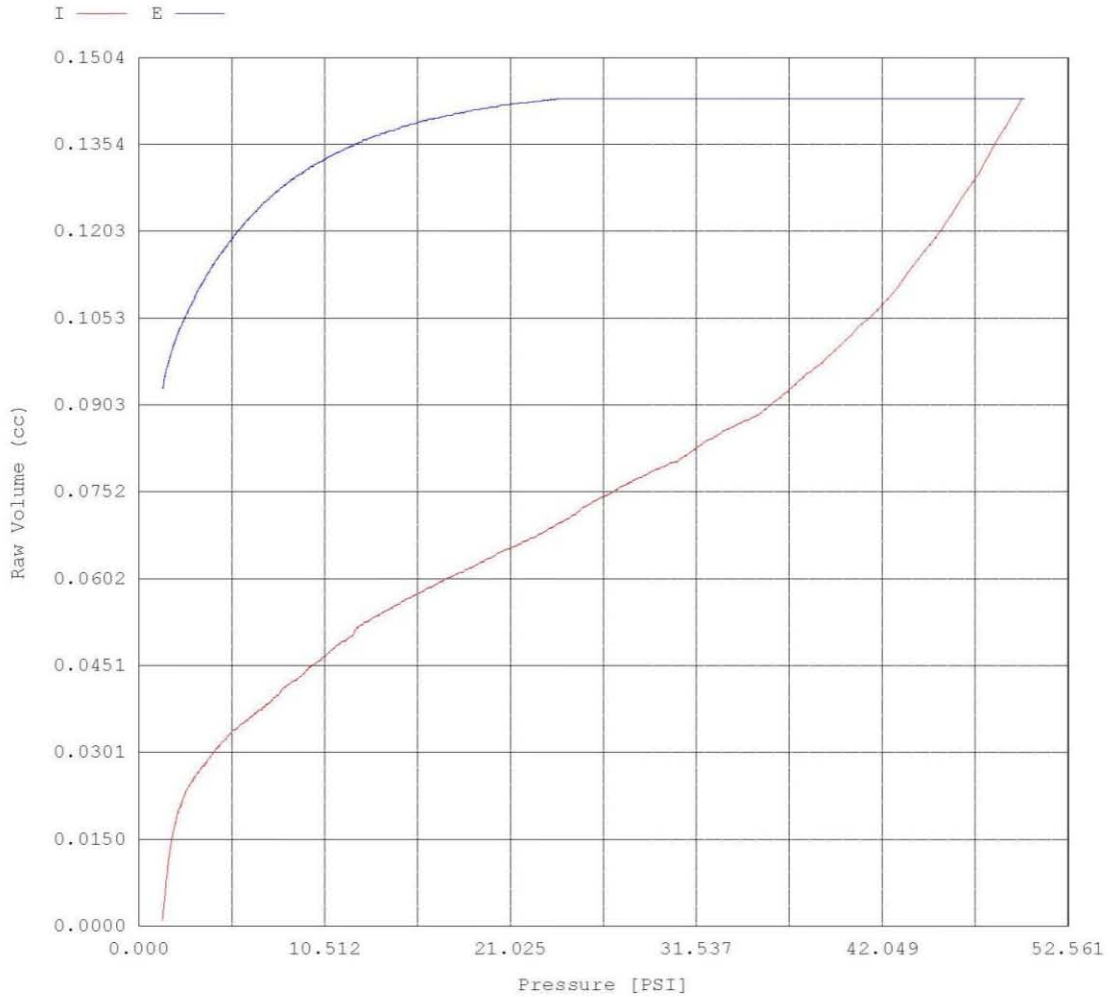
Report date: 05/14/2018

Analysis date: 04/27/2018

Quantachrome Corporation
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
version 8.01

Sample ID	CUT-07-1 segundo	File Name	S8427011.PRM
Sample Weight	18.8261 grams	Bulk Sample Volume	12.4841 cc
Sample Description	Ignimbrita		
Comments			
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm ²	Hg Contact Angle	(I)140.00°, (E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	Moving Point Avg.	11 (Scan Mode)
Operator	Guadalupe		Mercury volume normalized by sample weight.

Raw Volume vs. Pressure



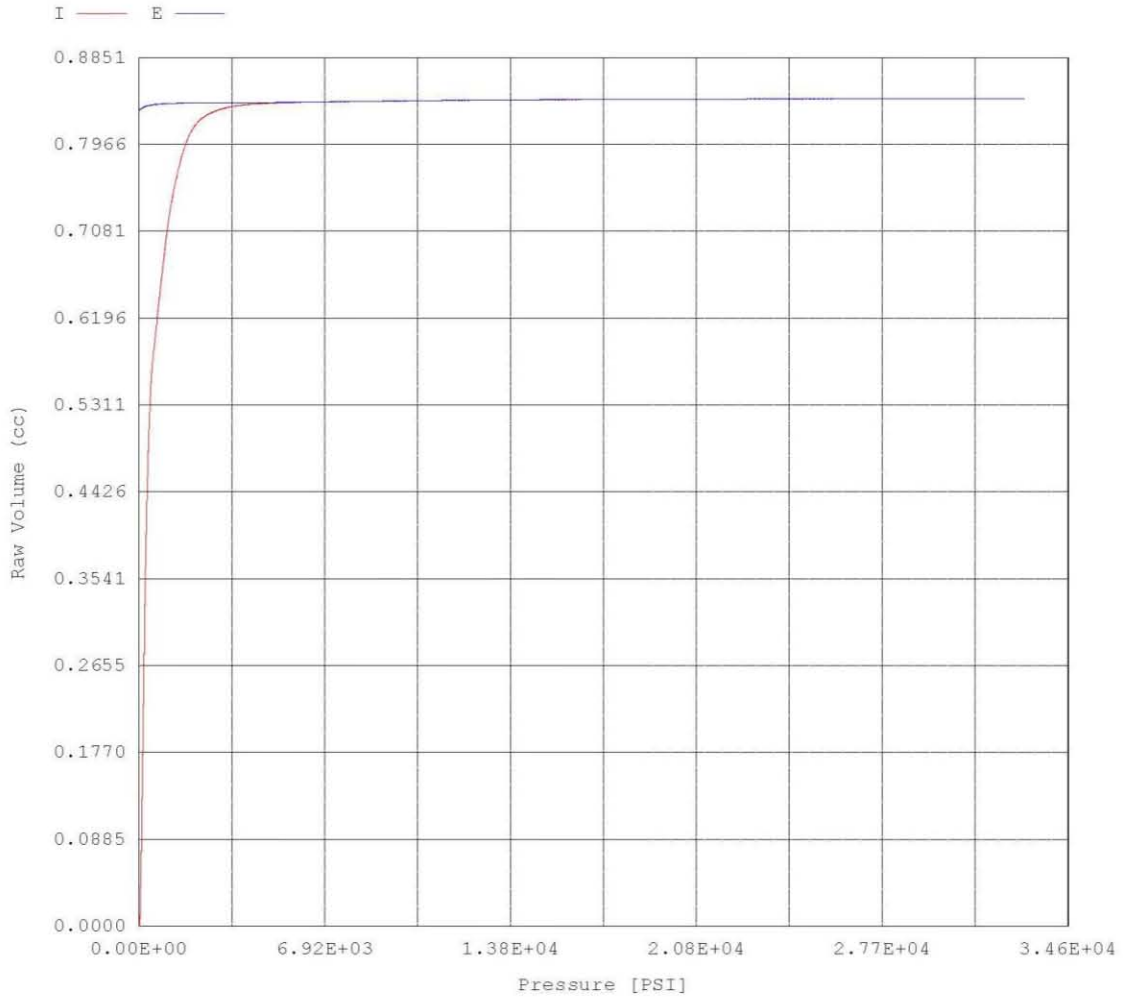
Report date: 05/14/2018

Analysis date: 04/27/2018

Quantachrome Corporation
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
version 8.01

Sample ID	CUT-07-1 segundo	File Name	S842701H.PRM
Sample Weight	18.8261 grams	Bulk Sample Volume	12.4841 cc
Sample Description	Ignimbrtita		
Comments			
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm ²	Hg Contact Angle	(I)140.00°, (E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	Moving Point Avg.	11 (Scan Mode)
Operator	Guadalupe		Mercury volume normalized by sample weight.

Raw Volume vs. Pressure



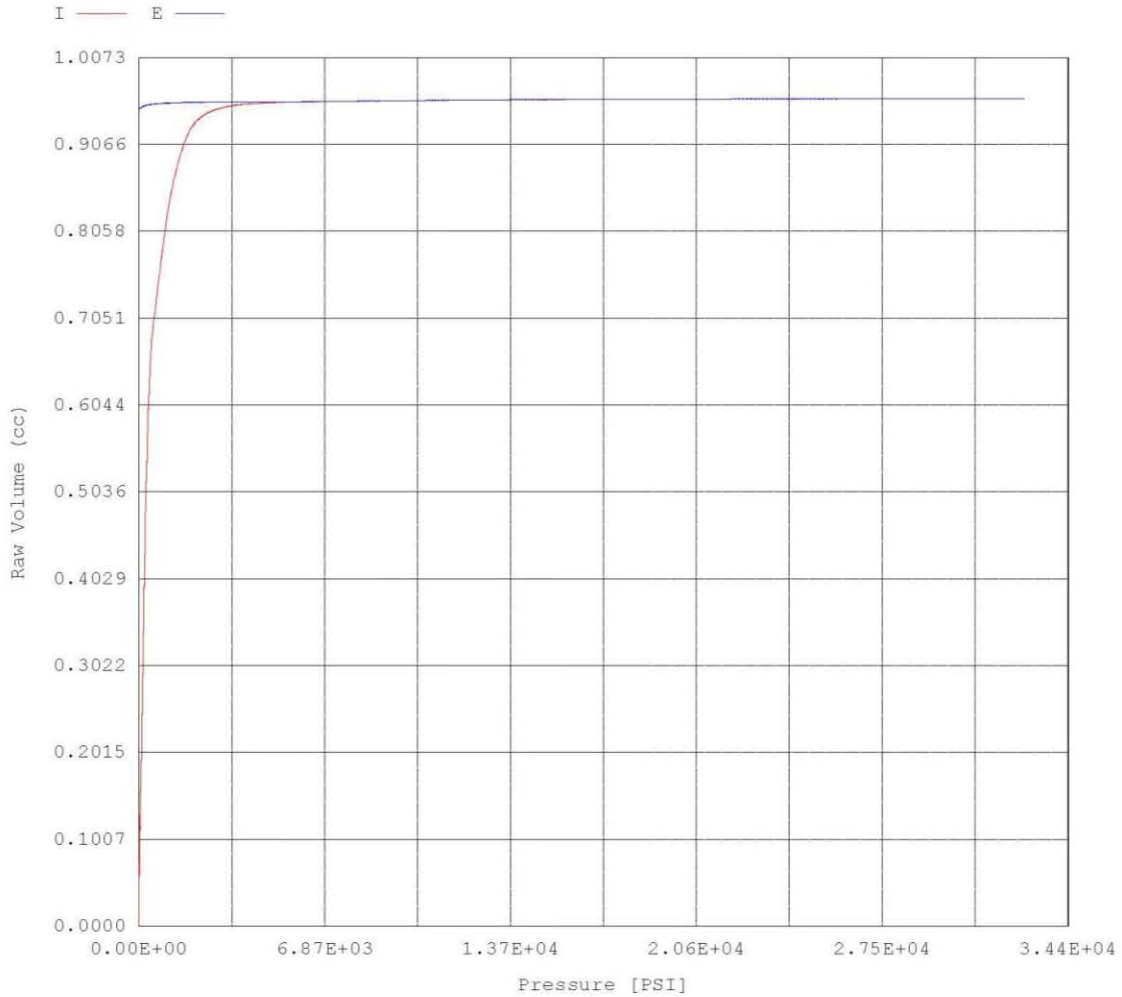
Report date: 05/14/2018

Merged File

Quantachrome Corporation
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
version 8.01

Sample ID	CUT-07-1 segundo	File Name	S842701H_Merged.PRM
Sample Weight	18.8261 grams	Bulk Sample Volume	12.4841 cc
Sample Description	Ignimbrtita		
Comments			
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm ²	Hg Contact Angle	(I)140.00°, (E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	Moving Point Avg.	11 (Scan Mode)
Operator	Guadalupe		Mercury volume normalized by sample weight.

Raw Volume vs. Pressure



Report date: 04/28/2018

Merged File

Quantachrome Corporation
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
version 8.01

Sample ID	CUT-07-2	File Name	S842801H_Merged.PRM
Sample Weight	17.9382 grams	Bulk Sample Volume	11.8953 cc
Sample Description	Ignimbrtita		
Comments			
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm ²	Hg Contact Angle	(I)140.00°, (E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	Moving Point Avg.	11 (Scan Mode)
Operator	Guadalupe	Mercury volume normalized by sample weight.	

Enhanced Data Reduction Summary

Total Porosity	8.7852 %
Interparticle Porosity	1.9257 %
Intraparticle Porosity	6.8595 %
Mercury Intrusion Porosity	8.7852 %
Pore Tortuosity	2.1307
Permeability (neglecting tortuosity effects)	0.0452 nm ²
Permeability (accounting for tortuosity effects)	0.0424 nm ²
Characteristic Throat/Pore Ratio	1.2439
Fractal Dimension (I) =	; (E) = 2.5220
Solid Compressibility	m ² /N
Bulk Modulus of Elasticity	N/m ²
Particle Coordination Number	12.7709
Breakthrough Pressure	1.6665 PSI

Particle Size Distribution

	MS Theory	SS Theory
10% particles finer than [%cm]	36.9407	83.0291
50% particles finer than [%cm]	89.8859	127.1173
90% particles finer than [%cm]	771.2036	775.2214

Calculation Parameters

Ambient Pressure	14.6960 [PSIA]
Interparticle Filling Pressure Limit	50.0000 [PSIA]
Helium (True) Density	2.0000 [g/cc]
Bulk (Particle) Density	1.5080 [g/cc]
Pore Shape Exponent for tortuosity calculation	1.0000
Exposed Surface Area for tortuosity calculation	0.5733 [m ² /g]
Particle Size Distribution	
MS Proportionality Constant	10.7300
Particle Shape Factor (Intrusion)	1.0000
Particle Shape Factor (Extrusion)	1.0000
SS Default Accuracy	1.0000
SS Relaxation Parameter	0.5000
SS Regularization Parameter	-3.0000

Report date: 04/28/2018

Merged File

Quantachrome Corporation
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
version 8.01

Sample ID	CUT-07-2	File Name	S842801H_Merged.PRM
Sample Weight	17.9382 grams	Bulk Sample Volume	11.8953 cc
Sample Description	Ignimbrtita		
Comments			
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm ²	Hg Contact Angle	(I)140.00°, (E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	Moving Point Avg.	11 (Scan Mode)
Operator	Guadalupe		Mercury volume normalized by sample weight.

Standard Report

Data Acquisition Parameters

Density of Mercury 13.5000 [g/cc]
 Temperature 20.00 [°C]

High Pressure

Data File Name S842801H.PRM
 Analysis Date 04/28/2018
 # of repeat cycles 0
 Penetrometer Constant . 1597 [mV/cc]
 Auto-Oil Fill Time 5 [sec]
 Run Mode Fixed Speed
 Motor Speed 20

Low Pressure

Data File Name S8428011.PRM
 Analysis Date 04/28/2018
 # of repeat cycles 0
 Penetrometer Constant . 1613 [mV/cc]
 Evacuation Rate 5
 Fine Evac. Until 2.0000 [min.]
 Coarse Evac. Until 10.0000 [min.]

916 Points Acquired	620 Pts in Intrusion Range	296 Pts in Extrusion Range
911 Points Used	619 Intrusion Pts Used	292 Extrusion Pts Used

Report date: 04/28/2018

Merged File

Quantachrome Corporation
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
version 8.01

Sample ID	CUT-07-2	File Name	S842801H_Merged.PRM
Sample Weight	17.9382 grams	Bulk Sample Volume	11.8953 cc
Sample Description	Ignimbrtita		
Comments			
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm ²	Hg Contact Angle	(I)140.00°, (E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	Moving Point Avg.	11 (Scan Mode)
Operator	Guadalupe		Mercury volume normalized by sample weight.

Standard Report

Intrusion Statistics

Pressure Range : 1.272 PSIA to 32688.078 PSIA
Pore Diameter Range : 167.659470 µm to 0.006526 µm

Pore Diameter Statistics Summary

	Mean	Mode (df/dD)	Median
Volume	4.266E-02 cc/g at a diameter of 4.058E-01 µm	6.537E-02 cc/(µm-g) at a diameter of 1.301E-01 µm	2.917E-02 cc/g at a diameter of 8.631E-01 µm
Surface Area	1.394E-01 m ² /g at a diameter of 4.058E-01 µm	3.498E+00 m ² /(µm-g) at a diameter of 6.526E-03 µm	2.866E-01 m ² /g at a diameter of 1.711E-01 µm
Pore Number Fraction	1.519E-03 at a diameter of 4.058E-01 µm	2.023E+02 at a diameter of 6.526E-03 µm	5.019E-01 at a diameter of 1.327E-02 µm

Mercury Porosimetry Data Summary

Total Intruded Volume	0.0583 cc/g	Bulk (Particle) Density	1.5080 [g/cc]
Total Surface Area	0.5733 m ² /g	Apparent Density	1.4155 [g/cc]

Report date: 04/28/2018

Merged File

Quantachrome Corporation
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
version 8.01

Sample ID	CUT-07-2	File Name	S842801H_Merged.PRM
Sample Weight	17.9382 grams	Bulk Sample Volume	11.8953 cc
Sample Description	Ignimbrtita		
Comments			
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm ²	Hg Contact Angle	(I)140.00°, (E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	Moving Point Avg.	11 (Scan Mode)
Operator	Guadalupe		Mercury volume normalized by sample weight.

Pore Size Distribution By Volume - Intrusion

Printing one out of every 10 data points.

Pressure [PSI]	Pore Diameter [µm]	Volume Intruded [cc/g]	Delta Volume [cc/g]	% Volume Intruded %	Dv(d) [cc/(µm-g)]	-dV/d(log d) [cc/g]
1.272	1.677E+02	0.0001	0.0001	0.15	1.152E-05	5.013E-03
1.937	1.102E+02	0.0013	0.0012	2.16	2.401E-05	6.067E-03
2.697	7.909E+01	0.0019	0.0007	3.31	2.041E-05	3.683E-03
3.492	6.109E+01	0.0023	0.0004	3.91	1.998E-05	2.829E-03
4.435	4.810E+01	0.0026	0.0003	4.38	2.448E-05	2.737E-03
5.352	3.986E+01	0.0028	0.0002	4.81	3.530E-05	3.257E-03
6.365	3.352E+01	0.0031	0.0003	5.25	4.802E-05	3.745E-03
7.405	2.881E+01	0.0033	0.0003	5.71	6.306E-05	4.197E-03
8.293	2.572E+01	0.0036	0.0002	6.10	8.681E-05	5.189E-03
9.550	2.234E+01	0.0039	0.0004	6.75	1.376E-04	7.177E-03
11.172	1.909E+01	0.0045	0.0006	7.70	1.941E-04	8.583E-03
12.727	1.676E+01	0.0050	0.0005	8.63	2.627E-04	1.019E-02
14.293	1.493E+01	0.0055	0.0005	9.51	2.954E-04	1.021E-02
15.924	1.340E+01	0.0061	0.0005	10.39	3.862E-04	1.199E-02
17.585	1.213E+01	0.0066	0.0006	11.39	5.147E-04	1.444E-02
19.313	1.105E+01	0.0072	0.0006	12.35	4.969E-04	1.268E-02
21.257	1.004E+01	0.0077	0.0005	13.23	5.271E-04	1.221E-02
22.907	9.312E+00	0.0081	0.0004	13.88	5.363E-04	1.153E-02
24.343	8.763E+00	0.0084	0.0003	14.42	5.981E-04	1.211E-02
25.792	8.271E+00	0.0087	0.0003	14.95	6.533E-04	1.249E-02
27.727	7.694E+00	0.0091	0.0004	15.68	7.926E-04	1.413E-02
30.466	7.002E+00	0.0097	0.0006	16.68	8.608E-04	1.392E-02
33.130	6.439E+00	0.0102	0.0005	17.51	8.421E-04	1.251E-02
35.461	6.016E+00	0.0106	0.0004	18.12	8.985E-04	1.249E-02
37.694	5.659E+00	0.0109	0.0003	18.72	1.004E-03	1.310E-02
40.074	5.323E+00	0.0113	0.0003	19.31	1.212E-03	1.496E-02
43.003	4.961E+00	0.0118	0.0006	20.28	1.842E-03	2.114E-02
50.169	4.252E+00	0.0127	0.0009	21.85	1.292E-03	1.292E-02
88.309	2.416E+00	0.0160	0.0033	27.46	3.170E-03	1.862E-02
171.636	1.243E+00	0.0236	0.0076	40.58	1.087E-02	3.256E-02
339.297	6.287E-01	0.0355	0.0118	60.85	2.910E-02	4.206E-02
552.871	3.858E-01	0.0431	0.0077	74.04	3.144E-02	2.738E-02
797.485	2.675E-01	0.0468	0.0037	80.34	3.929E-02	2.456E-02
1070.299	1.993E-01	0.0502	0.0034	86.23	5.910E-02	2.730E-02
1371.564	1.555E-01	0.0530	0.0028	90.97	6.444E-02	2.313E-02
1709.901	1.248E-01	0.0550	0.0020	94.37	6.512E-02	1.874E-02
2087.302	1.022E-01	0.0563	0.0014	96.70	5.379E-02	1.261E-02
2495.957	8.547E-02	0.0571	0.0007	97.95	3.704E-02	7.269E-03
2949.369	7.233E-02	0.0575	0.0004	98.62	2.629E-02	4.376E-03
3469.410	6.149E-02	0.0577	0.0002	99.04	2.004E-02	2.834E-03
4070.787	5.240E-02	0.0578	0.0001	99.30	1.444E-02	1.741E-03
4752.824	4.488E-02	0.0579	0.0001	99.46	1.111E-02	1.147E-03
5505.685	3.875E-02	0.0580	0.0001	99.56	8.891E-03	7.938E-04

Report date: 04/28/2018

Merged File

Quantachrome Corporation
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
version 8.01

Sample ID	CUT-07-2	File Name	S842801H_Merged.PRM
Sample Weight	17.9382 grams	Bulk Sample Volume	11.8953 cc
Sample Description	Ignimbrtita		
Comments			
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm ²	Hg Contact Angle	(I)140.00°, (E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	Moving Point Avg.	11 (Scan Mode)
Operator	Guadalupe		Mercury volume normalized by sample weight.

Pore Size Distribution By Volume - Intrusion

Printing one out of every 10 data points.

Pressure [PSI]	Pore Diameter [µm]	Volume Intruded [cc/g]	Delta Volume [cc/g]	% Volume Intruded %	Dv(d) [cc/(µm-g)]	-dV/d(log d) [cc/g]
6322.246	3.374E-02	0.0580	0.0000	99.62	6.056E-03	4.694E-04
7196.538	2.964E-02	0.0581	0.0000	99.66	6.684E-03	4.599E-04
8125.124	2.625E-02	0.0581	0.0000	99.71	7.642E-03	4.630E-04
9105.635	2.343E-02	0.0581	0.0000	99.74	5.219E-03	2.811E-04
10135.687	2.105E-02	0.0581	0.0000	99.76	6.744E-03	3.299E-04
11212.478	1.903E-02	0.0581	0.0000	99.79	9.571E-03	4.210E-04
12332.007	1.730E-02	0.0581	0.0000	99.81	6.750E-03	2.678E-04
13493.909	1.581E-02	0.0582	0.0000	99.83	5.661E-03	2.071E-04
14697.079	1.451E-02	0.0582	0.0000	99.84	6.306E-03	2.117E-04
15942.763	1.338E-02	0.0582	0.0000	99.85	7.491E-03	2.317E-04
17228.727	1.238E-02	0.0582	0.0000	99.87	8.373E-03	2.397E-04
18554.795	1.150E-02	0.0582	0.0000	99.88	6.032E-03	1.590E-04
19923.736	1.071E-02	0.0582	0.0000	99.89	9.778E-03	2.439E-04
21331.871	1.000E-02	0.0582	0.0000	99.91	1.679E-02	3.876E-04
22777.826	9.365E-03	0.0582	0.0000	99.92	1.169E-02	2.521E-04
24262.938	8.792E-03	0.0582	0.0000	99.94	1.563E-02	3.173E-04
25808.131	8.266E-03	0.0582	0.0000	99.95	9.400E-03	1.791E-04
27777.373	7.680E-03	0.0582	0.0000	99.96	1.554E-02	2.773E-04
30191.330	7.066E-03	0.0582	0.0000	99.98	2.199E-02	3.594E-04

Report date: 04/28/2018

Merged File

Quantachrome Corporation
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
version 8.01

Sample ID	CUT-07-2	File Name	S842801H_Merged.PRM
Sample Weight	17.9382 grams	Bulk Sample Volume	11.8953 cc
Sample Description	Ignimbrtita		
Comments			
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm ²	Hg Contact Angle	(I)140.00°, (E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	Moving Point Avg.	11 (Scan Mode)
Operator	Guadalupe		Mercury volume normalized by sample weight.

Standard Report

Total Surface Area	0.5733 m ² /g	Apparent Density	1.4155 [g/cc]
--------------------	--------------------------	------------------	---------------

Extrusion Statistics

Pressure Range : 32240.500 PSIA to 21.842 PSIA
Pore Diameter Range : 0.006617 µm to 9.766792 µm

Pore Diameter Statistics Summary

	Mean	Mode (df/dD)	Median
Volume	5.826E-02 cc/g at a diameter of 1.200E-01 µm	1.228E-02 cc/(µm-g) at a diameter of 6.617E-03 µm	5.806E-02 cc/g at a diameter of 2.891E-02 µm
Surface Area	5.731E-01 m ² /g at a diameter of 1.200E-01 µm	1.870E+00 m ² /(µm-g) at a diameter of 6.617E-03 µm	5.667E-01 m ² /g at a diameter of 7.066E-03 µm
Pore Number Fraction	1.182E-01 at a diameter of 1.200E-01 µm	1.182E+03 at a diameter of 6.617E-03 µm	5.007E-01 at a diameter of 7.077E-03 µm

Report date: 04/28/2018

Merged File

Quantachrome Corporation
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
version 8.01

Sample ID	CUT-07-2	File Name	S842801H_Merged.PRM
Sample Weight	17.9382 grams	Bulk Sample Volume	11.8953 cc
Sample Description	Ignimbrtita		
Comments			
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm ²	Hg Contact Angle	(I)140.00°, (E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	Moving Point Avg.	11 (Scan Mode)
Operator	Guadalupe		Mercury volume normalized by sample weight.

Pore Size Distribution By Volume - Extrusion

Printing one out of every 10 data points.

Pressure [PSI]	Pore Diameter [µm]	Volume Extruded [cc/g]	Delta Volume [cc/g]	% Volume Extruded %	Dv(d) [cc/(µm-g)]	-dV/d(log d) [cc/g]
32240.500	6.617E-03	0.0583	0.0000	100.00	1.228E-02	1.829E-04
29910.932	7.132E-03	0.0583	0.0000	99.99	5.797E-03	9.442E-05
27911.463	7.643E-03	0.0582	0.0000	99.99	3.234E-03	5.772E-05
26254.127	8.125E-03	0.0582	0.0000	99.99	0.000E+00	0.000E+00
24652.918	8.653E-03	0.0582	0.0000	99.99	0.000E+00	0.000E+00
23103.211	9.233E-03	0.0582	0.0000	99.99	0.000E+00	0.000E+00
21600.203	9.876E-03	0.0582	0.0000	99.99	0.000E+00	0.000E+00
20142.180	1.059E-02	0.0582	0.0000	99.99	0.000E+00	0.000E+00
18725.326	1.139E-02	0.0582	0.0000	99.99	0.000E+00	0.000E+00
17351.180	1.229E-02	0.0582	0.0000	99.99	0.000E+00	0.000E+00
16019.004	1.332E-02	0.0582	0.0000	99.99	0.000E+00	0.000E+00
14727.788	1.448E-02	0.0582	0.0000	99.99	0.000E+00	0.000E+00
13482.101	1.582E-02	0.0582	0.0000	99.99	0.000E+00	0.000E+00
12280.260	1.737E-02	0.0582	0.0000	99.99	3.322E-05	1.259E-06
11116.435	1.919E-02	0.0582	0.0000	99.98	9.634E-04	4.186E-05
9988.426	2.136E-02	0.0582	0.0000	99.98	8.091E-04	3.926E-05
8897.767	2.397E-02	0.0582	0.0000	99.97	1.849E-03	1.010E-04
7843.636	2.720E-02	0.0582	0.0000	99.96	1.723E-03	1.074E-04
6830.729	3.123E-02	0.0582	0.0000	99.96	5.456E-04	3.932E-05
5861.822	3.639E-02	0.0582	0.0000	99.95	1.520E-03	1.245E-04
4935.570	4.322E-02	0.0582	0.0000	99.93	5.701E-04	5.869E-05
4054.476	5.261E-02	0.0582	0.0000	99.93	2.806E-04	3.248E-05
3226.012	6.613E-02	0.0582	0.0000	99.92	2.995E-04	4.532E-05
2457.791	8.679E-02	0.0582	0.0000	99.91	4.239E-04	8.044E-05
1767.926	1.207E-01	0.0582	0.0000	99.89	4.348E-04	1.168E-04
1163.351	1.834E-01	0.0582	0.0000	99.84	4.541E-04	1.799E-04
665.650	3.205E-01	0.0581	0.0001	99.75	3.396E-04	2.326E-04
307.123	6.946E-01	0.0580	0.0001	99.61	1.650E-04	2.424E-04
110.568	1.929E+00	0.0579	0.0001	99.45	3.814E-05	1.608E-04
30.334	7.033E+00	0.0579	0.0001	99.35	4.027E-06	7.690E-05

Report date: 05/14/2018

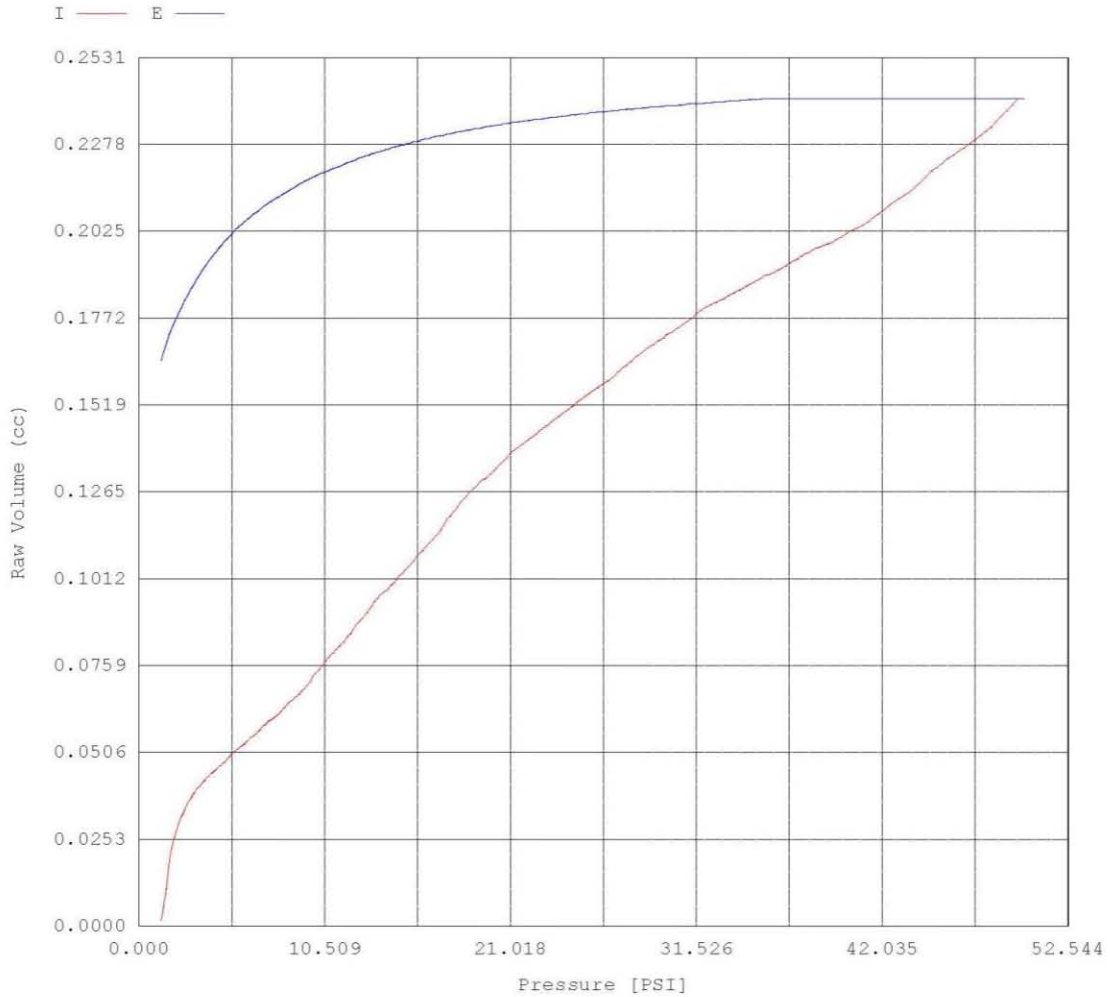
Analysis date: 04/28/2018

Quantachrome Corporation
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
version 8.01

Sample ID CUT-07-2
Sample Weight 17.9382 grams
Sample Description Ignimbritita
Comments
Hg Surface Tension 480.00 erg/cm²
Minimum Delta Vol. 0.000 % FS
Operator Guadalupe

File Name S8428011.PRM
Bulk Sample Volume 11.8953 cc
Hg Contact Angle (I)140.00°, (E)140.00°
Moving Point Avg. 11 (Scan Mode)
Mercury volume normalized by sample weight.

Raw Volume vs. Pressure



Report date: 05/14/2018

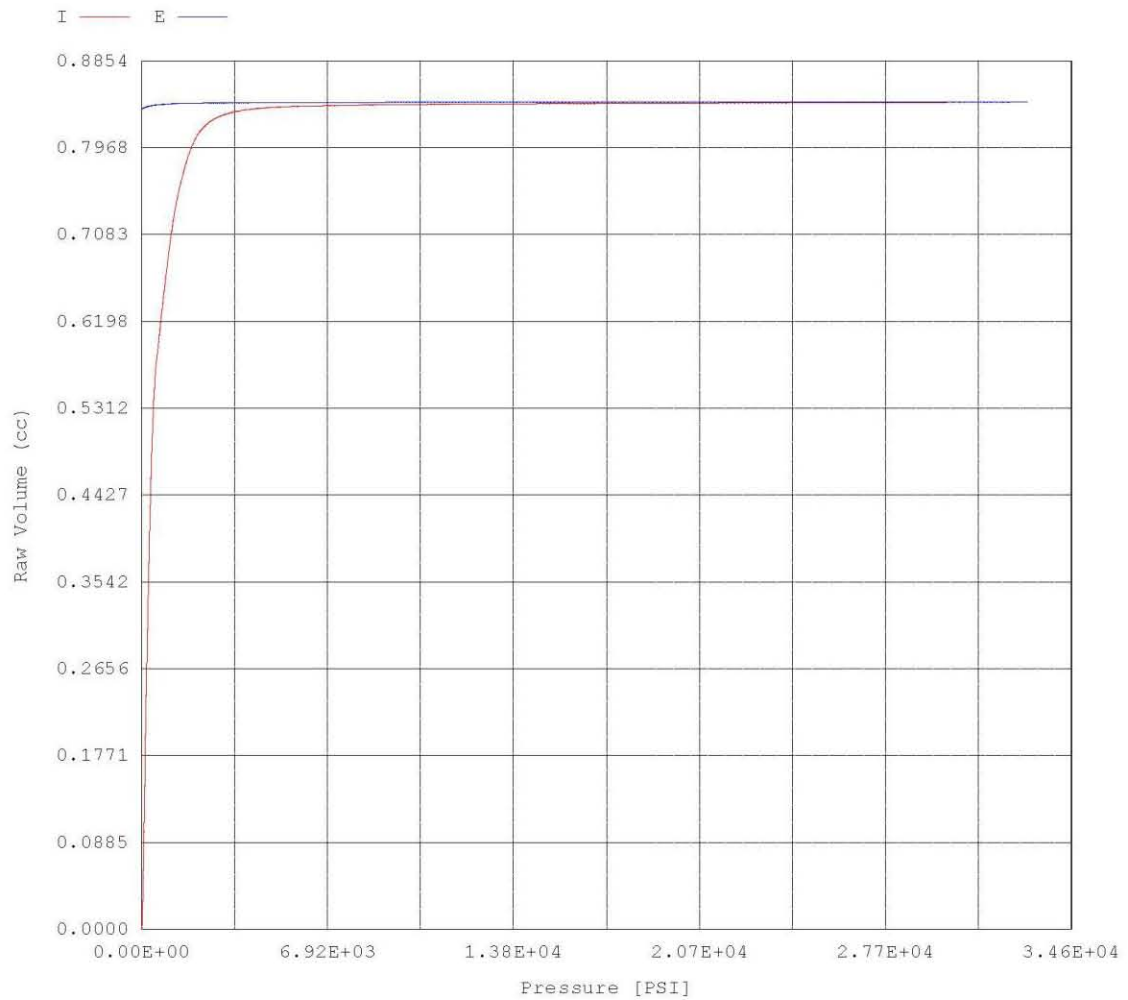
Analysis date: 04/28/2018

Quantachrome Corporation
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
version 8.01

Sample ID CUT-07-2
Sample Weight 17.9382 grams
Sample Description Ignimbrtita
Comments
Hg Surface Tension 480.00 erg/cm²
Minimum Delta Vol. 0.000 % FS
Operator Guadalupe

File Name S842801H.PRM
Bulk Sample Volume 11.8953 cc
Hg Contact Angle (I)140.00°, (E)140.00°
Moving Point Avg. 11 (Scan Mode)
Mercury volume normalized by sample weight.

Raw Volume vs. Pressure



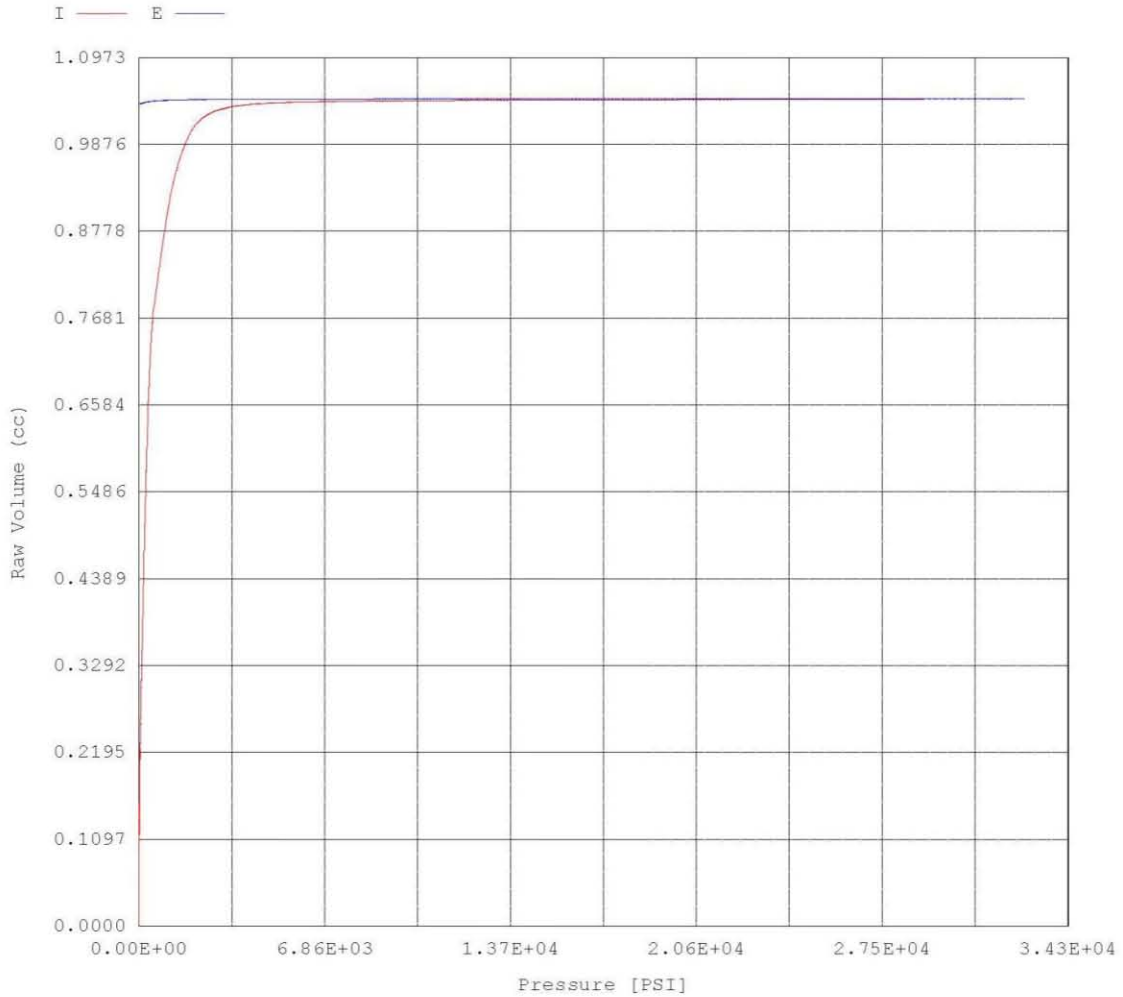
Report date: 05/14/2018

Merged File

Quantachrome Corporation
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
version 8.01

Sample ID	CUT-07-2	File Name	S842801H_Merged.PRM
Sample Weight	17.9382 grams	Bulk Sample Volume	11.8953 cc
Sample Description	Ignimbritita		
Comments			
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm ²	Hg Contact Angle	(I)140.00°, (E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	Moving Point Avg.	11 (Scan Mode)
Operator	Guadalupe		Mercury volume normalized by sample weight.

Raw Volume vs. Pressure



Report date: 04/28/2018

Merged File

Quantachrome Corporation
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
version 8.01

Sample ID	CUT-07-3	File Name	S842802H_Merged.PRM
Sample Weight	19.6388 grams	Bulk Sample Volume	13.0230 cc
Sample Description	Ignimbrtita		
Comments			
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm ²	Hg Contact Angle	(I)140.00°, (E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	Moving Point Avg.	11 (Scan Mode)
Operator	Guadalupe	Mercury volume normalized by sample weight.	

Enhanced Data Reduction Summary

Total Porosity	8.1007 %
Interparticle Porosity	1.8372 %
Intraparticle Porosity	6.2635 %
Mercury Intrusion Porosity	8.1007 %
Pore Tortuosity	2.1385
Permeability (neglecting tortuosity effects)	0.0413 nm ²
Permeability (accounting for tortuosity effects)	0.0386 nm ²
Characteristic Throat/Pore Ratio	38.6071
Fractal Dimension (I) =	; (E) = 5.0693
Solid Compressibility	m ² /N
Bulk Modulus of Elasticity	N/m ²
Particle Coordination Number	12.7709
Breakthrough Pressure	1.7036 PSI

Particle Size Distribution

	MS Theory	SS Theory
10% particles finer than [%cm]	34.6704	80.6357
50% particles finer than [%cm]	58.4861	130.6366
90% particles finer than [%cm]	302.0624	756.2895

Calculation Parameters

Ambient Pressure	14.6960 [PSIA]
Interparticle Filling Pressure Limit	50.0000 [PSIA]
Helium (True) Density	2.0000 [g/cc]
Bulk (Particle) Density	1.5080 [g/cc]
Pore Shape Exponent for tortuosity calculation	1.0000
Exposed Surface Area for tortuosity calculation	0.5310 [m ² /g]
Particle Size Distribution	
MS Proportionality Constant	10.7300
Particle Shape Factor (Intrusion)	1.0000
Particle Shape Factor (Extrusion)	1.0000
SS Default Accuracy	1.0000
SS Relaxation Parameter	0.5000
SS Regularization Parameter	-3.0000

Report date: 04/28/2018

Merged File

Quantachrome Corporation
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
version 8.01

Sample ID	CUT-07-3	File Name	S842802H_Merged.PRM
Sample Weight	19.6388 grams	Bulk Sample Volume	13.0230 cc
Sample Description	Ignimbrtita		
Comments			
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm ²	Hg Contact Angle	(I)140.00°, (E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	Moving Point Avg.	11 (Scan Mode)
Operator	Guadalupe		Mercury volume normalized by sample weight.

Standard Report

Data Acquisition Parameters

Density of Mercury 13.5000 [g/cc]
 Temperature 20.00 [°C]

High Pressure

Data File Name S842802H.PRM
 Analysis Date 04/28/2018
 # of repeat cycles 0
 Penetrometer Constant . 1597 [mV/cc]
 Auto-Oil Fill Time 5 [sec]
 Run Mode Fixed Speed
 Motor Speed 20

Low Pressure

Data File Name S8428021.PRM
 Analysis Date 04/28/2018
 # of repeat cycles 0
 Penetrometer Constant . 1613 [mV/cc]
 Evacuation Rate 5
 Fine Evac. Until 2.0000 [min.]
 Coarse Evac. Until 10.0000 [min.]

975 Points Acquired	665 Pts in Intrusion Range	310 Pts in Extrusion Range
972 Points Used	664 Intrusion Pts Used	308 Extrusion Pts Used

Report date: 04/28/2018

Merged File

Quantachrome Corporation
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
version 8.01

Sample ID	CUT-07-3	File Name	S842802H_Merged.PRM
Sample Weight	19.6388 grams	Bulk Sample Volume	13.0230 cc
Sample Description	Ignimbrtita		
Comments			
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm ²	Hg Contact Angle	(I)140.00°, (E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	Moving Point Avg.	11 (Scan Mode)
Operator	Guadalupe		Mercury volume normalized by sample weight.

Standard Report

Intrusion Statistics

Pressure Range : 1.328 PSIA to 32910.184 PSIA
Pore Diameter Range : 160.625488 µm to 0.006482 µm

Pore Diameter Statistics Summary

	Mean	Mode (df/dD)	Median
Volume	4.143E-02 cc/g at a diameter of 4.039E-01 µm	5.393E-02 cc/(µm-g) at a diameter of 1.566E-02 µm	2.691E-02 cc/g at a diameter of 1.286E+00 µm
Surface Area	1.132E-01 m ² /g at a diameter of 4.039E-01 µm	5.938E+00 m ² /(µm-g) at a diameter of 6.482E-03 µm	2.655E-01 m ² /g at a diameter of 1.420E-01 µm
Pore Number Fraction	4.864E-04 at a diameter of 4.039E-01 µm	1.342E+02 at a diameter of 6.482E-03 µm	5.000E-01 at a diameter of 1.062E-02 µm

Mercury Porosimetry Data Summary

Total Intruded Volume	0.0537 cc/g	Bulk (Particle) Density	n/a [g/cc]
Total Surface Area	0.5310 m ² /g	Apparent Density	n/a [g/cc]

Report date: 04/28/2018

Merged File

Quantachrome Corporation
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
version 8.01

Sample ID	CUT-07-3	File Name	S842802H_Merged.PRM
Sample Weight	19.6388 grams	Bulk Sample Volume	13.0230 cc
Sample Description	Ignimbrtita		
Comments			
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm ²	Hg Contact Angle	(I)140.00°, (E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	Moving Point Avg.	11 (Scan Mode)
Operator	Guadalupe	Mercury volume normalized by sample weight.	

Pore Size Distribution By Volume - Intrusion

Printing one out of every 10 data points.

Pressure [PSI]	Pore Diameter [µm]	Volume Intruded [cc/g]	Delta Volume [cc/g]	% Volume Intruded %	Dv(d) [cc/(µm-g)]	-dV/d(log d) [cc/g]
1.328	1.606E+02	0.0001	0.0001	0.19	4.372E-06	1.839E-03
1.862	1.145E+02	0.0004	0.0003	0.80	8.603E-06	2.263E-03
2.184	9.769E+01	0.0006	0.0001	1.08	9.074E-06	2.050E-03
2.716	7.854E+01	0.0008	0.0002	1.40	9.369E-06	1.704E-03
3.282	6.499E+01	0.0009	0.0001	1.64	9.674E-06	1.451E-03
3.789	5.630E+01	0.0010	0.0001	1.82	1.249E-05	1.647E-03
4.554	4.684E+01	0.0011	0.0001	2.09	1.911E-05	2.066E-03
5.082	4.197E+01	0.0012	0.0001	2.28	2.158E-05	2.096E-03
5.626	3.792E+01	0.0013	0.0001	2.46	2.416E-05	2.120E-03
6.227	3.426E+01	0.0014	0.0001	2.65	3.679E-05	2.934E-03
6.907	3.088E+01	0.0016	0.0002	2.96	5.183E-05	3.698E-03
7.736	2.757E+01	0.0018	0.0002	3.27	5.344E-05	3.422E-03
8.953	2.383E+01	0.0020	0.0002	3.72	7.656E-05	4.246E-03
10.469	2.038E+01	0.0023	0.0003	4.36	1.264E-04	5.993E-03
12.026	1.774E+01	0.0027	0.0004	5.09	1.518E-04	6.226E-03
13.644	1.564E+01	0.0031	0.0003	5.74	1.894E-04	6.863E-03
15.277	1.396E+01	0.0034	0.0004	6.40	2.597E-04	8.422E-03
16.881	1.264E+01	0.0039	0.0005	7.25	3.896E-04	1.138E-02
18.485	1.154E+01	0.0044	0.0005	8.11	4.527E-04	1.210E-02
20.438	1.044E+01	0.0049	0.0005	9.07	4.679E-04	1.128E-02
22.339	9.549E+00	0.0053	0.0004	9.89	5.519E-04	1.217E-02
23.809	8.960E+00	0.0057	0.0004	10.54	5.941E-04	1.228E-02
25.264	8.444E+00	0.0060	0.0003	11.10	5.869E-04	1.145E-02
26.954	7.914E+00	0.0064	0.0004	11.82	9.661E-04	1.776E-02
29.258	7.291E+00	0.0072	0.0008	13.34	1.518E-03	2.564E-02
31.954	6.676E+00	0.0082	0.0010	15.26	1.664E-03	2.560E-02
34.357	6.209E+00	0.0089	0.0007	16.56	1.356E-03	1.941E-02
36.651	5.820E+00	0.0094	0.0005	17.47	1.271E-03	1.708E-02
38.873	5.488E+00	0.0099	0.0005	18.38	1.573E-03	1.994E-02
41.677	5.118E+00	0.0105	0.0006	19.49	1.856E-03	2.199E-02
44.643	4.778E+00	0.0113	0.0008	20.94	2.379E-03	2.624E-02
55.839	3.820E+00	0.0127	0.0015	23.67	1.608E-03	1.496E-02
102.475	2.082E+00	0.0186	0.0058	34.55	6.120E-03	3.080E-02
186.655	1.143E+00	0.0286	0.0100	53.24	1.506E-02	3.997E-02
328.310	6.498E-01	0.0375	0.0089	69.77	1.935E-02	2.807E-02
529.873	4.026E-01	0.0414	0.0040	77.13	1.815E-02	1.698E-02
770.572	2.768E-01	0.0445	0.0031	82.85	3.211E-02	2.072E-02
1050.921	2.030E-01	0.0474	0.0028	88.15	4.269E-02	2.001E-02
1368.021	1.559E-01	0.0495	0.0021	92.09	4.892E-02	1.766E-02
1711.693	1.246E-01	0.0511	0.0016	95.10	5.176E-02	1.485E-02
2081.619	1.025E-01	0.0521	0.0010	96.99	3.971E-02	9.335E-03
2474.229	8.622E-02	0.0526	0.0005	97.96	2.849E-02	5.649E-03
2902.634	7.349E-02	0.0529	0.0003	98.53	2.136E-02	3.612E-03

Report date: 04/28/2018

Merged File

Quantachrome Corporation
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
version 8.01

Sample ID	CUT-07-3	File Name	S842802H_Merged.PRM
Sample Weight	19.6388 grams	Bulk Sample Volume	13.0230 cc
Sample Description	Ignimbrtita		
Comments			
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm ²	Hg Contact Angle	(I)140.00°, (E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	Moving Point Avg.	11 (Scan Mode)
Operator	Guadalupe	Mercury volume normalized by sample weight.	

Pore Size Distribution By Volume - Intrusion

Printing one out of every 10 data points.

Pressure [PSI]	Pore Diameter [µm]	Volume Intruded [cc/g]	Delta Volume [cc/g]	% Volume Intruded %	Dv(d) [cc/(µm-g)]	-dV/d(log d) [cc/g]
3391.345	6.290E-02	0.0531	0.0002	98.88	1.523E-02	2.200E-03
3959.645	5.387E-02	0.0532	0.0001	99.08	9.797E-03	1.211E-03
4607.244	4.630E-02	0.0533	0.0001	99.19	5.617E-03	5.961E-04
5329.710	4.003E-02	0.0533	0.0000	99.23	3.351E-03	3.080E-04
6117.268	3.487E-02	0.0533	0.0000	99.26	1.775E-03	1.414E-04
6962.727	3.064E-02	0.0533	0.0000	99.27	5.868E-04	4.072E-05
7867.283	2.712E-02	0.0533	0.0000	99.27	0.000E+00	0.000E+00
8827.980	2.416E-02	0.0533	0.0000	99.27	0.000E+00	0.000E+00
9840.779	2.168E-02	0.0533	0.0000	99.27	0.000E+00	0.000E+00
10899.980	1.957E-02	0.0533	0.0000	99.27	0.000E+00	0.000E+00
12004.702	1.777E-02	0.0533	0.0000	99.27	6.856E-03	2.914E-04
13152.638	1.622E-02	0.0534	0.0000	99.35	4.799E-02	1.808E-03
14344.101	1.487E-02	0.0534	0.0001	99.49	4.760E-02	1.630E-03
15579.226	1.369E-02	0.0535	0.0000	99.57	3.084E-02	9.704E-04
16856.352	1.266E-02	0.0535	0.0000	99.62	2.758E-02	8.081E-04
18172.076	1.174E-02	0.0535	0.0000	99.68	3.601E-02	9.766E-04
19529.256	1.092E-02	0.0536	0.0000	99.73	3.549E-02	8.944E-04
20927.268	1.019E-02	0.0536	0.0000	99.78	2.948E-02	6.933E-04
22367.131	9.537E-03	0.0536	0.0000	99.81	3.744E-02	8.258E-04
23845.680	8.946E-03	0.0536	0.0000	99.86	3.808E-02	7.851E-04
25364.506	8.410E-03	0.0537	0.0000	99.89	3.103E-02	6.019E-04
27072.846	7.880E-03	0.0537	0.0000	99.92	2.595E-02	4.722E-04
29340.352	7.271E-03	0.0537	0.0000	99.95	2.897E-02	4.876E-04
31851.098	6.697E-03	0.0537	0.0000	99.98	3.576E-02	5.518E-04

Report date: 04/28/2018

Merged File

Quantachrome Corporation
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
version 8.01

Sample ID	CUT-07-3	File Name	S842802H_Merged.PRM
Sample Weight	19.6388 grams	Bulk Sample Volume	13.0230 cc
Sample Description	Ignimbrtita		
Comments			
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm ²	Hg Contact Angle	(I)140.00°, (E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	Moving Point Avg.	11 (Scan Mode)
Operator	Guadalupe		Mercury volume normalized by sample weight.

Standard Report

Total Surface Area	0.5310 m ² /g	Apparent Density	n/a [g/cc]
--------------------	--------------------------	------------------	------------

Extrusion Statistics

Pressure Range : 32721.156 PSIA to 20.744 PSIA
Pore Diameter Range : 0.006519 µm to 10.283628 µm

Pore Diameter Statistics Summary

	Mean	Mode (df/dD)	Median
Volume	5.372E-02 cc/g at a diameter of 7.043E-02 µm	6.768E-03 cc/(µm-g) at a diameter of 2.965E-02 µm	5.355E-02 cc/g at a diameter of 1.157E-02 µm
Surface Area	5.310E-01 m ² /g at a diameter of 7.043E-02 µm	2.433E-01 m ² /(µm-g) at a diameter of 2.696E-02 µm	5.215E-01 m ² /g at a diameter of 6.918E-03 µm
Pore Number Fraction	2.304E-04 at a diameter of 7.043E-02 µm	1.867E+02 at a diameter of 2.965E-02 µm	5.167E-01 at a diameter of 2.594E-02 µm

Report date: 04/28/2018

Merged File

Quantachrome Corporation
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
version 8.01

Sample ID	CUT-07-3	File Name	S842802H_Merged.PRM
Sample Weight	19.6388 grams	Bulk Sample Volume	13.0230 cc
Sample Description	Ignimbrtita		
Comments			
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm ²	Hg Contact Angle	(I)140.00°, (E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	Moving Point Avg.	11 (Scan Mode)
Operator	Guadalupe		Mercury volume normalized by sample weight.

Pore Size Distribution By Volume - Extrusion

Printing one out of every 10 data points.

Pressure [PSI]	Pore Diameter [µm]	Volume Extruded [cc/g]	Delta Volume [cc/g]	% Volume Extruded %	Dv(d) [cc/(µm-g)]	-dV/d(log d) [cc/g]
32721.156	6.519E-03	0.0537	0.0000	100.00	4.470E-05	6.550E-07
30605.623	6.970E-03	0.0537	0.0000	100.00	6.997E-06	1.158E-07
28560.199	7.469E-03	0.0537	0.0000	100.00	2.336E-04	3.887E-06
26784.588	7.964E-03	0.0537	0.0000	100.00	1.039E-03	1.906E-05
25162.850	8.478E-03	0.0537	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
23589.654	9.043E-03	0.0537	0.0000	100.00	1.779E-03	3.679E-05
22063.590	9.669E-03	0.0537	0.0000	100.00	3.211E-04	7.344E-06
20581.412	1.036E-02	0.0537	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
19144.645	1.114E-02	0.0537	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
17752.342	1.202E-02	0.0537	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
16403.982	1.300E-02	0.0537	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
15097.543	1.413E-02	0.0537	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
13832.121	1.542E-02	0.0537	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
12609.743	1.692E-02	0.0537	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
11425.874	1.867E-02	0.0537	0.0000	100.00	1.874E-04	7.655E-06
10281.090	2.075E-02	0.0537	0.0000	99.99	3.994E-03	1.868E-04
9179.577	2.324E-02	0.0537	0.0000	99.97	5.428E-03	2.883E-04
8119.500	2.627E-02	0.0537	0.0000	99.93	6.300E-03	3.766E-04
7094.644	3.007E-02	0.0537	0.0000	99.89	6.750E-03	4.623E-04
6108.672	3.492E-02	0.0536	0.0000	99.83	4.584E-03	3.694E-04
5166.835	4.129E-02	0.0536	0.0000	99.80	2.143E-03	2.021E-04
4272.740	4.993E-02	0.0536	0.0000	99.78	4.754E-04	5.762E-05
3436.665	6.207E-02	0.0536	0.0000	99.78	0.000E+00	0.000E+00
2665.740	8.002E-02	0.0536	0.0000	99.78	0.000E+00	0.000E+00
1966.903	1.085E-01	0.0536	0.0000	99.78	0.000E+00	0.000E+00
1349.242	1.581E-01	0.0536	0.0000	99.78	1.579E-04	4.837E-05
830.253	2.569E-01	0.0536	0.0000	99.71	4.431E-04	2.435E-04
434.503	4.910E-01	0.0535	0.0001	99.57	2.203E-04	2.353E-04
192.302	1.109E+00	0.0534	0.0001	99.44	6.225E-05	1.563E-04
83.805	2.545E+00	0.0534	0.0000	99.38	6.381E-06	4.186E-05
36.049	5.918E+00	0.0534	0.0000	99.38	3.675E-08	7.144E-07

Report date: 05/14/2018

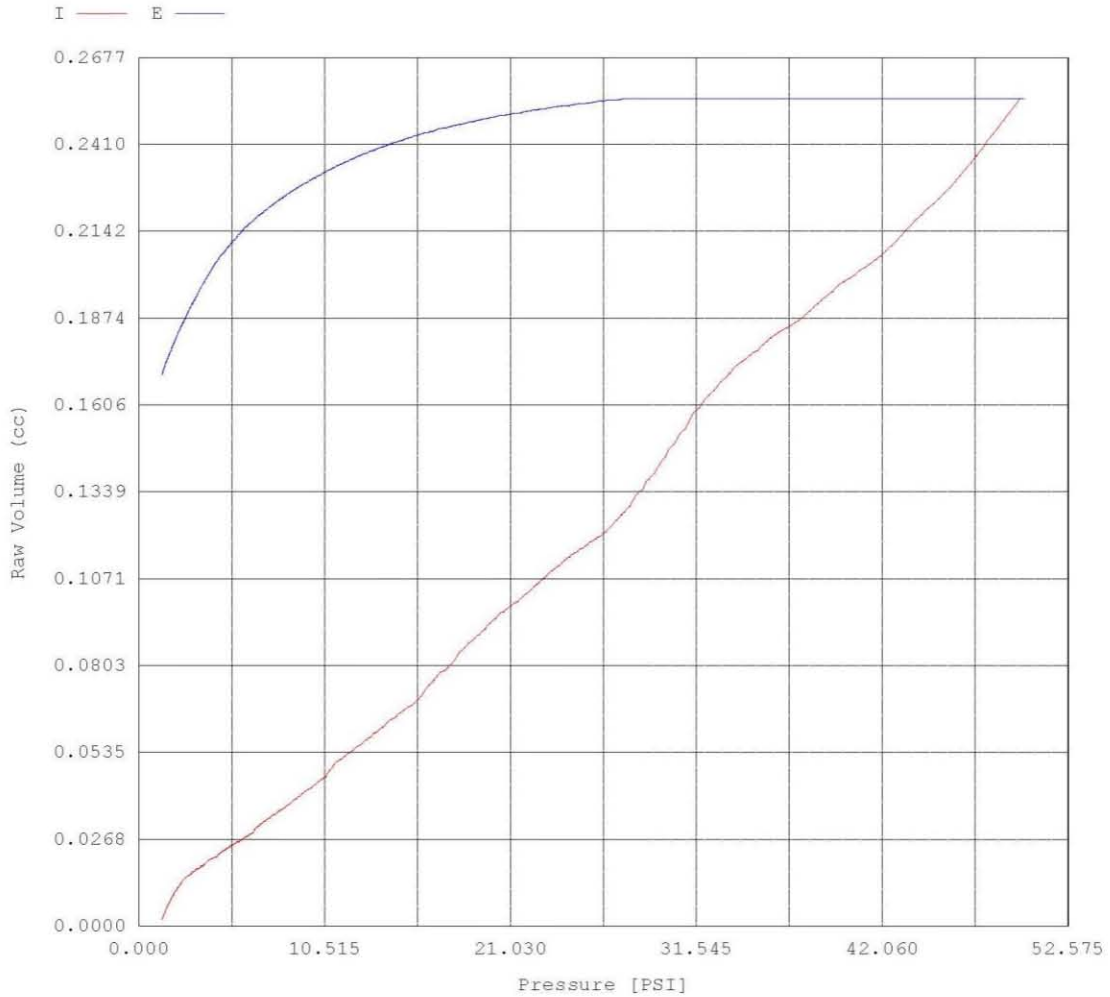
Analysis date: 04/28/2018

Quantachrome Corporation
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
version 8.01

Sample ID CUT-07-3
Sample Weight 19.6388 grams
Sample Description Ignimbritita
Comments
Hg Surface Tension 480.00 erg/cm²
Minimum Delta Vol. 0.000 % FS
Operator Guadalupe

File Name S8428021.PRM
Bulk Sample Volume 13.0230 cc
Hg Contact Angle (I)140.00°, (E)140.00°
Moving Point Avg. 11 (Scan Mode)
Mercury volume normalized by sample weight.

Raw Volume vs. Pressure



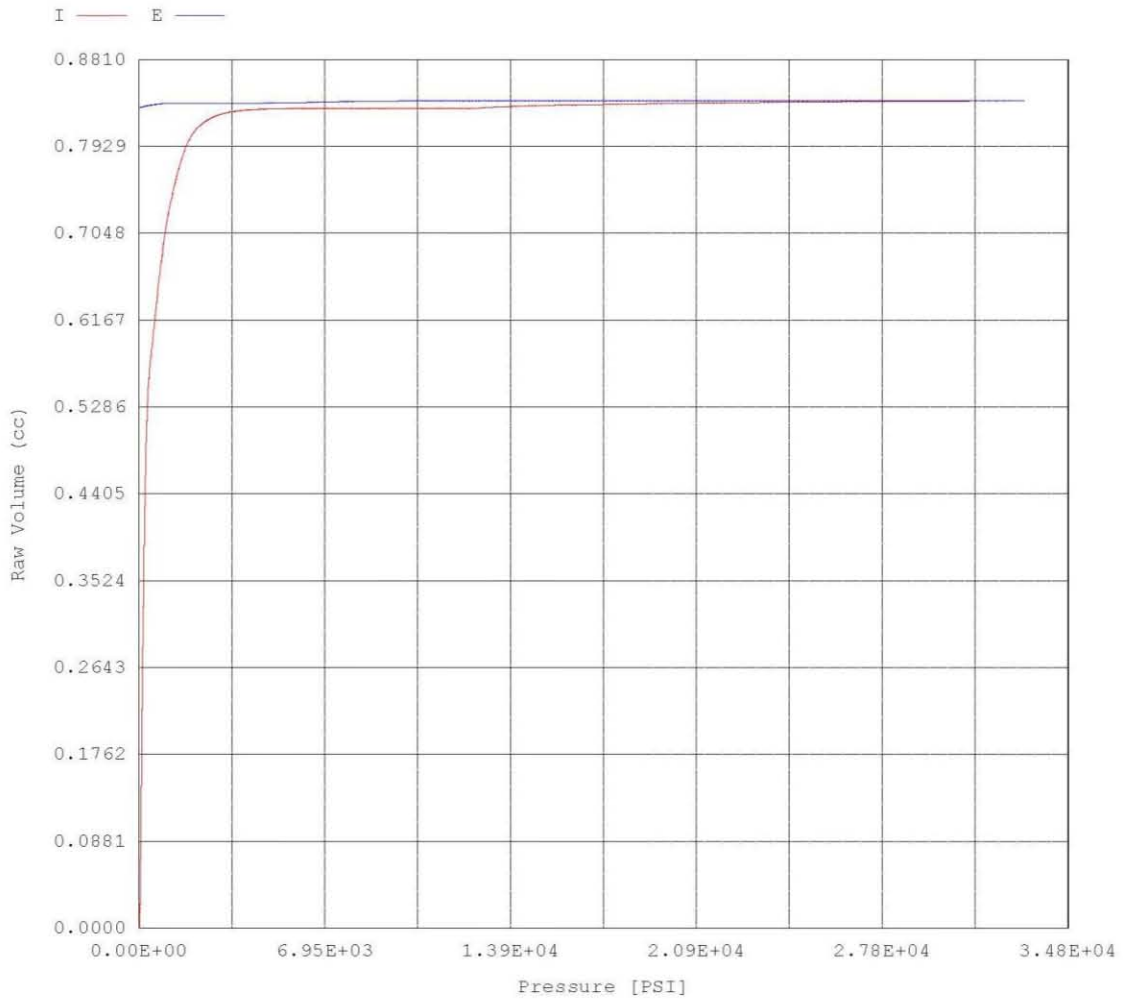
Report date: 05/14/2018

Analysis date: 04/28/2018

Quantachrome Corporation
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
version 8.01

Sample ID	CUT-07-3	File Name	S842802H.PRM
Sample Weight	19.6388 grams	Bulk Sample Volume	13.0230 cc
Sample Description	Ignimbrtita		
Comments			
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm ²	Hg Contact Angle	(I)140.00°, (E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	Moving Point Avg.	11 (Scan Mode)
Operator	Guadalupe		Mercury volume normalized by sample weight.

Raw Volume vs. Pressure



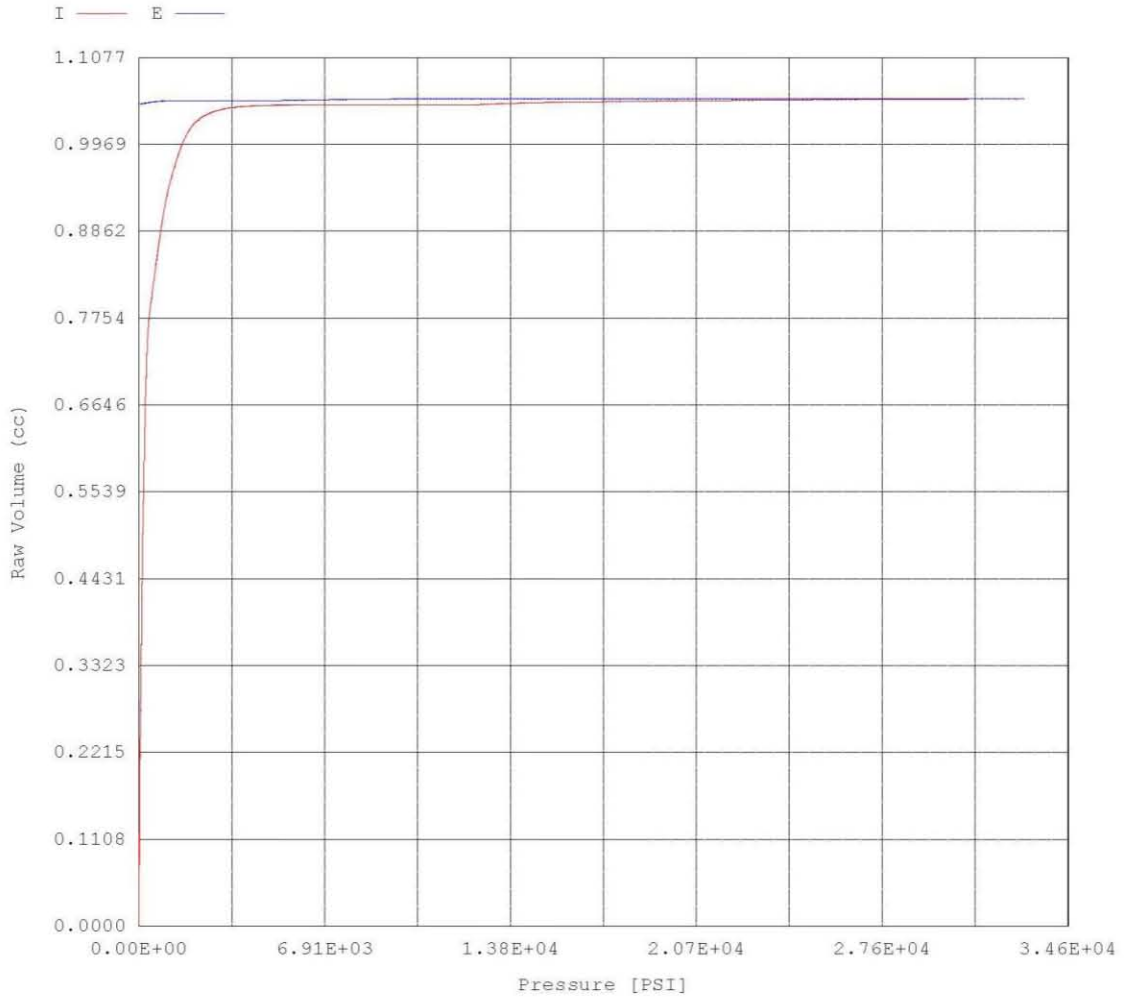
Report date: 05/14/2018

Merged File

Quantachrome Corporation
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
version 8.01

Sample ID	CUT-07-3	File Name	S842802H_Merged.PRM
Sample Weight	19.6388 grams	Bulk Sample Volume	13.0230 cc
Sample Description	Ignimbritita		
Comments			
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm ²	Hg Contact Angle	(I)140.00°, (E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	Moving Point Avg.	11 (Scan Mode)
Operator	Guadalupe		Mercury volume normalized by sample weight.

Raw Volume vs. Pressure



Anexo 6: Tablas y Gráficas de Capilaridad

Cut-07-a		
dimensiones		
a=	0.05735	m
b=	0.05822	m
Superficie=	0.00333892	m ²

Tiempo (min)	Tiempo (s)	raíz t (s ^{1/2})	masa (g)	masa _{abs} /S (g/m ²)	masa abs /S (kg/m ²)	Coefficiente de capilaridad
0	0	0.000	285.910	0.000	0.000	Cc 1
3	180	13.416	290.480	1368.707	1.369	5.342
5	300	17.321	291.350	1629.271	1.629	
8	480	21.909	292.090	1850.900	1.851	
12	720	26.833	292.760	2051.563	2.052	Cc 2
16	960	30.984	293.290	2210.298	2.210	1.656
20	1200	34.641	293.730	2342.077	2.342	
25	1500	38.730	294.270	2503.806	2.504	
30	1800	42.426	294.570	2593.655	2.594	
35	2100	45.826	294.810	2665.535	2.666	
40	2400	48.990	295.070	2743.405	2.743	
50	3000	54.772	295.460	2860.209	2.860	
60	3600	60.000	295.840	2974.018	2.974	
90	5400	73.485	296.870	3282.501	3.283	
120	7200	84.853	296.730	3240.572	3.241	
180	10800	103.923	299.090	3947.388	3.947	
240	14400	120.000	300.400	4339.731	4.340	
480	28800	169.706	303.980	5411.934	5.412	
1440	86400	293.939	314.440	8544.687	8.545	
2880	172800	415.692	324.190	11464.795	11.465	
4320	259200	509.117	331.050	13519.354	13.519	
5760	345600	587.878	335.320	14798.212	14.798	
7200	432000	657.267	338.510	15753.611	15.754	
8640	518400	720.000	341.190	16556.267	16.556	
10080	604800	777.689	340.560	16367.583	16.368	

Cut-07-b		
dimensiones		
a=	0.06209	m
b=	0.06079	m
Superficie=	0.00377445	m ²

tiempo (min)	tiempo (s)	raiz t (s ^{1/2})	masa (g)	masa _{abs} /S (g/m ²)	masa abs /S (kg/m ²)	Coefficiente de capilaridad
0	0	0	293.01		0	Cc 1
3	180	13.416	298.7	1507.50397	1.507503965	6.900
5	300	17.321	299.82	1804.23585	1.804235853	
8	480	21.909	300.72	2042.68112	2.04268112	Cc 2
12	720	26.833	301.75	2315.56848	2.315568481	2.443
16	960	30.984	302.46	2503.6753	2.503675303	
20	1200	34.641	303.02	2652.04125	2.652041246	
25	1500	38.730	303.53	2787.16023	2.787160231	
30	1800	42.426	303.9	2885.18773	2.88518773	
35	2100	45.826	304.27	2983.21523	2.983215228	
40	2400	48.990	304.64	3081.24273	3.081242727	
50	3000	54.772	305.15	3216.36171	3.216361712	
60	3600	60	305.77	3380.62401	3.380624006	
90	5400	73.485	307.05	3719.74616	3.719746164	
120	7200	84.853	308.17	4016.47805	4.016478052	
180	10800	103.923	310.01	4503.96615	4.503966153	
240	14400	120	311.79	4975.5579	4.975557903	
480	28800	169.706	316.12	6122.74458	6.122744576	
1440	86400	293.939	328.6	9429.18561	9.429185611	
2880	172800	415.692	339.78	12391.2057	12.3912057	
4320	259200	509.117	346.42	14150.4019	14.1504019	
5760	345600	587.878	349.31	14916.0761	14.91607614	
7200	432000	657.267	350.31	15181.0153	15.18101533	
8640	518400	720	351.28	15438.0063	15.43800634	
10080	604800	777.689	350.17	15143.9238	15.14392384	

Cut07-f		
dimensiones		
a=	0.06135	m
b=	0.05847	m
Superficie=	0.00358713	m ²

tiempo (min)	tiempo (s)	raiz t (s ^{1/2})	masa (g)	masa _{abs} /S (g/m ²)	masa abs /S (kg/m ²)	Coefficiente de capilaridad
0	0	0	342.14		0	Cc
3	180	13.4164079	347.3	1438.47408	1.43847408	6.170
5	300	17.3205081	348.27	1708.88491	1.708884905	
8	480	21.9089023	348.85	1870.57385	1.870573852	Cc
12	720	26.8328157	349.55	2065.71568	2.065715685	2.178
16	960	30.9838668	350.25	2260.85752	2.260857517	
20	1200	34.6410162	350.72	2391.88132	2.391881319	
25	1500	38.7298335	351.32	2559.14575	2.559145747	
30	1800	42.4264069	351.6	2637.20248	2.63720248	
35	2100	45.8257569	351.96	2737.56114	2.737561137	
40	2400	48.9897949	352.09	2773.80176	2.773801763	
50	3000	54.7722558	352.68	2938.27845	2.93827845	
60	3600	60	353.12	3060.93903	3.060939031	
90	5400	73.4846923	354.2	3362.015	3.362015001	
120	7200	84.8528137	355.2	3640.78905	3.640789048	
180	10800	103.923048	356.71	4061.73786	4.061737858	
240	14400	120	358.19	4474.32345	4.474323447	
480	28800	169.705627	361.64	5436.09391	5.436093907	
1440	86400	293.938769	372.65	8505.39616	8.50539616	
2880	172800	415.692194	382.64	11290.3489	11.29034888	
4320	259200	509.116882	388.26	12857.059	12.85705903	
5760	345600	587.877538	393.19	14231.4151	14.23141508	
7200	432000	657.267069	394.76	14669.0903	14.66909033	
8640	518400	720	400.04	16141.0173	16.14101729	
10080	604800	777.688884	398.23	15636.4363	15.63643627	

Cut-07-i		
dimensiones		
a=	0.05857	m
b=	0.0583	m
Superficie=	0.00341463	m ²

tiempo (min)	tiempo (s)	raiz t (s ^{1/2})	masa (g)	masa _{abs} /S (g/m ²)	masa abs /S (kg/m ²)	Coefficiente de capilaridad
0	0	0	294.88	0	0	Cc
3	180	13.4164079	298.96	1194.85824	1.19485824	5.913
5	300	17.3205081	299.68	1405.71558	1.40571558	
8	480	21.9089023	300.25	1572.64431	1.57264431	Cc
12	720	26.8328157	300.79	1730.78731	1.73078731	2.265
16	960	30.9838668	301.2	1850.85885	1.85085885	
20	1200	34.6410162	301.62	1973.85896	1.97385896	
25	1500	38.7298335	302.03	2093.9305	2.0939305	
30	1800	42.4264069	302.27	2164.21628	2.16421628	
35	2100	45.8257569	302.45	2216.93061	2.21693061	
40	2400	48.9897949	302.67	2281.35924	2.28135924	
50	3000	54.7722558	303.02	2383.85934	2.38385934	
60	3600	60	303.35	2480.50229	2.48050229	
90	5400	73.4846923	304.23	2738.21681	2.73821681	
120	7200	84.8528137	304.94	2946.14557	2.94614557	
180	10800	103.923048	306.22	3321.00306	3.32100306	
240	14400	120	307.4	3666.57481	3.66657481	
480	28800	169.705627	310.33	4524.64703	4.52464703	
1440	86400	293.938769	320.13	7394.64967	7.39464967	
2880	172800	415.692194	329.45	10124.0808	10.1240808	
4320	259200	509.116882	337.2	12393.7257	12.3937257	
5760	345600	587.877538	344.43	14511.0848	14.5110848	
7200	432000	657.267069	346.97	15254.9426	15.2549426	
8640	518400	720	350.95	16420.5151	16.4205151	
10080	604800	777.688884	351.34	16534.7295	16.5347295	

Cut-07-j		
dimensiones		
a=	0.05893	m
b=	0.06105	m
Superficie=	0.00359768	m ²

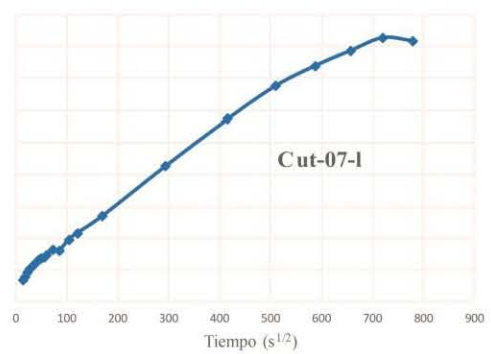
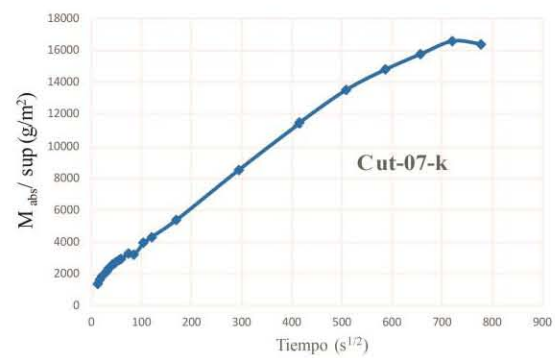
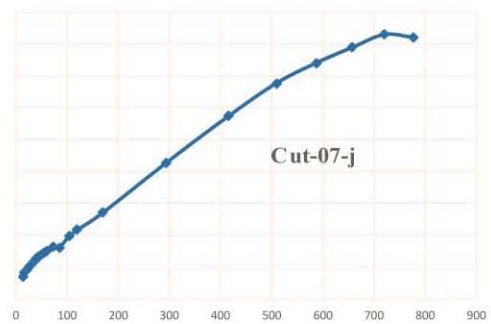
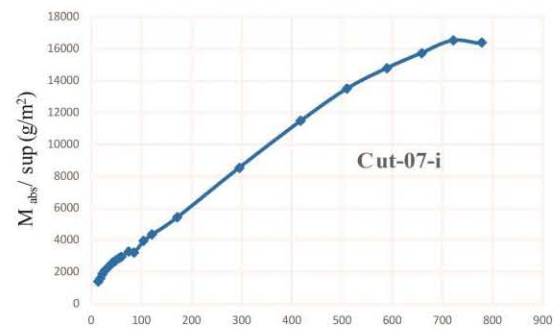
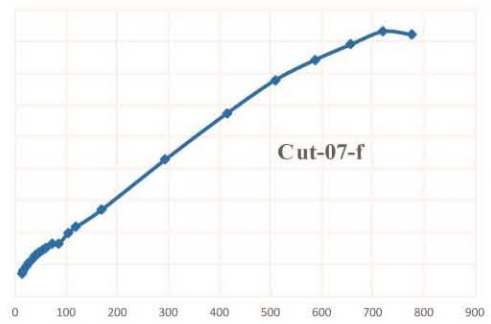
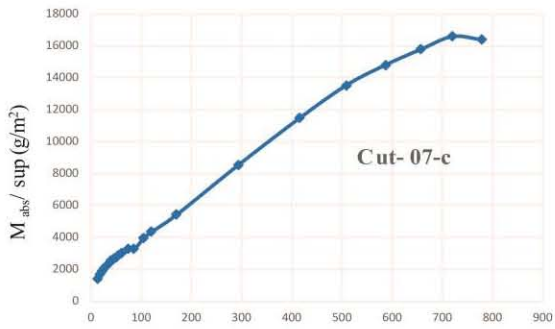
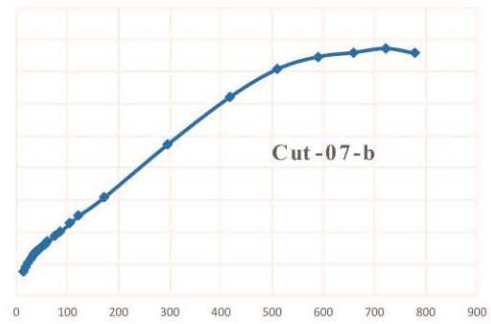
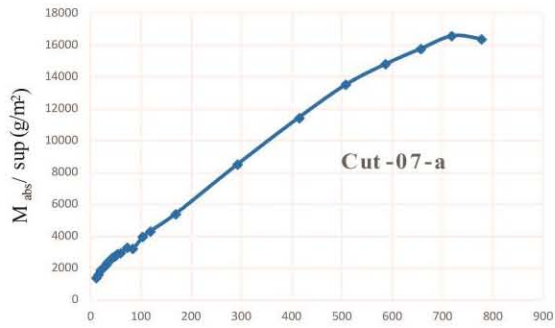
tiempo (min)	tiempo (s)	raiz t (s ^{1/2})	masa (g)	masa _{abs} /S (g/m ²)	masa abs /S (kg/m ²)	Coeficiente de capilaridad
0	0	0	342.64	0	0	Cc
3	180	13.4164079	347.82	1439.81817	1.43981817	6.126
5	300	17.3205081	348.63	1664.96348	1.66496348	
8	480	21.9089023	349.4	1878.99051	1.87899051	Cc
12	720	26.8328157	350.13	2081.89925	2.08189925	2.661
16	960	30.9838668	350.67	2231.99612	2.23199612	
20	1200	34.6410162	351.22	2384.87257	2.38487257	
25	1500	38.7298335	351.74	2529.4103	2.5294103	
30	1800	42.4264069	352.1	2629.47488	2.62947488	
35	2100	45.8257569	352.9	2851.84063	2.85184063	
40	2400	48.9897949	352.67	2787.91047	2.78791047	
50	3000	54.7722558	353.18	2929.66863	2.92966863	
60	3600	60	353.6	3046.41065	3.04641065	
90	5400	73.4846923	354.88	3402.19583	3.40219583	
120	7200	84.8528137	355.85	3671.81429	3.67181429	
180	10800	103.923048	357.48	4124.88449	4.12488449	
240	14400	120	359.1	4575.17512	4.57517512	
480	28800	169.705627	363.34	5753.71354	5.75371354	
1440	86400	293.938769	376.86	9511.69456	9.51169456	
2880	172800	415.692194	388.02	12613.6966	12.6136966	
4320	259200	509.116882	396.01	14834.5745	14.8345745	
5760	345600	587.877538	403.77	16991.5222	16.9915222	
7200	432000	657.267069	405.39	17441.8128	17.4418128	
8640	518400	720	408.29	18247.8886	18.2478886	
10080	604800	777.688884	407.88	18133.9262	18.1339262	

Cut-07-k		
dimensiones		
a=	0.06034	m
b=	0.06089	m
Superficie=	0.0036741	m ²

tiempo (min)	tiempo (s)	raiz t (s ^{1/2})	masa (g)	masa _{abs} /S (g/m ²)	masa abs /S (kg/m ²)	Coefficiente de capilaridad
0	0	0	334.45		0	Cc 1
3	180	13.4164079	339.32	1325.49374	1.32549374	5.533
5	300	17.3205081	340.06	1526.90347	1.52690347	
8	480	21.9089023	340.76	1717.42618	1.71742618	Cc 2
12	720	26.8328157	341.36	1880.73137	1.88073137	2.321
16	960	30.9838668	341.92	2033.14954	2.03314954	
20	1200	34.6410162	342.41	2166.51544	2.16651544	
25	1500	38.7298335	342.87	2291.71608	2.29171608	
30	1800	42.4264069	343.13	2362.48166	2.36248166	
35	2100	45.8257569	343.37	2427.80373	2.42780373	
40	2400	48.9897949	343.69	2514.89983	2.51489983	
50	3000	54.7722558	344.1	2626.4917	2.6264917	
60	3600	60	344.48	2729.91832	2.72991832	
90	5400	73.4846923	345.57	3026.5894	3.0265894	
120	7200	84.8528137	346.53	3287.8777	3.2878777	
180	10800	103.923048	347.93	3668.92313	3.66892313	
240	14400	120	349.36	4058.13381	4.05813381	
480	28800	169.705627	353.23	5111.45225	5.11145225	
1440	86400	293.938769	364	8042.7803	8.0427803	
2880	172800	415.692194	375.35	11131.97	11.13197	
4320	259200	509.116882	382.14	12980.0404	12.9800404	
5760	345600	587.877538	391.13	15426.8964	15.4268964	
7200	432000	657.267069	390.92	15369.7395	15.3697395	
8640	518400	720	396.57	16907.53	16.90753	
10080	604800	777.688884	396.54	16899.3648	16.8993648	

Cut-07-I		
dimensiones		
a=	0.05788	m
b=	0.05792	m
Superficie=	0.00335241	m ²

tiempo (min)	tiempo (s)	raiz t (s ^{1/2})	masa (g)	masa _{abs} /S (g/m ²)	masa abs /S (kg/m ²)	Coefficiente de capilaridad
0	0	0	297.72		0	Cc 1
3	180	13.4164079	302.64	1467.6011	1.4676011	6.100
5	300	17.3205081	303.43	1703.25249	1.70325249	
8	480	21.9089023	304.09	1900.12581	1.90012581	Cc 2
12	720	26.8328157	304.72	2088.05034	2.08805034	2.368
16	960	30.9838668	305.24	2243.16265	2.24316265	
20	1200	34.6410162	305.73	2389.32617	2.38932617	
25	1500	38.7298335	306.21	2532.50677	2.53250677	
30	1800	42.4264069	306.49	2616.02878	2.61602878	
35	2100	45.8257569	306.76	2696.56787	2.69656787	
40	2400	48.9897949	307.07	2789.03867	2.78903867	
50	3000	54.7722558	307.46	2905.3729	2.9053729	
60	3600	60	307.99	3063.46814	3.06346814	
90	5400	73.4846923	308.93	3343.86347	3.34386347	
120	7200	84.8528137	309.72	3579.51487	3.57951487	
180	10800	103.923048	311.19	4018.00544	4.01800544	
240	14400	120	312.58	4432.63258	4.43263258	
480	28800	169.705627	316.12	5488.58946	5.48858946	
1440	86400	293.938769	326.79	8671.37476	8.67137476	
2880	172800	415.692194	336.69	11624.4745	11.6244745	
4320	259200	509.116882	342.93	13485.8223	13.4858223	
5760	345600	587.877538	349.82	15541.0604	15.5410604	
7200	432000	657.267069	349.62	15481.4018	15.4814018	
8640	518400	720	353.5	16638.7783	16.6387783	
10080	604800	777.688884	352.97	16480.683	16.480683	



Anexo 7: Tabla y Gráficas de Evaporación

Cut-07-d	
masa seca =	340.38 g

tiempo (min)	tiempo (s)	raíz t (s ^{1/2})	masa (g)	evaporación relativa	
0	0	0	413.11	0	0
3	180	13.4164079	412.27	-1.15495669	1.15495669
5	300	17.3205081	412.13	-1.34744947	1.34744947
8	480	21.9089023	411.93	-1.62243916	1.62243916
12	720	26.8328157	411.58	-2.10367111	2.10367111
16	960	30.9838668	411.54	-2.15866905	2.15866905
20	1200	34.6410162	411.29	-2.50240616	2.50240616
25	1500	38.7298335	411.23	-2.58490307	2.58490307
30	1800	42.4264069	411.13	-2.72239791	2.72239791
35	2100	45.8257569	411.01	-2.88739172	2.88739172
40	2400	48.9897949	410.93	-2.9973876	2.9973876
50	3000	54.7722558	410.78	-3.20362986	3.20362986
60	3600	60	410.59	-3.46487007	3.46487007
90	5400	73.4846923	410.18	-4.02859893	4.02859893
120	7200	84.8528137	409.7	-4.68857418	4.68857418
180	10800	103.923048	408.62	-6.17351849	6.17351849
240	14400	120	407.41	-7.8372061	7.8372061
480	28800	169.705627	401.86	-15.4681699	15.4681699
1440	86400	293.938769	389	-33.1500069	33.1500069
1920	115200	339.411255	377.87	-48.453183	48.453183
2880	172800	415.692194	369.27	-60.2777396	60.2777396
4320	259200	509.116882	361.09	-71.5248178	71.5248178
5760	345600	587.877538	356.59	-77.7120858	77.7120858
7200	432000	657.267069	352.15	-83.8168569	83.8168569
8640	518400	720	350.94	-85.4805445	85.4805445

Cut-07-e	
masa seca =	290.46 g

tiempo (min)	tiempo (s)	raíz t (s^{1/2})	masa (g)	evaporación relativa	
0	0	0	351.18	0	0
3	180	13.4164079	349.74	-2.3715415	2.3715415
5	300	17.3205081	349.67	-2.48682477	2.48682477
8	480	21.9089023	349.44	-2.86561265	2.86561265
12	720	26.8328157	349.23	-3.21146245	3.21146245
16	960	30.9838668	349.11	-3.40909091	3.40909091
20	1200	34.6410162	348.99	-3.60671937	3.60671937
25	1500	38.7298335	348.88	-3.78787879	3.78787879
30	1800	42.4264069	348.8	-3.91963109	3.91963109
35	2100	45.8257569	348.67	-4.13372859	4.13372859
40	2400	48.9897949	348.57	-4.29841897	4.29841897
50	3000	54.7722558	348.42	-4.54545455	4.54545455
60	3600	60	348.27	-4.79249012	4.79249012
90	5400	73.4846923	347.88	-5.43478261	5.43478261
120	7200	84.8528137	347.46	-6.12648221	6.12648221
180	10800	103.923048	346.56	-7.60869565	7.60869565
240	14400	120	345.59	-9.20619236	9.20619236
480	28800	169.705627	341.11	-16.5843215	16.5843215
1440	86400	293.938769	329.3	-36.0342556	36.0342556
1920	115200	339.411255	320.7	-50.1976285	50.1976285
2880	172800	415.692194	314.16	-60.9683794	60.9683794
4320	259200	509.116882	308	-71.113307	71.113307
5760	345600	587.877538	304.24	-77.3056653	77.3056653
7200	432000	657.267069	300.4	-83.629776	83.629776
8640	518400	720	299.36	-85.342556	85.342556

Cut-07-g		
masa seca =	293.07	g

tiempo (min)	tiempo (s)	raíz t (s^{1/2})	masa (g)	evaporación relativa	
0	0	0	355.07	0	0
3	180	13.4164079	354.22	-1.37096774	1.37096774
5	300	17.3205081	354.07	-1.61290323	1.61290323
8	480	21.9089023	353.93	-1.83870968	1.83870968
12	720	26.8328157	353.84	-1.98387097	1.98387097
16	960	30.9838668	353.65	-2.29032258	2.29032258
20	1200	34.6410162	353.57	-2.41935484	2.41935484
25	1500	38.7298335	353.47	-2.58064516	2.58064516
30	1800	42.4264069	353.38	-2.72580645	2.72580645
35	2100	45.8257569	353.29	-2.87096774	2.87096774
40	2400	48.9897949	353.21	-3	3
50	3000	54.7722558	353.08	-3.20967742	3.20967742
60	3600	60	352.93	-3.4516129	3.4516129
90	5400	73.4846923	352.54	-4.08064516	4.08064516
120	7200	84.8528137	352.06	-4.85483871	4.85483871
180	10800	103.923048	351.05	-6.48387097	6.48387097
240	14400	120	349.91	-8.32258065	8.32258065
480	28800	169.705627	344.94	-16.3387097	16.3387097
1440	86400	293.938769	334.52	-33.1451613	33.1451613
1920	115200	339.411255	325.03	-48.4516129	48.4516129
2880	172800	415.692194	317.89	-59.9677419	59.9677419
4320	259200	509.116882	311.17	-70.8064516	70.8064516
5760	345600	587.877538	307.69	-76.4193548	76.4193548
7200	432000	657.267069	304	-82.3709677	82.3709677
8640	518400	720	303.01	-83.9677419	83.9677419

Cut-07-h	
masa seca =	346.94 g

tiempo (min)	tiempo (s)	raíz t (s^{1/2})	masa (g)	evaporación relativa	
0	0	0		0	0
3	180	13.4164079		0	0
5	300	17.3205081		0	0
8	480	21.9089023		0	0
12	720	26.8328157		0	0
16	960	30.9838668		0	0
20	1200	34.6410162		0	0
25	1500	38.7298335		0	0
30	1800	42.4264069	420.84	0	0
35	2100	45.8257569	420.69	-0.202977	0.202977
40	2400	48.9897949	420.56	-0.37889039	0.37889039
50	3000	54.7722558	420.37	-0.63599459	0.63599459
60	3600	60	420.23	-0.82543978	0.82543978
90	5400	73.4846923	419.72	-1.51556157	1.51556157
120	7200	84.8528137	419.18	-2.24627876	2.24627876
180	10800	103.923048	418.05	-3.77537212	3.77537212
240	14400	120	416.81	-5.45331529	5.45331529
480	28800	169.705627	411.2	-13.0446549	13.0446549
1440	86400	293.938769	396.46	-32.9905277	32.9905277
1920	115200	339.411255	385	-48.4979702	48.4979702
2880	172800	415.692194	376.4	-60.135318	60.135318
4320	259200	509.116882	368.82	-70.3924222	70.3924222
5760	345600	587.877538	364.45	-76.3058187	76.3058187
7200	432000	657.267069	359.94	-82.4086604	82.4086604
8640	518400	720	358.74	-84.0324763	84.0324763

Cut-07-m	
masa seca =	338.25 g

tiempo (min)	tiempo (s)	raíz t (s^{1/2})	masa (g)	evaporación relativa	
0	0	0	409.85	0	0
3	180	13.4164079	408.84	-1.41061453	1.41061453
5	300	17.3205081	408.63	-1.70391061	1.70391061
8	480	21.9089023	408.26	-2.22067039	2.22067039
12	720	26.8328157	408.12	-2.41620112	2.41620112
16	960	30.9838668	407.95	-2.65363128	2.65363128
20	1200	34.6410162	407.85	-2.79329609	2.79329609
25	1500	38.7298335	407.71	-2.98882682	2.98882682
30	1800	42.4264069	407.6	-3.1424581	3.1424581
35	2100	45.8257569	407.48	-3.31005587	3.31005587
40	2400	48.9897949	407.4	-3.42178771	3.42178771
50	3000	54.7722558	407.23	-3.65921788	3.65921788
60	3600	60	407.06	-3.89664804	3.89664804
90	5400	73.4846923	406.57	-4.58100559	4.58100559
120	7200	84.8528137	405.99	-5.39106145	5.39106145
180	10800	103.923048	404.81	-7.03910615	7.03910615
240	14400	120	403.45	-8.93854749	8.93854749
480	28800	169.705627	397.07	-17.849162	17.849162
1440	86400	293.938769	384.01	-36.0893855	36.0893855
1920	115200	339.411255	374.31	-49.6368715	49.6368715
2880	172800	415.692194	365.96	-61.2988827	61.2988827
4320	259200	509.116882	358.45	-71.7877095	71.7877095
5760	345600	587.877538	354.19	-77.7374302	77.7374302
7200	432000	657.267069	350.07	-83.4916201	83.4916201
8640	518400	720	348.83	-85.2234637	85.2234637

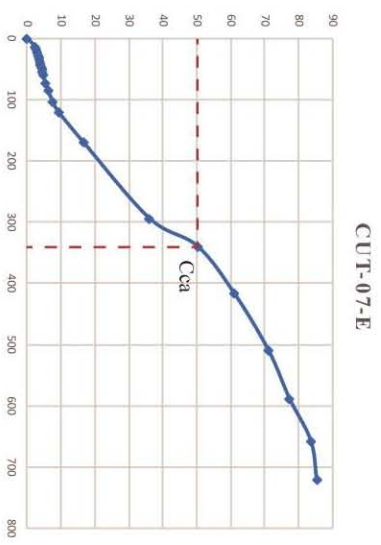
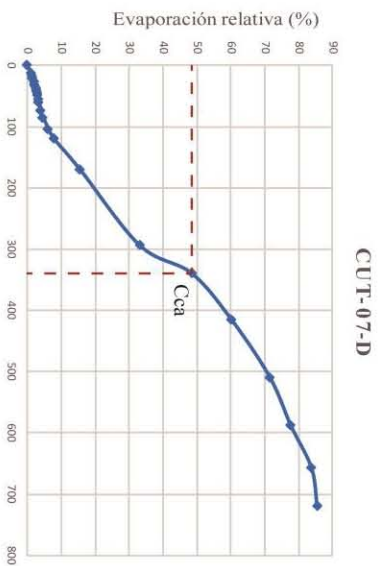
Cut-07-n	
masa seca =	293.2 g

tiempo (min)	tiempo (s)	raíz t (s^{1/2})	masa (g)	evaporación relativa	
0	0	0	354.69	0	0
3	180	13.4164079	353.93	-1.23597333	1.23597333
5	300	17.3205081	353.69	-1.6262807	1.6262807
8	480	21.9089023	353.49	-1.95153684	1.95153684
12	720	26.8328157	353.36	-2.16295333	2.16295333
16	960	30.9838668	353.17	-2.47194666	2.47194666
20	1200	34.6410162	353.06	-2.65083753	2.65083753
25	1500	38.7298335	352.96	-2.8134656	2.8134656
30	1800	42.4264069	352.85	-2.99235648	2.99235648
35	2100	45.8257569	352.73	-3.18751016	3.18751016
40	2400	48.9897949	352.65	-3.31761262	3.31761262
50	3000	54.7722558	352.48	-3.59408034	3.59408034
60	3600	60	352.32	-3.85428525	3.85428525
90	5400	73.4846923	351.82	-4.6674256	4.6674256
120	7200	84.8528137	351.35	-5.43177752	5.43177752
180	10800	103.923048	350.35	-7.05805822	7.05805822
240	14400	120	349.17	-8.97706944	8.97706944
480	28800	169.705627	344.12	-17.189787	17.189787
1440	86400	293.938769	331.6	-37.5508213	37.5508213
1920	115200	339.411255	321.43	-54.090096	54.090096
2880	172800	415.692194	314.66	-65.1000163	65.1000163
4320	259200	509.116882	309.61	-73.3127338	73.3127338
5760	345600	587.877538	306.27	-78.7445113	78.7445113
7200	432000	657.267069	302.86	-84.2901285	84.2901285
8640	518400	720	301.98	-85.7212555	85.7212555

Cut-07-ñ	
masa seca =	321.53

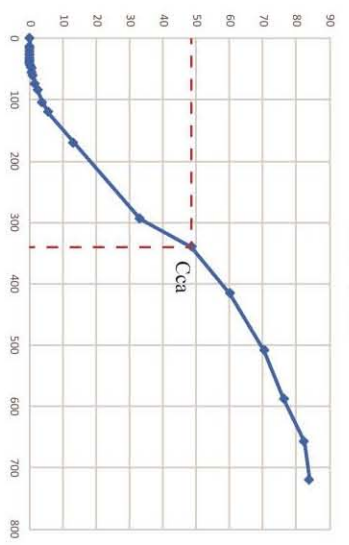
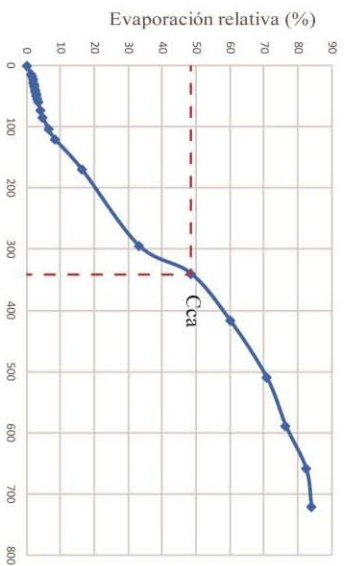
g

tiempo (min)	tiempo (s)	raíz t (s^{1/2})	masa (g)	evaporación relativa	
0	0	0	389.27	0	0
3	180	13.4164079	388.72	-0.81192796	0.81192796
5	300	17.3205081	388.25	-1.50575731	1.50575731
8	480	21.9089023	388.02	-1.84529082	1.84529082
12	720	26.8328157	387.93	-1.97815176	1.97815176
16	960	30.9838668	387.75	-2.24387363	2.24387363
20	1200	34.6410162	387.63	-2.42102155	2.42102155
25	1500	38.7298335	387.55	-2.53912017	2.53912017
30	1800	42.4264069	387.4	-2.76055506	2.76055506
35	2100	45.8257569	387.26	-2.96722764	2.96722764
40	2400	48.9897949	387.21	-3.04103927	3.04103927
50	3000	54.7722558	387.01	-3.3362858	3.3362858
60	3600	60	386.84	-3.58724535	3.58724535
90	5400	73.4846923	386.34	-4.32536168	4.32536168
120	7200	84.8528137	385.76	-5.18157662	5.18157662
180	10800	103.923048	384.54	-6.98258045	6.98258045
240	14400	120	383.16	-9.01978152	9.01978152
480	28800	169.705627	376.66	-18.6152938	18.6152938
1440	86400	293.938769	361.32	-41.2607027	41.2607027
1920	115200	339.411255	351.25	-56.1263655	56.1263655
2880	172800	415.692194	344.55	-66.0171243	66.0171243
4320	259200	509.116882	338.96	-74.2692648	74.2692648
5760	345600	587.877538	335.52	-79.3475052	79.3475052
7200	432000	657.267069	331.87	-84.7357544	84.7357544
8640	518400	720	330.9	-86.1677	86.1677



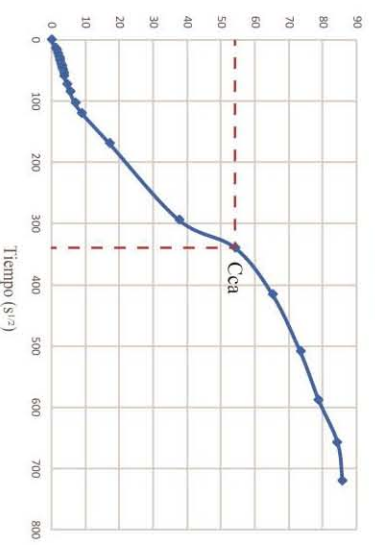
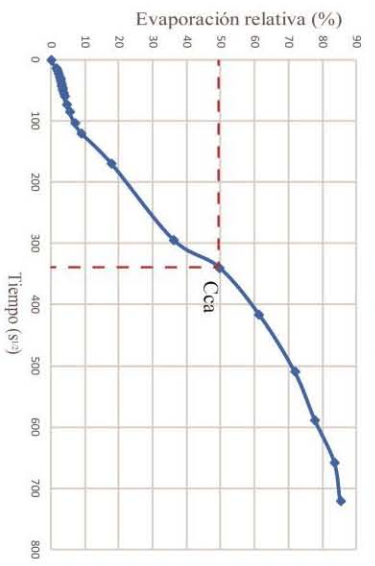
CUT-07-G

CUT-07-H

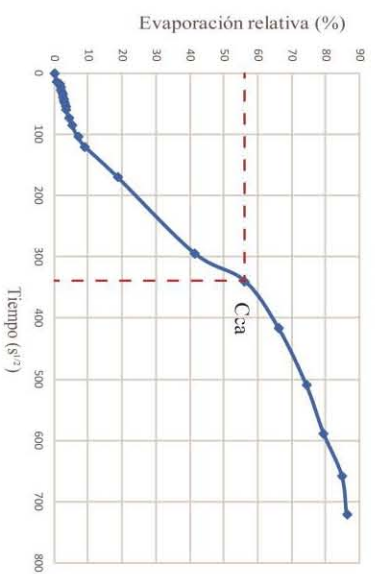


CUT-07-M

CUT-07-N



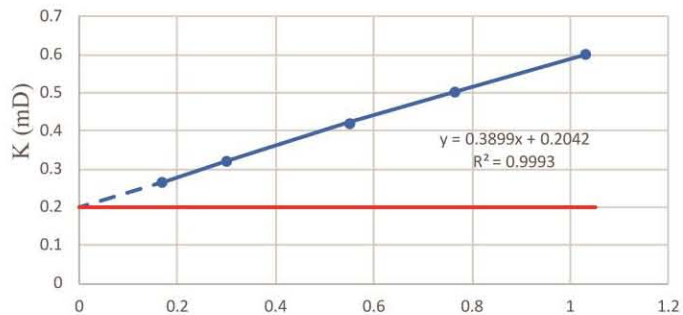
CUT-07-N



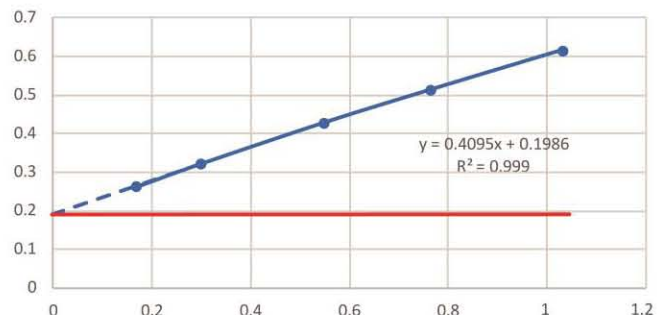
Anexo 8: Tabla y gráficas de Permeabilidad

Espécimen	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Presión atmosférica (psi)	Presión de entrada (psig)	Flujo de N2 ($\frac{Ncm^3}{min}$)	Permeabilidad al nitrógeno (mD)	Permeabilidad líquida (mD)
Cut-07-1	25.87	43.54	11.756	400	0.76	0.603	0.204
Cut-07-1	25.87	43.54	11.756	400	2.56	0.503	
Cut-07-1	25.87	43.54	11.756	400	5.97	0.423	
Cut-07-1	25.87	43.54	11.756	400	20.9	0.322	
Cut-07-1	25.87	43.54	11.756	400	60.69	0.266	
Cut-07-2	25.82	41.47	11.727	400	0.81	0.617	0.199
Cut-07-2	25.82	41.47	11.727	400	2.73	0.514	
Cut-07-2	25.82	41.47	11.727	400	6.35	0.429	
Cut-07-2	25.82	41.47	11.727	400	21.87	0.322	
Cut-07-2	25.82	41.47	11.727	400	62.6	0.263	
Cut-07-3	25.73	39.34	11.727	400	0.75	0.528	0.150
Cut-07-3	25.73	39.34	11.727	400	2.38	0.43	
Cut-07-3	25.73	39.34	11.727	400	5.51	0.356	
Cut-07-3	25.73	39.34	11.727	400	18.5	0.261	
Cut-07-3	25.73	39.34	11.727	400	52.22	0.21	
Cut-07-4	25.74	22.81	11.724	400	1.77	0.746	0.310
Cut-07-4	25.74	22.81	11.724	400	6.08	0.636	
Cut-07-4	25.74	22.81	11.724	400	14.55	0.548	
Cut-07-4	25.74	22.81	11.724	400	48.09	0.445	
Cut-07-4	25.74	22.81	11.724	400	161.04	0.378	
Cut-07-5	25.81	24.46	11.725	400	1.26	0.564	0.191
Cut-07-5	25.81	24.46	11.725	400	4.27	0.473	
Cut-07-5	25.81	24.46	11.725	400	9.94	0.397	
Cut-07-5	25.81	24.46	11.725	400	34.65	0.301	
Cut-07-5	25.81	24.46	11.725	400	100.26	0.249	
Cut-07-6	25.81	24.38	11.725	400	1.22	0.541	0.155
Cut-07-6	25.81	24.38	11.725	400	3.97	0.442	
Cut-07-6	25.81	24.38	11.725	400	9.11	0.364	
Cut-07-6	25.81	24.38	11.725	400	30.81	0.268	
Cut-07-6	25.81	24.38	11.725	400	87.52	0.217	
Cut-07-7	25.82	24.55	11.725	400	1.49	0.672	0.198
Cut-07-7	25.82	24.55	11.725	400	4.94	0.553	
Cut-07-7	25.82	24.55	11.725	400	11.39	0.459	
Cut-07-7	25.82	24.55	11.725	400	38.73	0.339	
Cut-07-7	25.82	24.55	11.725	400	108.45	0.271	

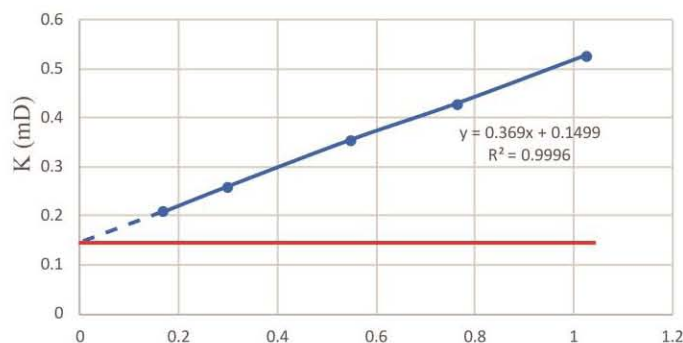
Cut-07-1



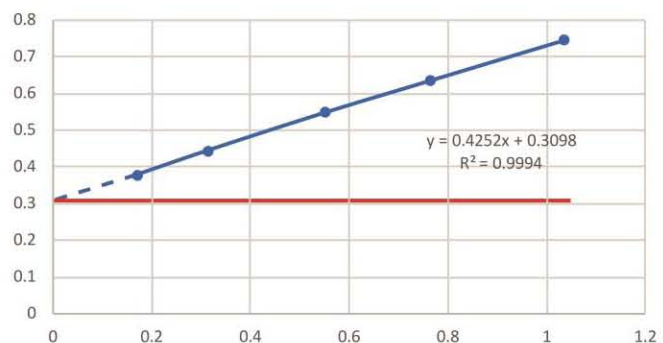
Cut-07-2



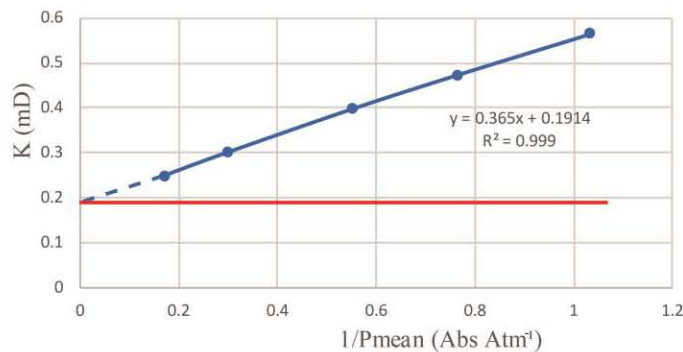
Cut-07-3



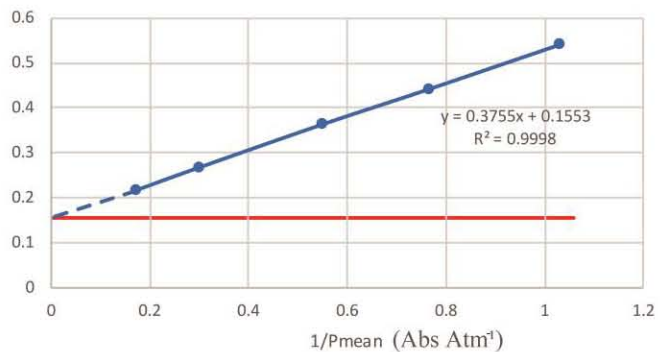
Cut-07-4



Cut-07-5



Cut-07-6



Cut-07-7

