



**Universidad Autónoma de San Luis Potosí**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Centro de Investigación y Estudios de Posgrado**

**Estudios geológicos, petrográficos, geoquímicos y geotécnicos en  
las rocas de construcción del centro histórico de Santiago de  
Querétaro y su comportamiento al intemperismo.**

**T E S I S**

Que para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias en Geología Aplicada

Presenta:

Ing. Sergio Arturo Molina Maldonado  
Alumno becado por *CONACYT* (CVU: 568065)



Asesor:

Dr. Rubén Alfonso López Doncel





**UASLP**  
Universidad Autónoma  
de San Luis Potosí

16 de julio de 2015

**ING. SERGIO ARTURO MOLINA MALDONADO  
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Rubén Alfonso López Doncel** Asesor de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Ciencias en Geología Aplicada**. Me es grato comunicarle que en la Sesión de Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 16 de julio del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

**TEMARIO:**

**"Estudios geológicos, petrográficos, geoquímicos y geotécnicos en las rocas de construcción del centro histórico de Santiago de Querétaro y su comportamiento al intemperismo"**

Introducción.

1. Marco geológico del área de Santiago de Querétaro.
2. Estudios geológicos, petrográficos, geoquímicos y geotécnicos.
3. Comportamiento al intemperismo de las rocas de construcción.
4. Resultados.

Conclusiones.

Referencias.

**"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"**

**A T E N T A M E N T E**

**M. I. JORGE ALBERTO PÉREZ GONZÁLEZ  
DIRECTOR.**



**FACULTAD DE  
INGENIERÍA**

Av. Manuel Nava 8  
Zona Universitaria - CP 78290  
San Luis Potosí, S.L.P.  
tel. (444) 826 2330 al39  
fax (444) 826 2336  
www.uaslp.mx

Copia. Archivo  
\*etn.

"1945 - 2015. 70 AÑOS CON LA FACULTAD DE FORMAR INGENIEROS"

# Contenido

Contenido.....	i
<i>Índice de figuras</i> .....	v
<i>Índice de tablas</i> .....	ix
<i>Índice de ecuaciones</i> .....	ix
Agradecimientos .....	x
Resumen .....	xiii
Abstract.....	xv
Introducción.....	1
<i>Marco histórico</i> .....	2
<i>Antecedentes</i> .....	2
<i>Zona de monumentos históricos de la Ciudad de Santiago de Querétaro UNESCO</i> .....	2
<i>Localización geográfica</i> .....	3
<i>Clima</i> .....	4
<i>Planteamiento del problema</i> .....	4
<i>Objetivo general</i> .....	5
<i>Objetivos particulares</i> .....	5
<i>Estudios realizados</i> .....	6
1 Marco geológico del área de Santiago de Querétaro.....	7
<i>Geología regional</i> .....	7
<i>Faja Volcánica Transmexicana</i> .....	9
<i>La Caldera de Amazcala</i> .....	11
<i>Edad de la Caldera de Amazcala</i> .....	12
<i>Geología de la caldera de Amazcala</i> .....	12
<i>Ignimbrita Colón</i> .....	14
<i>Domos del borde</i> .....	15
<i>Domo central</i> .....	15
<i>Canteras de rocas dimensionables de la caldera de Amazcala</i> .....	15
<i>Cantera Trozo Sillar</i> .....	15
<i>Cantera las Palmas</i> .....	17
<i>Cantera de Tierra Dura</i> .....	18
<i>Cantera de la Cañada del Marqués</i> .....	18

<b>La Caldera de Amealco</b> .....	20
<i>Edad de la Caldera de Amealco</i> .....	21
<b>Unidades utilizadas como rocas dimensionables de la Caldera de Amealco</b> .....	21
<i>Toba Amealco</i> .....	21
<i>Ignimbrita Huimilpan</i> .....	24
<b>Localidades cantereras en la Caldera de Amealco</b> .....	25
<b>2. Estudios geológicos, petrográficos, geoquímicos y geotécnicos</b> .....	28
<b>Análisis petrográficos</b> .....	28
<b>Análisis petrofísicos/geotécnicos</b> .....	29
<i>Preparación de muestras</i> .....	29
<i>Porosidad-Densidad</i> .....	31
<i>Distribución del radio de poro</i> .....	33
<i>Absorción de agua por capilaridad</i> .....	34
<i>Resistencia a la difusión de vapor</i> .....	36
<i>Velocidad de onda ultrasónica</i> .....	38
<i>Fuerza de partición por tensión</i> .....	39
<i>Dilatación térmica</i> .....	40
<i>Dilatación hídrica</i> .....	41
<i>Destrucción salina</i> .....	42
<b>Análisis Geoquímicos</b> .....	42
<i>Difracción de Rayos X</i> .....	42
<i>Preparación de muestra para el análisis de difracción de rayos X</i> .....	42
<i>Espectrometría de Masa con Inducción de Acoplamiento de Plasma (ICP-MS)</i> .....	45
<i>Preparación de muestras</i> .....	45
<b>3. Comportamiento al intemperismo de las rocas de construcción</b> .....	47
<b>El intemperismo de las rocas de construcción</b> .....	47
<b>Intemperismo físico</b> .....	47
<b>Expansión Térmica</b> .....	48
<b>Hinchamiento Hídrico e Hígrico</b> .....	49
<b>Intemperismo químico</b> .....	50
<i>Modelo de presión de crecimiento lineal</i> .....	52
<i>Modelo de presión capilar</i> .....	52
<i>Modelo de presión de hidratación</i> .....	52
<i>Influencia de los contaminantes atmosféricos</i> .....	53

<b>Intemperismo biológico</b> .....	53
<b>4. Resultados</b> .....	55
<b>Propiedades petrográficas</b> .....	55
<i>Descripción macroscópica de muestras</i> .....	55
1) <i>Ignimbrita Escolásticas Gris (TGQ1)</i> .....	55
2) <i>Ignimbrita Amarilla de la Cañada del Marqués, (TQGec)</i> .....	55
3) <i>Ignimbrita Rosa de la Cañada del Marques (TRCQ1)</i> .....	56
4) <i>Ignimbrita Roja de Huimilpan, Querétaro (TRH1)</i> .....	56
5) <i>Ignimbrita Amarilla de Huimilpan, Querétaro (TAH1)</i> .....	57
6) <i>Ignimbrita Escolásticas Negra, Querétaro (BT1)</i> .....	57
7) <i>Ignimbrita Colón (WT1)</i> .....	58
8) <i>Cantera Blanca de Las Palmas, Colón, Querétaro (LPW1)</i> .....	58
9) <i>Cantera Roja de Las Palmas, Colón, Querétaro (LPR1)</i> .....	58
10) <i>Cantera Roja de Tierra Dura, Colón, Querétaro (TDWI)</i> .....	59
<b>Descripción microscópica</b> .....	59
1) <i>Ignimbrita Escolásticas Gris de Querétaro (TGQ1)</i> .....	59
2) <i>Ignimbrita Amarilla de la Cañada (TQGec1)</i> .....	60
3) <i>Cantera Rosa de la Cañada del Marqués, Querétaro (TRCQ1)</i> .....	61
4) <i>Ignimbrita Roja de Huimilpan, Querétaro (TRH1)</i> .....	62
5) <i>Ignimbrita Amarilla de Humilpan, Querétaro (TAH1)</i> .....	63
5) <i>Ignimbrita Escolásticas Negra (BT1)</i> .....	64
6) <i>Ignimbrita Colón, Querétaro (WT1)</i> .....	65
7) <i>Cantera Blanca de Las Palmas, Colón, Querétaro (LPW1)</i> .....	66
<b>Difracción de Rayos X</b> .....	67
<i>Caracterización mineralógica</i> .....	67
1) <i>Ignimbrita Escolásticas Gris (TGQ1)</i> .....	67
2) <i>Ignimbrita Roja de Huimilpan (TRH1)</i> .....	68
3) <i>Ignimbrita Amarilla de Huimilpan (TAH1)</i> .....	68
4) <i>Ignimbrita Escolásticas Negra (BT1)</i> .....	69
5) <i>Ignimbrita Colón (WT1)</i> .....	70
6) <i>Ignimbrita Rosa de la Cañada (TRCQ1)</i> .....	70
7) <i>Cantera Blanca de Las Palmas (LPW1)</i> .....	71
8) <i>Ignimbrita Amarilla de La Cañada (TQGecl)</i> .....	71
<b>Geoquímica de elementos trazas y Tierras Raras</b> .....	72

<i>Familia Escolásticas</i> .....	74
<i>Familia Amazcala</i> .....	75
<i>Porosidad</i> .....	77
<i>Distribución de radio de poro</i> .....	78
<b>Transporte de agua y propiedades de retención de agua de las rocas</b> .....	83
<i>Absorción de agua por capilaridad</i> .....	83
<i>Resistencia a la difusión de vapor de agua</i> .....	85
<b>Propiedades mecánicas / elásticas de las rocas</b> .....	86
<i>Velocidad de onda ultrasónica/Módulo elástico</i> .....	86
<i>Fuerza de partición por tensión</i> .....	88
<b>Propiedades de intemperismo de las rocas</b> .....	90
<i>Dilatación térmica</i> .....	90
<b>Destrucción Salina</b> .....	93
<i>Ciclos salinos</i> .....	93
<b>Mapeo de monumentos en el Centro Histórico de Santiago de Querétaro</b> .....	100
<i>Litologías</i> .....	100
<i>Mapeo litológico en la Plaza de los Fundadores de Querétaro</i> .....	102
<i>Mapeo litológico barda del Templo de la Virgen del Soriano</i> .....	108
<i>Mapeo de la casona (restaurante el arcángel) contra esquina de la presidencia municipal</i> .....	108
<b>Formas de intemperismo</b> .....	111
<b>Conclusiones</b> .....	121
<b>Propiedades de espacio de poro y densidad</b> .....	121
<b>Propiedades de transporte y retención de agua</b> .....	122
<b>Propiedades geotécnicas</b> .....	124
<b>Propiedades de intemperismo</b> .....	128
<i>Expansión térmica</i> .....	128
<i>Características de intemperismo</i> .....	129
<b>Referencias</b> .....	132
<b>Normativa DIN</b> .....	137

## Índice de figuras

Figura 1. Localización geográfica del municipio de Santiago de Querétaro y mancha urbana (Tomado de INEGI, 2005) .....	3
Figura 2. Parámetros climáticos promedio de la ciudad de Santiago de Querétaro (Servicio Meteorológico Nacional) .....	4
Figura 3. Estudios realizados para esta investigación .....	6
Figura 4. Mapa de las Provincias Geológicas donde se sitúa el área de estudio (Modificado de Aguirre-Díaz <i>et al.</i> 2013).....	7
Figura 5. Faja Volcánica Transmexicana dividida en 3 sectores. (Modificado de Gómez-Tuena, 2007).11	
Figura 6. Localización regional de la Caldera de Amazcala (representada con color rojo) en el Sector Central de la FVTM. Con color azul, La Caldera de Amealco (Modificado de Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001).....	12
Figura 7. Mapa geológico de la región de la caldera de Amazcala (Modificado de Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001).....	13
Figura 8. A) Ignimbrita Colón explotada para la producción de sillar. Se recolectó un bloque muestra al cual se le denominó WT1. B) Vista de la cantera, la cual tienen impresionantes dimensiones. Se localiza en las afueras de la localidad de Colón. ....	16
Figura 9. A) Hombres trabajando en una de las canteras en la comunidad de Las Palmas. B) Pedacería de la cantera blanca de Las Palmas (LPW1). C) Extracción de la cantera roja de Las Palmas (LPR1). ....	17
Figura 10. Cantera típica de la comunidad de Tierra Dura de donde se extrae la Cantera Blanca de Tierra Dura (TDW1).....	18
Figura 11. A) Cantera de la localidad de la Cañada del Marqués donde se extrae la Ignimbrita Colón (Miembro soldado; en este trabajo conocida como ignimbrita rosa de La Cañada y en la esquina inferior izquierda se encuentran bloques de la ignimbrita amarilla de La Cañada). B) Artesano labrando un bloque para adoquín a mano; estos adoquines son los que recubren las calles del centro histórico de Santiago de Querétaro.....	19
Figura 12. Ignimbrita Amealco. Sobre el mapa se representaron algunas zonas cantereras. (Modificado de Aguirre-Díaz, 2001). ....	20
Figura 13. Mapa de localización de la caldera de Amealco y en el cual se muestra la distribución de la 20	
Figura 14. A) Fotografía de la Ignimbrita Amealco con cima intemperisada y calichosa. B) Pómez negra presente en matriz oxidada.....	22
Figura 15. Sección idealizada de la Ignimbrita Amealco. La sección muestra las 4 unidades de tobas Amealco. (Tomado y modificado de Aguirre-Díaz, 2001). ....	23
Figura 16. Artesanías de la comunidad canterera de Escolásticas .....	25
Figura 17. Comunidad Escolásticas, barranca sur en donde se encuentra la zona de canteras. ....	26
Figura 18. Bloque y cantera ignimbrita negra, Escolásticas (Ignimbrita Amealco III). ....	26
Figura 19. Banco de canteras la Lagunillas, Humilpan. ....	27
Figura 20. Banco de piedra en la comunidad de La Cantera, Huimilpan.....	27
Figura 21. Diagrama de Streckeisen (1978), para clasificación de rocas volcánicas extrusivas (Tomado y modificado de Le Maitre, 2002). ....	28
Figura 22. A) Máquina "Press-Drill" para perforación de muestras y obtención de núcleos de roca. B) Cuarto de máquinas de corte de muestras en el Centro de Geología Estructural y Geodinámica de la Unversidad de Göttingen, Alemania. ....	29
Figura 23. Representación de las tres dimensiones de una muestra.....	30
Figura 24. Balanza de precisión para obtener los pesos secos, húmedos y sumergidos de las muestras para la prueba de porosidad/densidad. ....	31

Figura 25. Bomba de extracción y campana de desecación para la extracción del aire de la muestra y absorción de agua al vacío. ....	32
Figura 26. Porosímetro de mercurio Pascal 440 de Thermo Scientific.....	34
Figura 27. Equipo para la prueba de absorción de agua por capilaridad.....	35
Figura 28. Charola con muestras cilíndricas para prueba de resistencia a la difusión de vapor. ....	37
Figura 29. Cámara climática KPK 600 para realización de la prueba de resistencia a la difusión de vapor. ....	37
Figura 30. Equipo transmisor de onda ultrasónica, con emisor y receptor de onda.....	38
Figura 31. A) Prensa hidráulica universal. B) Computadora para el cálculo de la presión ejercida en kilo Newtons sobre la muestra. ....	39
Figura 32. Dilatómetro para pruebas de expansión térmica.....	41
Figura 33. A) Fotografía de Morteros de ágata con esferas para colocar la muestra a moler. B) colocación de la muestra de roca triturada para molienda fina. C) Máquina para morteros de ágata, en ella caben cuatro morteros. D). Sujetadores de tornillo para mantener .....	43
Figura 34. A) Fotografía de las placas de colocación de acero inoxidable y anillos para la colocación del polvo de muestra para ingresarlo al difractor. El dispositivo de colocación de placas es el que está sobre la hoja de papel de la derecha. B) Placa con muestras previas a ser colocadas en la ficha que se coloca dentro del difractor. ....	44
Figura 35. Dilatación térmica. ....	48
Figura 36. Hinchamiento osmótico (Ruedrich <i>et al.</i> 2010).....	50
Figura 37. Ejemplo de deterioro de la roca debido a la agresiva acción de eflorescencia salina en el Centro histórico de Santiago de Querétaro .....	51
Figura 38. TGQ1.....	55
Figura 39. TQGec1 .....	55
Figura 40. TRCQ1 .....	56
Figura 41. TRH1 .....	56
Figura 42. TAH1 .....	57
Figura 43. BT1.....	57
Figura 44. WT1.....	58
Figura 45. LPW1.....	58
Figura 46. LPR1.....	58
Figura 47. TDW1.....	59
Figura 48. Microfotografía de la muestra TGQ1 tomada con objetivo 5x. a) luz natural, b) luz polarizada. ....	59
Figura 49. Microfotografía de la muestra TQGec1 tomada con objetivo 5x. a) luz natural, b) luz polarizada.....	60
Figura 50. Microfotografía de la muestra TRCQ1 tomada con objetivo 5x. a) luz natural, b) luz polarizada.....	61
Figura 51. Microfotografía de la muestra TRH1 tomada con objetivo 5x. a) luz natural, b) luz polarizada .....	62
Figura 52. Microfotografía de la muestra TAH1 tomada con objetivo 5x. a) luz natural, b) luz polarizada .....	63
Figura 53. Microfotografía de la muestra BT1 tomada con objetivo 5x. a) luz natural, b) luz polarizada. ....	64
Figura 54. Microfotografía de la muestra WT1 tomada con objetivo 5x. a) luz natural, b) luz polarizada. ....	65

Figura 55. Microfotografía de la muestra LPW1 tomada con objetivo 5x. a) luz natural, b) luz polarizada.....	66
Figura 56. Difractograma de la Ignimbrita Escolásticas gris (TGQ1) .....	67
Figura 57. Difractograma de la Ignimbrita Roja de Huimilpan (TRH1).....	68
Figura 58. Difractograma de Ignimbrita Amarilla de Huimilpan (TAH1).....	68
Figura 59. Difractograma de la Ignimbrita Escolásticas Negra (BT1).....	69
Figura 60. Difractograma para la Ignimbrita Colón (WT1).....	70
Figura 61. Difractograma de la Ignimbrita Rosa de la Cañada (TRCQ1).....	70
Figura 62. Difractograma de la Cantera Blanca de Las Palmas (LPW1).....	71
Figura 63. Difractograma de la Ignimbrita Amarilla de La Cañada (TQGec1).....	72
Figura 64. Diagrama multielemental normalizado a manto primitivo, de la familia de ignimbritas Escolásticas (valores de normalización Sun y McDonough, 1989).....	72
Figura 65. Diagrama spider de tierras raras normalizados a condritas (Sun+McDon, 1989).De la familia Escolásticas.....	74
Figura 66. Diagrama multielemental normalizado a manto primitivo de la familia de muestras de la caldera de Amazcala.....	75
Figura 67. Diagrama spider de Tierras Raras normalizado a Condritas de la familia de Amazcala.....	76
Figura 68. Grafica de densidad aparente [g/cm <sup>3</sup> ] contra porosidad (%). .....	78
Figura 69. Histograma de la distribución del radio de poro de la Ignimbrita Escolásticas Gris (TGQ1) .	78
Figura 71. Distribución de radio de poro de la ignimbrita rosa de la Cañada (TRCQ1).....	79
Figura 70. Distribución del radio de poro de la Ignimbrita amarilla de la Cañada (TQGec1).....	79
Figura 72. Distribución de radio de poro de la Ignimbrita rosa de Huimilpan (TRH1).....	80
Figura 73. Distribución de radio de poro de la Ignimbrita amarilla de Huimilpan (TAH1).....	80
Figura 74. Distribución de radio de poro de la Ignimbrita Negra de Escolásticas (BT1).....	81
Figura 75. Distribución de radio de la Ignimbrita Colón (WT1).....	82
Figura 76. Distribución de radio de poro de la Cantera Blanca de Las Palmas (LPW1).....	82
Figura 77. Coeficientes de absorción de agua por capilaridad contra porosidad [%] en direcciones paralelas y perpendiculares a las capas.....	84
Figura 78. Absorción de agua (% en peso) contra porosidad (%). .....	84
Figura 79. Resistencia a la difusión de vapor de agua contra porosidad (%) en direcciones paralelas y perpendiculares a las capas.....	85
Figura 80. Velocidades de onda ultrasónica de las muestras. En rojo las velocidades en el eje X (paralelas a las capas) y en azul las velocidades en el eje Z (perpendiculares a las capas).....	86
Figura 81. Velocidad de onda ultrasónica en [km/s] contra porosidad (%) en direcciones paralelas y perpendiculares a las capas.....	87
Figura 82. Módulos de elasticidad [GPa] contra porosidad (%) paralelas y perpendiculares a las capas.88	
Figura 83. Fuerza máxima de las pruebas [kN]. Representado con azul: fuerza máxima en dirección paralela a las capas (x), con rojo: fuerza máxima en dirección perpendicular a las capas (z).....	89
Figura 84. Fuerza de partición por tensión [MPa] contra porosidad (%) en dirección perpendicular y paralelas a las capas.....	89
Figura 85. Graficas de la dilatación térmica de las muestras [mm/m] en direcciones paralelas y perpendiculares a las capas.....	90
Figura 86. Prueba de destrucción salina para la Ignimbrita Escolásticas Gis (TGQ1). Prueba de 20 ciclos.....	93
Figura 88. Prueba de destrucción salina para la Ignimbrita Amarilla de Huimilpan (TAH1). Destrucción en ciclo 16.....	94

Figura 87. Prueba de destrucción salina para Ignimbrita Roja de Huimilpan (TRH1). Prueba hasta ciclo 20. ....	94
Figura 90. Prueba de destrucción salina para la Ignimbrita Amarilla de la Cañada (TQGec1). Prueba hasta el ciclo 20.....	95
Figura 89. Prueba de destrucción salina para la Ignimbrita Rosa de la Cañada (TRCQ1). Prueba hasta ciclo 13.....	95
Figura 91. Prueba de destrucción salina de la Ignimbrita Colón (WT1).....	96
Figura 92. Prueba de destrucción salina para la ignimbrita Escolásticas negra (BT1). ....	97
Figura 93. Grafica donde se muestra la porosidad contra los ciclos salinos .....	97
Figura 94. Grafica donde se compara los ciclos de destrucción salina contra la fuerza de tensión. ....	98
Figura 95. Prueba de destrucción salina para la Canteras blanca de las Palmas (LPW1). Prueba hasta ciclo 20. ....	98
Figura 96. Prueba de destrucción salina de la Canteras Roja de las Palmas (LPR1).....	99
Figura 97. Prueba de destrucción salina de la Canteras Blanca de Tierra Dura (TDW1). ....	99
Figura 98. Imagen satelital con ubicación de la plaza de los fundadores de Querétaro delineada con color rojo, frente al convento de la Santa Cruz. Tomada de Google Earth. ....	103
Figura 100. Taller de labrado para la elaboración de baldosas y adoquines en la localidad de la Cañada del Marqués.....	104
Figura 99. Obras de remodelación en la Plaza fundadores de Santiago de Querétaro. Se puede observar la colocación del adoquín elaborado con la Ignimbrita Rosa de la Cañada (TRCQ1).....	104
Figura 101. Estatuas de algunos personajes ilustres y fundadores de Querétaro hechas en bronce y montadas en bases construidas con la Ignimbrita Escolásticas Gris (TGQ1). ....	105
Figura 102. Monumento dedicado a la Plaza Fundadores de Santiago de Querétaro inaugurado el 21 de Marzo del 2014 y construido con la ignimbrita roja de Huimilpan (TRH1), Amarilla de Huimilpan (TAH1) y Escolásticas Gris (TGQ1). ....	105
Figura 103. Mapeo litológico 1.....	106
Figura 104. Mapeo litológico 2.....	107
Figura 105. Mapeo litológico 3.....	107
Figura 106. Mapeo litológico 4 Barda del templo de la Virgen del Soriano .....	109
Figura 107. Mapeo litológico de la casona (restaurante el arcángel) contra esquina de la presidencia municipal .....	110
Figura 108. Formas de intemperismo .....	113
Figura 109. Formas de intemperismo Monumento a los fundadores. ....	114
Figura 110. Intensidad de intemperismo Monumento a los Fundadores. ....	115
Figura 111. Intensidad de daños Nicho de Luis de Montañez .....	116
Figura 112. Formas de intemperismo Nicho de Luis de Montañez .....	116
Figura 113. Formas de Intemperismo Nicho de Fray Junipero Serra .....	117
Figura 114. Intensidad de daños Nicho de Fray Junipero Serra.....	117
Figura 115. Mapeo de formas de intemperismo Muro del templo de la Virgen del Soriano. ....	119
Figura 116. Mapeo de intensidad de daños Muro del templo de la Virgen del Soriano .....	119
Figura 117. Casona Centro Histórico de Santiago de Querétaro A) Mapeo formas de intemperismo. B) Mapeo intensidad de daños.....	120
Figura 118. Valor del tamaño promedio de poro contra el valor de la absorción de agua por capilaridad mostrando un coeficiente de correlación de 0.383.....	123
Figura 119. Gráfica donde se muestra el porcentaje de microporos contra el coeficiente de resistencia a la difusión de vapor de agua (M; el coeficiente de correlación es bajo (R2) de 0.2128). La segunda	

gráfica muestra el porcentaje de porosidad contra el coeficiente (M). El coeficiente de correlación (R2) es muy alto de 0.9457. ....	124
Figura 120. Velocidades de onda ultrasónica típicas para rocas plutónicas, rocas carbonatadas y areniscas (Siegesmund y Dürrast, 2011).....	125
Figura 121. Velocidad de onda ultrasónica promedio [km/s] y Resistencia a la fuerza de partición por tensión [MPa] contra el porcentaje de porosidad. ....	126
Figura 122. Resultados de la prueba brasileña de tensión en seco de las tobas volcánicas estudiadas por Wedekind <i>et al.</i> (2013). Las ignimbritas mexicanas están sombreadas con el color verde. Las alemanas con amarillo y la muestra hungara con rojo.....	126
Figura 123. Prueba brasileña de tensión en seco comparando dos ignimbritas. A) Prueba brasileña para la muestra TAH1. B) prueba brasileña para muestra BT1. Representado con flechas azules el esfuerzo principal $\sigma_1$ y perpendicular a este con flechas rojas el esfuerzo menor $\sigma_3$ . ....	127
Figura 124. Comparativa de expansión térmica contra porosidad entre las muestras de Platz, 2014 y las de este estudio.....	128
Figura 125. Patrón de esférico de eflorescencia salina para muestras porosas. ....	131

### Índice de tablas

Tabla 1. Medidas y formas de las muestras para los respectivos experimentos según la normativa DIN 30	
Tabla 2. Distintas definiciones individuales sobre el tamaño promedio de poro (Tomado de Siegesmund y Dürrast, 2011). ....	32
Tabla 3. Bitácora de control de muestras para análisis geoquímicos. ....	45
Tabla 4 Resultados de elementos trazas para las muestras de la familia Escolásticas. Extremo derecho: Resultados de elementos trazas obtenidos por Aguirre-Díaz, 2001 sobre la ignimbrita Amealco III; Nótese la asombrosa similitud de concentraciones de estos elementos. ....	73
Tabla 5 Concentraciones de Tierras Raras obtenidas de las muestras de la caldera de Amazcala. ....	75
Tabla 6. Concentraciones de Tierras Raras de las muestras de la familia de Amazcala.....	76
Tabla 7. Porosidad (%), densidad de matriz [g/cm <sup>3</sup> ], densidad aparente/ <i>bulk</i> [g/cm <sup>3</sup> ]. ....	77
Tabla 8 Radio de poro promedio [ $\mu\text{m}$ ] de las muestras. ....	83
Tabla 9. Coeficientes de absorción de agua por capilaridad y porcentaje de absorción. ....	84
Tabla 10. Coeficientes de resistencia a la difusión de vapor ( $\mu$ -Coef.) en dirección paralela y perpendicular a las capas. ....	85
Tabla 11. Velocidades de onda ultrasónica calculada en las muestras en los ejes x,y,z. en direcciones paralelas y perpendiculares a las capas. ....	86
Tabla 12. Tabla comparativa del módulo elástico paralelo y perpendicular a las capas.....	87
Tabla 13. Fuerza de partición por tensión [MPa] y fuerza máxima [kN] de las muestras en direcciones paralelas (X) y perpendiculares (Z) a las capas. ....	88

### Índice de ecuaciones

Ecuación 1.....	33
Ecuación 2.....	35
Ecuación 3.....	36
Ecuación 4.....	40
Ecuación 5.....	87

## Agradecimientos

En ocasiones resulta muy difícil expresar con palabras todo lo que llevamos en nuestra mente y en nuestro corazón, hoy es una de ellas.

Agradezco a mi Dios Padre por prestarme vida para ver la culminación de este proyecto.

A mis padres Ing. Sergio Molina Rubio y Mtra. Eneida Maldonado Vidales, a mis hermanas Eneida y Carmen Daniela por darme palabras de aliento, por nunca dejarme tirar la toalla y darme el calor de un hogar que siempre me brindó dicha amor y armonía. A mis Abuelos Prof. Herculano Maldonado Barragán y Sra. María del Carmen Vidales Vargas, por estar siempre a nuestro lado y que Dios los conserve muchos años más con nosotros.

A mi novia, Lic. Fátima Lapuente Meneses por todo ese incondicional apoyo y comprensión durante todo este proceso, por las noches de desvelo y tu visión optimista que me impulsa a seguir siempre firme. Te amo hermosa.

Con mucho cariño para mi estimado asesor de tesis y amigo, Dr. Rubén López Doncel “El Profe”, por su enorme paciencia, confianza y apoyo. Por no perder la esperanza en mí y por haber compartido conmigo sus conocimientos, experiencias, vivencias y sueños.

Agradezco igualmente al CONACyT, por el valioso apoyo a través de los proyectos Ciencia Básica 130282 y Cooperación Bilateral 191044 a cargo del Dr. Rubén López Doncel.

Con afecto y estima para todo el cuerpo de investigadores del Instituto de Geología. Por sus sabias recomendaciones, consejos y paciencia. Especialmente para los Doctores José Rafael Barboza Gudiño, Margarito Tristán González, Alfredo Aguillón Robles, José Ramón Torres Hernández, Javier Castro Larragoitia, Damiano Sarocchi y Lorenzo Borselli. Se les admira y aprecia mucho, maestros.

Al reconocido Prof. Dr. Siegfried Siegesmund del Departamento de Geología Estructural y Geodinámica de la Universidad Georg August Göttingen, Alemania; por facilitarme el uso de las instalaciones de laboratorio y equipo para la medición de las muestras y por sus buenos consejos.

A la Maestra en Ciencias Geológicas Theresa Valentina Platz por su excelente asesoramiento y ayuda en todos los experimentos realizados en el “Tek-Lab” y por su valiosa amistad y consejos.

Al Geólogo Christian Knell, por su asesoramiento para la preparación de muestras y correcto funcionamiento y limpieza de los equipos.

A la geóloga Anna Kral por el trabajo de campo realizado en la ciudad de Querétaro y el posterior acompañamiento en el trabajo de laboratorio. Por su amistad y cariño incondicional.

A los geólogos Tobias Dierkes, Pascal Sieck, Heindrik Wilke, Christopher Pötzl, Marc Wengler, Hannes Rã, Annika, Franciska, Stefan, Anakaren Velasco, Elco Ludwij, Ninja Braukmuller, y Sebastián Oriolo, de todo corazón les agradezco todas sus atenciones. Su casa está en San Luis Potosí.

Al Restaurador Wanja Wedekind por sus innumerables consejos y amistad, por prestarme su veloz y hermosa bicicleta durante mi estancia en Göttingen.

A los profesores y estudiantes encargados del laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología de la UASLP; Dr. Alfredo Aguillón, Dr Erik Espinoza, y Dra. María Elena, por su gran paciencia y apoyo en el uso de las instalaciones y equipo y en la preparación de mis muestras e interpretación de análisis.

Al ingeniero Erasmo Mata, por su valiosa ayuda en la preparación de mis muestras para análisis petrográficos y por el uso de los equipos del laboratorio de preparación de muestras.

Al personal de intendencia por su gran apoyo, disposición y amistad; Sr. Efrén Román y Sr. Juan Carlos Guel.

A los señores canteros de la comunidad de Escolásticas, La Cañada, Tierra Dura, Las Palmas y Colón, Querétaro por haber aportado con alegría, una piedra cada quién, para la construcción de este trabajo. Espero que este trabajo les rinda frutos a su trabajo.

A todos de corazón ¡Muchas Gracias! Vielen Dank an alle und alles!

*Para Valentín*

## Resumen

El conocimiento sobre los factores que controlan el intemperismo de las rocas de construcción en términos de protección y preservación de monumentos históricos es esencial. México, un país rico en legado cultural e histórico, encabeza la lista como una de las naciones más ricas del mundo, en sitios declarados como Patrimonio Cultural de la Humanidad por la UNESCO. La mayoría de estos sitios culturales, contienen monumentos históricos, construidos con roca natural, y concentrados en su totalidad en las ciudades coloniales, como lo es la Ciudad de Santiago de Querétaro, fundada en 1531. Desafortunadamente, en México, no se cuenta, con una metodología adecuada, y el conocimiento necesario para investigar las características fundamentales de las rocas de construcción, para entender mejor, su comportamiento como material de construcción y su respuesta al intemperismo. Además de identificar las características petrográficas y geoquímicas de las muestras, este trabajo utiliza la metodología estandarizada del Instituto Alemán de Normalización (DIN) aplicada para piedra natural de construcción para determinar las propiedades petrofísicas y geotécnicas como: porosidad, densidad, distribución de tamaño de poro y microporosidad, absorción de agua por capilaridad, resistencia a la difusión de vapor, velocidad de onda ultrasónica, módulo elástico, prueba brasileña de tensión, expansión térmica y destrucción salina; También se utilizó la guía *ICOMOS-2008* del Comité Científico Internacional para la Piedra (ISCS) que identifica, homogeniza y clasifica los términos y patrones de intemperismo en las rocas naturales de construcción alrededor del mundo. Investigaciones de campo de algunas paredes de edificios y monumentos históricos del Centro Histórico de Santiago de Querétaro exhiben un deterioro y daño significativos. La contaminación atmosférica y las condiciones climáticas de la región central de México juegan un papel importante en el intemperismo de estas rocas. Las distintas ignimbritas analizadas provienen de varias canteras activas ubicadas en la zona centro norte de la provincia geológica de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), en donde también se encuentra la Ciudad de Querétaro. Posen una composición riolítica y difieren explícitamente en sus características de intemperismo y en su aplicación como roca de construcción. Las ignimbritas con bajo grado de soldamiento que pertenecen a 3 miembros de la Ignimbrita Escolásticas, a un miembro de la Ignimbrita Amealco y a un miembro de la Ignimbrita Colón, muestran una alta porosidad (38 %-60%) lo cual resulta en una baja resistencia contra esfuerzos mecánicos y por ende con baja idoneidad como roca de

construcción. Para las muestras con menor porosidad, se identificaron algunas, pero en menor proporción. El factor más importante para la resistencia de las rocas naturales contra los problemas de intemperismo son las propiedades de los poros tales como su porosidad, la distribución del radio de poro y la fuerza de cohesión interna, las cuales afectan la mayoría de las otras propiedades y características. El grado de intemperismo depende básicamente de las propiedades que cada roca tenga. Todas las rocas tienen un uso, la tarea es encontrarles el correcto.

## Abstract

The knowledge about the factors that control the weathering of natural building stones in terms of protection and preservation is essential. Mexico, a country rich in cultural and historical heritage, tops the list as one of the richest nations in the world, for places declared as World Heritage Sites by UNESCO. Most of these cultural sites, contain historical monuments, built with natural stone, which are concentrated mostly in the colonial cities, such as the City of Santiago de Queretaro, founded in 1531. Unfortunately, in Mexico there is a lack of appropriated methodology followed by a poor knowledge on what and how to investigate about the fundamental characteristics of natural building stones for a better understanding on the rock's behavior as a building material and its response to weathering. In addition to identifying the petrographic and geochemical characteristics of the samples, this research uses the standardized methodology of the German Institute for Standardization (DIN) applied to natural stones for construction and masonry units, to measure petrophysical and geotechnical properties of the rocks, such as porosity, density, pore size distribution and microporosity, capillary water absorption, resistance to water vapor diffusion, ultrasonic wave velocity, elastic modulus, Brazilian splitting tensile strength test, thermal dilatation and saline destruction test. Also using the 2008 ICOMOS Guide from the International Scientific Committee for Stone (ISCS) that identifies, classifies and homogenized terms for weathering patterns in natural building stones around the world. Field research made on the walls of some buildings and monuments of the Historic Centre of Santiago de Queretaro show significant stone decay and damage. Air pollution and the climate conditions of central Mexico, play an important role, which triggers the weathering of the natural building stones. The different ignimbrites samples analyzed on this work have a rhyolitic composition and were collected on several active dimension stone quarries from the north central zone of the Trans-Mexican Volcanic Belt geological province (TMVB) in which the City of Queretaro is also located, they differ explicitly on their weathering characteristics and their application as natural building stones. The analyzed ignimbrite samples which belong to 3 members of the Escolasticas Ignimbrite, one from the Amealco Ignimbrite and one sample from the Colon Ignimbrite, show an elevated porosity (38%-60%), which results on a poor response to mechanical stress and finally not very suitable rocks for construction purposes. The most important factor for the resistance of the natural building ignimbrite stones against their

weathering problems are their pore properties, such as porosity, pore size distribution and the degree of welding, which affects the majority of the other properties and characteristics. The degree of weathering basically depends on the types of characteristics every rock has. All rocks have a use, the task is to find the right one.

## Introducción

Esta investigación a las rocas de construcción está realizada en el Centro Histórico de la Ciudad de Santiago de Querétaro la cual es célebre por su importante papel en la historia de México; en 1810 fue sede de la conspiración de Querétaro donde se fraguó el movimiento que posteriormente llevaría a la Independencia de México. En 1917 fue sede del congreso constituyente que promulgó la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que continúa vigente. Por último en 1996 su Centro Histórico recibió, por parte de la UNESCO, la distinción de Patrimonio de la Humanidad.

El Centro Histórico contiene una gran cantidad de monumentos arquitectónicos de gran importancia para la historia de la ciudad; como lo son edificios, templos, conventos, fuentes, acueductos, plazas, museos y esculturas.

Gracias a un convenio CONACyT de cooperación bilateral entre el Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, (México) encabezado por el Dr. Rubén López Doncel y el Departamento de Geología Estructural y Geodinámica de la Universidad de Göttingen (Alemania), liderado por el Prof. Dr. Siegfried Siegesmund, resultó posible realizar una estancia de investigación donde se utilizaron sus laboratorios, metodologías y conocimiento sobre el estudio de las rocas naturales de construcción. Ya que esta institución alemana es líder en conocimiento e innovación sobre los estudios aplicados a las piedras naturales de construcción.

En México por desgracia no se cuenta con este tipo de conocimientos y por lo tanto resulta muy difícil realizar estudios competentes y de primer nivel a las rocas naturales para construcción, resultando esto en estudios y trabajos de mala calidad y afectando al patrimonio y legado histórico de nuestro país.

Este trabajo está dirigido a investigadores, arquitectos, restauradores, e ingenieros que realicen algún proyecto que involucre piedra natural y para el público en general que tenga interés sobre el tema.

### ***Marco histórico***

Se afirma que el 25 de Julio de 1531, se fundó la ciudad de Santiago de Querétaro como "Pueblo de Indios" por Don Fernando de Tapia que confirmó una merced de tierras fechada dos años más tarde, mediante la cual el rey Carlos I de España otorgó a los caciques indígenas las tierras en las que luego prosperó el pueblo de Querétaro.

Al martes 25 de Julio de 1531 Don Fernando de Tapia le entregó la ciudad a su Majestad Católica, dándosele el nombre de Queréndaro que después se españolizó como Querétaro, que en Purépecha significa lugar de peñas.

Fue hasta 1537 cuando le fue concedida, por el rey Felipe III, a Querétaro la categoría de pueblo; en 1606 de villa. El primero de junio de 1654 se le dio el título de nombre y merced de muy noble y leal ciudad, título aprobado y confirmado por Cédula Real, con el timbre de armas, otorgada por el rey Felipe V, el 29 de Septiembre de 1712; siendo nombrada también como la tercer ciudad del reino.

### ***Antecedentes***

Patrimonio Cultural de la Humanidad por la UNESCO en 1996.

Su arquitectura del siglo XVII se refleja en la riqueza de sus Iglesias y Casonas del Centro Histórico, haciéndola acreedora al nombramiento por la UNESCO de Ciudad Patrimonio Cultural de la Humanidad el 5 de diciembre de 1996.

### ***Zona de monumentos históricos de la Ciudad de Santiago de Querétaro UNESCO***

La Zona de monumentos históricos de Querétaro se encuentra en el estado de Querétaro en la República Mexicana. Es un ejemplo excepcional de una ciudad colonial cuyo trazado simboliza su población multiétnica. También está dotado de una gran cantidad de edificios singulares, sobre todo a partir de los siglos XVII y XVIII. La propiedad es inusual por haber conservado el trazado de las calles geométrico del lado conquistadores españoles a codo con los callejones serpenteantes de los barrios de la India. El otomí, el Tarasco, los chichimecas y los españoles vivían juntos en la ciudad, que se caracteriza por los numerosos monumentos barrocos civiles y religiosos adornados, con un horizonte que se ha definido desde el siglo XVI.

La propiedad cuenta con 4 kilómetros cuadrados con 203 bloques. En estos hay 1,400 monumentos designados como parte del patrimonio de la humanidad de los cuales veinte son

religiosos y quince se utilizan para los servicios públicos. Su significado especial radica en el diseño y la construcción de una amplia gama de arcos.

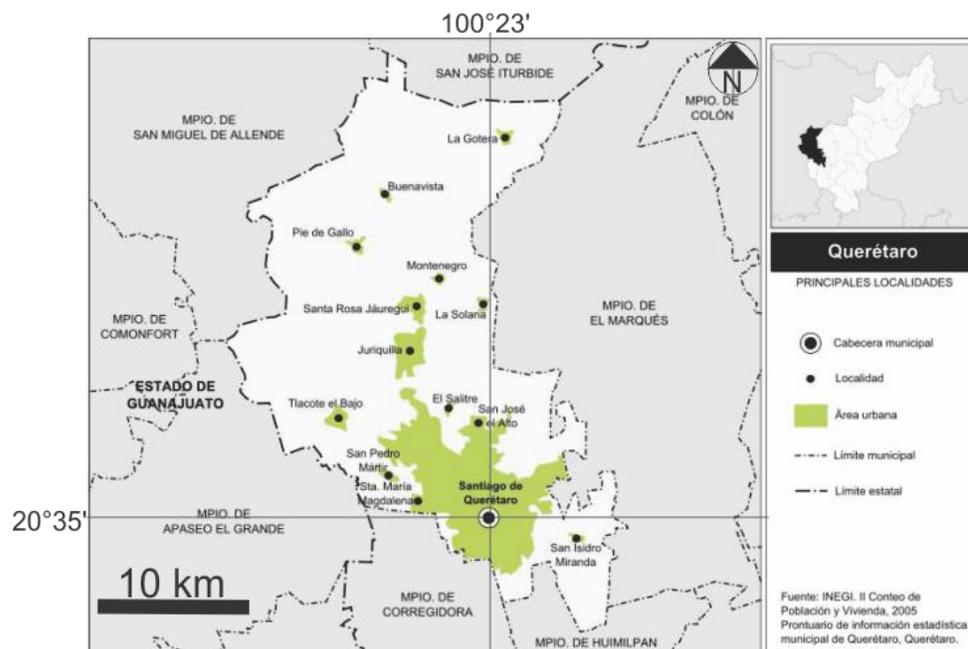
Los criterios que la UNESCO tomo en cuenta para el nombramiento fueron el II y el IV

Criterio (II): La Zona de monumentos históricos de Querétaro tiene un carácter urbano único y el diseño que refleja la coexistencia de los diferentes grupos en el mismo espacio urbano. Tiene varios edificios civiles y religiosos bien conservados, que tienen expresiones constructivas y decorativas únicas.

Criterio (IV): La zona monumental de Querétaro es un ejemplo excepcional de una ciudad colonial española cuyo trazado simboliza su población multiétnica. También está dotado de una gran cantidad de edificios singulares, sobre todo a partir de los siglos 17 y 18.

### **Localización geográfica**

Santiago de Querétaro es la ciudad más poblada así como la capital del estado de Querétaro. Se encuentra a 221 km al noroeste de la ciudad de México, tiene una altitud media de 1820 msnm. La ciudad de Santiago de Querétaro se encuentra al oeste del Estado de Querétaro, en el centro de México, al sureste de la macroregión del Bajío. Es atravesada de oriente a poniente por el Río Querétaro, que forma parte de la cuenca del Río Lerma. Desde su fundación en 1531, hasta mediados del siglo XX, El Río Querétaro fue al norte el límite natural de la ciudad; así como al sur fueron las faldas del Cerro del Cimatario.



**Figura 1. Localización geográfica del municipio de Santiago de Querétaro y mancha urbana (Tomado de INEGI, 2005)**

## Clima

El Clima de Santiago de Querétaro es semiseco, presentado estaciones muy marcadas: inviernos con heladas frecuentes por las noches y pocas precipitaciones pluviales, una primavera seca con temperaturas estables, un verano cálido y húmedo, con un otoño ventoso que a menudo es extremoso. La temporada de lluvias es de abril a septiembre.

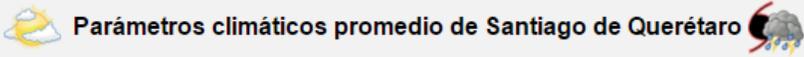
Parámetros climáticos promedio de Santiago de Querétaro  <a href="#">[ocultar]</a>													
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Temperatura máxima absoluta (°C)	35.2	30.0	33.4	37.0	36.8	35.5	32.5	31.3	30.5	32.0	29.6	28.2	37.0
Temperatura máxima media (°C)	23.0	24.6	27.6	29.5	30.7	29.2	26.9	26.8	25.7	25.9	24.5	23.5	30.7
Temperatura media (°C)	15.1	16.2	18.7	20.7	22.5	21.9	20.4	20.3	19.5	18.6	16.9	15.5	18.9
Temperatura mínima media (°C)	7.1	7.8	9.8	12.0	14.3	14.6	13.9	13.7	13.3	11.2	8.9	7.5	7.1
Temperatura mínima absoluta (°C)	-1.4	-0.4	0.7	6.7	8.1	10.2	9.1	8.6	5.9	1.8	0.0	-1.4	-1.4
Precipitación total (mm)	15.3	8.8	3.6	15.2	42.8	95.4	130.8	84.9	70.1	40.4	9.9	10.3	527.5

Figura 2. Parámetros climáticos promedio de la ciudad de Santiago de Querétaro (Servicio Meteorológico Nacional).

## Planteamiento del problema

La carencia de investigación y conocimiento respecto al tema de las rocas de construcción de los centros históricos de importantes ciudades coloniales en México, siendo la ciudad de Santiago de Querétaro, una de ellas, provoca que se lleven a cabo trabajos de restauración de mala calidad, que perjudican la obra arquitectónica y sobre todo su valor histórico.

En otros lugares del mundo como es el caso de Europa, el tema del patrimonio histórico y cultural toma de una manera seria. Y con estricta normatividad medidas y estrategias para no perjudicar la originalidad del monumento y su legado para la humanidad. En México estas actividades se llevan a cabo con personas profesionales que no están familiarizados con el tema y en ocasiones por gente sin preparación académica.

La guía ICOMOS del comité científico internacional de la piedra (ISCS) proporciona un foro para el intercambio de experiencia, ideas y conocimiento en el campo de la conservación de la piedra natural de construcción. El comité se enfoca en facilitar la publicación difusión y presentación de las observaciones del estado del arte en los monumentos y las rocas de construcción.

Esta guía funciona como un estándar mundial para el estudio de las rocas de construcción y de sus fenómenos de intemperismo, además de unificar términos y ayudar a la persona encargada de algún proyecto de restauración a identificar las posibles clases de deterioro concentradas en un monumento histórico.

### ***Objetivo general***

El objetivo general de este trabajo es comprender la naturaleza y el origen de los fenómenos de intemperismo que ocurren en las rocas de construcción del centro histórico de Querétaro, investigando las propiedades físicas y químicas de las mismas, para una mejor evaluación y entendimiento de estos fenómenos y con ello generar estrategias para el mejor cuidado y preservación del patrimonio histórico y cultural de la ciudad.

### ***Objetivos particulares***

- Identificación, descripción y muestreo de los diferentes tipos de rocas.
- Investigación y determinación de la composición mineralógica con base en estudios petrográficos y geoquímicos (Realizados en la Universidad de Göttingen).
- Investigación de las características petrofísicas y geotécnicas de las muestras.
- Análisis de su resistencia al intemperismo.
- Con base en la guía ICOMOS-ISCS 2008 documentar los tipos de deterioro de las rocas.

### Estudios realizados

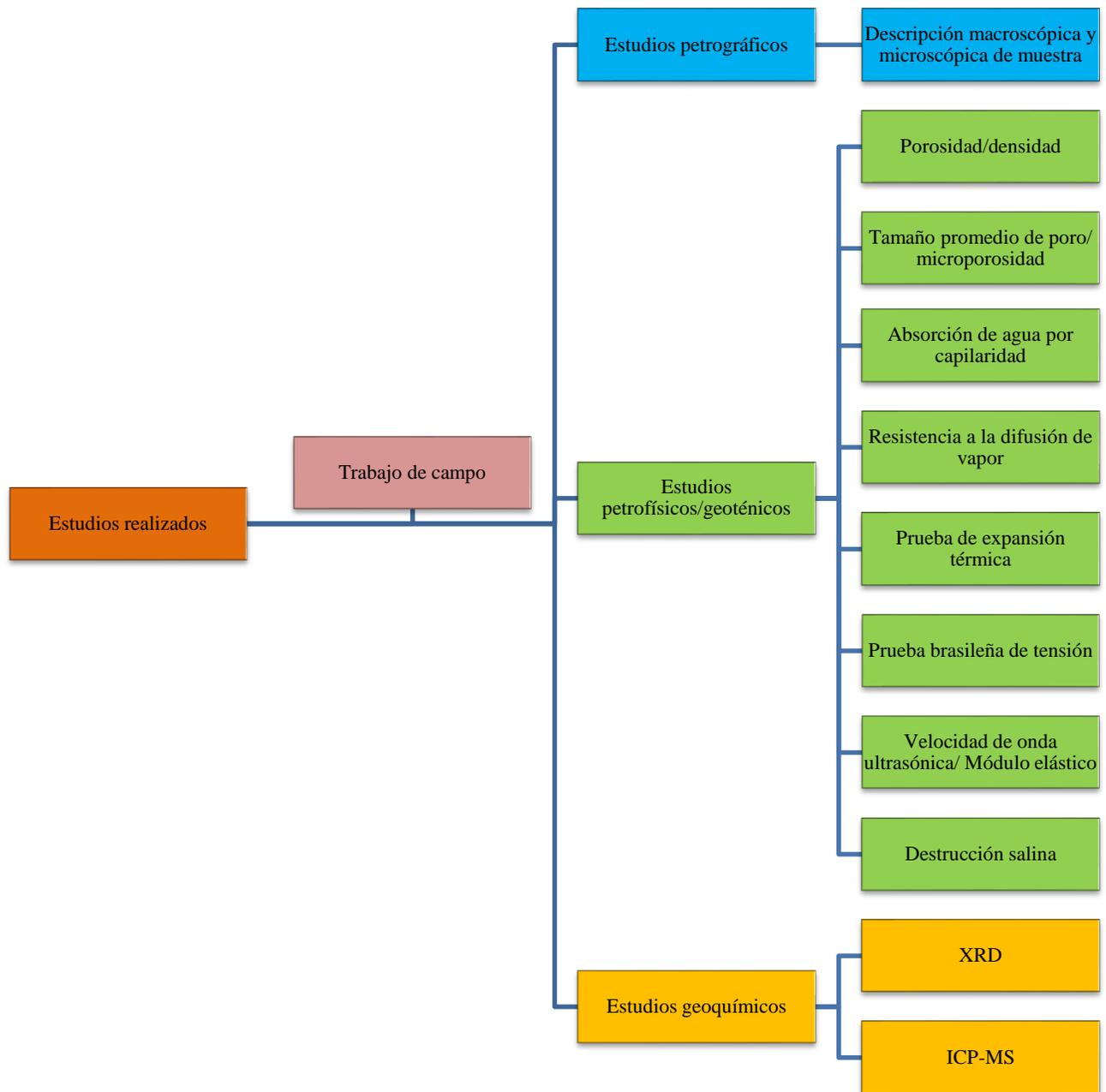


Figura 3. Estudios realizados para esta investigación

# 1 Marco geológico del área de Santiago de Querétaro

## Geología regional

El área de estudio se encuentra en los límites de tres provincias fisiográficas: la Mesa Central, la Sierra Madre Oriental y la Faja Volcánica Transmexicana (Figura 4). La región sur de la Mesa Central pertenece a la porción más suroriental de la Provincia Volcánica de la Sierra Madre Occidental, ya que esta está formada por depósitos de rocas volcánicas félsicas con edades cercanas a los 30 millones de años. Estos principales pulsos de volcanismo y extensión de la Mesa Central están relacionados a incrementos de velocidades del fondo oceánico de la placa Farallón, la cual subducía a la placa Norteamericana (Alaníz-Álvarez *et al.* 2001).

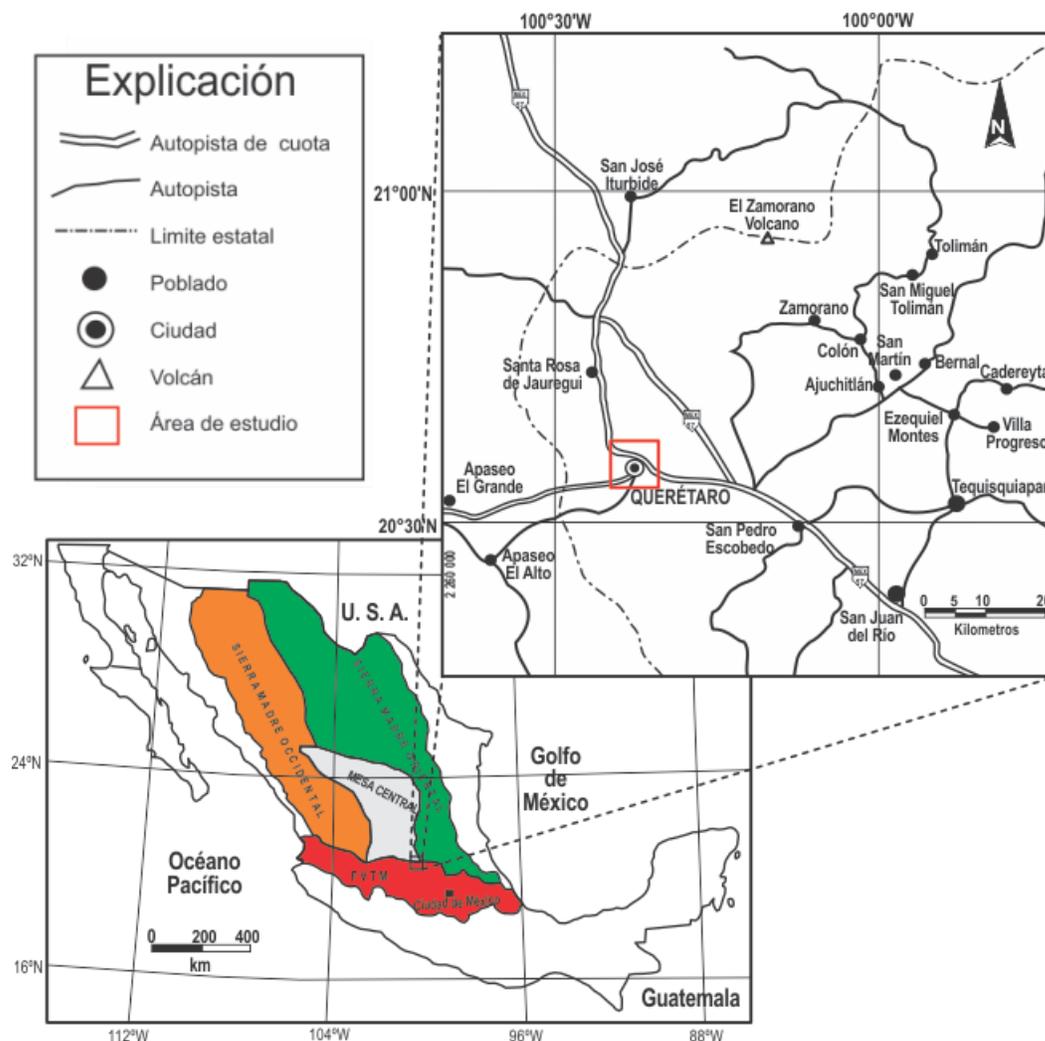


Figura 4. Mapa de las Provincias Geológicas donde se sitúa el área de estudio (Modificado de Aguirre-Díaz *et al.* 2013).

La Sierra Madre Oriental representa el ejemplo más sobresaliente del Cinturón de Pliegues y Cabalgaduras de México (Padilla y Sánchez, 1982; Tristán-González, 2008). La Sierra Madre Oriental está compuesta mayormente por rocas sedimentarias marinas mesozoicas, las cuales se deformaron y acortaron debido a la Orogenia Laramide durante el Paleógeno y con muy poca deformación extensional en el cenozoico (Eguiluz de Antuñano *et al.* 2000; Alaníz-Álvarez *et al.* 2001). La Sierra Madre Occidental se trata de una de las provincias volcánicas silíceas más grandes del mundo, con dimensiones de más de 1200 km de largo y de 200 a 500 km de ancho, se prolonga desde la parte sur de Estados Unidos, entre los estados de Arizona y Nuevo México hasta ser cortada por la Faja Volcánica Transmexicana (McDowell y Clabaugh, 1979; Ferrari *et al.* 1999; Aguirre-Díaz y Labarthe-Hernández, 2003; Arango-Guevara, 2006; Busby, 2008; Aguirre-Díaz *et al.* 2010). Aguirre-Díaz y Labarthe-Hernández (2003) aseguran un espesor ignimbrítico de más de 1000 metros en algunas partes de la sierra basados en secciones medidas en zonas de especial interés y estiman un volumen del material ígneo de alrededor de 393,000 km<sup>3</sup>. Su origen se atribuye a la subducción de la placa Farallón que ocurrió durante el Cenozoico en el occidente de México aunque su mecanismo de formación no ha sido aun claramente entendido (Ferrari *et al.* 1999; Arango-Guevara, 2006; Ferrari, 2004; Busby, 2008). En términos generales, la Sierra Madre Occidental (SMO) es el producto de un evento ignimbrítico colosal (*Ignimbrite flare-up*), que ocurrió en un lapso de 38 a 28 millones de años (Aguirre-Díaz y McDowell, 1991; Aguirre-Díaz y Labarthe-Hernández, 2003 Ferrari *et al.* 2005) y que incluso causó estragos ambientales de escala global en el clima de la Tierra causando una baja en las temperaturas (Jicha *et al.* 2009). La Sierra Madre Occidental (SMO) a su vez fue afectada por la deformación extensional asociada a la Provincia Geológica de Cuencas y Sierras (Basin and Range). Así como desplazamientos laterales en el Bloque de Jalisco (JB) y la SMO durante el Mioceno medio (Pardo y Suarez, 1993; Ferrari *et al.* 1999; Aguirre-Díaz y Labarthe-Hernández, 2003; Arango-Guevara, 2006). Se propone que la generación del vulcanismo silíceo se debió a la subducción de una placa joven, entre los 20 y 10 millones de años, justo antes de la ruptura de la corteza continental que formó el Golfo de California (Ferrari *et al.* 2002; Ferrari, 2004; Arango-Guevara, 2006). La existencia de 2 desprendimientos consecutivos en la placa Farallón ocurridos entre el Mioceo inferior y medio fueron definitivos en el vulcanismo y extensión de la SMO (Ferrari, 2004, Arango-Guevara, 2006).

Con varios fechamientos isotópicos, se estudió entre Celaya y Guanajuato el paso del volcanismo en la zona de transición de la Sierra Madre Occidental a la Faja Volcánica Transmexicana y se documentó que la actividad volcánica se redujo sustancialmente entre los 22 y los 14.6 millones de años (Cerca-Martínez *et al.* 2000; Alaníz-Álvarez *et al.* 2001). También se documentó la evolución de la Sierra Madre Occidental hacia la Faja Volcánica Transmexicana y se mostró que la orientación del eje mayor del arco cambio de NNW-SSE en el Oligoceno-Mioceno a E-W en el Plioceno-Reciente (Ferrari *et al.*, 1999; Alaníz-Álvarez *et al.* 2001).

### *Faja Volcánica Transmexicana*

La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) es un arco volcánico continental activo que atraviesa México desde el Océano Pacífico hasta el Golfo de México con una extensión de 1200 km, y un grosor de 80 km a 230 km formado por la subducción de las placas Rivera y Cocos en la Placa Norteamericana a lo largo de la Trinchera de Acapulco desde el Mioceno medio con actividad volcánica importante durante el Plioceno y Cuaternario (Pardo y Suárez, 1993; Ferrari *et al.* 1999; Ferrari, 2000; Ego y Ansan, 2002; Gómez-Tuena, 2007). Aunque algunos autores proponen modelos alternos que lo asocian a un proceso de *rifting* (Verma, 2002) o con un punto caliente (Márquez *et al.* 1999).

La FVTM no es una cadena volcánica uniforme, pero si una agrupación compleja de campos volcánicos, cada uno con características propias (Aguirre-Díaz *et al.* 1998; Ferrari, 2000; Hernández-Rojas, 2007; Gómez-Tuena, 2007). La actividad de la FVTM ha migrado aparentemente hacia el sur durante los últimos 2 millones de años (Ferrari *et al.* 1999; Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001; Hernández-Rojas, 2007). Por lo tanto la gran mayoría de los volcanes activos están localizados a lo largo del margen sureño del arco incluyendo el Volcán de Colima, el Volcán Parícutín, el Nevado de Toluca, el Volcán Popocatepetl, La Malinche y el Pico de Orizaba (Hernández-Rojas, 2007). Gómez-Tuena, (2007), divide a la FVTM en 3 sectores, el Occidental, El Central, y el Oriental (Figura 5).

El sector occidental está delimitado al este por el *rift* de Colima, el arco volcánico se sobrepone a la parte norte del Bloque de Jalisco (BJ) y al límite meridional de la Sierra Madre Occidental (SMO). El vulcanismo emplazado en el límite sur de la SMOc es claramente bimodal, formado por estratovolcanes y complejos de domos dacíticos-riolíticos, como por

centros monogenéticos basálticos. En cambio, el volcanismo emplazado dentro del BJ es casi exclusivamente monogenético y de composición basáltico-andesítica (Hernandez-Rojas, 2007; Gómez-Tuena; 2007).

En el sector oriental, al oriente del sistema Taxco-Querétaro, la mayor parte del volcanismo está emplazado en grandes estratovolcanes, complejos de calderas y complejos de domos de composición andesítica a riolítica, alineados a lo largo de estructuras corticales; mientras que los volcanes monogenéticos de composición basáltica representan solo una fracción del volumen del magma emplazado (Hernández-Rojas; 2007; Gómez-Tuena, 2007).

El sector central se desarrolla el campo volcánico Michoacán-Guanajuato, integrado por centros monogenéticos y pequeños volcánes en escudo, de composición basáltica a basáltico andesítico. Los estratovolcanes están completamente ausentes a excepción del Cerro Tancítaro. En el sector central, entre los 99° a 103°, longitud W, se tiene mayor número de calderas identificadas en esta provincia (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001, Hernández-Rojas, 2007; Gómez-Tuena;2007). Según Aguirre-Díaz y López-Martínez (2001), las calderas (en orden de mayor lejanía de la trinchera ) son: Amazcala, (7-6 Ma), Apaseo (7-6 Ma), Huichapan (5-4 Ma), Agustinos (5-4 Ma), Amealco (5-4 Ma), Macua (4-3 Ma), Muerta (¿ Ma), Catedral (6-5 Ma), Azufres (4-3 Ma), la mayoría de la calderas tienen un periodo de actividad de 1 Ma, a excepción de la de los Azufres y Zitácuaro que aún tienen actividad.

La mayoría de estas calderas termina con el emplazamiento de domos de lava post-caldera y flujos piroclásticos asociados (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001, Hernández-Rojas, 2007). Para este trabajo solo se profundizará más en las calderas de Amazcala y Amealco, que son las que generaron las rocas que se utilizaron y se utilizan mayormente en las construcciones del Centro Histórico de Santiago de Querétaro.

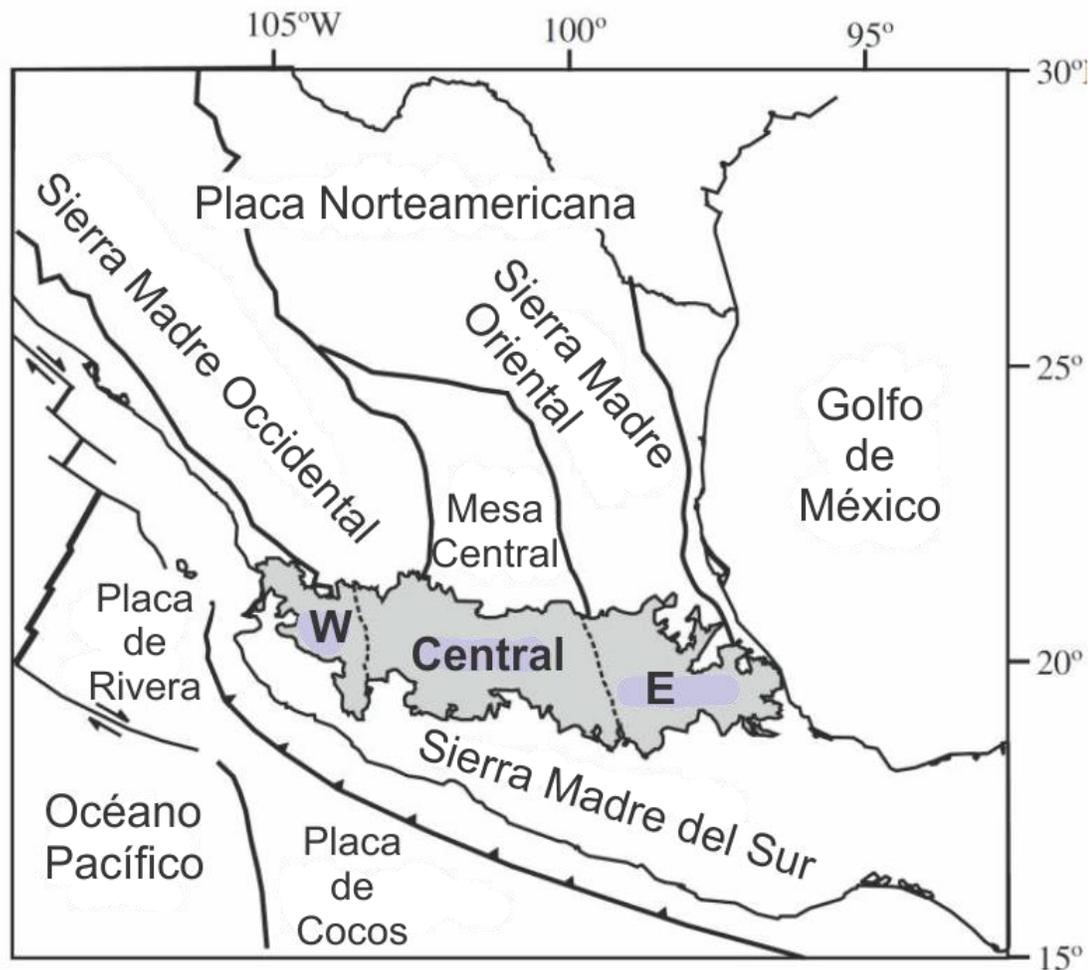


Figura 5. Faja Volcánica Transmexicana dividida en 3 sectores. (Modificado de Gómez-Tuena, 2007).

### ***La Caldera de Amazcala***

La Caldera de Amazcala se localiza a 30 km al NE de la Ciudad de Querétaro (Figura 6). Esta caldera forma parte de las calderas localizadas en el sector central de la FVTM. Esta caldera se localiza a 480 km de la Trinchera de Acapulco, además de ser la caldera más adentrada al continente en el sector central del Cinturón Volcánico Mexicano (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001).

### Edad de la Caldera de Amazcala

Con una edad de 7.3 a 6.6 Ma, datada con el método  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ , se considera como la caldera más antigua de la FVTM. Lo cual indica una migración general del vulcanismo hacia el sur (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001). Con depósitos ampliamente distribuidos de pumicita, ignimbritas, y lavas riolíticas de gran volumen que se generaron en este centro volcánico, son de gran importancia para el entendimiento y la distribución del vulcanismo silíceo en esta porción del Cinturón Volcánico Mexicano (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001; Hernández-Rojas, 2007).

### Geología de la caldera de Amazcala

La caldera tiene una forma elíptica, con dimensiones de 11 x 14 km de diámetro, con su eje principal orientado al NE (Figura 7). La caldera erupcionó depósitos amplios de pómez de caída que se extendieron al menos 35 km de la caldera al este-sureste y al oeste-suroeste. Los productos también incluyen ignimbritas, domos de borde de caldera y un domo central. Estas unidades caldericas, sobreyacen ignimbritas y lavas oligocénicas de la SMO.

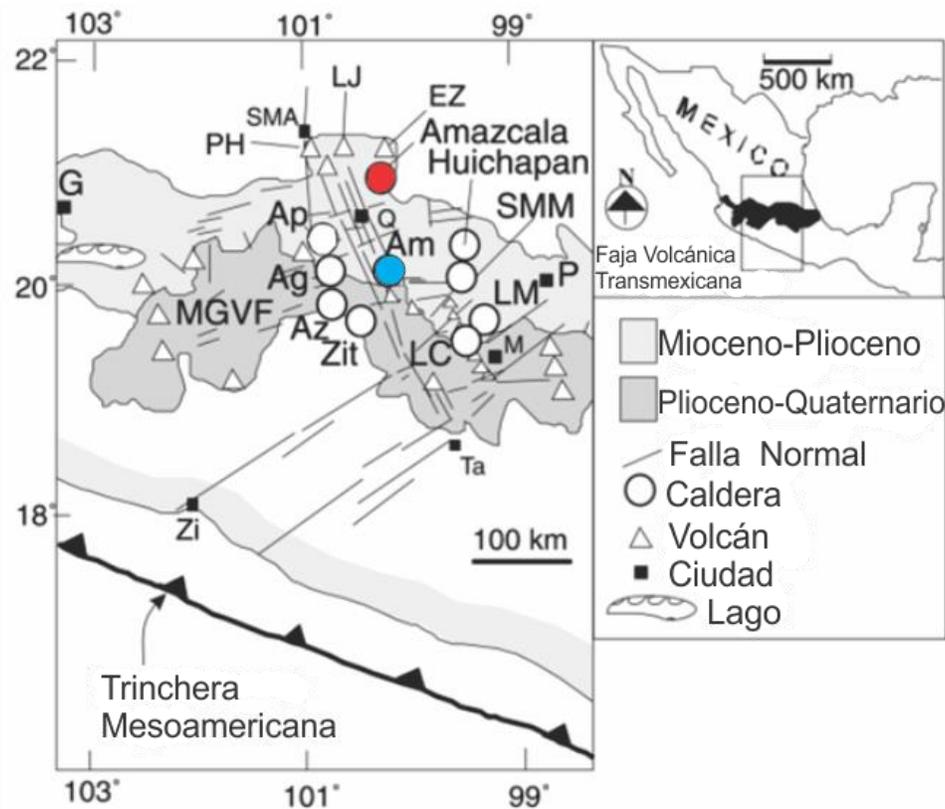
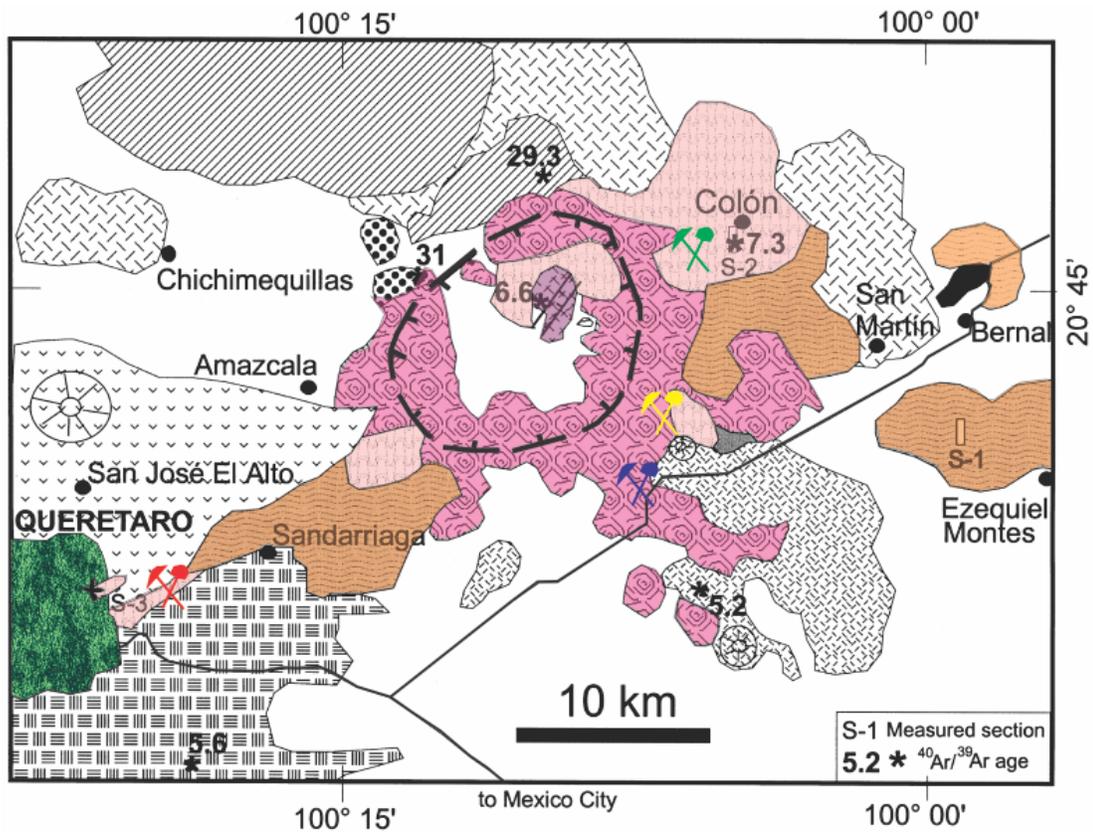


Figura 6. Localización regional de la Caldera de Amazcala (representada con color rojo) en el Sector Central de la FVTM. Con color azul, La Caldera de Amealco (Modificado de Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001).



**Unidades de la caldera**

- Domo de lava central
- Domos de lava del borde
- Ignimbrita Colón
- Ignimbrita Ezequiel Montes
- Cantera Las Palmas
- Cantera Tierra Dura
- Cantera "Trozo sillar" Colón
- Cantera Cañada del Marqués

**Explicación**

- Ciudad, Pueblo
- Autopista
- Aeropuerto +
- Graben
- Volcán ☀
- Borde de caldera

Figura 7. Mapa geológico de la región de la caldera de Amazcala (Modificado de Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001).

Esta unidad consiste de una secuencia gradada de depósitos de caída de pumicita. Su amplia distribución estos depósitos representan un buen marcador de horizontes estratigráficos. Su localidad tipo se encuentra a las afueras de la localidad de Ezequiel Montes, en canteras que exponen la sección más gruesa conocida de esta secuencia piroclástica de 32 metros. Existen registros de pozos donde la unidad tiene un espesor de 43 metros. Aguirre-Díaz y López-Martínez (2001), describen esta unidad compuesta de *lapilli* y cenizas intercaladas de color gris suave con depósitos de tipo *surge*. Esta unidad tiene una edad de 7.5 a 7.3 Ma (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001).

### *Ignimbrita Colón*

La Ignimbrita Colón incluye una sucesión de unidades de flujo gradados. Está en su mayoría cubierta por rocas volcánicas más jóvenes o de aluvión del Valle de Amazcala-Ezequiel Montes. La ignimbrita Colón fue mayormente depositada al este y noreste de la caldera, donde la secuencia alcanza hasta 80 metros de espesor sin exponer su base en su localidad tipo muy cerca de la población de Colón. Más alejados de la fuente estos depósitos son encontrados al oeste de la caldera. Esta secuencia fue producida probablemente durante las fases culminantes del colapso de la caldera como resultado de la salida del voluminoso magma de la cámara magmática de la subcaldera (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001). Aguirre-Díaz y López-Martínez (2001), describieron esta unidad de pobremente a muy soldada con muy baja relación de aspecto y con cada unidad de flujo de 2-5 m de espesor, generalmente formando unidades de enfriamiento o ignimbritas gradacionales. Esta ignimbrita es de color blanco a amarillo pálido, con abundante pómez y matriz arenosa, muy pobre en cristales de cuarzo y sanidino. Estos investigadores datan esta unidad en  $7.3 \pm 0.2$  y  $7.6 \pm 0.1$  Ma utilizando el método de  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ . Más alejados de la fuente hacia el oeste, existen varias mesetas con esta unidad, por ejemplo en donde se encuentra el aeropuerto internacional de Querétaro, esta unidad está soldada densamente y tiene un espesor de 2 a 10 m con diaclasas verticales. Posiblemente, esta unidad de flujo fue relativamente más caliente que los que produjeron a la Ignimbrita Colón, la cual esta pobremente soldada a pesar de su gran espesor. Esta unidad también aflora en el sector de la Cañada del Marqués en donde muestran diaclasamiento columnar fuerte. Arango-Guevara, (2006, 2007). Describió a esta unidad en este sector como una roca de matriz arenosa con pocos cristales. Este autor también

hace mención que mucho del adoquín que recubre las calles del centro histórico de Querétaro ha sido extraído de esta unidad, lo cual se corrobora con esta investigación.

### *Domos del borde*

Algunos domos fueron emplazados a lo largo de las fracturas del borde de la caldera, formando el borde de la caldera, son de poca altura y con formas planas. Algunos domos tuvieron erupciones pequeñas con flujos de lava cortos. Otros domos y flujos de lava aun preservan obsidiana fresca como flujos bandeados. Localmente, los domos muestran alteración hidrotermal intensa, la cual causó oxidación y argilitización. Las riolitas son de color blanco a amarillo pálido cuando no se muestran alteradas, y mayormente desvitrificadas. La foliación concéntrica y la textura de flujo son comunes en estos domos. Debido a su bajo contenido de cristales no se pudo obtener una datación de esta roca. Estratigráficamente los domos sobreyacen a la EMP y a la Ignimbrita Colón (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001).

### *Domo central*

Es un domo de lava de composición riolítica de 4 X 2 km<sup>2</sup> que se emplazó dentro de la caldera. Este domo se localiza cerca de la pared noreste de la caldera fuera del centro de la caldera. Tiene forma elongada en una dirección NE y es de cima plana, con lomas formando márgenes verticales formadas por flujos de riolita diaclasados. Un grabado pequeño orientado hacia el NE desplazó la parte central del domo. El grabado tiene la misma orientación que el eje mayor de la caldera. Este domo está un poco más enriquecido en cristales que los domos de los bordes de la caldera. La riolita es de amarillo pálido y blanco y contiene sanidino y cuarzo de un 5 a 2 %. Gracias a ello esta riolita se pudo datar por el método <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar con sanidino, obteniendo una edad de 6.6 ±0.3 Ma. El domo corta los depósitos intracaldera y representa el último evento volcánico de la caldera de Amazcala (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001).

## ***Canteras de rocas dimensionables de la caldera de Amazcala***

### *Cantera Trozo Sillar*

Esta cantera se localiza a las afueras del poblado de Colón (Figura 6). En esta cantera se explota la Ignimbrita Colón descrita por Aguirre-Díaz y López-Martínez (2001). Estos bancos de material son famosos por la explotación y localmente conocidos como “Sillar

Trozo” o “Trozo”. La muestra analizada se recolectó de este lugar y se le asignó la clave WT1 (Figura 8A y 8B). Esta ignimbrita es muy popular en las construcciones modernas y se prefiere por su peso ligero y sencillo método de extracción del depósito.



Figura 8. A) Ignimbrita Colón explotada para la producción de sillar. Se recolectó un bloque muestra al cual se le denominó WT1. B) Vista de la cantera, la cual tienen impresionantes dimensiones. Se localiza en las afueras de la localidad de Colón.

### Cantera las Palmas

La Cantera Las Palmas se encuentra en el camino a la comunidad de Las Palmas, en el municipio de Colón. Esta cantera de acuerdo con el mapa de Aguirre-Díaz y López Martínez (2001), se encuentra sobre la región de los domos del borde de la Caldera de Amazcala. Estas rocas son explotadas por habitantes de esta localidad como actividad primaria. En esta zona se recolecto la muestra LPW1 (Figura 9 B). y LPR1 (Figura 9 C).



Figura 9. A) Hombres trabajando en una de las canteras en la comunidad de Las Palmas. B) Pedacería de la cantera blanca de Las Palmas (LPW1). C) Extracción de la cantera roja de Las Palmas (LPR1).

### *Cantera de Tierra Dura*

La Cantera Tierra Dura se encuentra ubicada a orillas de la comunidad de Tierra Dura en el municipio de Colón. De esta cantera se extrae la Cantera Blanca de Tierra Dura (TDW1). De este banco de material se obtuvo la muestra a estudiar (Figura 10). De acuerdo con el mapa de Aguirre-Díaz y López-Martínez (2001). Esta cantera se encuentra ubicada en los domos riolíticos del borde de la Caldera de Amazcala. La cantera de las Palmas y la de Tierra Dura están muy cerca una de la otra.



**Figura 10.** Cantera típica de la comunidad de Tierra Dura de donde se extrae la Cantera Blanca de Tierra Dura (TDW1).

### *Cantera de la Cañada del Marqués*

Esta cantera se encuentra ubicada a las afueras de la localidad de La Cañada en el Municipio del Marqués al este de la Ciudad de Santiago de Querétaro y al oeste de la Caldera de Amazcala. En esta localidad se extrae la Ignimbrita Colón miembro soldado de color rosa, y amarillo característica de ser la roca más utilizada para el adoquinado de las calles del centro

histórico de Santiago de Querétaro. La muestra color rosa se le denominó TRCQ1 y la amarilla TQGec1 (Figura 11A y 11B).



Figura 11. A) Cantera de la localidad de la Cañada del Marqués donde se extrae la Ignimbrita Colón (Miembro soldado; en este trabajo conocida como ignimbrita rosa de La Cañada y en la esquina inferior izquierda se encuentran bloques de la ignimbrita amarilla de La Cañada). B) Artesano labrando un bloque para adoquín a mano; estos adoquines son los que recubren las calles del centro histórico de Querétaro.

## La Caldera de Amealco

La Caldera de Amealco es un centro volcánico, de casi 11 km de diámetro, localizado en la porción central de la FVTM (Figuras 6 y 12) (Aguirre-Díaz, 1996). Esta caldera se encuentra a 400 km de distancia de la Trinchera de Acapulco. Es una de los 5 complejos de caldericos que ocurrieron a lo largo de esta porción de la FVTM (Aguirre-Díaz, 1996). Las otras son las calderas de la Primavera, Huichapan, Mazahua y los Humeros (Aguirre-Díaz, 1996).

Figura 13. Mapa de localización de la caldera de Amealco y en el cual se muestra la distribución de la

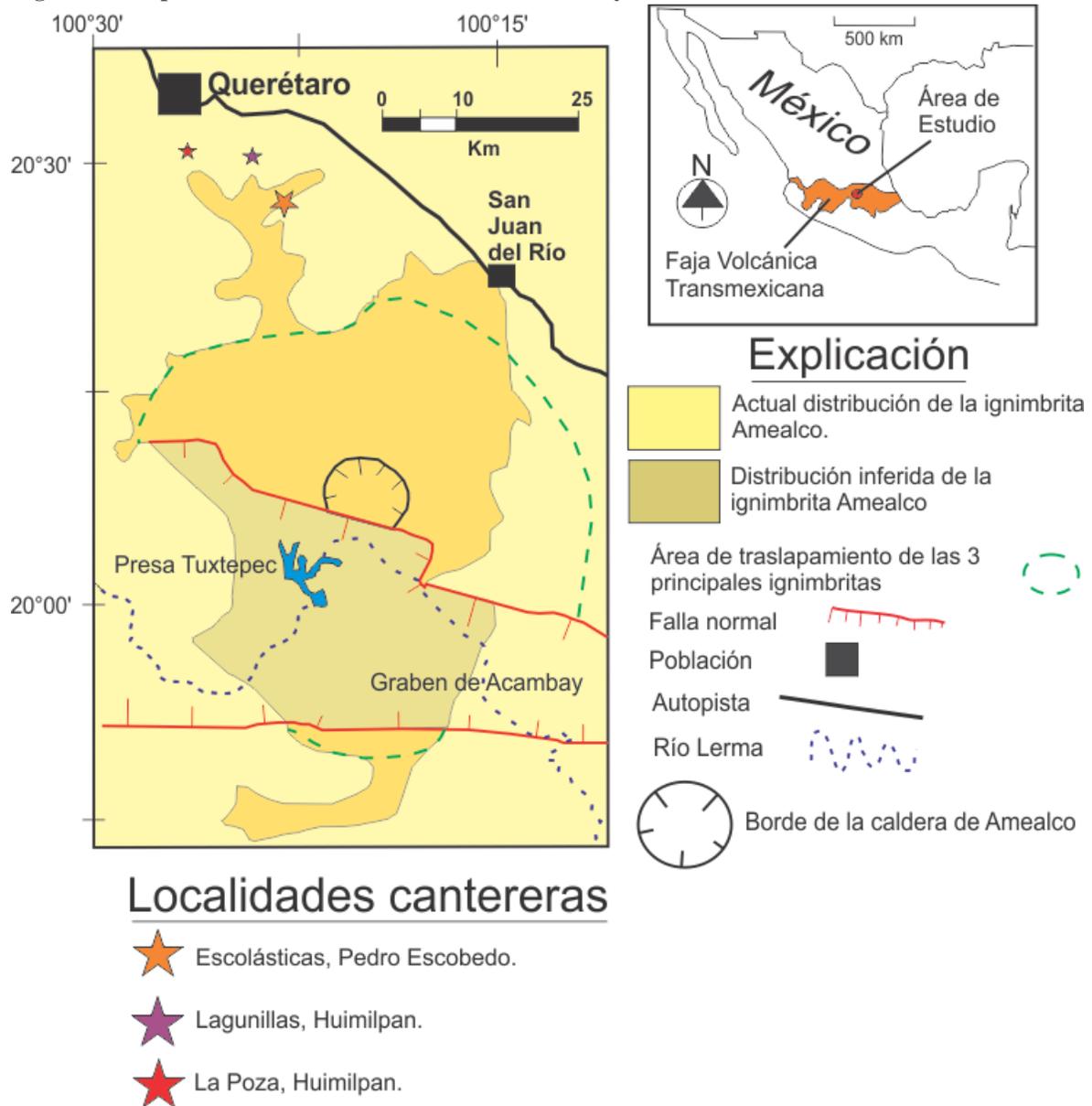


Figura 12. Ignimbrita Amealco. Sobre el mapa se representaron algunas zonas cantereras. (Modificado de Aguirre-Díaz, 2001).

### *Edad de la Caldera de Amealco*

Aguirre-Díaz (1996), utilizando el método de datación K-Ar, pudo determinar una edad de  $4.7 \pm 1$  Ma como inicio de la actividad volcánica de la caldera llegando a su fin en 3.7 Ma.

### ***Unidades utilizadas como rocas dimensionables de la Caldera de Amealco***

#### *Toba Amealco*

La toba Amealco consiste en un amplio depósito ( $> 2880$  km<sup>2</sup>) que va desde composiciones traquiandesíticas hasta riolíticas en la porción central del Cinturón Volcánico Mexicano que fue erupcionado de la caldera de Amealco hace  $4.7 \pm 0.1$  Ma (Aguirre-Díaz, 2001). Este depósito incluye 4 paquetes ignimbríticos diferentes. Aguirre-Díaz (2001) indica que cada uno de ellas muestra *mingling* complejo de fragmentos de pómez y matriz de composición andesítica hasta riolítica las cuales son evidencia de mezcla de magmas o *mingling* según el autor.

La toba Amealco está dividida en 4 unidades ignimbríticas importantes. Aguirre-Díaz (2001) les asigna los nombres de Amealco Cero; El cual es un depósito local con un volumen de densidad de roca equivalente de  $0.75$  km<sup>3</sup>, Amealco I, II, y III con volúmenes equivalentes de roca densa (DRE) de  $8.7$ ,  $11.1$  y  $13.8$  km<sup>3</sup>, respectivamente. También argumenta que si se considera la asociación de depósitos piroclásticos de tipo *surge* y de caída de la toba Amealco, los respectivos volúmenes de roca densa equivalente son de  $20.7$ ,  $32.3$ , y  $24$  km<sup>3</sup>, respectivamente, para un mínimo total de  $77.8$  km<sup>3</sup>, lo cual implica un volumen impresionante de material magmático expulsado de la cámara de la caldera. Cada una de estas unidades tiene un espesor de 3 a 10 m y se extienden por al menos 30 km alrededor de la fuente (Aguirre-Díaz, 2001). Más allá de esta distancia solo una o dos continúan por hasta 45 km de distancia hacia el noroeste. Aguirre-Díaz (2001). Argumenta que es usualmente posible distinguir ignimbritas distales aisladas. Las ignimbritas más gruesas se encuentran generalmente densamente soldadas, con diaclasamiento vertical y en algunos afloramientos estos depósitos son de color gris a gris oscuro y en otros de color rojo, debido a la oxidación ocurrida durante las fases de vapor. Esta descripción corresponde con un afloramiento en la barranca de Escolásticas y cerca de una cantera en la carretera estatal Querétaro-Huimilpan en la localidad de La Cantera municipio de Huimilpan, y también coincide con la descripción

de Dávalos-Álvarez *et al.* (2005). En la cual describe que esta unidad intemperisa en tonos rojizos (Figura 14 A y B).

Cada uno de estos piroclásticos está separado de la ignimbrita sobreyacente por discordancias erosionales las cuales están acompañadas de depósitos de sedimentos lacustres, depósitos de tipo *surge*, de caída, y paleosuelos; los cuales indican intervalos de tiempo significantes entre cada uno de los paquetes ignimbríticos (Aguirre-Díaz, 2001). La pómez de diversos colores



**Figura 14.** A) Fotografía de la Ignimbrita Amealco con cima intemperisada y calichosa. B) Pómez negra presente en matriz oxidada.

están dispersas a través de cada depósito, aparentemente sin orden alguno, pero en algunos afloramientos se puede notar zoneamiento vertical donde Aguirre-Díaz (2001) señala la existencia de vidrio de composición riolítica en las partes basales, y hacia la cima vidrio de composición andesítica y dacítica.

Las pumicitas negras predominan, haciendo más de 40% de cada ignimbrita con fragmentos muy largo de más de 40 cm de longitud en las partes superiores de cada unidad. La pómez blanca hace menos de 20 % en la base de los depósitos, y menos de un 5% en la cima de los depósitos.

Las pumicitas blancas están generalmente más comprimidas que las pumicitas negras que durante el

soldamiento y la compactación se comportan diferente a la misma temperatura de soldamiento, esto va ligado probablemente a las diferencias en composición de las pómez (Aguirre-Díaz, 2001).

La mineralogía es la misma en los tres grupos mayores de la ignimbrita Amealco aunque Aguirre-Díaz (2001) reporta que el contenido de cristales se incrementa de la Amealco I a la Amealco II, a la Amealco III, tanto en facies proximales como en distales (Figura 15).

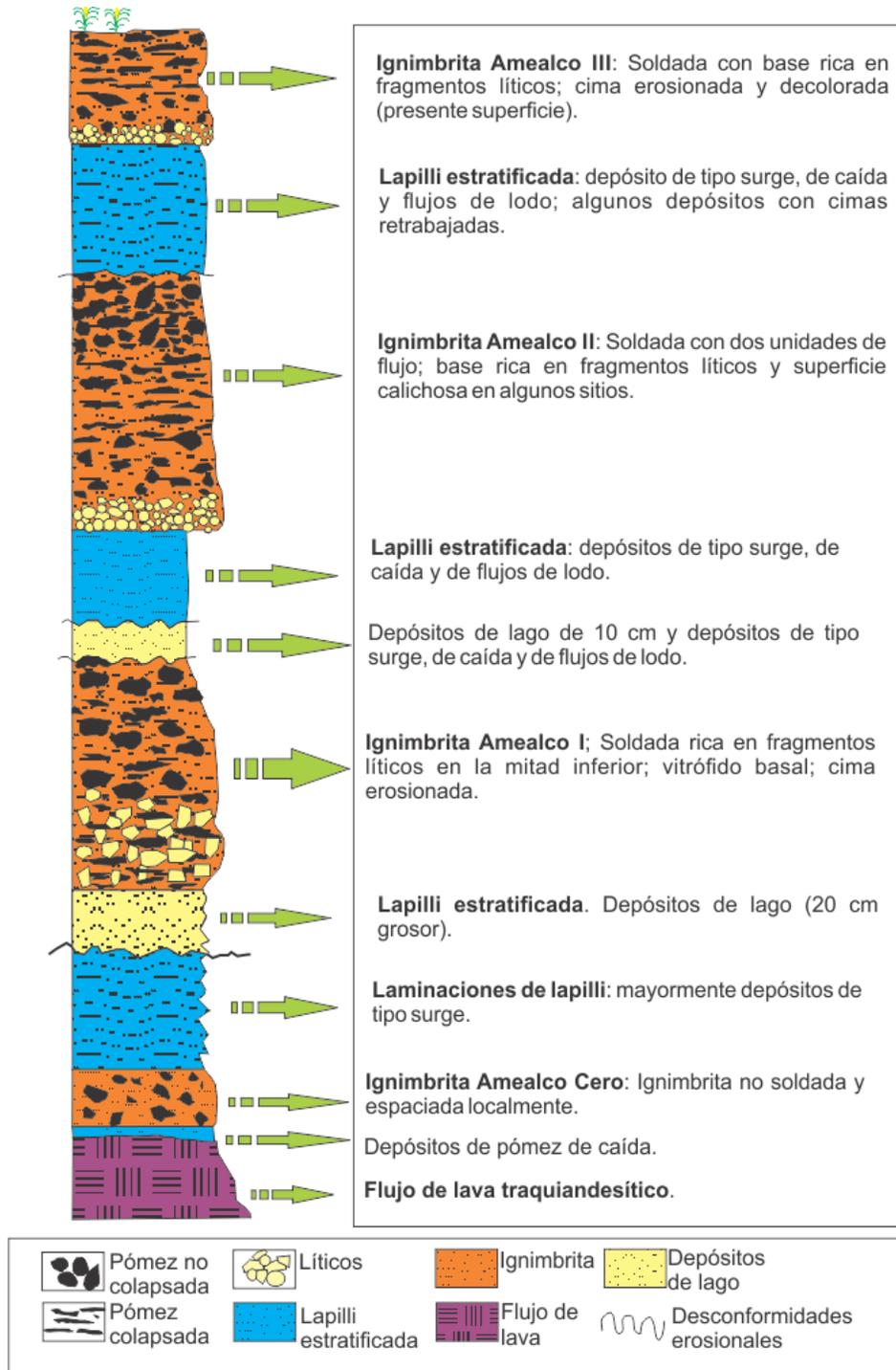


Figura 15. Sección idealizada de la Ignimbrita Amealco. La sección muestra las 4 unidades de tobas Amealco. (Tomado y modificado de Aguirre-Díaz, 2001).

Se menciona que las ignimbritas Amealco están compuestas mayormente de fragmentos de vidrio con proceso de *mingling* con composiciones diferentes desde basalto-andesítica hasta vidrio de composición muy riolítica. En este trabajo se le asignó el nombre ignimbrita Escolásticas Negra (BT1), solo para fines prácticos por la localización de la cantera de donde se extrae y por su color característico pero pertenece a la unidad formalmente descrita como toba Amealco.

### *Ignimbrita Huimilpan*

Dávalos-Rodríguez *et al.* (2005) mencionan que existe la presencia de una unidad informalmente descrita como Ignimbrita Huimilpan, y solo se menciona que es una roca piroclástica de coloraciones rosadas y amarillas, soldada y de composición félsica y pobre en contenido de cristales de cuarzo y feldespato, e indican que esta unidad aflora principalmente en la porción central de la región de Huimilpan, además de ser la roca más joven de la región que cubre a la unidad de la toba Amealco y que el espesor de la unidad varía de 5 a 10 m. Es muy probable que la Ignimbrita Escolásticas Gris (TGQ1) y las Ignimbritas Roja y Amarilla de Huimilpan (TRH1 y TAH1) descritas en este trabajo pertenezcan a esta unidad y por lo tanto que la caldera de Amealco haya sido su fuente.

Aguirre Díaz (2009) redactó un breve resumen, en el cual menciona que la localidad tipo de la Ignimbrita Escolásticas, se encuentra ubicada en la población canterera de Escolásticas, sitio reconocido por la piedra cantera que ahí se extrae y por las piezas de piedra ornamental que labran los habitantes de ese lugar. Menciona que esta ignimbrita fue emitida por el colapso de la caldera de Apaseo ubicada a 30 km WNW de la población de Escolásticas hace aproximadamente 6 Ma. La descripción hecha por él, concuerda con la realizada en este trabajo, sobre el color gris a gris oscuro de la roca, su depósito masivo y su textura afanítica son concordantes. Sin embargo, los estudios geoquímicos de elementos traza, descritos en el Capítulo 4 arrojan luz sobre el posible origen calderico de estas muestras, aunque la intención de este trabajo no sea la de llegar al fondo del origen geológico de las muestras, si pretende abrir pauta a una mayor investigación geológica sobre estas unidades y definir las de manera formal.

### ***Localidades cantereras en la Caldera de Amealco***

Las muestras se recolectaron en las localidades cantereras ubicadas en la caldera de Amealco, principalmente en las canteras de la comunidad de Escolásticas (Figuras 16, 17 y 18), en el municipio de Pedro Escobedo y en las comunidades de Lagunillas (Figura 19), la Cantera (Figura 20), y la Poza ubicadas en el municipio de Huimilpan al norte de la caldera, y al sur de la ciudad de Querétaro. En las canteras de Escolásticas se recolectaron las muestras TGQ1 y BT1 y que para este trabajo se le asignó el nombre con base en su coloración. La muestra con color gris se definió como la Ignimbrita Escolásticas Gris y la de color negro como Ignimbrita Escolásticas Negra. De la comunidad de Lagunillas y La Poza se extrajeron las muestras Ignimbrita Roja y Amarilla de Huimilpan.



**Figura 16. Artesanías de la comunidad canterera de Escolásticas**



**Figura 17. Comunidad Escolásticas, barranca sur en donde se encuentra la zona de canteras.**



**Figura 18. Bloque y cantera ignimbrita negra, Escolásticas (Ignimbrita Amealco III).**



**Figura 19. Banco de canteras la Lagunillas, Humilpan.**



**Figura 20. Banco de piedra en la comunidad de La Cantera, Huimilpan.**

## 2. Estudios geológicos, petrográficos, geoquímicos y geotécnicos

### *Análisis petrográficos*

Para determinar las propiedades petrográficas de las muestras de roca, se prepararon secciones delgadas. Estas fueron analizadas con el microscopio de luz polarizada de la marca *Leica* para determinar su composición mineralógica y sus propiedades estructurales. Las rocas se clasifican en términos del esquema correspondiente a su composición. Con una cámara fotográfica marca *Leica* montada en el microscopio se realizaron las fotografías correspondientes a cada muestra. Para la clasificación mineralógica se utilizó el diagrama de Streckeisen (1978), para rocas volcánicas extrusivas (Figura 21).

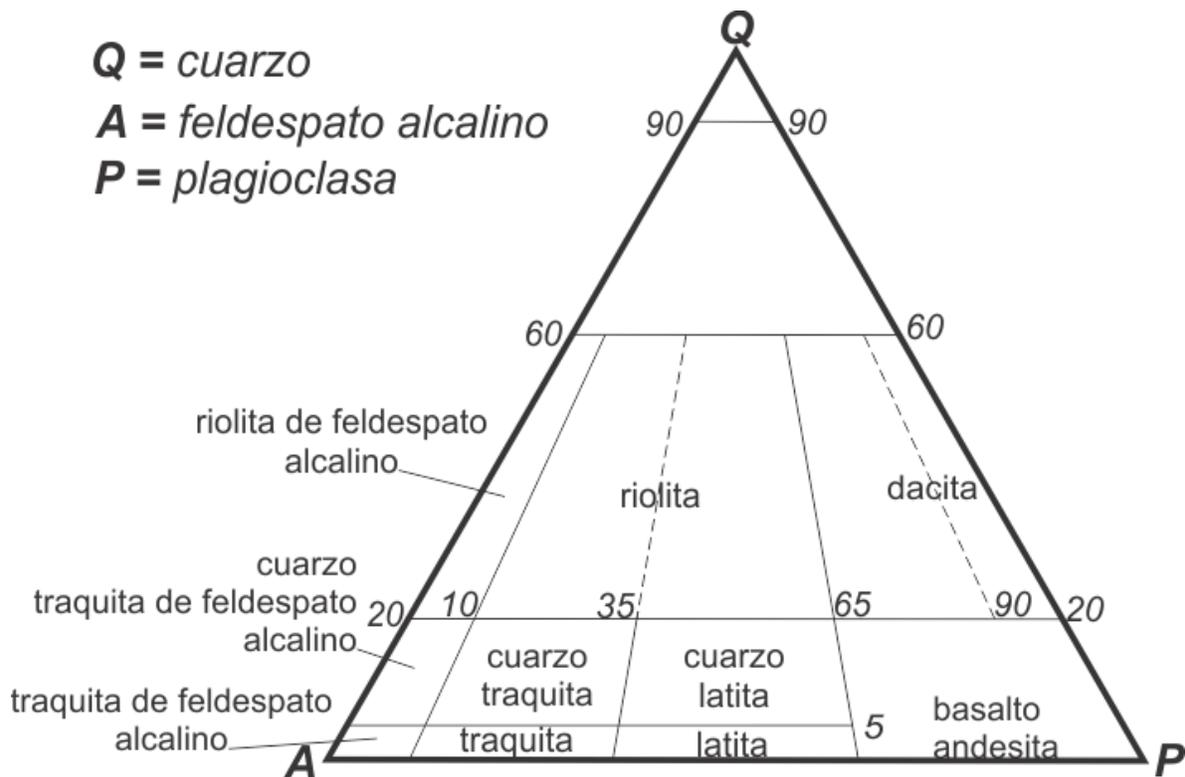


Figura 21. Diagrama de Streckeisen (1978), para clasificación de rocas volcánicas extrusivas (Tomado y modificado de Le Maitre, 2002).

## Análisis petrofísicos/geotécnicos

### Preparación de muestras

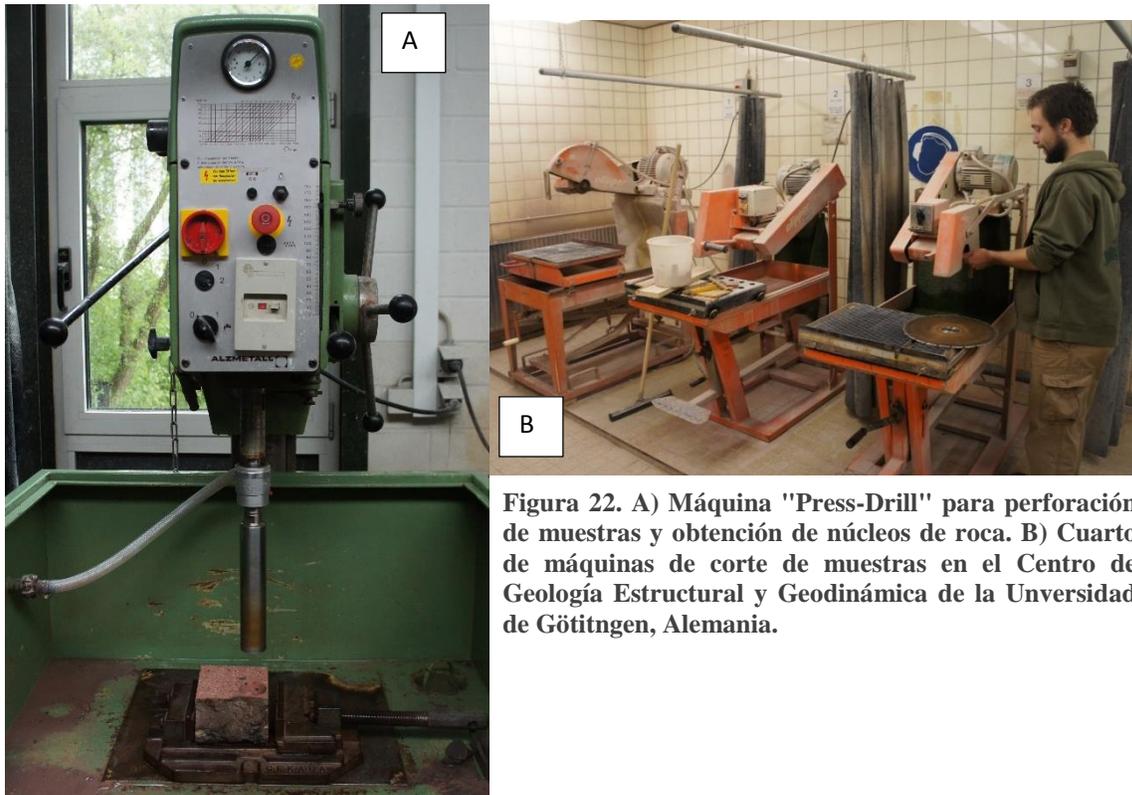


Figura 22. A) Máquina "Press-Drill" para perforación de muestras y obtención de núcleos de roca. B) Cuarto de máquinas de corte de muestras en el Centro de Geología Estructural y Geodinámica de la Universidad de Göttingen, Alemania.

En la Tabla 1, se muestra cuales especímenes son utilizados de acuerdo con los estándares establecidos por el Instituto Alemán de Normatividad (DIN-Normen). En este trabajo se realizaron mediciones perpendiculares y paralelas a la estratificación (X, Y, Z, Figura 23) para determinar cualquier anisotropía en cada prueba. Para mayor facilidad de manejo de las muestras se designa un color para cada dirección a medir, rojo para "X", Verde para "Y" y azul para "Z". Cada dirección debe medirse al menos seis veces por muestra para obtener un resultado estadísticamente confiable y para alcanzar los estándares de calidad establecidos en la DIN. Debido a la escasez de algunas de las muestras y a algunas de sus propiedades no fue posible prepararlas en cada dirección. Para las muestra de la Ignimbrita Colón (WT1) no fue posible extraer los cilindros debido a la fragilidad de la roca. Solo se pudieron calcular algunas de sus propiedades. Al igual para las muestras de La Palma (LPW & LPR) y Tierra Dura (TDW) solo fue posible el estudio de algunas de sus propiedades debido a la escasez de muestra durante su preparación.

Los cubos se cortaron con una medida preferente de 6.5 cm de cada lado (Figura 22 B). Los cilindros fueron hechos con diámetros y alturas diferentes dependiendo de la prueba o experimento al que se someterían utilizando una máquina Press Drill con barrenas huecas de diamante (Figura 22 A). Las longitudes en las muestras preparadas pueden variar unos cuantos milímetros sobre las medidas y tamaños establecidos en la norma (Tabla 1), esto es debido al tipo de roca y que tan bien están preparadas (Platz, 2014).

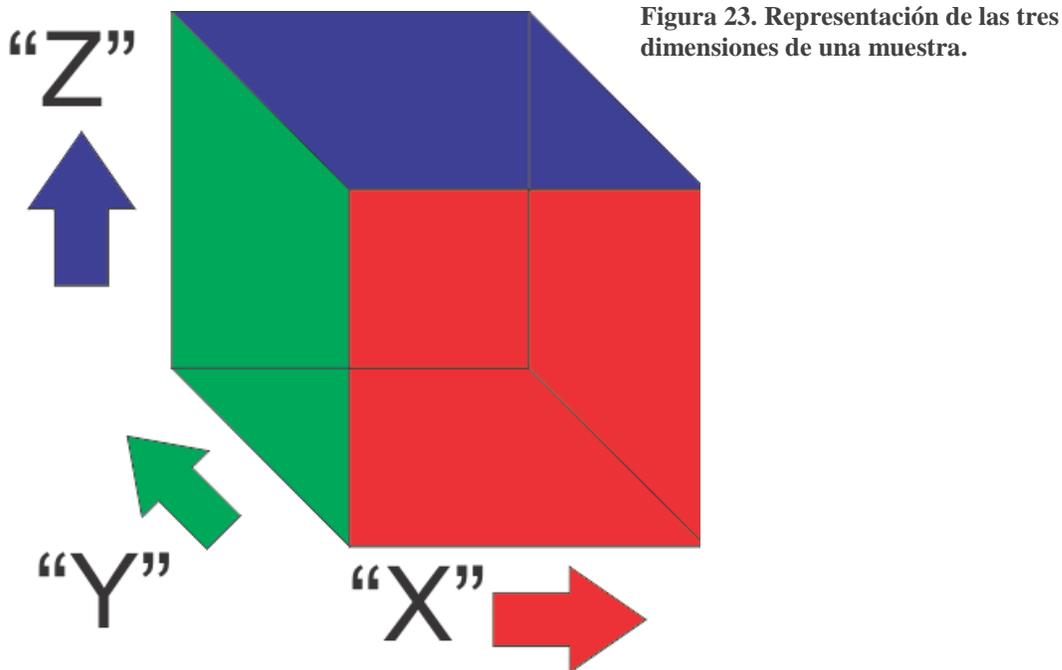


Tabla 1. Medidas y formas de las muestras para los respectivos experimentos según la normativa DIN

Prueba	Forma del espécimen	Dimensiones
Porosidad/Densidad	Cúbo	Lados de 6.5 cm
Distribución de radio de poro	Fragmento de roca	< 1 cm
Absorción de agua por capilaridad	Cúbo	Lados de 6.5 cm
Difusión de vapor de agua	Cilíndro	Diámetro: 40 mm/Altura: 10 mm
Ultrasonido	Cúbo	Lados de 6.5 cm
Destrucción Salina	Cúbo	Lados de 6.5 cm
Resistencia a partición por tensión	Cilíndro	Diámetro: 40 mm/Altura: 20 mm
Dilatación térmica	Cilíndro	Diámetro: 15 mm/Altura: 50 mm
Dilatación hídrica	Cilíndro	Diámetro: 20 mm/Altura: 50 - 100 mm

### *Porosidad-Densidad*

En los procesos de intemperismo, la porosidad de una roca es un factor muy influyente. La porosidad de una roca está definida como el valor resultante del volumen de poros entre el volumen total de la roca (Siegesmund y Dürrast, 2011). La porosidad se determina con base en los cubos de roca preparados de acuerdo con el estándar DIN 772-4. Para llevarlo a cabo, los cubos se colocan en un horno a 60 °C aproximadamente por 24 horas y se obtiene el valor del peso en seco de los cubos. Estos se colocan en un desecador de vidrio refractario (Figura 25), donde se crea un vacío. Después de 24 horas, el desecador se satura con agua destilada. Para asegurar la completa saturación de agua en la muestra, se dejan bajo el agua por un intervalo de tiempo de 24 a 48 horas (Figura 24). Subsecuentemente los cubos se vuelven a pesar y se determina el peso bouyante. De estos valores, se calculan, la porosidad en %, densidad de matriz, la densidad bulk, en g/cm<sup>3</sup>, y la absoción de agua al vacío en porcentaje de peso.



**Figura 24.** Balanza de precisión para obtener los pesos secos, húmedos y sumergidos de las muestras para la prueba de porosidad/densidad.



Figura 25. Bomba de extracción y campana de desecación para la extracción del aire de la muestra y absorción de agua al vacío.

Adicionalmente, se hace una distinción sobre los cuatro diferentes tipos de tamaños de poros: micro, mesoporos, macroporos, (capilares) y poros grandes. Acerca del respectivo radio de poro no hay una definición precisa. Las diferentes interpretaciones del radio de poro se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Distintas definiciones individuales sobre el tamaño promedio de poro (Tomado de Siegesmund y Dürrast, 2011).

	Micropores ( $\mu\text{m}$ )	Mesopores ( $\mu\text{m}$ )	Macropores ( $\mu\text{m}$ )	Large pores ( $\mu\text{m}$ )
De Quervain (1967)	<5	5–200 (fine pores)	200–2,000 (coarse pores)	>2,000
Dubinín (1979)	0.003 to 0.0032– 0.0012 to 0.0014	0.2 to 0.4– 0.003 to 0.0032	<0.2–0.4	
IUPAC (Gregg and Sing 1982)	<0.002	0.002–0.05	>0.05	
Klopfer (1985)	<0.1	0.1–1,000 (capillary pores)	>1,000	
DIN 66131 (1993)	<0.002	0.002–0.05	>0.05	
Kodikara et al. (1999)	1 to 30		10–1,000	

### *Distribución del radio de poro*

La distribución del radio de poro se determina por medio de un porosímetro de mercurio Pascal 440/140 manufacturado por la firma Thermo Scientific, de acuerdo con el estándar DIN 66133. Se hace una distinción entre macro y microporos. Para el experimento, un fragmento de muestra de roca previamente pesado (40g) se coloca en un bulbo de vidrio y subsecuentemente sellado con una tapa de vidrio capilar, el cual se llena con mercurio presurizado. De este modo el mercurio es forzado hacia el interior de los poros. Este arreglo es el primer paso a instalar en el porosímetro Pascal 140, los macroporos son llenados después de la evacuación del mercurio lentamente alcanzando presión atmosférica. Por este medio el volumen de cada tamaño de poro se puede determinar para el espacio total de poros. En un segundo paso, la muestra ahora llena con mercurio, se pesa de nuevo, y enseguida se coloca en el arreglo del porosímetro Pascal 440, el cual es un dispositivo para alta presión. Hay una máxima presión de 400 MPa, la proporción de los microporos se determina (Figura 26). Después los resultados son analizados y se muestra la distribución del radio de poro en un histograma. El cálculo de la distribución del radio de poro se determina mediante la siguiente ecuación (Platz, 2014): Ecuación 1.

#### Ecuación 1

$$r_p = -2\gamma \cos\theta / P$$

Donde,  $\gamma$  = Tensión superficial del mercurio (0.476 N/m)

$\theta$  = Ángulo de humectación

P = Presión de penetración.

Esta ecuación se basa en el principio de que cada radio de poro capilar necesita una cierta presión para forzar un líquido en su interior (Siegesmund y Dürrast, 2011). El líquido no debe de ser humectante, esta es la principal razón para utilizar el mercurio para este tipo de

pruebas, ya que es un líquido que no es humectante en la mayoría de las superficies (Siegesmund y Dürrast, 2011; Platz, 2014).



Figura 26. Porosímetro de mercurio Pascal 440 de Thermo Scientific.

### *Absorción de agua por capilaridad*

Cada material poroso absorbe agua a través de sus poros. En los poros capilares de una roca, el agua contenida dentro de ellos puede ascender y puede contribuir al deterioro (Charola *et al.* 2011). Los poros capilares tienen un diámetro de 10 micrones a 1 mm, por lo tanto, el mecanismo depende del tamaño y la geometría de los poros. Poros más pequeños tienen un poder de succión más alto, pero menor un valor de absorción de agua, mientras más grandes sean los poros capilares, la velocidad de absorción es más alta, pero la fuerza de succión es más baja (Siegesmund y Dürrast, 2011).

El agua sube en contra de la gravedad, siempre y cuando sea en hecho en superficies hidrofílicas. Como sea, en superficies hidrofóbicas, el agua sube. La absorción capilar de agua indica cuánta agua puede ser absorbida en un periodo dado de tiempo en poros capilares. La muestra continuamente absorbe agua, la cual después sube a través de los capilares hasta que el cubo está completamente saturado con agua. El resultado de la absorción capilar se debe de correlacionar con otras propiedades de poro, como lo son, la porosidad y la

distribución de radio de poro. Para expresar la absorción de agua por capilaridad, el llamado *W-Value* (Coeficiente de absorción de agua) es utilizado. El cual toma en cuenta el cambio en peso. El cual nos dirige a la siguiente formula. Ecuación 2.

Ecuación 2.

$$W\text{-Value} \left[ \frac{kg}{m^2 h^{0.5}} \right] = \frac{m_w}{\sqrt{t}}$$

$$\text{Con } m_w = \text{Absorción de agua} \left[ \frac{kg}{m^2} \right]$$

$$t = \text{Tiempo [h]}$$

La determinación de la absorción capilar de agua es realizada en muestras cubicas de acuerdo con el estándar DIN ISO 15148. Para este propósito, estos cubos son sujetos a un dispositivo especial y pesados en una balanza. Por consiguiente se llena un contenedor con agua destilada y este, se levanta con un pequeño elevador y se coloca debajo de la muestra. Se empieza a levantar hasta que el nivel del agua en el contenedor apenas toca la superficie de la muestra. En este punto, la muestra comienza a registrar el peso del agua absorbida (Figura 27). Con el programa “WinWedge” cada cinco segundos un valor es enviado a Excel y esa medición puede ser evaluada, y la absorción capilar de agua máxima y el coeficiente de absorción de agua son relevantes. Dependiendo del tipo de roca toma de dos a veinticuatro horas hasta que el cubo ha alcanzado el valor máximo de absorción. La medición se realiza en una dirección vertical y paralela a la estratificación.

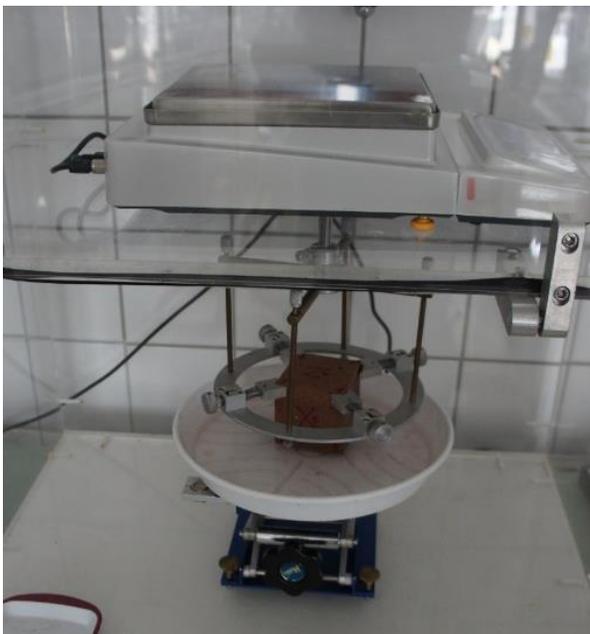


Figura 27. Equipo para la prueba de absorción de agua por capilaridad.

### *Resistencia a la difusión de vapor*

La medición de la resistencia a la difusión de vapor indica cuanta resistencia tiene un material poroso para difundir moléculas de vapor de agua (Siegesmund y Dürrast, 2011). Este resultado es el llamado  $\mu$ -value (Coeficiente de resistencia a la difusión de vapor), el cual se calcula utilizando la siguiente formula. Ecuación 3.

#### Ecuación 3

$$\mu = \delta L \times ps \times \Delta a \times \frac{t}{s} \Delta m$$

Donde,  $\delta L$  = es el coeficiente de difusión de vapor de agua del aire  $\left[ \frac{kg}{Pa \cdot m \cdot s} \right]$

$ps$  = presión parcial del aire [Pa]

$\Delta a$  = Cambios en la humedad del aire

$A$  = Superficie de la muestra [ $m^2$ ]

$s$  = Grosor de la muestra [m]

$t$  = Tiempo de difusión [s]

$\Delta m$  = Cambio en peso [kg]

La difusión de vapor de agua se determina de acuerdo con el estándar DIN ISO 12572. Para el experimento, cilindros delgados de muestra son utilizados (Figura 28). Primero, estos cilindros son colocados en un horno a una temperatura de 20 °C y una humedad del 50%. Las muestras son pesadas por alrededor de cuatro días cada 24 horas hasta que alcanzan un equilibrio. En un segundo paso, las muestras se colocan sobre unos viales de politetrafluoretileno (Teflón) de aproximadamente 7 cm de altura y se llenan con unos 2 cm de agua destilada. Por consiguiente los viales cargados con la muestra y el agua son transferidos a una cámara climática y vuelven a pesarse por los siguientes 5 días cada 24 horas y con esto se determina la difusión de vapor de la muestra (Figura 29).



Figura 28. Charola con muestras cilíndricas para prueba de resistencia a la difusión de vapor.



Figura 29. Cámara climática KPK 600 para realización de la prueba de resistencia a la difusión de vapor.

### *Velocidad de onda ultrasónica*

La velocidad de onda ultrasónica también se mide en muestra con forma de cubo. Para este propósito, un generador de onda ultrasónica se acopla con un osciloscopio, esta se calcula en Km/s y se aplica de manera paralela y perpendicular a las capas. El dispositivo que manda la señal y el que la recibe se colocan en lados opuestos de la muestra (Figura 30) y se utiliza el software “*Lighthouse*” para calcular la velocidad de onda, tomando en cuenta la altura de la muestra y el tiempo determinado ( $V = l / t$ ). Las mediciones se realizan perpendiculares y paralelas a la estratificación de muestra y se repiten 5 veces sobre una superficie, entonces se miden en las 4 esquinas y una en el centro de la superficie.

Con la ayuda de la velocidad de ultrasonido se pueden hacer conclusiones acerca de las propiedades del material que componen las rocas. La velocidad de ultrasonido es influenciada por la humedad y la mineralogía de la muestra. La porosidad afecta la velocidad de onda ultrasónica considerablemente.

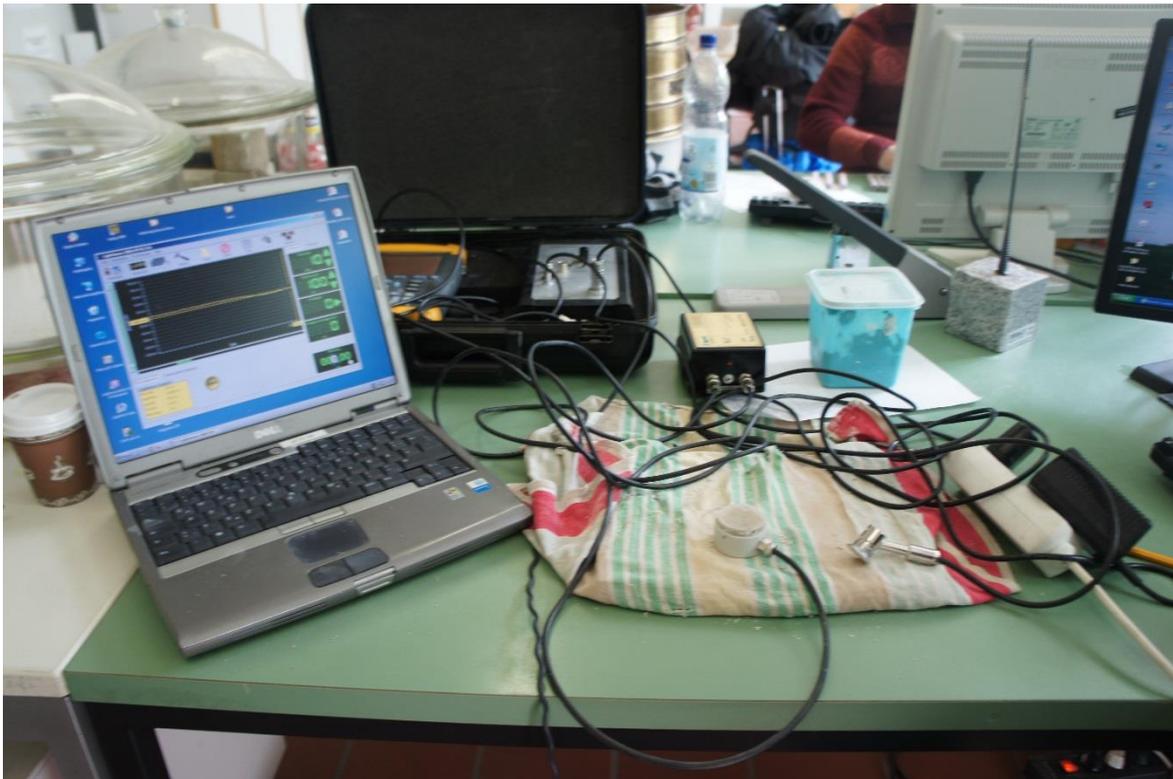


Figura 30. Equipo transmisor de onda ultrasónica, con emisor y receptor de onda.

### *Fuerza de partición por tensión*

La fuerza de partición por tensión de una roca depende de muchos factores. Las características estructurales, tales como el tamaño de grano, el contacto entre los grano, la composición mineralógica y las características del espacio de poro; juegan un papel muy importante. La magnitud de la fuerza de partición por tensión depende de la forma y composición de la matriz (Siegismund y Dürrast, 2011).

Para determinar la fuerza de partición por tensión son necesarios cilindros de muestra de 40 mm de diámetro y 20 mm de altura. Estos son colocados dentro de una prensa hidráulica (Figura 31 A).



Figura 31. A) Prensa hidráulica universal. B) Computadora para el cálculo de la presión ejercida en kilo Newtons sobre la muestra.

Para cada tipo de roca, se miden seis especímenes, siempre y cuando las propiedades de la muestra permitan la preparación para los seis especímenes de prueba.

Aplicando una presión máxima de 50kN en la cilindro de muestra en la Prueba Brasileña (DIN 22024), la fuerza máxima es después determinada cuando se genera el esfuerzo de ruptura por tensión. Las mediciones se realizan de manera perpendicular y paralelas a la estratificación de las muestras y se registran en la computadora del equipo (Figura 31 B). La fuerza de ruptura máxima puede ser calcula utilizando la siguiente formula. Ecuación 4.

#### Ecuación 4

$$\sigma_z = \frac{2 \times F}{d \times l \times \pi} [MPa]$$

$\sigma_z$  = Tensión de ruptura [MPa]

F = Fuerza de rotura [kN]

l = Altura del cilindro [cm]

d = Diámetro del cilindro [cm]

#### *Dilatación térmica*

Para determinar la dilatación térmica se necesitan muestras en forma cilíndrica. Estas se colocan en el aparato correspondiente (Figura 32) con seis dilatómetros. El odómetro esta hecho de vidrio de cuarzo. En un experimento de 14 horas de duración, el dispositivo se calienta hasta una temperatura de 90 ° C y luego es enfriado hasta la temperatura inicial de 20 ° C. la expansión de la muestra utilizando el odómetro se determina y puede ser también evaluada en la terminal, particularmente el coeficiente de expansión es relevante.



Figura 32. Dilatómetro para pruebas de expansión térmica.

### *Dilatación hídrica*

La dilatación o expansión hídrica se refiere al crecimiento de la muestra en un estado totalmente saturado de agua. Para este proceso, seis cilindros de muestra son colocados en vasos de precipitado o en tazas y son saturados en agua. Con el dilatómetro ya colocado en cada uno de los cilindros de una manera muy precisa, la expansión es medida por 24 horas. Los dilatómetros no tocan el agua, entre ellos hay cilindros de cuarzo que hacen el contacto entre la muestra y el dilatómetro.

La siguiente figura muestra la colocación del experimento. Las mediciones para los coeficientes de expansión hídricos y térmicos se llevan a cabo en los ejes X y Z de la muestra. Los transductores de desplazamiento tienen una precisión de 1  $\mu\text{m}$  a una resolución de 0.5  $\mu\text{m}$ .

### *Destrucción salina*

Para estudiar la resistencia de distintos tipos de rocas a la destrucción por sal, los cubos de muestra se impregnan con una solución de  $Na_2SO_4 \times 2 H_2O$ . Esto se hace en diferentes ciclos, la muestra se sumerge por completo en la solución de sulfato por 4 horas y luego es metida a un horno a secar a una temperatura de 50 ° C de 24 a 48 horas. Esto corresponde a un ciclo. Este proceso se repite hasta que la roca esta finalmente destruida. Después de cada ciclo, se determina el peso de la muestra por la pérdida de material que sufre.

El proceso de deterioro se documenta individualmente con fotografías.

El sulfato de sodio es considerado como la sal más dañina existente, por lo tanto, sirve bien para hacer este tipo de experimentos de exposición a sales máxima. Diferentes sales son encontradas en formando parte del deterioro de distintas rocas de ornamentación, y las cuales pueden reaccionar de una manera distinta. Para este trabajo, la prueba de destrucción salina sería demasiado compleja utilizando todas las composiciones de sales existentes, por lo cual, se utiliza el sulfato de sodio como default.

### *Análisis Geoquímicos*

#### *Difracción de Rayos X*

La difracción de Rayos X es una técnica analítica rápida primariamente utilizada para la identificación de fases de materiales cristalinos. El material analizado es finamente pulverizado, homogenizado y la composición promedio en bruto es determinada. Todos los métodos de difracción están basados en la generación de Rayos X en un tubo de Rayos X. Estos son dirigidos hacia la muestra, los resultantes rayos difractados son recolectados. Un componente clave de toda la difracción es el ángulo entre los rayos de incidencia y los rayos difractados

([http://serc.carleton.edu/research\\_education/geochemsheets/techniques/XRD.html](http://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/XRD.html)).

#### *Preparación de muestra para el análisis de difracción de rayos X*

La preparación de la muestra es la misma utilizada para obtener polvo de roca para digestión en ácidos para análisis geoquímicos cuantitativos como lo es el acoplamiento de plasma por inducción (ICP) o la fluorescencia de rayos X (XRF). La preparación y análisis de las muestras para este trabajo se realizó en los laboratorios de geología estructural y geodinámica de la Universidad de Göttingen.

1. Como primer paso la muestra es quebrada a mano en el laboratorio de preparación de muestras sobre una placa de metal rígida, utilizando un marró de 4 libras. La muestra es golpeada con fuerza medida para no provocar pérdida de la misma y hasta obtener fragmentos no mayores a medio centímetro. Cuando la muestra está lista, se lleva directo al molino de ágata mecánico. El área de trabajo es previamente limpiada con agua, acetona y aire a presión al igual que el marro. Este proceso es para cada una de las muestras.
2. La muestra triturada es colocada en los molinos de ágata, donde previamente se colocan 3 esferas de ágata. La muestra se suministra hasta cubrir las esferas. Cuando esto ocurre, una cuarta esfera es colocada en la parte superior de la muestra dentro del molino. Se cierra y se asegura con un tornillo. Cuando los molinos quedan asegurados, la muestra se deja moler por 15 minutos (Figura 33 A, B, C y D).

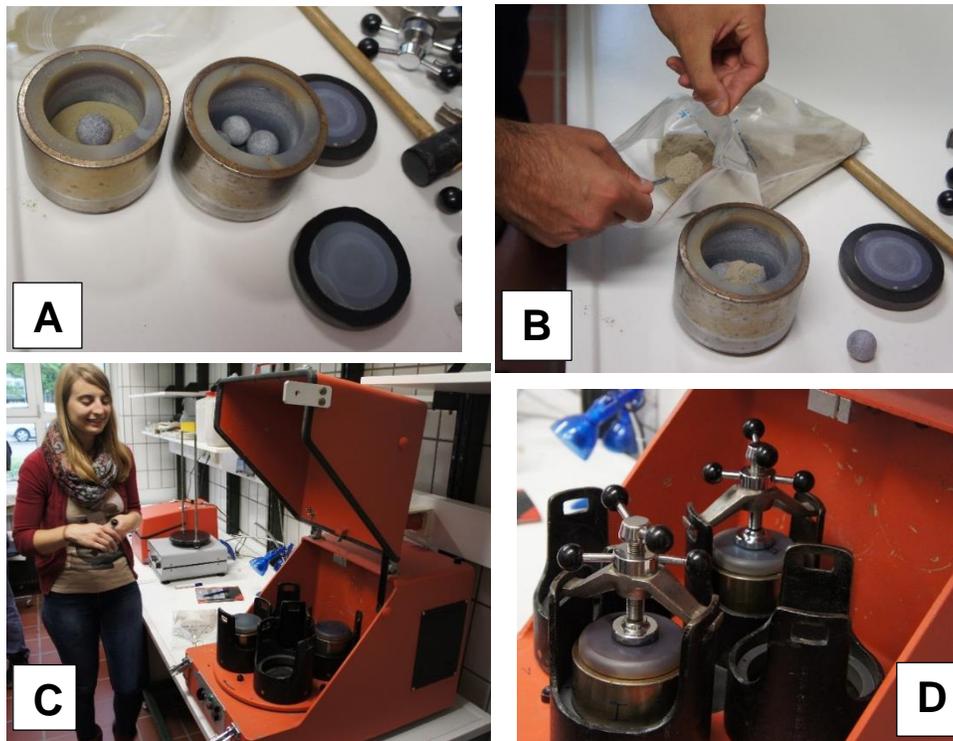


Figura 33. A) Fotografía de Morteros de ágata con esferas para colocar la muestra a moler. B) colocación de la muestra de roca triturada para molienda fina. C) Máquina para morteros de ágata, en ella caben cuatro morteros. D). Sujetadores de tornillo para mantener

3. Una vez transcurridos los 15 minutos, la muestra pulverizada es recolectada y llevada al cuarto de análisis de difracción de Rayos X.

4. En el cuarto de análisis la muestra se tamiza utilizando una malla de 200 micras. Solo se necesitan menos de 10 gramos de muestra para el análisis.
5. El polvo es colocado sobre un dispositivo de acero inoxidable con la ayuda de una pequeña espátula hasta llenar el recipiente. A este recipiente se le coloca una ficha del mismo material. La ficha es aplastada por el dispositivo y en seguida se voltea. Al voltearse se puede ver el polvo uniformemente colocado y sin rizaduras que puedan interferir en los análisis. A esta forma de preparación se le conoce como “*Back Loaded Method*” (Figura 34A, B). Si la muestra es muy escasa se coloca una pequeña ficha de metal con una pequeña ranura en la parte de en medio sobre un cubreobjetos de vidrio, asegurados con una pinza. El material es cuidadosamente vertido dentro de la ranura entre la ficha y el cubreobjetos. En ocasiones se le suministra un ligero golpeteo para que el material quede bien asentado dentro de la ficha. A este método se le conoce como “*Side Loaded Method*”.
6. Finalmente las muestras son llevadas al difractor de rayos x para su evaluación. El difractor de la universidad de Göttingen, posee una capacidad para doce muestras. El aparato mide una muestra por un tiempo de una hora, por lo cual la medición completa es de un periodo de doce horas.

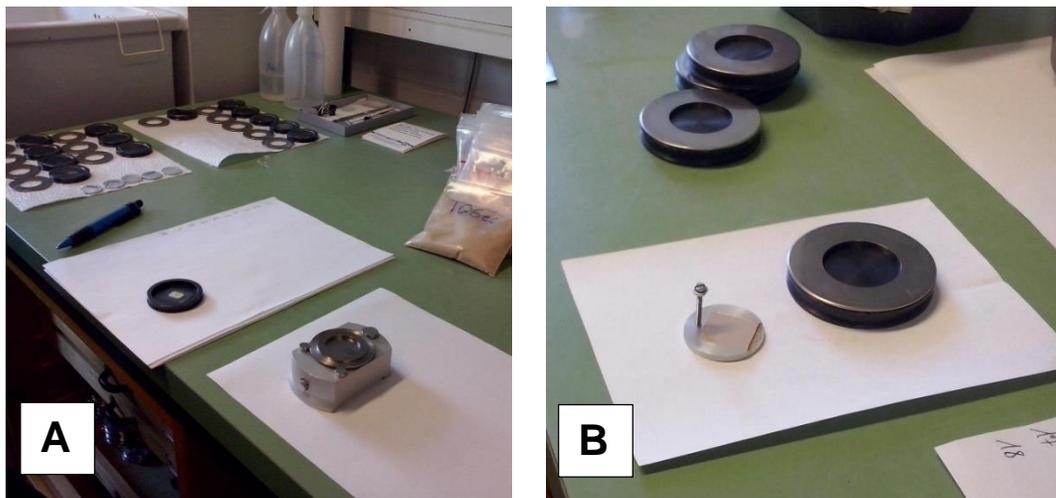


Figura 34. A) Fotografía de las placas de colocación de acero inoxidable y anillos para la colocación del polvo de muestra para ingresarlos al difractor. El dispositivo de colocación de placas es el que está sobre la hoja de papel de la derecha. B) Placa con muestras previas a ser colocadas en la ficha que se coloca dentro del difractor.

### *Espectrometría de Masa con Inducción de Acoplamiento de Plasma (ICP-MS)*

La técnica del ICP-MS es una variante de las técnicas de análisis por espectrometría de masas. Las ventajas principales de esta técnica es que radican en la alta precisión, bajos límites de detección y bajo costo económico, analizando la mayoría de los elementos e isotopos presentes en la tabla periódica de manera simultánea, en no más de un par de minutos. Este sistema ha revolucionado la geología al contribuir con grandes descubrimientos y aportaciones al conocimiento de nuestro planeta y del universo. Otra ventaja importante es la habilidad de detectar y medir concentraciones de elementos en niveles muy bajos (partes por trillón, billón o millón; ppt, ppb, ppm). Es por lo tanto una técnica ideal en el análisis de aguas, suelos, lixiviados de roca y minerales, alimentos, etc (Almaguer-Rodríguez, 2010).

### *Preparación de muestras*

Esta preparación de muestras se hace con base en el método EPA 3052 el cual está establecido para la digestión ácida para matrices de base silícica y orgánica asistida por microondas. El método establece digerir hasta 0.5 g de muestra en 9 ml de ácido nítrico concentrado y usualmente 3 ml de ácido fluorhídrico durante 15 minutos utilizando calor producido por microondas con un sistema de microondas de laboratorio adecuado.

Para este trabajo la digestión total de muestra se realizó utilizando 0.2 g en 3 ml de ácido nítrico y 2 de ácido fluorhídrico en un microondas para laboratorio modelo Mars 6 de la marca CEM®. Las muestras son colocadas en viales para microondas poliméricamente inertes de 35 ml (Teflon™). Los viales de teflón son enumerados del 1 al 12. Se lleva un control en la bitácora de la siguiente manera (Tabla 4).

**Tabla 3. Bitácora de control de muestras para análisis geoquímicos.**

Vial	Clave	Peso (g)	Aforo (g)
1	A	0.2	
2	B	0.2	
-	-	0.2	
12	X	0.2	

El vial numero 1 lleva una sonda que monitorea la temperatura y la presión dentro del sistema. Para este análisis, se recomienda utilizar 7 muestras reales, 2 repeticiones aleatorias, 1 muestra en blanco y 2 muestras estandarizadas; para un mayor control sobre la veracidad de los resultados. Los estándares utilizados para esta prueba son estándares certificados por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y son el *Guano Valley Andesite* (AGV-2) y el *Granodiorite* (GSP-2). Los viales son sellados y calentados en el sistema de microondas. La temperatura requerida para alcanzar reacciones específicas e incorporados es de  $180 \pm 5$  °C en aproximadamente menos de 5.5 minutos, se mantiene así por 9.5 minutos más para que las reacciones se lleven a cabo. Después del enfriamiento, los viales son retirados del equipo de microondas para la neutralización por medio del ácido bórico. Se recomienda que a cada muestra se le agregue un volumen de 10 ml diluida al 4% de  $H_3BO_4$ . Los viales de teflón vuelven a ser colocados dentro del microondas, se alcanza una temperatura de 160 °C en 4 minutos y se mantiene así por 2 minutos. No se recomienda este procedimiento si la cantidad de HF sobrepasa los 3 ml. Al enfriarse los viales, estos son retirados del sistema de microondas, llevados a la campana de extracción y posteriormente la solución es vaciada en viales de polietileno esterilizados de 50 ml. Se recomienda enjuagar los viales de teflón y sus tapas 3 veces con agua destilada hasta conseguir la mayor cantidad de muestra fuera del vial. Hecho esto, los viales de polietileno son llevados a la balanza de precisión y aforados deseablemente con agua destilada hasta 50 ml ó 0.5 g. Antes de iniciar el análisis con el ICP-MS se debe preparar una dilución de la muestra preparada 1:5, lo cual quiere decir, 2 ml de la muestra obtenida y 8 ml de agua destilada. Para una mayor recuperación de elementos, este procedimiento se realiza en la balanza de precisión midiendo primero 2 ml de muestra y posteriormente los 8 ml de agua destilada con pipetas de precisión. Esta dilución no aplica para las muestras “Blancas”, ya que solo es ácido. En estos casos se toman los 10 ml directos para su análisis. Los pesajes son anotados en una bitácora en este orden. Por último, las muestras son llevadas al ICP-MS de la marca ThermoScientific®. Dentro de la instalación, los datos de los pesajes son ingresados en el programa de cómputo del mismo sistema. La medición de las muestras toma 2 minutos en promedio por muestra.

### 3. Comportamiento al intemperismo de las rocas de construcción

#### *El intemperismo de las rocas de construcción*

Charola *et al.* (2011), Sneathlage (2011) y Siegesmund y Török (2011) mencionan que la roca es desde tiempos inmemoriales uno de los materiales más resistentes, pues cuando se comparaba con otros materiales de construcción como el adobe y la madera, no tenía igual. Aun así, no está exenta a deteriorarse. Heródoto, el padre de la historia había mencionado que la piedra utilizada en las pirámides de Egipto ya se estaban deteriorando cuando las observó en el siglo V A.C. El intemperismo es un proceso natural que gobierna todas las rocas en la naturaleza expuestas en la corteza terrestre. En este caso, la interacción toma lugar en procesos físicos, químicos y biológicos diferentes (Charola *et al.* 2011).

De acuerdo con Charola *et al.* (2011), una distinción debe de ser hecha entre los términos, decaimiento, intemperismo y alteración. Mientras que en la naturaleza las rocas son intemperisadas, las rocas naturales de construcción sufren decaimiento por causas antropogénicas. La alteración se refiere a una transformación de los minerales en la roca. El cuarto término (alteración), el cual trata de la destrucción de la roca completa necesita mencionarse, lo cual representa una combinación total de todas las mencionadas anteriormente, y muy frecuentemente toma lugar en un lapso de tiempo muy rápido. Individualmente, para este trabajo, los procesos de intemperismo son presentados.

#### *Intemperismo físico*

El intemperismo físico se refiere al daño de la roca causado por esfuerzo mecánico, el cual va más allá de su resistencia. Ejemplos de este intemperismo incluyen daño mecánico o agrietamiento por cargas asimétricas en construcciones pobremente diseñadas, eventos catastróficos como terremotos, el crecimiento de la vegetación que induce un esfuerzo mecánico a la roca cuando crecen las raíces, incendios, los cuales provocan expansión termal extrema, ya que las rocas no son un buen conductor térmico, y aun peor cuando se trata de extinguir con agua, la formación de cuñas de hielo y congelamiento y la expansión hídrica e hídrica (Charola *et al.* 2011).

## Expansión Térmica

La expansión térmica o daño térmico desencadena cambios significativos en el volumen de las rocas. Esto se define como el coeficiente de expansión térmica, dependiendo del tipo de roca, varía de  $15$  a  $33 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$  (Charola *et al.* 2011). La Figura 35, ilustra que existen minerales que tienen cantidades de expansión diferencial específica. Esta expansión también no es nunca lineal. Las variaciones resultan de las diferentes texturas de las rocas, como la talla, la orientación de los cristales y el contacto de grano entre los diferentes cristales (Charola *et al.* 2011). El coeficiente de expansión térmica es derivado de la suma de los coeficientes de expansión de cada mineral en la roca. Cada mineral muestra cantidades de elongación material específica a lo largo de sus ejes cristalinicos, consecuentemente, la expansión térmica dirige al aflojamiento de esta asociación mineral y consecuentemente a aflojar toda la roca.

En general, ciclos termales entre  $20^\circ\text{C}$  y  $90^\circ\text{C}$  induce más o menos deterioro a la mayoría de las rocas.

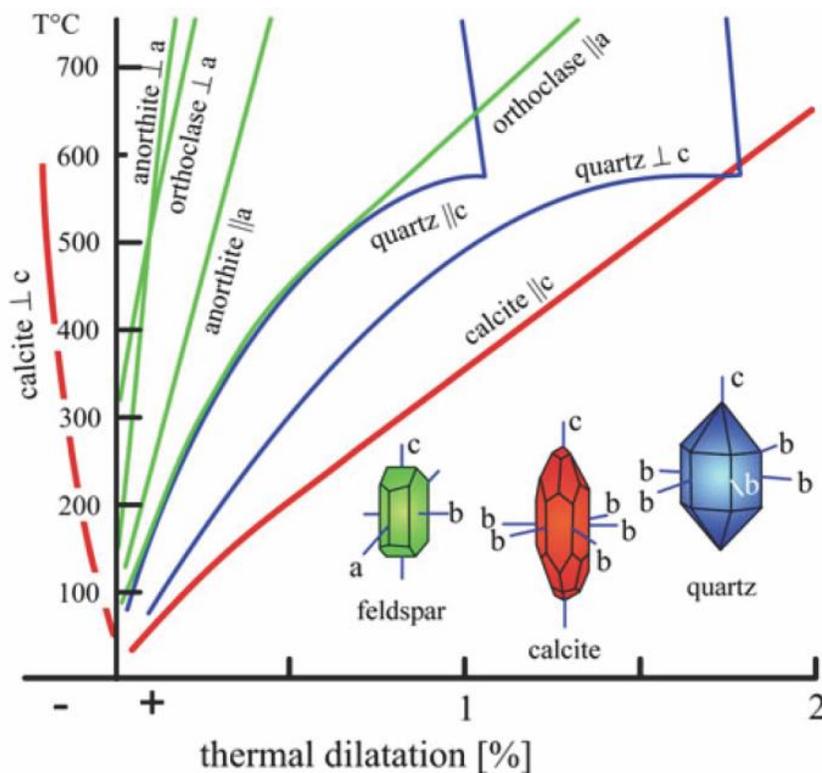


Figura 35. Dilatación térmica.

### *Hinchamiento Hídrico e Hígrico*

Todos los materiales porosos absorben vapor de agua de la atmosfera y se expanden. Aunque la piedra no sufra de la misma expansión hídrica al grado que la madera lo hace, seguirá afectada por el inevitable ciclo que esta inducido por los cambios normales en la humedad relativa en el aire. Las más afectadas por este proceso son las rocas que contienen arcillas, porque su estructura planar las hace particularmente susceptibles a retener la humedad entre ellas. El vapor de agua se difundirá hacia un material poroso y será absorbido en la superficie de poro. Inicialmente, una capa de agua monomolecular desarrollará que, debido a que su afinidad a la superficie mineral no se comporta como agua “normal”, generalmente referida como agua “*bulk*”. Si más vapor de agua está disponible, una segunda capa se formará y luego una tercera. Si los poros son muy pequeños (Charola *et al.* 2011).

La expansión hídrica e hígrica se refiere a la expansión en volumen, la cual sucede en una roca en presencia de humedad. Este proceso puede, a través de la repetición constante, resultar en un daño substancial para la roca, especialmente cuando se combina con sales. Dependiendo de la porosidad de la roca y la humedad relativa, concordantemente varía la cantidad de expansión hídrica. Rocas que contengan 3 capas de arcillas son especialmente vulnerables a sufrir la expansión porque el agua se hace un emparedado entre las capas de arcillas por ende la hinchazón de los minerales arcillosos toma lugar (Ruedrich *et al.* 2010). Aquí se diferencia entre procesos inter e intracrystalinos, la estructura de los filosilicatos, los cuales están hechos de superposiciones diferentes de tetraedros y octaedros deben ser considerados. Los minerales arcillosos tienen un cambio en su superficie, lo cual permite la adición de los cationes en un medio con contenido electrolítico. Esto a cambio resulta en un enriquecimiento del gradiente de concentración del ambiente que lo rodea. Este gradiente de concentración es compensado por la absorción de agua dentro de sus intersecciones. Aquí estos espacios intraparticular son extendidos por procesos de expansión intergranular (Ruedrich *et al.* 2010).

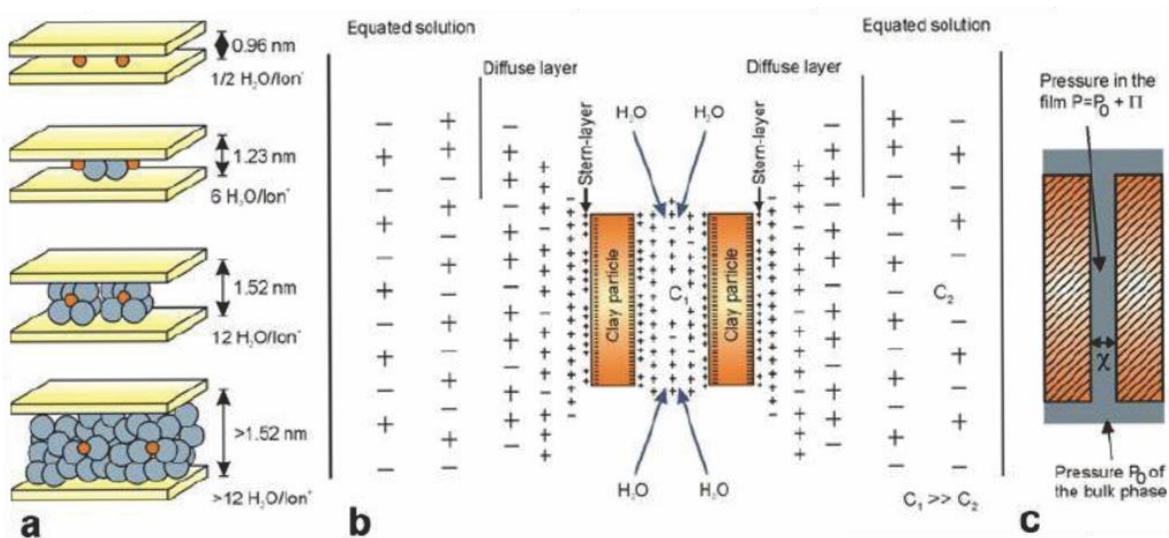


Figura 36. Hinchamiento osmótico (Ruedrich *et al.* 2010).

La expansión higroscópica también ocurre en rocas pobres o libres en contenido de arcillas, donde las cuales deben tener una gran proporción de microporosidad. Este mecanismo de basa en el principio de la condensación capilar. Los microporos toman preferentemente el agua, así los cationes, se neutralizan el potencial negativo de la superficie mineral. Se sobreponen dos potenciales negativos a partículas adyacentes, estas se repelen cada una de la otra y se crea un incremento en el volumen en lugar de hinchamiento (Figura 36). Este fenómeno se conoce como “presión de contacto” y solo relevante en microporos que tengan un tamaño  $< 0.1$  micras (Charola *et al.* 2011).

### ***Intemperismo químico***

Procesos de intemperismo químico se refieren a la disolución o alteración de los minerales que constituyen a una roca por medio de reacciones químicas. La disolución mineral en rocas de construcción está fuertemente relacionada con la contaminación atmosférica y deposición ácida (Charola *et al.* 2011). Muchos minerales presentes en las rocas o piedras naturales para construcción son termodinámicamente inestables con las condiciones que presenta la superficie terrestre. El aire y la contaminación juegan un papel muy importante en el intemperismo de las rocas de construcción (Brimblecombe, 2011). En este trabajo se encontró que particularmente la eflorescencia salina y los sulfatos que contribuyen a la formación de yesos formado “costra negra” son un factor clave en el deterioro. Brimblecombe, (2011) menciona que la formación de estas sustancias puede ser causada

por el contenido mineral o por la composición química de los morteros utilizados en su construcción y también menciona que la industrialización contribuye a la formación de costras de yeso por la contaminación del aire, este fenómeno es visible en los edificios del centro histórico de Querétaro.

La eflorescencia salina juega un papel muy importante y se encuentra dentro de las formas más agresivas del intemperismo de las rocas de construcción de los monumentos del centro histórico de Santiago de Querétaro (Figura 37).



Figura 37. Ejemplo de deterioro de la roca debido a la agresiva acción de eflorescencia salina en el Centro histórico de Santiago de Querétaro

Aquí ocurren reacciones de minerales en la roca con el aire, morteros o sustancias que hacen desde el suelo. Brimblecombe (2011) indica que los materiales que empiezan las reacciones para la formación de sales son mayormente cationes de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y aniones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ . Las sales que se forman son  $(\text{Ca},\text{Mg})\text{CO}_3$  donde mayormente sulfatos como el yeso ( $\text{CaSO}_4 \times 2 \text{H}_2\text{O}$ ) y sulfato de sodio ( $\text{NaSO}_4$ ) tienen un efecto destructivo en la roca. Los iones son usualmente transportados dentro de la roca por sustancias acuosas (Platz, 2014). Las sales presentes en cambio pueden generar intemperismo mecánico con la cristalización de la sal o “*Salt Bursting*” (Platz, 2014) menciona que el daño a los edificios que es causado por la cristalización de la sal puede ser explicado en diferentes modelos.

### *Modelo de presión de crecimiento linear*

El crecimiento de presión linear se refiere a la presión que se forma entre el cristal y la pared de poro encajonante, acompañada por la presión del cristal, donde una película de solución supersaturada está presente. Con suficiente tensión interfacial entre la sal y el cristal para circular e incrementar el estímulo del crecimiento del cristal en este espacio la solución. Este crecimiento es dependiente de la supersaturación.

### *Modelo de presión capilar*

De acuerdo con este modelo, el crecimiento del cristal toma lugar en los poros capilares, los cuales tienen la menor cantidad de soluciones presentes, para el estímulo del crecimiento del cristal (Platz, 2014) e indica que este principio se basa en la idea que el potencial químico de un cristal excede la cantidad energía superficial requerida en un poro capilar. Solo después de la cristalización pueden crecer cristales en los microporos cuando el potencial químico del cristal obtenido en los poros capilares sobrepasa al de los microporos. La caracterización de cristales en los macroporos esta estimulada por el crecimiento de cristales más grandes, de donde en los microporos actúa como una fuerza conductora. El incremento del volumen asociado a al crecimiento del cristal puede conducir al “*salt bursting*”, donde las rocas son particularmente vulnerables a este mecanismo de intemperismo con una concentración de microporos rodeándolos.

### *Modelo de presión de hidratación*

Cuando la hidratación lleva a la conversión de una fase baja en agua que se enriquece y forma a una fase alta de agua. Especialmente relevante para el intemperismo de las rocas naturales de construcción es el proceso de transformación del sulfato de sodio deshidratado (tenardita) por una fase rica en agua (mirabilita) ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \times 10 \text{H}_2\text{O}$ ), la cual es acompañada por incremento masivo de volumen. La presión asociada (presión de hidratación) lleva al daño en la roca, en donde la fase de conversión toma lugar alrededor de 20 °C y con cerca de un 70% de humedad relativa. Ya que estas condiciones son encontradas en la naturaleza muy frecuentemente, este proceso de intemperismo corresponde con áreas climáticas muy relevantes.

### *Influencia de los contaminantes atmosféricos*

Los contaminantes atmosféricos o del aire y los relacionados procesos químicos, físicos y biológicos son la mayor causa de daño a las rocas naturales de construcción. La contaminación de la atmosfera tomo lugar con el comienzo de la industrialización hasta el presente, lo cual claramente refleja el intemperismo de las rocas en los edificios (Brimblecombe, 2011).

El acelerado crecimiento de la ciudad de Santiago de Querétaro y su rápida industrialización ha marcado la pauta para que este tipo de deterioro de contaminación atmosférica tome lugar y se refleje en las rocas de construcción que se utilizaron en los edificios del centro histórico. Niveles elevados de contaminación indican un mayor daño por deterioro, los cuales son atribuidos a la contaminación del aire, la cual también afecta a edificaciones históricas ubicadas en las zonas rurales. En esta forma de proceso de daño por intemperismo puede ser acelerado por las reacciones de los contaminantes y daño y deterioro considerables pueden ocurrir a las rocas de construcción existentes. Estas reacciones toman lugar ya sea directamente por la vía de fase de gaseosa o por partículas disueltas en la lluvia y menciona que contaminantes relevantes como los derivados de elementos como el azufre y nitrógeno forman compuestos altamente ácidos y atacan los minerales en las rocas, resultando en procesos de intemperismo. Un ejemplo de esas reacciones es la que ocurre con el feldespato alcalino que junto con un catión de hidrogeno y el agua que libera como resultado, potasio y arcillas como la caolinita, y compuestos de ácido de sílice pueden atacar a la roca (Brimblecombe, 2011).



Ya que el feldespato alcalino común en las rocas volcánicas, de composición riolítica, esta reacción es relevante.

### *Intemperismo biológico*

El intemperismo biológico se refiere a la desintegración de la roca por la influencia de la vegetación o microorganismos como las bacterias, algas, musgos u hongos. Estos, pueden afectar a la roca de manera con intemperismo físico o químico el sistema de raíces en una planta o árbol, el cual viaja rápidamente a través de la roca con crecimiento progresivo, causa un estrés mecánico el cual quiebra la roca. Los microorganismos pueden permitir la

biocolonización por medio de procesos químicos o por medio de costras en las rocas. A través de la descomposición de ácidos orgánicos o ácido carbónico esta se puede formar, la cual a cambio activa el intemperismo químico (Charola *et al.* 2011). Así como los microorganismos pueden destruir una roca, también pueden salvarla o prolongar su tiempo de vida al intemperismo. Por ejemplo, el musgo también ayuda a sostener los componentes de la roca en su lugar, además de que no presenta indicios de cristalización de sales previniendo así su deterioro. De cualquier manera se necesita profundizarse más en este tema, este trabajo solo las investigaciones existentes.

## 4. Resultados

### *Propiedades petrográficas*

#### *Descripción macroscópica de muestras*

##### *1) Ignimbrita Escolásticas Gris (TGQ1)*

Roca de color gris oscuro con textura de grano fino (afanítica) con un 5% de fenocristales de plagioclasa y feldespato euhedrales a subhedrales de 1 a 2 mm de grosor en matriz vítrea con un 5 % de líticos de 1 a 2 mm de espesor, presenta poca pómez de colapsada con alteración a óxidos. La matriz es vítrea, poco soldada, de textura suave y porosa. La textura del afloramiento es masiva y presenta poca alteración a arcillas (Figura 38)



Figura 38. TGQ1

##### *2) Ignimbrita Amarilla de la Cañada del Marqués, (TQGec)*

Roca de color amarillo claro de composición félsica, con textura de flujo y matriz altamente soldada. Con un contenido en cristales de cuarzo y feldespato de un 5 a 10 % euhedrales a subhedrales de 2 a 3 mm de grosor. Los líticos están silicificados, en una abundancia en la muestra de 5 a 10 % y con un grosor de 3 a 10 mm. Su matriz está altamente soldada y silicificados. Presenta estructura de flujo o reomórfica (Figura 39).



Figura 39. TQGec1

### 3) Ignimbrita Rosa de la Cañada del Marques (TRCQ1)

Roca de color rosado con textura eutaxítica o de flujo compuesta de pómez colapsada o fiames y líticos todos en una matriz desvitrificada con 10 a 15 % de fenocristales de cuarzo y feldespato con un 1 mm de grosor que van de euhedrales a subhedrales y los cuales se encuentran rotos o fragmentados. La matriz esta desvitrificada. Esta roca contiene abundancia de líticos con forma de angulosa a subangulosa, algunos de los cuales superan los 10 mm de grosor. La roca contiene pómez en estructura de *fiames* (Figura 40).



Figura 40. TRCQ1

### 4) Ignimbrita Roja de Huimilpan, Querétaro (TRH1)

Roca de color café rojizo con textura de grano fino, con un 5 a 10 % de fenocristales de cuarzo y feldespato y algunas micas. Estos cristales son de forma euhedral y subhedral de 1 mm de grosor. Presenta de 5 a 10 % de líticos, con alteración a óxidos de 1 mm de grosor. Esta muestra contiene pómez colapsada y alterada a oxidos en un 5%. Su matriz es vítrea y con textura de flujo (Figura 41).



Figura 41. TRH1

### 5) Ignimbrita Amarilla de

#### *Huimilpan, Querétaro (TAH1)*

Roca de color amarillo claro con textura de grano fino con un 10% de fenocristales de cuarzo, feldespato y plagioclasa, los cristales son de 1 mm de espesor y estos tienen una forma anhedral a subhedral. Su matriz es vítrea con estructura de flujo. Presenta de 10% de líticos alterados por oxidación y su tamaño es de 1 mm. Su matriz es porosa y suave (Figura 42).



Figura 42. TAH1

### 6) Ignimbrita Escolásticas Negra,

#### *Querétaro (BT1)*

Roca de color marrón a negro, de textura porfirítica a seriada con menos del 5% de fenocristales de cuarzo y feldespato subhedral a anhedral menor a 1 mm de grosor y fragmentados. Contiene pómez negra y blanca, con bajo grado de colapso y representan de un 15 a 20 % de la muestra y miden hasta varios de centímetros de longitud. Los líticos son de un color gris de 4 a 5 cm de grosor, mal clasificados y representan un 15 % de la muestra. La matriz es vítrea y porosa con textura de flujo con grado de soldamiento bajo. (Figura 43).



Figura 43. BT1

### 7) Ignimbrita Colón (WT1)

Roca de color blanco a gris claro constituida de pómez sin colapsar y líticos alterados arcillas pobremente soldada. La pómez esta soportada por una matriz fina de ceniza volcánica. Llegan a medir desde 5 mm de espesor hasta varios centímetros. Es una roca de peso muy ligero (Figura 44).



Figura 44. WT1

### 8) Cantera Blanca de Las Palmas, Colón, Querétaro (LPW1)

Roca ígnea extrusiva de composición félsica de grano fino, con textura afanítica y matriz desvitrificada. Presenta bandeamiento fluidal señalado por bandas de color morado y color beige (Figura 45).



Figura 45. LPW1

### 9) Cantera Roja de Las Palmas, Colón, Querétaro (LPR1)

Roca ígnea extrusiva de composición félsica de grano fino y matriz desvitrificada. Presenta una marcada textura de flujo. Se presenta levemente oxidada. Entre cada pliegue de flujo existe recristalización de minerales de fase de vapor, como cuarzo y calcedonia. Contiene trazas de ópalo (Figura 46).



Figura 46. LPR1

10) *Cantera Roja de Tierra Dura, Colón,  
Querétaro (TDWI)*

Roca ígnea extrusiva de composición félsica y de grano fino con matriz desvitrificada. Presenta textura de flujo y esta alterada por oxidación secundaria. Entre sus pliegues de flujo existen espacios rellenos de minerales de fase de vapor secundarios como cuarzo recristalizado, calcedonia y trazas de ópalo (Figura 47).

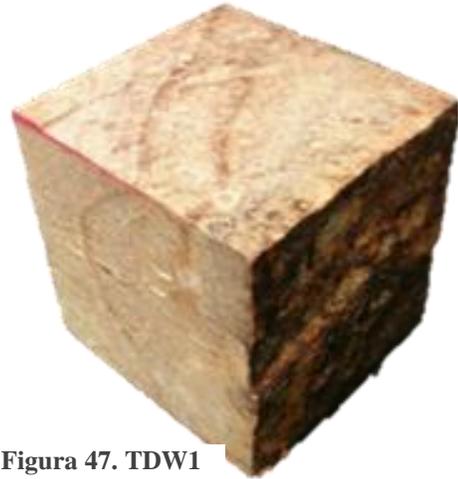


Figura 47. TDWI

**Descripción microscópica**

1) *Ignimbrita Escolásticas Gris de Querétaro (TGQ1)*

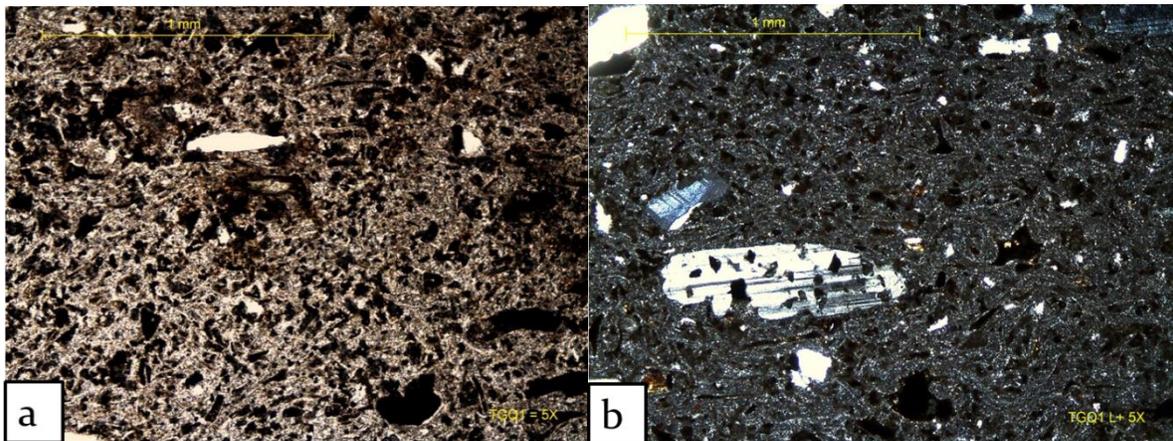


Figura 48. Microfotografía de la muestra TGQ1 tomada con objetivo 5x. a) luz natural, b) luz polarizada.

Roca ígnea extrusiva, félsica, piroclástica, porfirítica, leucocrática con componentes: Albita>Sanidino>Cuarzo> líticos y minerales de alteración (óxidos). La albita se tiene forma euهدral a subهدral menor a 1 mm de grosor con bordes rotos y representa un 5%. El sanidino se encuentra de manera euهدral a subهدral menores a 1 mm de grosor y tiene una abundancia de 5%. El cuarzo tiene forma euهدral a subهدral con una presencia menor a 2%. La Figura 48 a) con luz natural revela una concentrada presencia de minerales de alteración a óxido y fragmentos líticos finos menores a 0.5 mm. Estos representan un 5% de la muestra. La matriz es vítrea con textura de flujo (eutaxítica) y corresponde a un 82%. Es altamente porosa, se alcanzan a ver con el objetivo 5x las esquirlas de vidrio (*glass shards*)

de la ceniza. Contenido de 12% de fenocristales euhedrales a subhedrales con bordes angulosos con un 82 % de matriz. Utilizando el diagrama de QAPF (Streckeisen, 1978) para rocas ígneas extrusivas podemos concordar que esta muestra tiene la composición de una cuarzo-latita, ya que presenta 16.6% de cuarzo y 41.34 % de sanidino y albita.

## 2) Ignimbrita Amarilla de la Cañada (TQGec1)

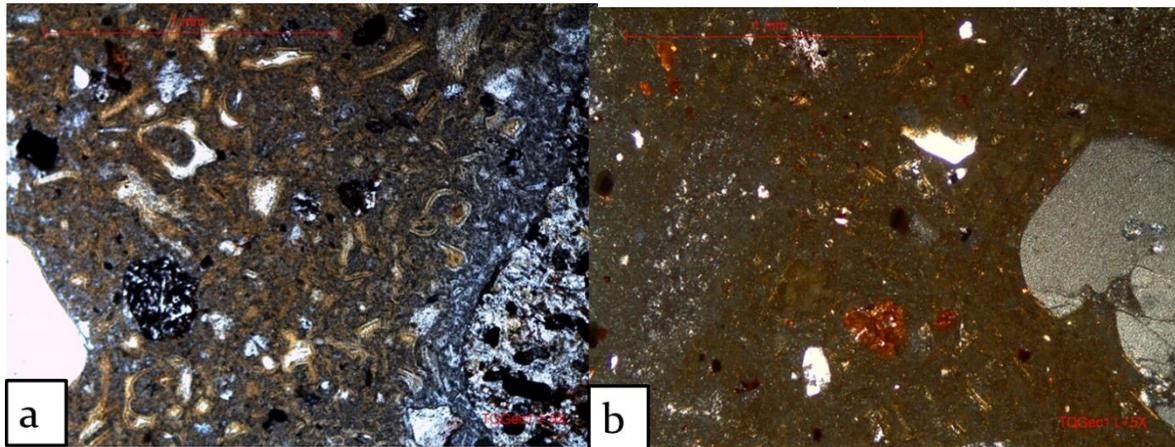


Figura 49. Microfotografía de la muestra TQGec1 tomada con objetivo 5x. a) luz natural, b) luz polarizada.

Roca ígnea extrusiva, félsica, piroclástica, porfirítica, leucocrática con componentes: líticos volcánicos > cuarzo > sanidino > minerales de alteración (óxidos). Los clastos volcánicos representan el 10 % de la muestra con un diámetro de hasta 5 mm con bordes angulosos. El cuarzo presenta formas euhedrales a subhedrales con bordes quebrados de 1 a 2 mm de grosor, representan el 5% de la muestra. El sanidino se encuentra de manera euhedral a subhedral menores a 1 mm de grosor y tiene una abundancia de 5 %. La Figura 49 a) con luz natural revela núcleos de recristalización de posible cristobalita y cavidades rellenas de minerales de fase de vapor además de presentar formas de esquirlas en arreglo de flujo desvitrificadas. La matriz está desvitrificada con marcada textura de flujo y altamente soldada. Esta muestra está formada por un 20% de componentes, de los cuales 10 % es de fenocristales euhedrales a subhedrales con bordes angulosos y un 80 % de matriz. Utilizando el diagrama de QAPF (Streckeisen, 1978) para rocas ígneas extrusivas podemos concordar que esta muestra tiene un 50% de cuarzo y 50 % de feldespato, es de composición riolítica, por lo que se puede concluir que se trata de una riolita. Es de un flujo de cenizas riolíticas o ignimbrita riolítica con alto grado de soldamiento.

### 3) Cantera Rosa de la Cañada del Marqués, Querétaro (TRCQ1)

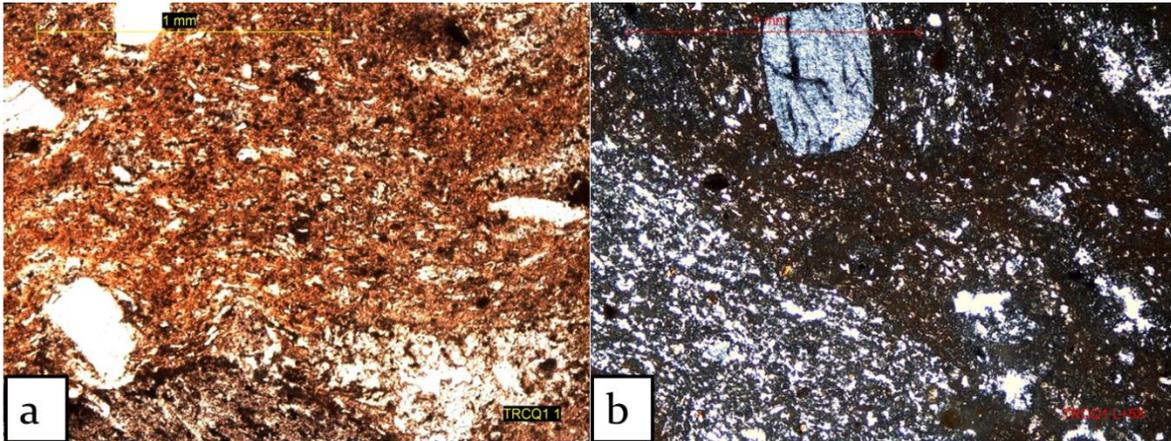


Figura 50. Microfotografía de la muestra TRCQ1 tomada con objetivo 5x. a) luz natural, b) luz polarizada.

Roca ígnea extrusiva piroclástica de color rosado con textura porfirítica compuesta de fragmentos líticos, *fiammes*, pómez no colapsada y fenocristales de cuarzo y sanidino constituidos en una matriz desvitrificada con estructura eutaxítica. Relación de componentes y matriz (40%-60%) respectivamente. Los líticos se encuentran en una proporción de 10% en la muestra con bordes angulosos, algunos miden poco más de 1 mm hasta 10 mm de grosor. Estos líticos presentan gran cantidad de plagioclasa en ellos indicando que su protolito es una roca ígnea. Cuenta con alrededor de un 10% de pómez colapsada o fiammes, los cuales presentan minerales de fase de vapor en sus bordes. Miden poco más de 1 mm hasta 15 mm de longitud. Contiene 10% de cuarzo euhedral a subhedral con sus bordes rotos y miden menos de 1 mm. El sanidino se encuentra de forma euhedral a subhedral con bordes angulosos y frías, mide poco menos de 1 mm y se encuentra en abundancia de un 10%. La matriz está desvitrificada y presenta una estructura eutaxítica o de fluidal microcristalina, constituye un 60% del área total de la muestra. La presencia de los fiammes en esta roca indica que se trata de una ignimbrita de alto grado de soldamiento. Utilizando el diagrama de QAPF (Streckeisen, 1978) para rocas ígneas extrusivas se puede concordar que es una roca con un origen riolítico.

#### 4) Ignimbrita Roja de Huimilpan, Querétaro (TRH1)

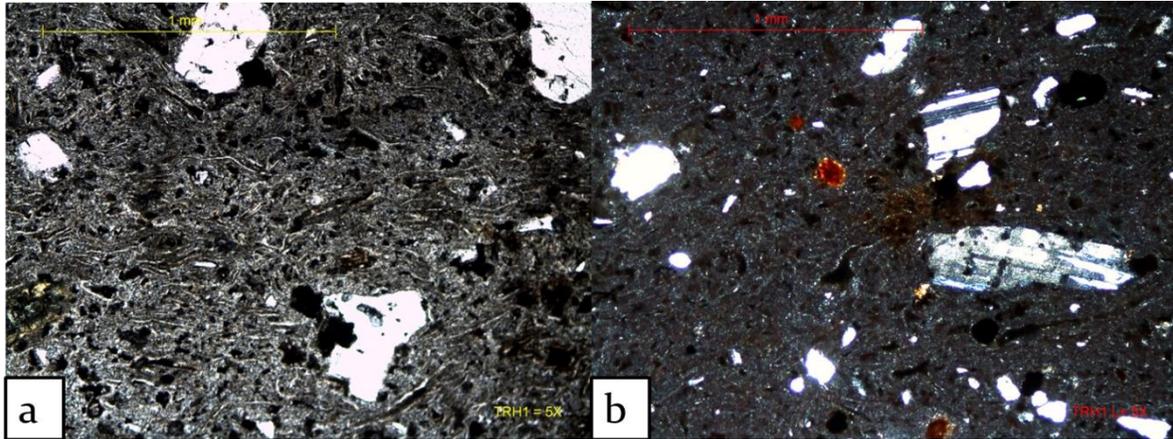


Figura 51. Microfotografía de la muestra TRH1 tomada con objetivo 5x. a) luz natural, b) luz polarizada

Roca ígnea extrusiva, félsica, piroclástica, porfirítica, leucocrática con componentes: Albita>Sanidino>Cuarzo> Biotita oxidada. La albita se tiene forma euhedral a subhedral menor a 1 mm de grosor con bordes rotos y representa un 5%. El sanidino se encuentra de manera euhedral a subhedral menores a 1 mm de grosor y tiene una abundancia de 5%. El cuarzo tiene forma euhedral a subhedral con una presencia menor a 2%. La Figura 51 b) con luz polarizada revela una ligera presencia de biotita alterada a óxido y fragmentos líticos finos menores a 0.5 mm. Estos representan un 5% de la muestra. La matriz es vítrea con textura de flujo (eutaxítica) y corresponde a un 82%. Es altamente porosa, se alcanzan a ver con el objetivo 5x las esquirlas de vidrio (glass shards) de la ceniza. Contenido de 12% de fenocristales euhedrales a subhedrales con bordes angulosos con un 82% de matriz. Utilizando el diagrama de QAPF (Streckeisen, 1978) para rocas ígneas extrusivas podemos concordar que demuestra una composición de cuarzo-latita.

### 5) Ignimbrita Amarilla de Humilpan, Querétaro (TAH1)

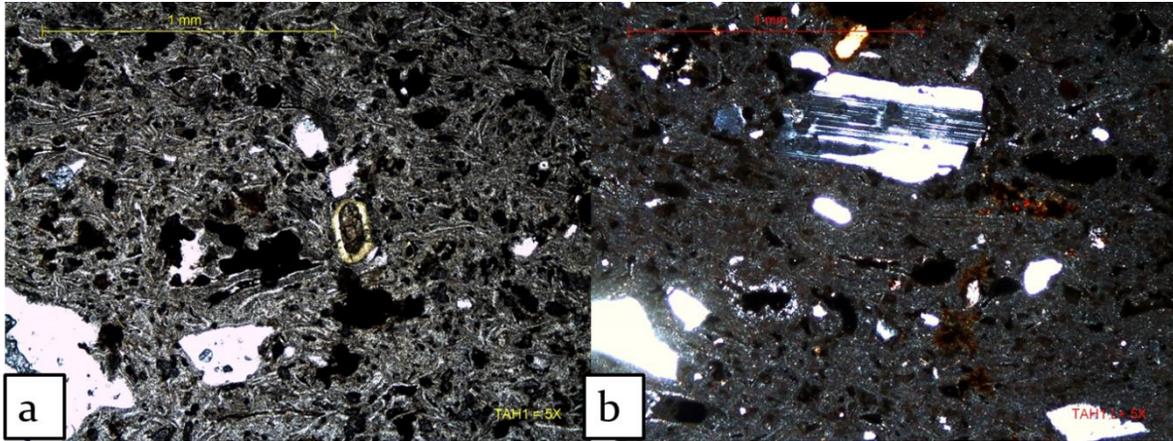


Figura 52. Microfotografía de la muestra TAH1 tomada con objetivo 5x. a) luz natural, b) luz polarizada

Roca ígnea extrusiva, félsica, piroclástica, porfirítica, leucocrática con componentes: Albita>Sanidino>Cuarzo> líticos y minerales de alteración (óxidos). La albita se tiene forma euهدral a subهدral menor a 1 mm de grosor con bordes rotos y representa un 5%. El sanidino se encuentra de manera euهدral a subهدral menores a 1 mm de grosor y tiene una abundancia de 5%. El cuarzo tiene forma euهدral a subهدral con una presencia menor a 2%. La Figura 52 a) con luz natural revela una concentrada presencia de minerales de alteración a óxido y fragmentos líticos finos menores a 0.5 mm. Estos representan un 5% de la muestra. La matriz es vítrea con textura de flujo (eutaxítica) y corresponde a un 82%. Es altamente porosa, se alcanzan a ver con el objetivo 5x las esquirlas de vidrio (*glass shards*) de la ceniza. Contenido de 12% de fenocristales euهدrales a subهدrales con bordes angulosos con un 82% de matriz. Utilizando el diagrama de QAPF (Streckeisen, 1978) para rocas ígneas extrusivas se puede concordar que esta muestra es de composición cuarzo-latítica, con similar composición a las ignimbritas Escolásticas gris y Huimilpan rosa

### 5) Ignimbrita Escolásticas Negra (BT1)

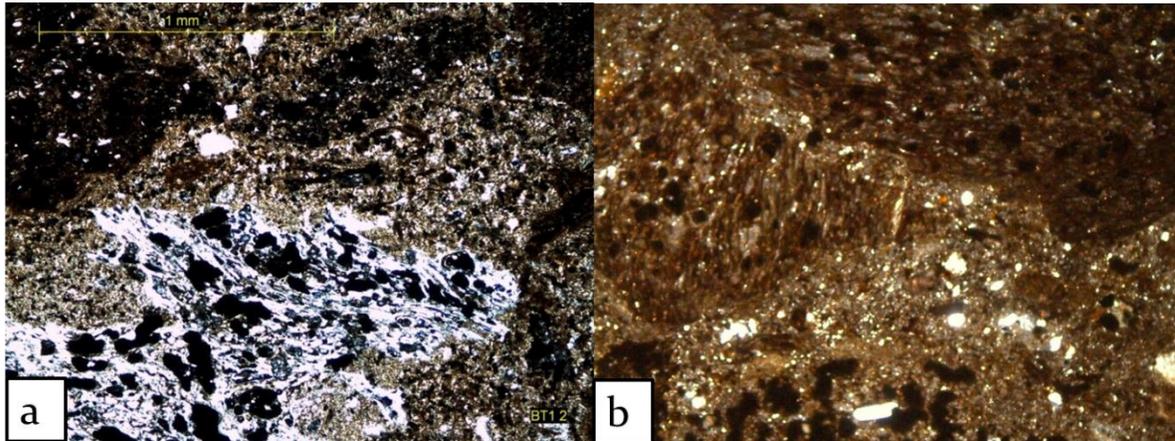


Figura 53. Microfotografía de la muestra BT1 tomada con objetivo 5x. a) luz natural, b) luz polarizada.

Roca ígnea extrusiva de marrón a negro de textura porfírica a seriada compuesta de fragmentos de pómez negra, pómez blanca, líticos y fenocristales de sanidino, plagioclasa y cuarzo. La matriz tiene una textura vítrea. Relación de componentes y matriz (65%-35%). La pómez negra se encuentra en proporción de un 20% con textura vesicular alta. Estos componentes miden desde 1 mm de grosor hasta varios centímetros. No se encuentran colapsados. La pómez blanca constituye un 20% de la muestra y mide desde poco más de 1 mm hasta 2 centímetros. Esta pómez contiene una alta concentración de vesículas y no se encuentra colapsada. Los líticos representan un 10% de la muestra con bordes angulosos y que miden desde 0.5 mm hasta 15 mm. Todo parece indicar que se trata de líticos de origen ígneo por su alto contenido de plagioclasas. El sanidino se presenta de manera euhedral a subhedral, su tamaño es menor a 1mm y sus bordes están rotos. Se encuentra en abundancia del 5% en la muestra. La plagioclasa se trata probablemente de albita por su distintiva macla polisintética se presenta de manera euhedral a subhedral con bordes rotos, miden menos de 1 mm y se encuentran en un 5% en la muestra. El cuarzo se presenta de forma subhedral, menor a 1 mm de grosor y se encuentran en un 5%. La matriz presenta texturas vítreas y eutaxítica y la cual no alcanzó a devitrificar. Representa un 35% de la muestra. Analizando los valores de cuarzo, feldespato y plagioclasa en el diagrama QAPF de Streckeisen esta muestra tiene una composición riolítica.

## 6) Ignimbrita Colón, Querétaro (WT1)

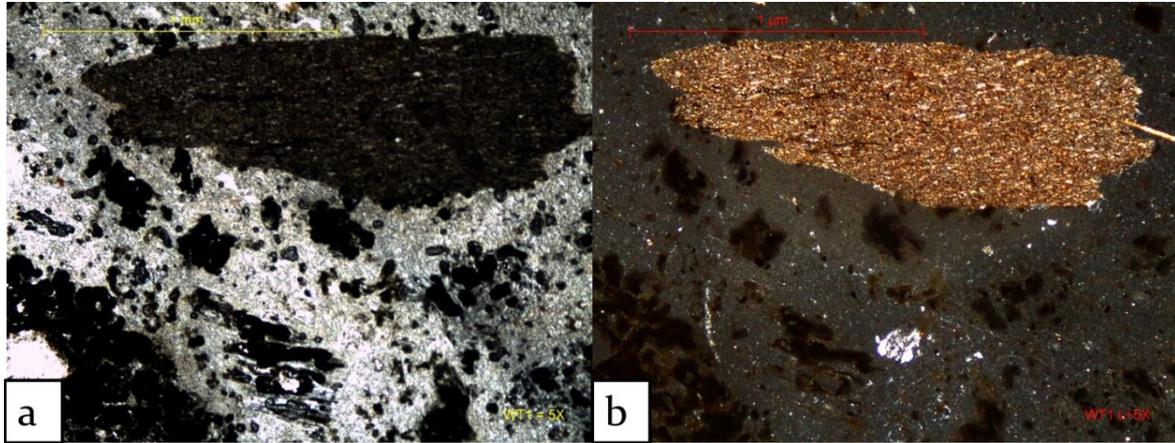


Figura 54. Microfotografía de la muestra WT1 tomada con objetivo 5x. a) luz natural, b) luz polarizada.

Roca ígnea extrusiva, félsica, piroclástica, seriada, leucocrática y holohialina con componentes: pómez no colapsada > líticos volcánicos > fragmentos de cuarzo y sanidino. La pómez sin colapsar se encuentra en una abundancia del 50% llegando a presentar medidas desde los 2 mm hasta 5 cm de grosor sin mostrarse alterada. Los líticos volcánicos representan un 10% de la muestra con bordes angulosos a subangulosos desde 2 mm de grosor hasta 1 cm de diámetro. Algunos de estos líticos están altamente alterados a arcillas y levemente oxidados. El sanidino al igual que el cuarzo se encuentra en una abundancia menor al 3% en la muestra, sus tamaños son menores a 1 mm de grosor y muestran bordes rotos y subangulosos. La matriz está compuesta de ceniza levemente soldada con textura pumicítica y representa un 37% de la muestra. Utilizando la composición de los fenocristales en el diagrama de Streckeisen de 1978 se puede hacer la conjetura de que se trata de un depósito de caída de cenizas con un origen ígneo riolítico levemente soldado.

### 7)Cantera Blanca de Las Palmas, Colón, Querétaro (LPW1)

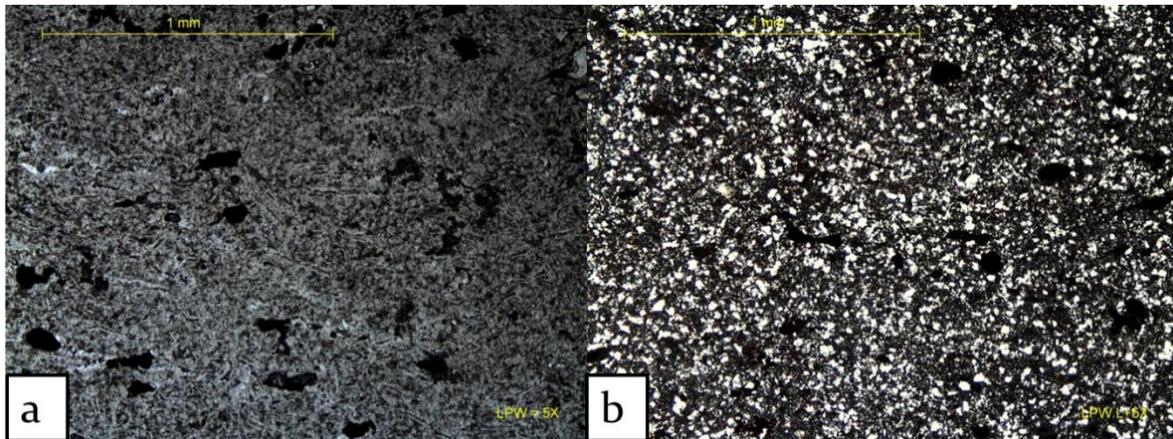


Figura 55. Microfotografía de la muestra LPW1 tomada con objetivo 5x. a) luz natural, b) luz polarizada.

Roca ígnea extrusiva, félsica, afanítica, y compuesta únicamente de microcristales y algunos. La albita se tiene forma euhedral a subhedral menor a 1 mm de grosor con bordes rotos y representa un 5%. El sanidino se encuentra de manera euhedral a subhedral menores a 1 mm de grosor y tiene una abundancia de 5%. El cuarzo tiene forma euhedral a subhedral con una presencia menor a 2%. La microfotografía 55a) con luz natural revela una concentrada presencia de minerales de alteración a óxido y fragmentos líticos finos menores a 0.5 mm. Estos representan un 5% de la muestra. La matriz es vítrea con textura de flujo (eutaxítica) y corresponde a un 82%. Es altamente porosa, se alcanzan a ver con el objetivo 5x las esquirlas de vidrio (glass shards) de la ceniza. Contenido de 12% de fenocristales euhedrales a subhedrales con bordes angulosos con un 82% de matriz. Utilizando el diagrama de QAPF (Streckeisen, 1978) para rocas ígneas extrusivas podemos concordar que esta muestra es de composición riolítica, por lo que se puede concluir que se trata de una riolita. Por el tamaño de granos y matriz se utiliza la clasificación de rocas piroclásticas de Smidt, 1981, la cual correspondería a una toba de ceniza. Es una Toba de ceniza riolítica con bajo grado de soldamiento; Ignimbrita riolítica con bajo grado de soldamiento.

## Difracción de Rayos X

### Caracterización mineralógica

#### 1) Ignimbrita Escolásticas Gris (TGQ1)

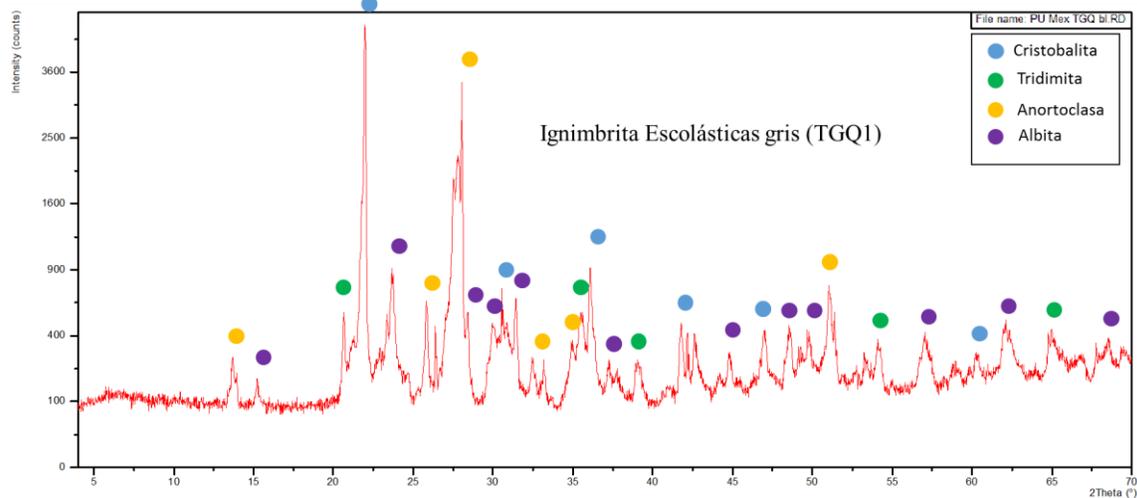


Figura 56. Diffractograma de la Ignimbrita Escolásticas gris (TGQ1)

La muestra TGQ1 correspondiente a la Ignimbrita Escolásticas Gris (Figura 56) presenta una composición mineralógica con variedades polimorfas de cuarzo como la cristobalita y la tridimita, además de dos variedades de plagioclasas como la anortoclasa y la albita. (Velasco Sánchez, 2013) reporta composiciones mineralógicas similares. La cristobalita y la tridimita son variedades del cuarzo que solo se forman a temperaturas muy elevadas y a presiones bajas. Para esta muestra el contenido de la cristobalita fue el más alto. El acompañamiento de albita y ortoclasa reflejan una evolución magmática avanzada.

## 2) Ignimbrita Roja de Huimilpan (TRH1)

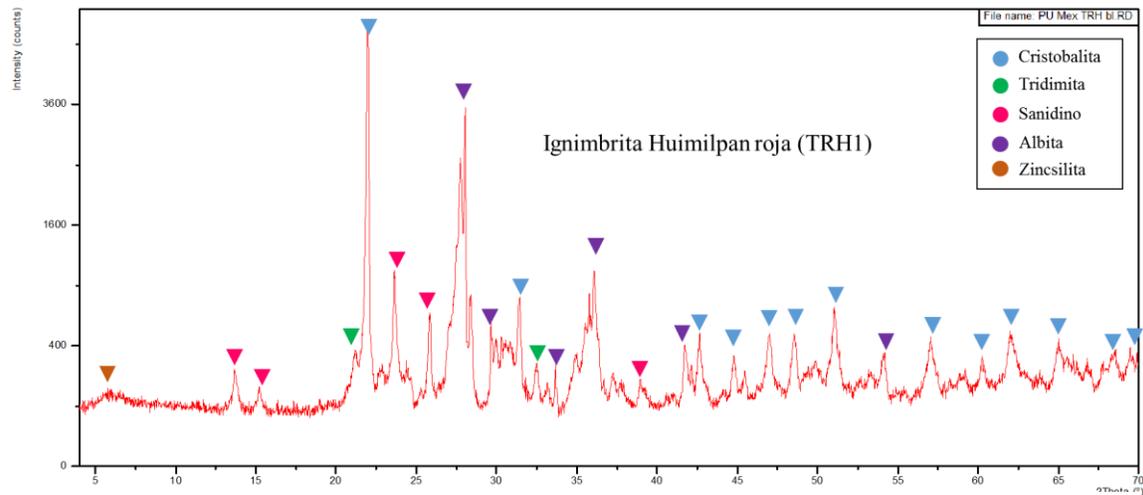


Figura 57. Diffractograma de la Ignimbrita Roja de Huimilpan (TRH1).

El diffractograma de la Ignimbrita Roja de Huimilpan (Figura 57) indica una composición mineralógica formada principalmente por variedades polimorfas del cuarzo como la cristobalita y la tridimita además de contener también albita (plagioclasa sódica) y sanidino (feldespato potásico) lo cual sugiere que son productos de magmas evolucionados. Esta muestra contiene a una especie de zeolita llamada Zinco-silita. Las zeolitas se presentan como productos de alteración de las plagioclasas y feldespatos.

## 3) Ignimbrita Amarilla de Huimilpan (TAH1)

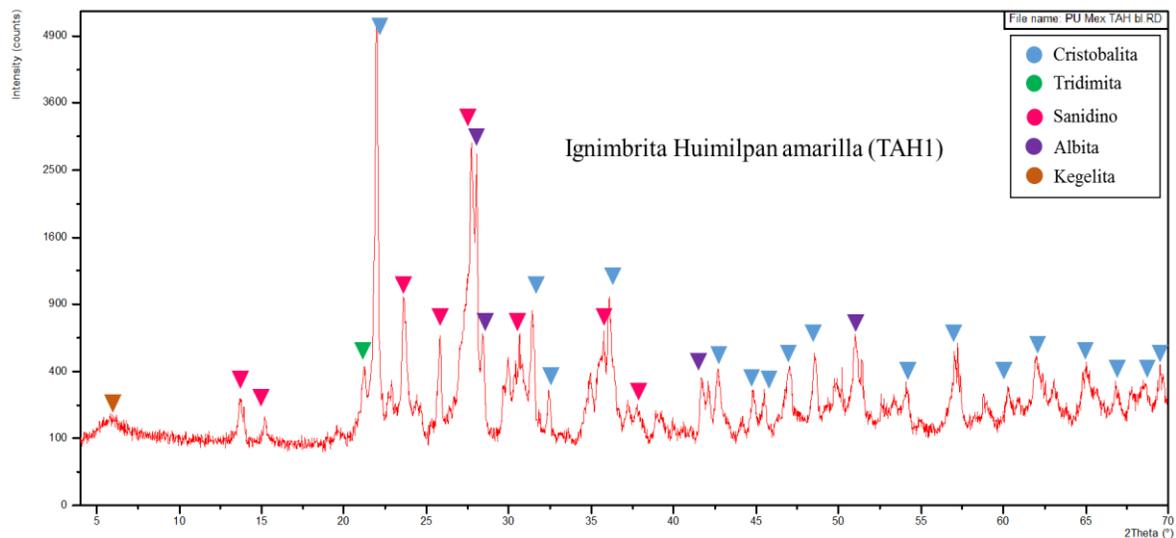


Figura 58. Diffractograma de Ignimbrita Amarilla de Huimilpan (TAH1).

La Figura 58 muestra el difractograma para la muestra de la Ignimbrita Amarilla de Huimilpan (TAH1). Se compone principalmente de polimorfos de cuarzo como la cristobalita y la tridimita además de contener sanidino (feldespato alcalino) y albita (plagioclasa sódica). Muestra exactamente la misma mineralogía que las muestras anteriormente descritas, con la única diferencia que la Cristobalita es más abundante además de contener kegelita, una variedad de zeolita.

#### 4) Ignimbrita Escolásticas Negra (BT1)

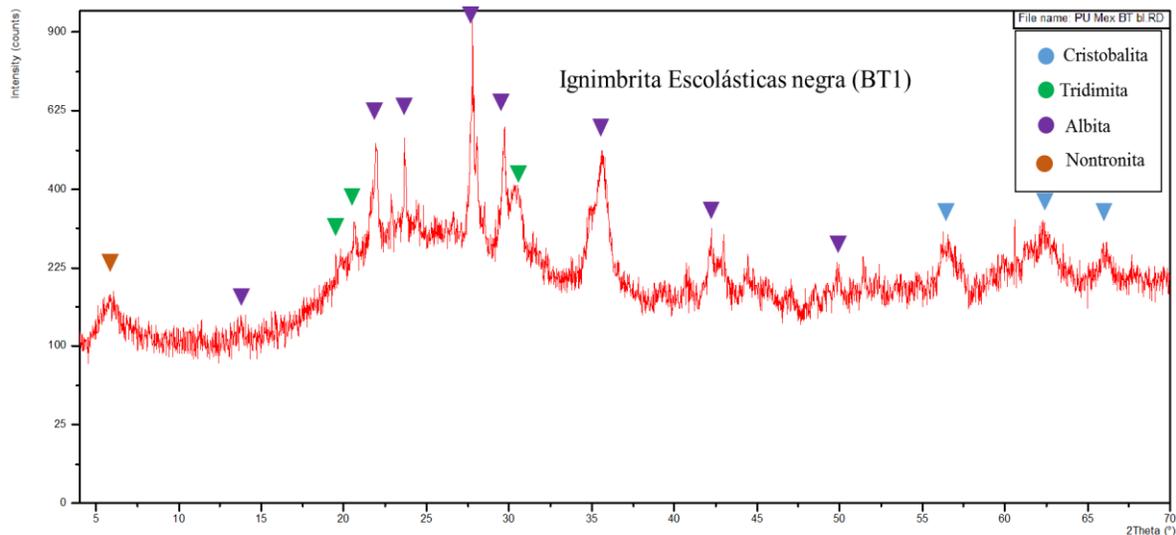


Figura 59. Difractograma de la Ignimbrita Escolásticas Negra (BT1)

En el difractograma para la Ignimbrita Escolásticas Negra (Figura 59) revela en contenido mineralógico principalmente de albita, tridimita, cristobalita, y una zeolita denominada nontronita. La variación irregular del difractograma nos indica que el resto del contenido mineralógico es solo vidrio, ya que este no presenta una red cristalina prismática sino amorfa y sin estructura.

### 5) Ignimbrita Colón (WT1)

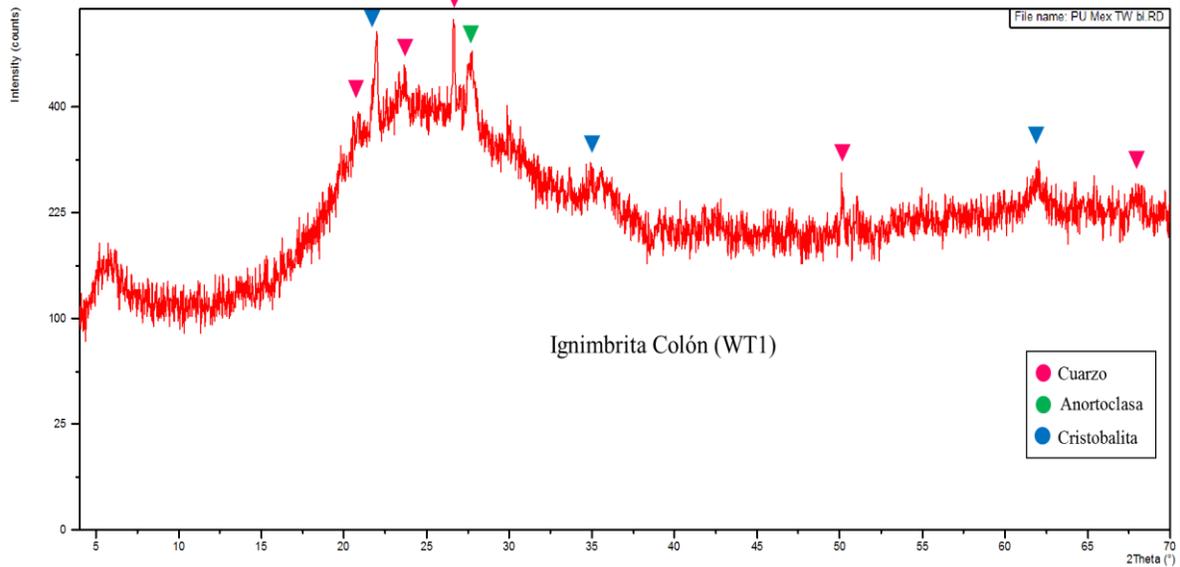


Figura 60. Diffractograma para la Ignimbrita Colón (WT1).

La Figura 60 muestra el diffractograma para la Ignimbrita Colón. Al igual que la ignimbrita Escolásticas negra, la Ignimbrita Colón muestra mucha interferencia debido a su alto contenido de vidrio, ya que esta muestra está compuesta en su gran mayoría por pumicita. Muestra algunos ligeros picos en su mayoría de cuarzo, de cristobalita y de anortoclasa.

### 6) Ignimbrita Rosa de la Cañada (TRCQ1)

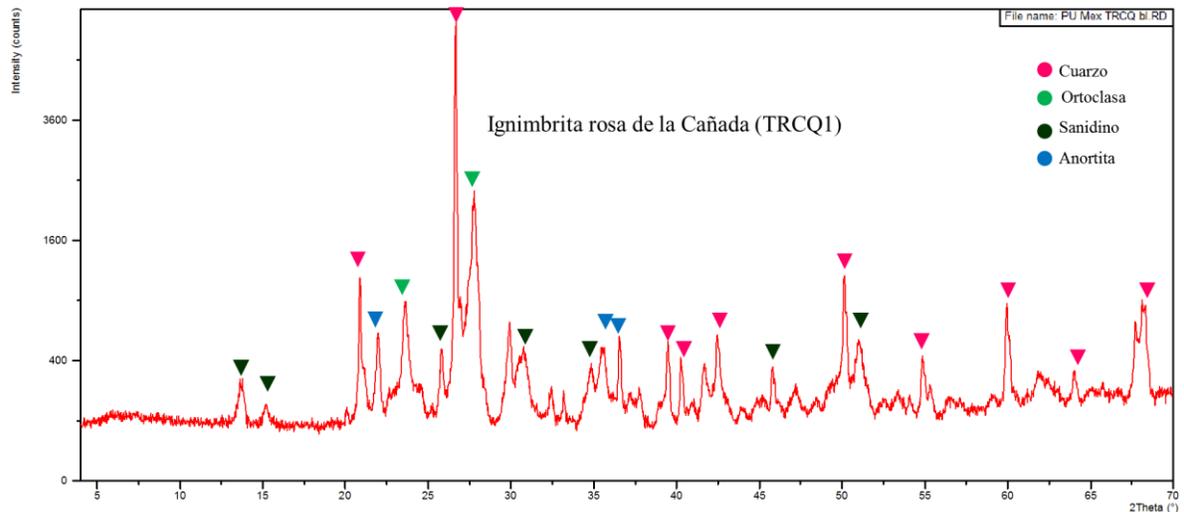
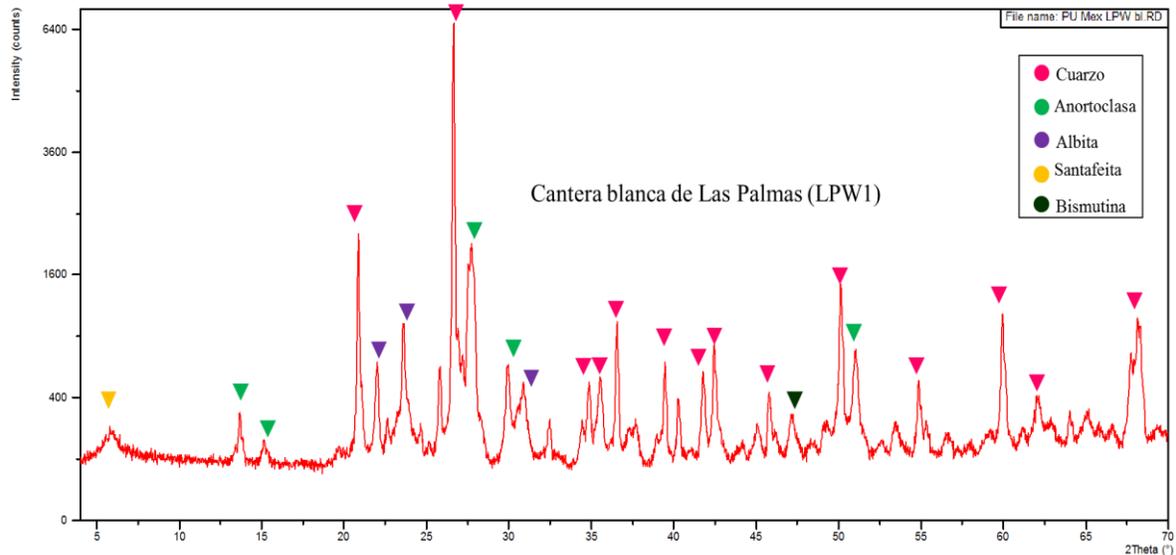


Figura 61. Diffractograma de la Ignimbrita Rosa de la Cañada (TRCQ1).

El difractograma para la Ignimbrita Rosa de la Cañada (Figura 61) muestra un contenido mineralógico de cuarzo, sanidino, anortita y ortoclasa. Claramente se puede apreciar que se trata de una composición mineralógica félsica. No presenta interferencia por vidrio.

### 7) *Cantera Blanca de Las Palmas (LPW1)*



**Figura 62. Difractograma de la Cantera Blanca de Las Palmas (LPW1).**

La Figura 62 muestra el difractograma de la Cantera Blanca de Las Palmas. La prueba reveló la presencia de cuarzo, anortoclasa, albita y la zeolita denominada santafeita y la bismutita, la cual es un sulfuro de bismuto que se deriva de la estibinita.

### 8) *Ignimbrita Amarilla de La Cañada (TQGecl)*

La Figura 63 muestra el difractograma para la ignimbrita amarilla de la Cañada, el cual señala la presencia de minerales como la cristobalita, sanidino, ortoclasa, cuarzo, kolfanita, tridimita, y corrensitita. El pico más grande indica la abundancia de cristobalita aunque indica mayormente la presencia de sanidino. Esta muestra contiene una especie de esmectita denominada *corrensitita* (Rodríguez-Jiménez *et al.* 1988). Además contiene un mineral producto de alteración hidrotermal de pegmatitas graníticas y se asocia a la arsenosiderita (Fleischer *et al.* 1983).

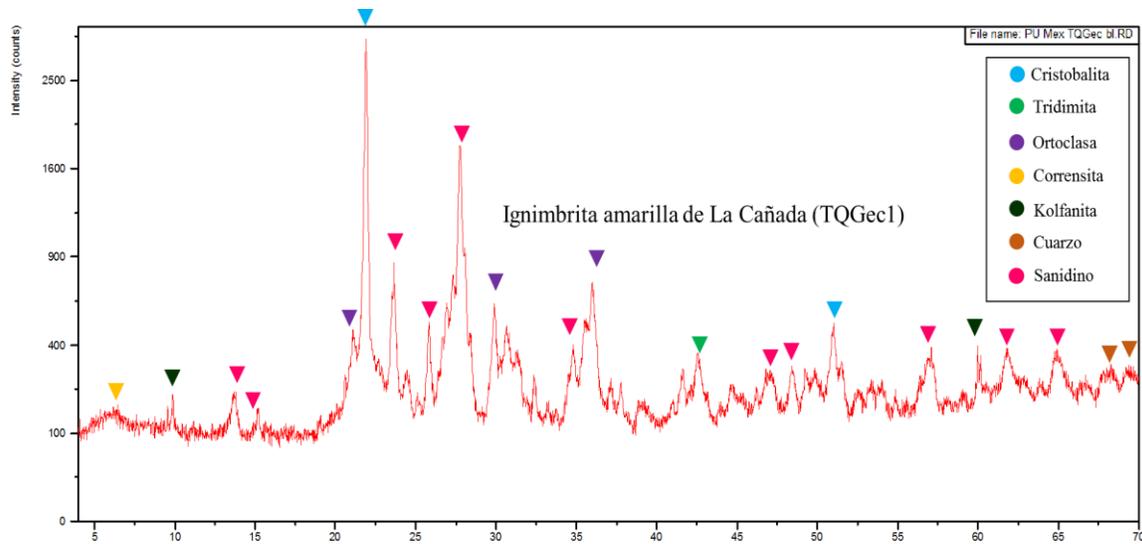


Figura 63. Diffractograma de la Ignimbrita Amarilla de La Cañada (TQGec1).

### ***Geoquímica de elementos trazas y Tierras Raras***

Los elementos traza y los isotopos tienen un gran número de usos en las ciencias geológicas. Estos permiten plantear hipótesis sobre el origen y evolución de los sistemas magmáticos. Los elementos trazas son incorporados selectivamente en las diferentes fases y se incorporan o excluyen con gran selectividad, por lo que son muy flexibles a los procesos de fraccionamiento. Como resultado, el origen de los sistemas fundidos y los procesos evolutivos, pueden ser bien definidos utilizando a los elementos traza (Brady et al, 1995).

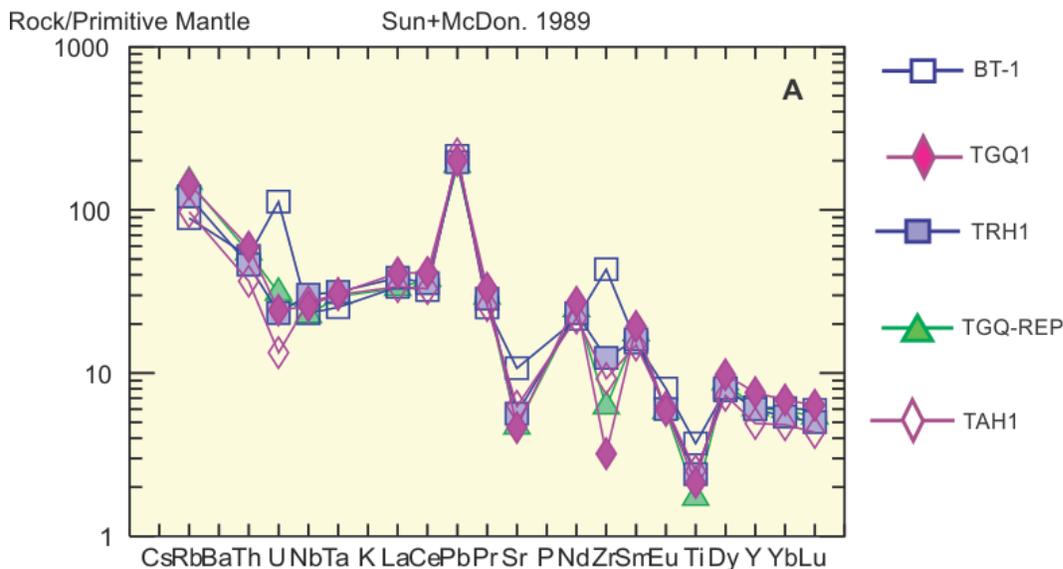


Figura 64. Diagrama multielemental normalizado a manto primitivo, de la familia de ignimbritas Escolásticas (valores de normalización Sun y McDonough, 1989).

En la familia de las ignimbritas Escolásticas (Figura 64) se puede hacer ciertas distinciones de acuerdo con la evolución magmática. En general todas llevan la misma tendencia en el diagrama multielemental normalizados al manto primitivo (valores propuestos por Sun y McDonough, 1989). Presenta un patrón de fraccionamiento ligero de elementos incompatibles con respecto a los elementos compatibles y/o elementos de campo magnético fuerte (HFS), lo que se puede interpretar, que las rocas podrían ser derivadas desde el manto y por proceso contaminación y residencia en la corteza, dió origen a estas ignimbritas riolíticas, lo cual está representada por las anomalías positivas de algunos elementos litofílicos de U, Pb y Zr (LIL).

La muestra TGQ1 tiene la anomalía negativa más pronunciada en zircón, lo cual significa que esta muestra tuvo la mayor evolución magmática posible, ya que altas concentraciones implican un enriquecimiento en la fuente o una vasta evolución líquida. Todas las muestras presentan una anomalía negativa del elemento Sr. El cual sustituye al Ca en las plagioclasas y en menor proporción al K en los feldespatos alcalinos. Según la literatura, es un elemento compatible a baja presión donde la plagioclasa se forma tempranamente, pero actúa como elemento incompatible a alta presión donde la plagioclasa es poco estable, lo cual significa que su evolución magmática fue en la corteza y no en el manto donde este elemento es termodinámicamente estable.

**Tabla 4 Resultados de elementos trazas para las muestras de la familia Escolásticas. Extremo derecho: Resultados de elementos trazas obtenidos por Aguirre-Díaz, 2001 sobre la ignimbrita Amealco III; Nótese la asombrosa similitud de concentraciones de estos elementos.**

	TRH1	TAH1	TGQ1	TAH1 REP	TGQ1 REP	BT1	III Es1-b	III Es2-b	III Es4-b
La	26.35	23.24	28.20	17.91	25.62	23.18	27.00	24.00	28.00
Ce	63.16	58.43	73.34	46.09	62.40	57.36	85.00	89.00	70.00
Pr	7.88	7.16	9.12	5.74	7.76	6.97	7.00	6.00	7.00
Nd	31.50	29.42	36.78	23.20	31.82	29.05	31.00	27.00	33.00
Sm	7.13	6.60	8.56	5.31	7.22	6.83	7.00	6.00	7.00
Eu	1.01	1.04	0.99	0.85	0.85	1.35	1.10	0.80	0.80
Gd	6.29	5.76	7.44	4.55	6.27	6.10	7.40	6.50	7.70
Tb	1.03	0.94	1.27	0.75	1.09	0.99	1.10	1.00	1.00
Dy	5.95	5.38	7.19	4.30	6.18	5.77	7.40	6.80	8.10
Ho	1.14	1.05	1.41	0.84	1.22	1.18	1.20	1.10	1.30
Er	3.13	2.73	3.84	2.21	3.29	3.21	4.20	4.00	4.60
Tm	0.45	0.39	0.55	0.32	0.47	0.47	0.50	0.50	0.30
Yb	2.67	2.38	3.37	1.92	2.93	3.00	n.d	n.d	n.d
Lu	0.37	0.32	0.47	0.26	0.40	0.44	0.50	0.50	0.40

### Familia Escolásticas

Análisis de Tierras raras normalizadas a condritos para las rocas de la familia Escolásticas. En primer lugar se puede observar que las muestras TGQ1, TRH1, TAH1, BT1 y TGQ-REP tienen una anomalía negativa en el elemento Europio ya que este elemento es altamente compatible con el calcio. Estas rocas son ignimbritas de composición de riolítica, con alto contenido en plagioclasa sódica o albita, la cual está enriquecida en sodio por lo tanto la anomalía negativa del elemento europio es normal y es un indicador más que demuestra que son rocas de composición riolítica.

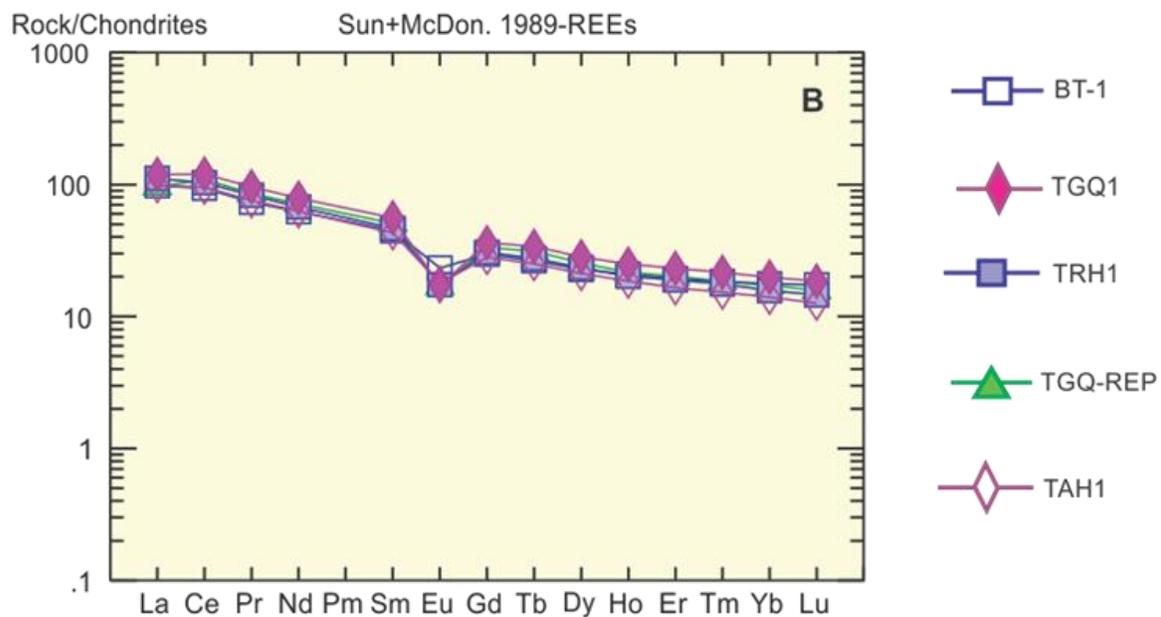


Figura 65. Diagrama spider de tierras raras normalizados a condritos (Sun+McDon, 1989). De la familia Escolásticas.

*Familia Amazcala*

Tabla 5 Concentraciones de Tierras Raras obtenidas de las muestras de la caldera de Amazcala.

	LPR1	TQGEC1	TRCQ1 REP	TRCQ1	TDW1	LPW1	WT1
Rb	203.88	141.32	154.33	131.11	199.46	186.88	205.08
Sr	14.70	209.57	56.22	49.76	17.48	23.03	42.75
Ni	3.54	5.83	4.14	3.57	4.95	4.03	4.59
Cr	5.09	12.56	10.45	8.09	3.05	2.85	5.36
La	6.33	54.76	36.35	31.10	24.23	11.34	48.50
Ce	49.58	140.21	111.51	91.03	57.81	36.49	119.16
Nd	11.37	72.56	55.32	46.18	35.28	15.95	65.98
Sm	7.29	22.28	17.79	14.75	10.11	6.20	20.66
Eu	0.29	0.80	0.50	0.42	0.38	0.23	0.48
Dy	25.79	25.60	20.75	16.76	14.17	15.49	25.71
Er	17.35	14.76	12.12	9.73	8.62	10.38	15.39
Yb	17.66	14.40	11.74	9.48	8.73	11.00	15.05
Lu	2.52	2.06	1.62	1.34	1.24	1.60	2.15

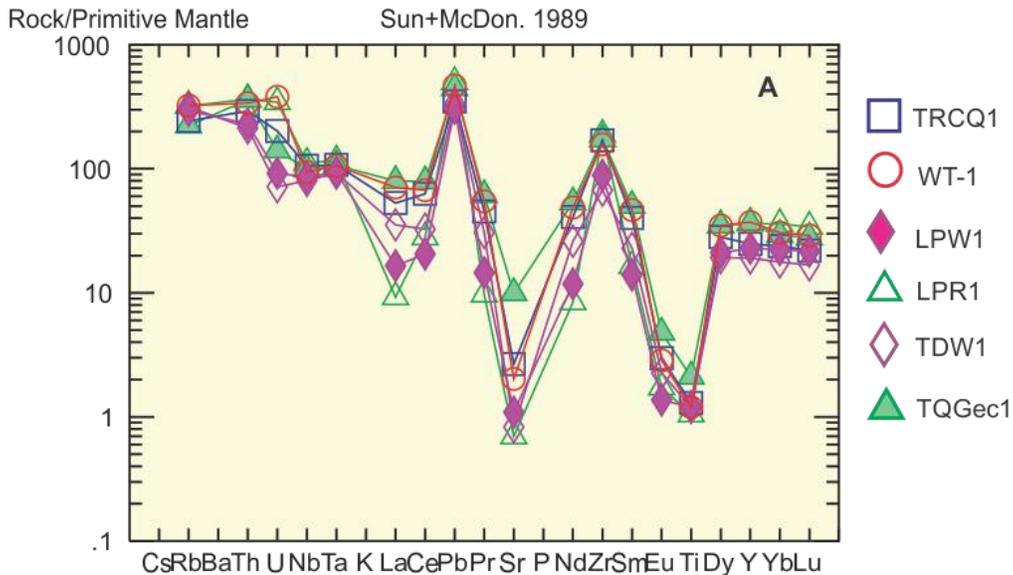


Figura 66. Diagrama multielemental normalizado a manto primitivo de la familia de muestras de la caldera de Amazcala.

Para el grupo de muestras de la caldera de Amazcala, el diagrama multielemental normalizado a manto primitivo (Figura 66), muestra anomalía positiva del elemento plomo (Pb), ya que es un elemento litofílico y es compatible en corteza, lo cual arroja pistas sobre la evolución magmática de las rocas en la corteza continental. Muestran anomalía negativa de estroncio (Sr), por lo que están enriquecidas y el cual es muy compatible con el potasio (K). Estas

muestras contienen sanidino porque son provenientes de magmas félsicos. Presentan anomalía negativa de Eu y Ti.

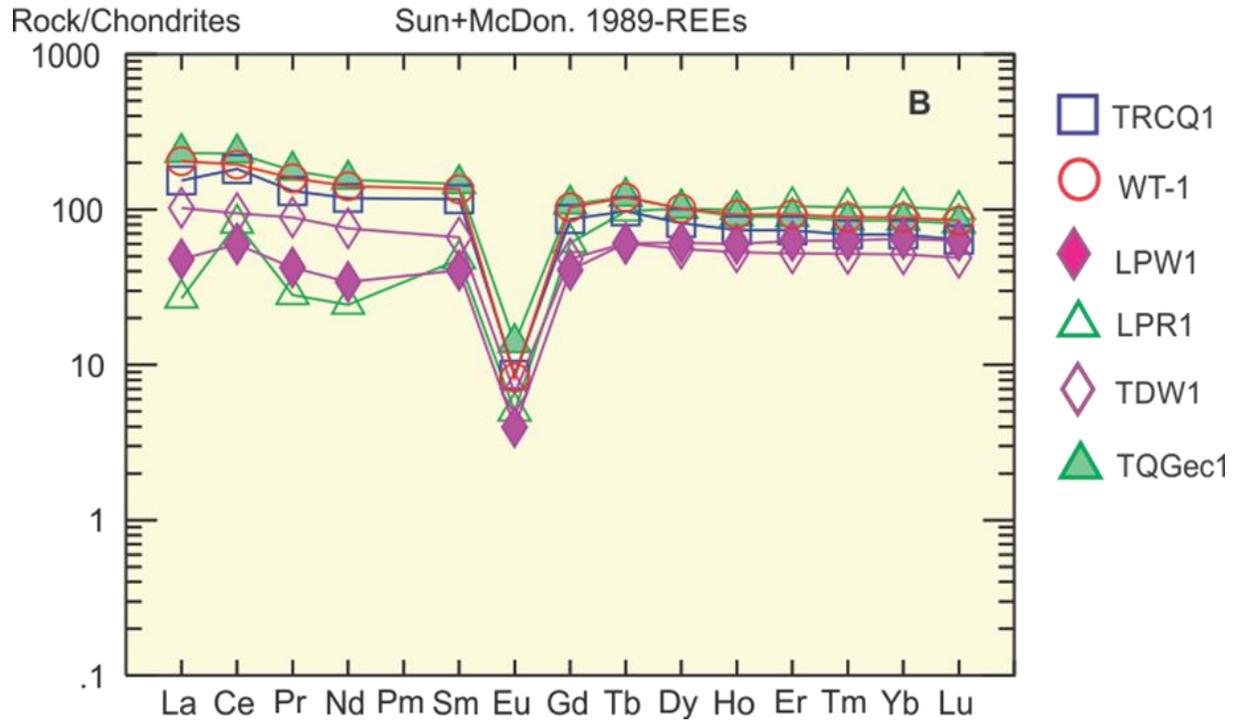


Figura 67. Diagrama spider de Tierras Raras normalizado a Condritas de la familia de Amazcala.

En el diagrama spider (Figura 67) de tierras raras de Sun. y McDonough (1989). Todas las muestras revelan el mismo patrón con anomalía negativa de Europio (Eu), asociadas al fraccionamiento de las plagioclasas.

Tabla 6. Concentraciones de Tierras Raras de las muestras de la familia de Amazcala

	LPR 1	TQGEC1	TRCQ1 REP	TRCQ1	TDW1	LPW1	WT1
La	6.33	54.76	36.35	31.10	24.23	11.34	48.50
Ce	49.58	140.21	111.51	91.03	57.81	36.49	119.16
Pr	2.67	16.89	12.49	10.35	8.43	4.01	15.11
Nd	11.37	72.56	55.32	46.18	35.28	15.95	65.98
Sm	7.29	22.28	17.79	14.75	10.11	6.20	20.66
Eu	0.29	0.80	0.50	0.42	0.38	0.23	0.48
Gd	12.49	22.09	17.80	14.50	9.89	8.36	21.22
Tb	3.63	4.52	3.64	2.98	2.26	2.26	4.46
Dy	25.79	25.60	20.75	16.76	14.17	15.49	25.71
Ho	5.62	5.10	4.16	3.32	3.00	3.39	5.24
Er	17.35	14.76	12.12	9.73	8.62	10.38	15.39
Tm	2.63	2.16	1.76	1.43	1.32	1.61	2.27
Yb	17.66	14.40	11.74	9.48	8.73	11.00	15.05
Lu	2.52	2.06	1.62	1.34	1.24	1.60	2.15

## ***Propiedades de espacio de poro de las rocas***

### ***Porosidad***

Los siguientes valores fueron remarcados individualmente para todas las tablas presentadas en esta sección. El color rojo es para los valores altos y el color verde es para los valores bajos.

**Tabla 7. Porosidad (%), densidad de matriz [g/cm<sup>3</sup>], densidad aparente/bulk [g/cm<sup>3</sup>].**

	<b>Porosidad [%]</b>	<b>Densidad de la Matriz (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidad Aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>TGQ1</b>	39.34	2.49	1.51
<b>TRCQ1</b>	24.59	2.59	1.95
<b>TQGec</b>	13.30	2.31	2.00
<b>TRH1</b>	37.60	2.57	1.60
<b>TAH1</b>	44.01	2.58	1.45
<b>WT1</b>	58.38	2.19	0.91
<b>BT1</b>	46.17	2.51	1.35
<b>LPW1</b>	18.93	2.49	2.02
<b>TDW1</b>	25.29	2.62	1.96
<b>LPR1</b>	13.33	2.58	2.24

Considerando que las muestras estudiadas en esta investigación son todas ignimbritas volcánicas y algunas lavas existe una marcada variación en su porcentaje de porosidad. La Tabla 7 muestra las distintas porosidades y densidades calculadas para estas rocas. La porosidad más alta la tiene la Ignimbrita Colón (WT1), seguida por la Ignimbrita Escolásticas Negra (BT1) y la Ignimbrita Huimilpan Amarilla (TAH1). Esta misma propiedad hace que estas rocas sean muy livianas, además de tener una densidad aparente muy baja aunque no del todo parecida. Estos hallazgos concuerdan con las observaciones macroscópicas descritas, ya que parecen ser muy porosas y frágiles. De hecho la preparación de la muestra WT1 fue muy difícil por ser tan frágil y porosa. Son seguidas por la Ignimbrita Escolásticas Gris (TGQ1) y por la Ignimbrita Roja de Huimilpan (TRH1) que presentan casi las mismas porosidades aunque la TRH1 presenta una mayor densidad aparente probablemente por su contenido en óxidos que le dan su color rojizo. Todas estas ignimbritas muestran la característica de tener un soldamiento de bajo a moderado. La Ignimbrita Rosa de la Cañada (TRCQ) mejor conocida localmente como “Cantera Rosa de la Cañada” presenta una porosidad más intermedia debido a su grado de soldamiento, el cual es de moderado a alto. Su porosidad es parecida a la de la Cantera Blanca de Tierra Dura (TDW1), esta roca es una

lava riolítica pero que contiene muchas estructuras de flujos que le hacen tener una mayor porosidad secundaria. La Cantera Blanca de Las Palmas (LPW1), La Ignimbrita amarilla de la Cañada (TQGec1) y la Cantera de Las Palmas Roja (LPR1) presentan las más bajas porosidades. La TQGec1 es una ignimbrita con alto grado de soldamiento y la LPR1 es una lava que presenta menores estructuras de flujo.

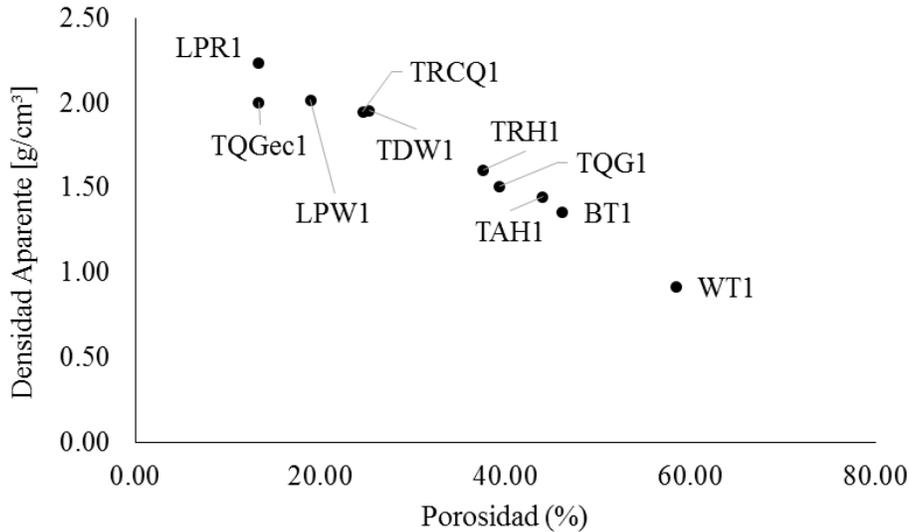


Figura 68. Grafica de densidad aparente [g/cm³] contra porosidad (%).

La Figura 68 muestra las densidades aparentes y las porosidades calculadas. Existe una marcada relación lineal entre la densidad y la porosidad, entre menos denso sea el material mayor es su porosidad y viceversa.

*Distribución de radio de poro*

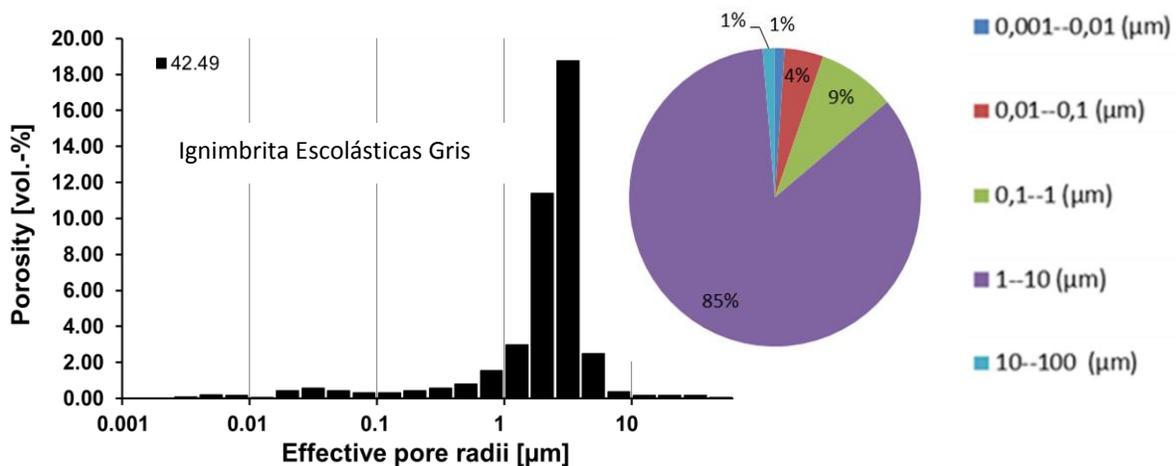


Figura 69. Histograma de la distribución del radio de poro de la Ignimbrita Escolásticas Gris (TGQ1)

El histograma la distribución del tamaño del poro de la Ignimbrita Escolásticas gris (Figura 69) muestra un área unimodal con un pico sobresaliente en la zona de los poros capilares. Los microporos casi no ocurren en esta roca. Una característica a tomar en cuenta es su elevada porosidad y que cuenta con un 85% de macroporosidad. El tamaño de poro promedio es de 1.815  $\mu\text{m}$ .

El histograma para la Ignimbrita Amarilla de la Cañada (Figura 70) muestra una tendencia unimodal con un pico sobresaliente en la zona de los microporos. Los poros capilares se presentan en una muy baja concentración. Muestra una baja porosidad del 14.43%. Un 93% de sus poros son microporos. El tamaño promedio de poro es de 0.035  $\mu\text{m}$ .

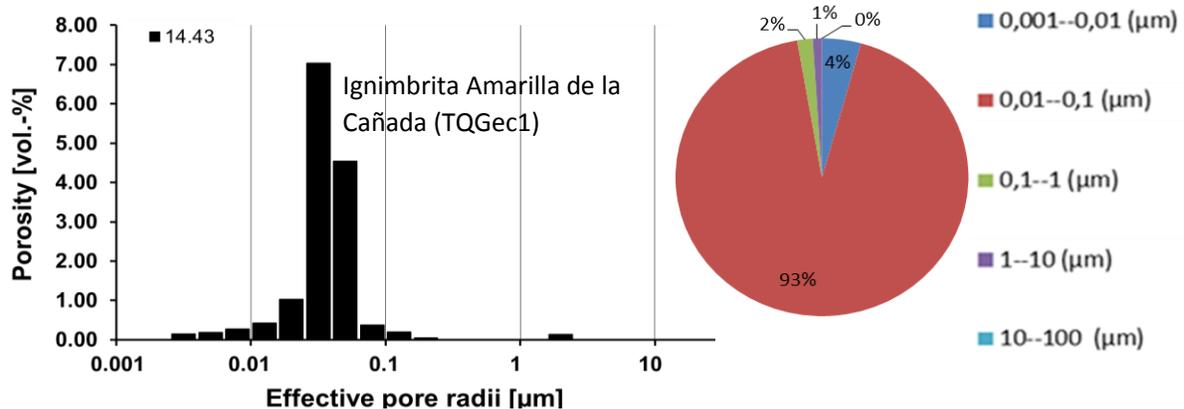


Figura 71. Distribución del radio de poro de la Ignimbrita amarilla de la Cañada (TQGec1)

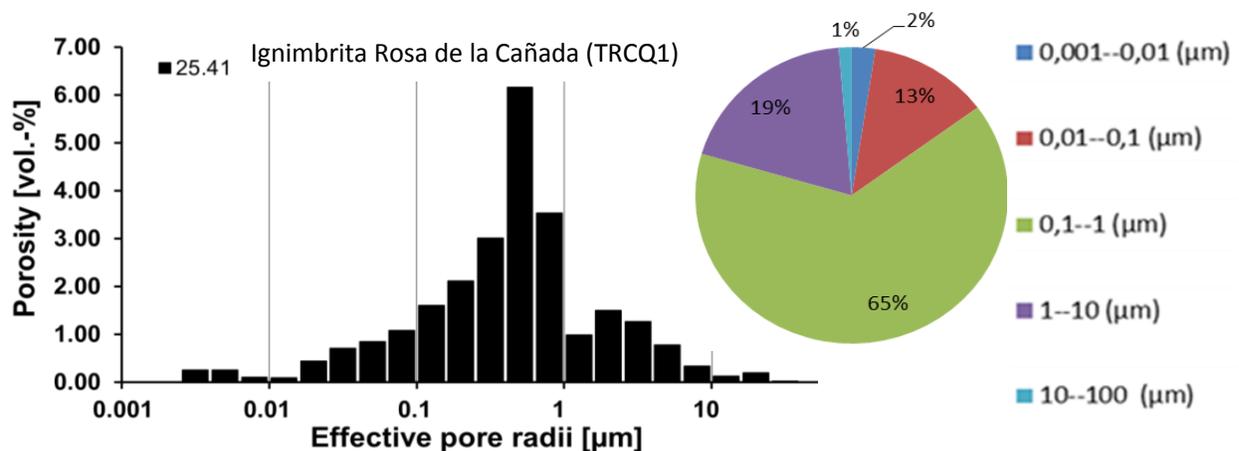


Figura 70. Distribución de radio de poro de la ignimbrita rosa de la Cañada (TRCQ1).

La distribución del radio de poro para la Ignimbrita rosa de la Cañada (TRCQ1, Figura 71) muestra una tendencia unimodal con un remarcado pico en la zona de poros capilares. Presenta la misma tendencia de poros a cada lado de la zona de poros capilares entre microporosidad y macroporosidad. El tamaño promedio de poro es de 0.407µm.

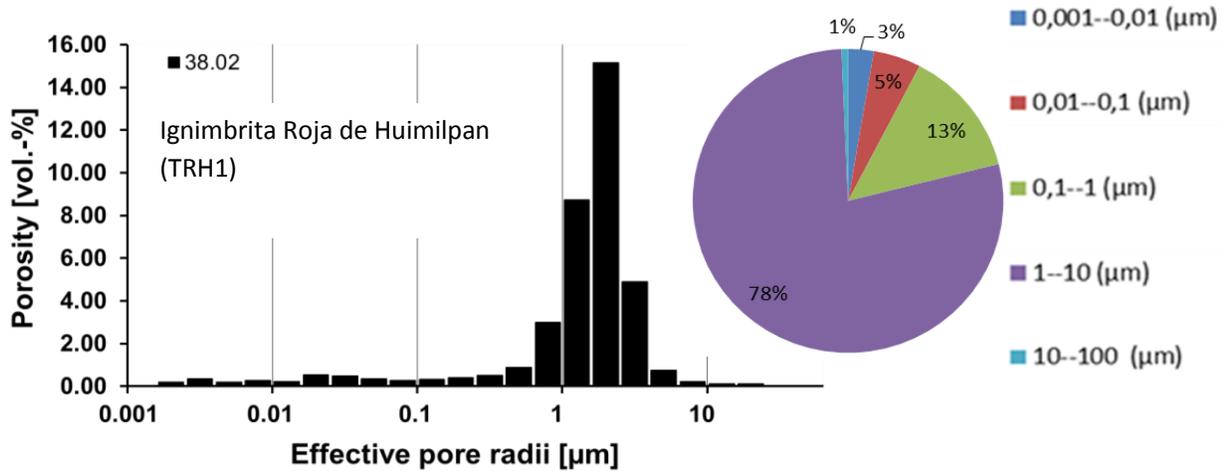


Figura 72. Distribución de radio de poro de la Ignimbrita rosa de Huimilpan (TRH1).

El histograma de la distribución de radio de poro para la Ignimbrita Roja de Huimilpan (Figura 72) muestra una tendencia unimodal con un sobresaliente pico en la zona de macroporosidad. Su porosidad es bastante alta. No presenta mucho rastro de microporosidad. Su tamaño promedio de poro es de 1.145 µm.

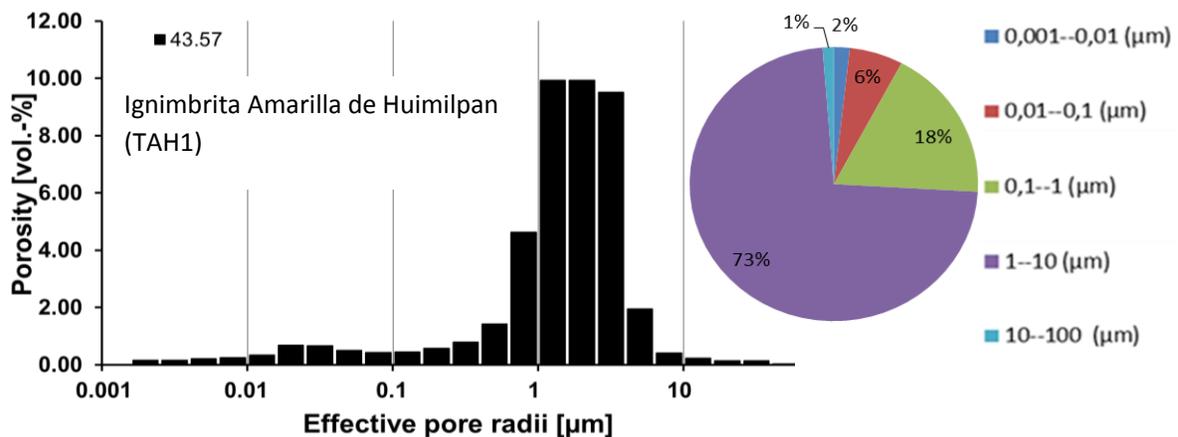


Figura 73. Distribución de radio de poro de la Ignimbrita amarilla de Huimilpan (TAH1).

El histograma la distribución del tamaño del poro de la Ignimbrita Amarilla de Huimilpan (Figura 73) muestra un área unimodal sobresaliente en la zona de los poros capilares. Los microporos sobresalen muy poco en esta roca. Una característica a tomar en cuenta es su elevada porosidad y que cuenta con un 73% de macroporosidad. A diferencia de la ignimbrita Escolásticas Gris (TGQ1) y la Ignimbrita roja de Huimilpan (TRH1), que muestran un gran porcentaje de macroporosidad, esta muestra presenta un mayor porcentaje de poros capilares pero una similar magnitud en la concentración de microporosidad. El tamaño de poro promedio es de 1.191  $\mu\text{m}$ .

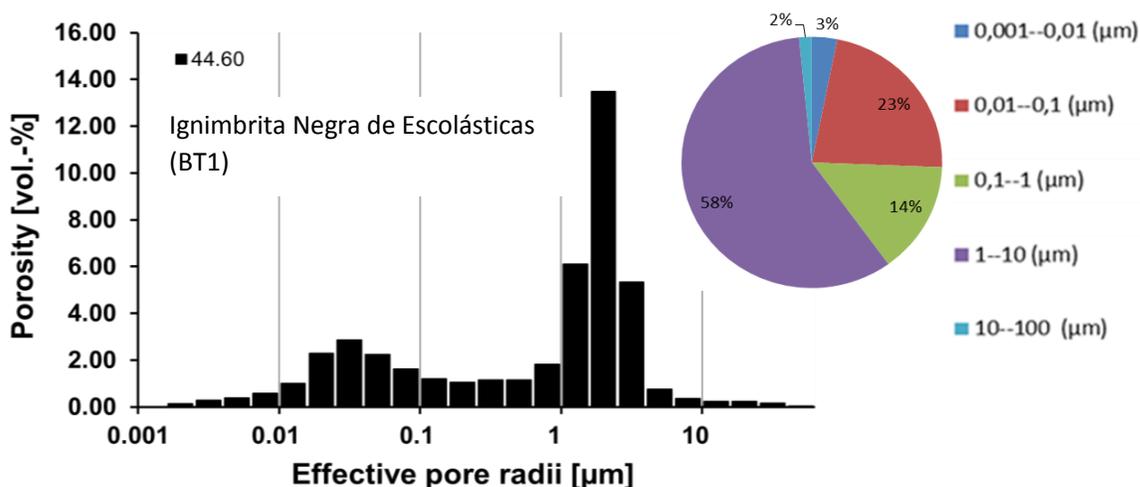


Figura 74. Distribución de radio de poro de la Ignimbrita Negra de Escolásticas (BT1).

El histograma la distribución del tamaño del poro de la Ignimbrita Escolásticas Negra (Figura 74) muestra un área y tendencia bimodal con un pico sobresaliente en la zona de los poros capilares y otro no tan pronunciado en el área de los microporos. Los microporos más ocurren en esta roca que en la Ignimbrita Amarilla de Huimilpan (TAH). Sin embargo esta ignimbrita es algo más parecida a la TAH1 que en las TGQ1 y TRH1. Una característica a tomar en cuenta es su elevada porosidad y que cuenta con un 58% de macroporosidad. El tamaño de poro promedio es de 0.542  $\mu\text{m}$ . cabe mencionar que estas ignimbritas pertenecen a la misma formación teniendo en la base la Ignimbrita Negra de Escolásticas (BT1), seguida por Ignimbrita Amarilla de Huimilpan (TAH1) y la Ignimbrita Roja de Huimilpan (TRH1) y culminando con la Ignimbrita Escolásticas Gris (TGQ1). Es muy probable que por ello, muestren características similares aunque no del todo iguales.

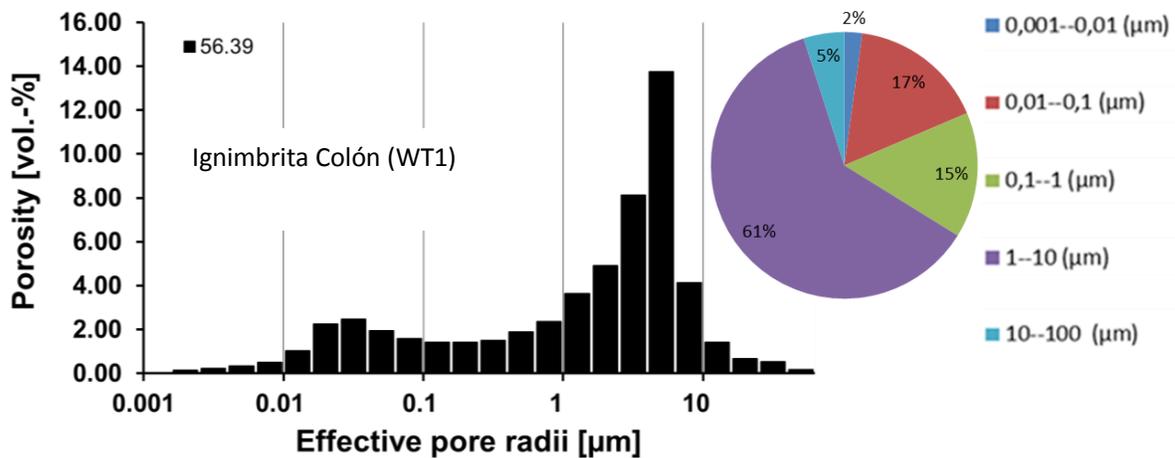


Figura 75. Distribución de radio de la Ignimbrita Colón (WT1).

El histograma la distribución del tamaño del poro de la Ignimbrita Colón (Figura 75) muestra un área bimodal con un pico sobresaliente en la zona de los poros capilares y uno suave en la zona de los microporos. Tiene una tendencia parecida a la que presenta la ignimbrita escolásticas negra (BT1). Una característica a tomar en cuenta es su muy elevada porosidad. Cuenta con un 61% de macroporosidad. El tamaño de poro promedio es de 1.101  $\mu\text{m}$ .

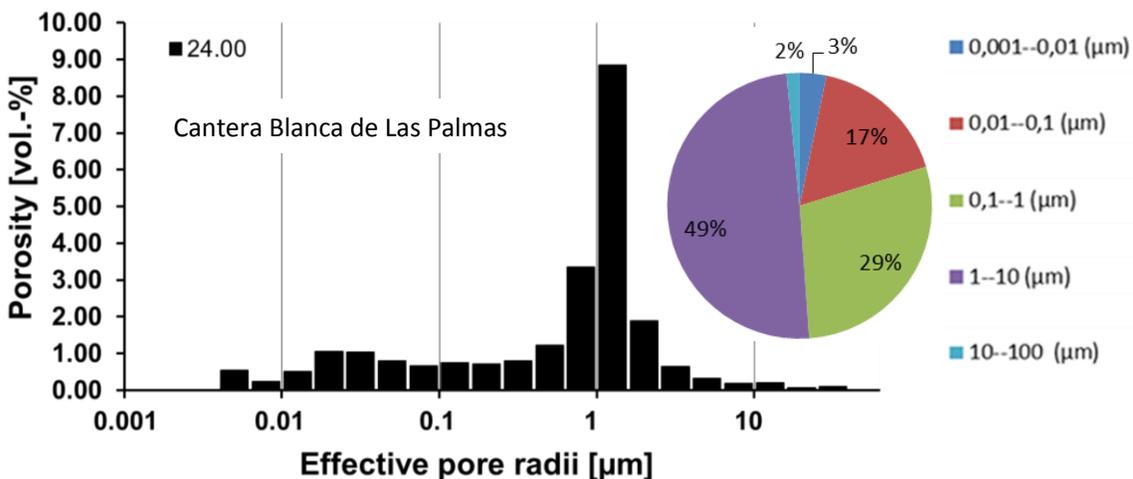


Figura 76. Distribución de radio de poro de la Cantera Blanca de Las Palmas (LPW1).

El histograma la distribución del tamaño del poro de la Cantera Blanca de las Palmas (Figura 76) muestra un área unimodal con un pico sobresaliente en la zona de los poros macroporos. Los microporos tienen la misma abundancia que los poros capilares. Tiene una porosidad moderada de 24% de macroporosidad. El tamaño de poro promedio es de 0.487  $\mu\text{m}$ .

La distribución de radio de poro de las ignimbritas analizadas muestra que aunque similares en composición y textura presentan una variación significativa en el tamaño promedio de poro. Un claro ejemplo de ello es la Ignimbrita Escolásticas Negra; la cual presenta valores altísimos de porcentaje de porosidad pero el tamaño promedio de poro no es tan alto como lo es en las demás ignimbritas de porosidad alta como lo son la TGQ1, TAH1, TRH1 y la WT1 (Tabla 8). Las ignimbritas LPW1 y TRCQ1 tienen más baja porosidad que las anteriores y el tamaño promedio de poro cae en la zona de poros capilares. La única ignimbrita que tiene la más baja porosidad de todas es la TQGec1 y es la única que presento tener el tamaño promedio de poro dentro de la zona de microporos. Estas variaciones en la porosidad y en tamaño promedio del radio de poro están muy ligadas con el grado de soldamiento de la roca. Se recomendaría, cuando se trate de estudiar a una roca piroclástica con componentes de distintas tallas, hacer la distribución de radio de poro a cada uno de los distintos componentes que la conforman junto con su matriz para hacer un análisis más detallado de su microporosidad.

**Tabla 8 Radio de poro promedio [ $\mu\text{m}$ ] de las muestras.**

Muestra	Tamaño de radio de poro promedio ( $\mu\text{m}$ )
TGQ1	1.815
TQGec1	0.035
TRCQ1	0.407
TRH1	1.145
TAH1	1.191
BT1	0.542
WT1	1.101
LPW1	0.487

## ***Transporte de agua y propiedades de retención de agua de las rocas***

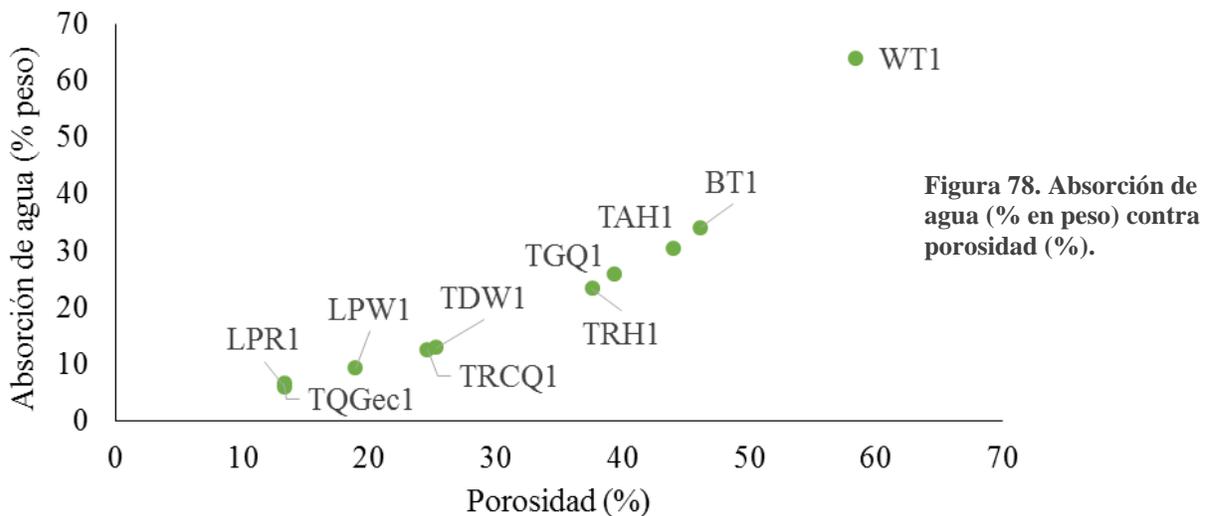
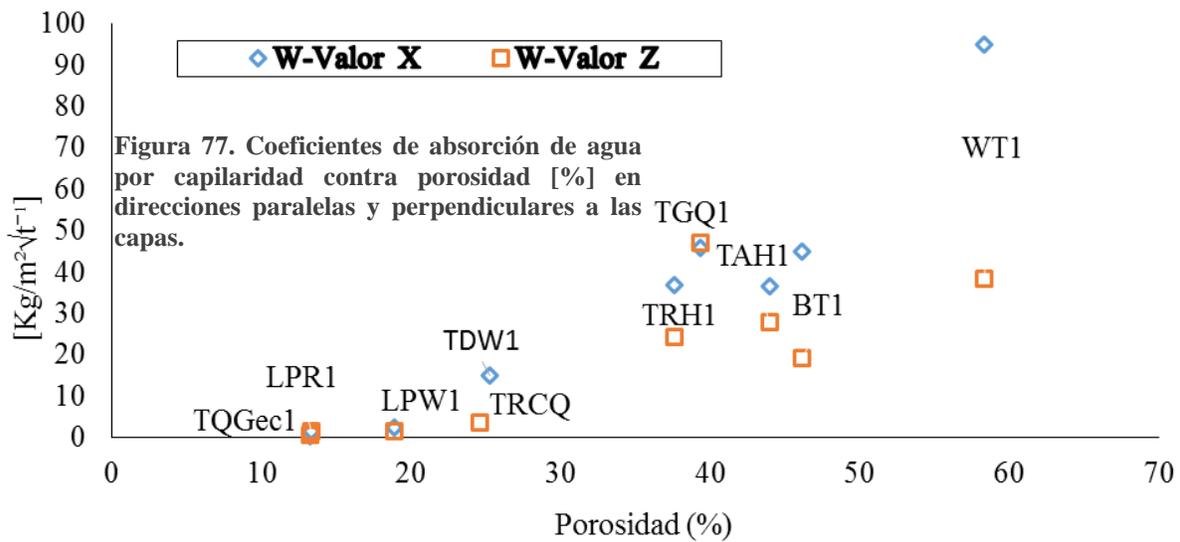
### *Absorción de agua por capilaridad*

En la absorción de agua por capilaridad (Tabla 9) se muestran altos valores (*W-Valor*) para la Ignimbrita Colón (WT1) los cuales concuerdan con su alto porcentaje de porosidad al igual que las Ignimbritas Negra y Gris (BT1 y TGQ1) y para las Ignimbritas Roja y Amarilla de Huimilpan (TRH1 y TAH1). Estas muestras se saturaron en un intervalo muy corto de tiempo. Estos altos valores de coeficiente de agua por capilaridad (*W-Valores*) tienen mucha relación el porcentaje de absorción de agua en peso de las muestras (Figura 77).

La Ignimbrita Colón muestra coeficientes de *w*-valor altos, absorbe el 63% de su peso en agua. Estos valores altos son producto de su muy elevada porosidad. Existe una relación lineal entre la porosidad (%) y el porcentaje de absorción de agua en peso (Figura 78).

Tabla 9. Coeficientes de absorción de agua por capilaridad y porcentaje de absorción.

Muestra	[Kg/m <sup>2</sup> √t <sup>-1</sup> ] X	[Kg/m <sup>2</sup> √t <sup>-1</sup> ] Z	Absorción de agua (% en peso)
TGQ1	45.77	47.107	26.05
TRH1	36.86	24.19	23.44
TAH1	36.69	27.76	30.42
TQGec1	0.4264	0.637	6.63
BT1	44.8	19.1588	34.14
WT1	94.96	38.47	63.93
LPW1	2.5	1.66	9.38
LPR1	1.61	1.61	5.95
TDW1	14.95		12.92
TRCQ1		3.7	12.6



### Resistencia a la difusión de vapor de agua

Para determinar la magnitud de la difusión de vapor de agua en las muestras y encontrar el coeficiente de resistencia a la difusión de vapor (Coeficiente de resistencia  $\mu$ ) las pruebas fueron realizadas en ambos ejes paralelos y perpendiculares a la estratificación. La Cantera Blanca de Las Palmas (LPW1) muestra los coeficientes de resistencia a la difusión de vapor de agua y por el contrario los valores del coeficiente de resistencia a la difusión de vapor de agua son para la Ignimbrita Amarilla de Huimilpan (TAH1). Estas relaciones son claramente lineales con la porosidad de las muestras. El coeficiente de resistencia  $\mu$  más alto es para las muestras con baja porosidad mientras que para las muestras con un porcentaje de porosidad más elevado ocurre exactamente lo contrario. En la Tabla 10 se observa que los coeficientes  $\mu$  tienden a ser menores cuando se calculan en dirección paralela a las capas (dirección del eje x) y más elevados cuando son perpendiculares (dirección del eje z).

Tabla 10. Coeficientes de resistencia a la difusión de vapor ( $\mu$ -Coef.) en dirección paralela y perpendicular a las capas.

Muestra	$\mu$ -Coef. X	$\mu$ -Coef. Z
TRH1	9.413699	13.02427
TAH1	7.27	8.770188
TGQ1	8.955381	10.67373
BT1	11.54079	10.50668
TRCQ1	22.95342	23.94
LPW1	35.2	33.95

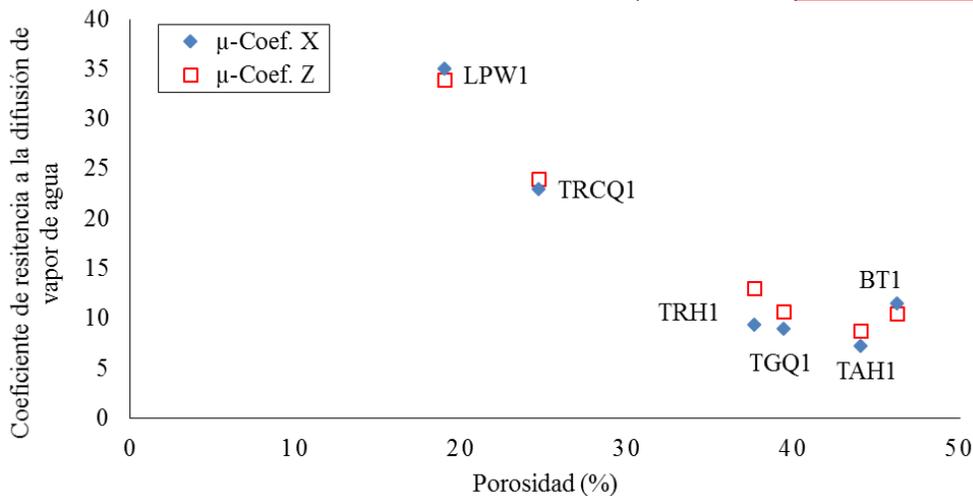


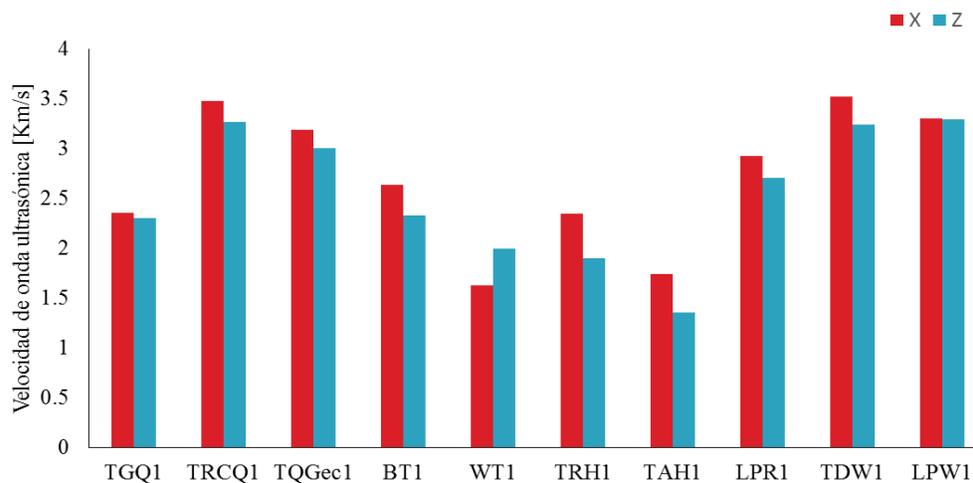
Figura 79. Resistencia a la difusión de vapor de agua contra porosidad (%) en direcciones paralelas y perpendiculares a las capas.

## Propiedades mecánicas / elásticas de las rocas

### Velocidad de onda ultrasónica/Módulo elástico

Existe una diferencia entre las velocidades de onda ultrasónica (Tabla 11 y Figura 80) donde la más baja es de 1.35 km/s para la Ignimbrita Amarilla de Huimilpan (TAH1) y la más alta es de 3.555 km/s para la Cantera Blanca de Tierra Dura (TDW1). Esta variación en velocidades establece que la onda atraviesa medios anisótropos. Se puede establecer que la porosidad juega un papel muy importante en la transmisión de la onda ultrasónica que es claramente visto en la Figura 81, donde se compara las velocidades de ultrasonido contra la porosidad (%) en dirección paralela y perpendicular a las capas. También existe una tendencia al haber una disminución en la velocidad cuando esta se mide en dirección al eje z o perpendicular a las capas, esto debido al espacio que existe entre capa y capa (Figura 81).

**Figura 80.** Velocidades de onda ultrasónica de las muestras. En rojo las velocidades en el eje X (paralelas a las capas) y en azul las velocidades en el eje Z (perpendiculares a las capas).



Muestra	X	Z	Y
	V [Km/s]	V [Km/s]	V [Km/s]
TGQ1	2.3544	2.2978	2.0104
TRCQ1	3.4758	3.2636	3.363
TQGec1	3.1868	3.0062	3.2202
BT1	2.6388	2.3306	2.6222
WT1	1.6262	1.9962	1.8306
TRH1	2.3446	1.8962	2.3542
TAH1	1.7384	1.355	1.706
LPR1	2.9212	2.7064	3.0506
TDW1	3.5186	3.24	3.5556
LPW1	3.298	3.2924	3.476

**Tabla 11.** Velocidades de onda ultrasónica calculada en las muestras en los ejes x,y,z, en direcciones paralelas y perpendiculares a las capas.

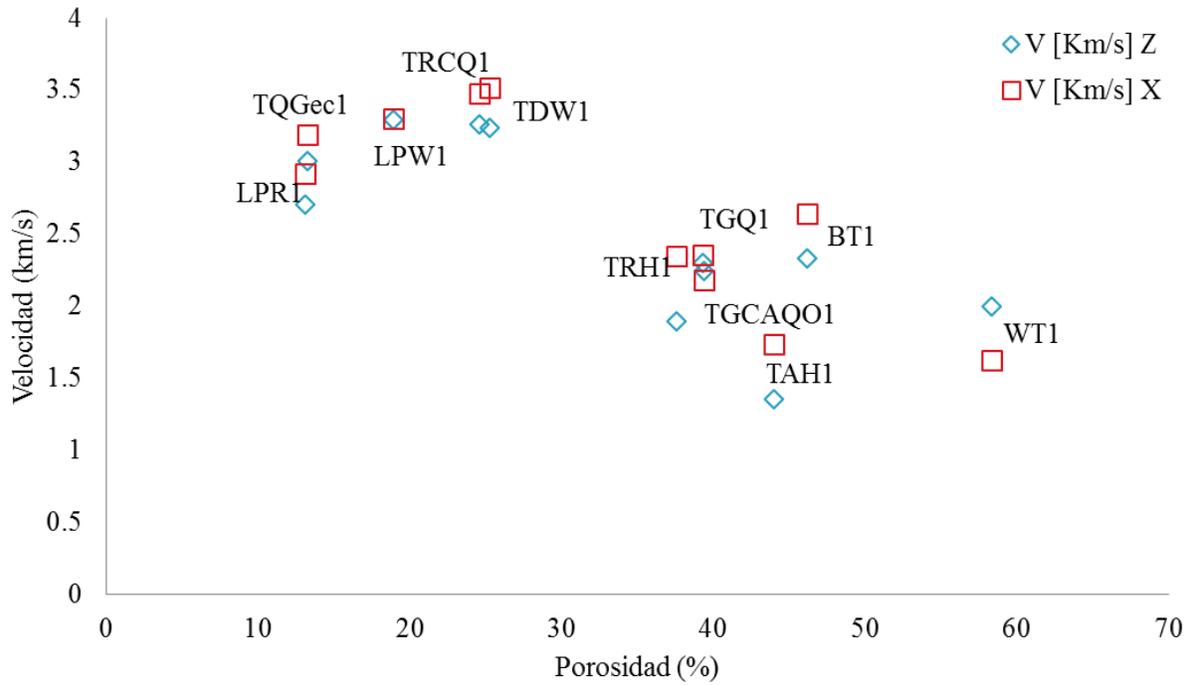


Figura 81. Velocidad de onda ultrasónica en [km/s] contra porosidad (%) en direcciones paralelas y perpendiculares a las capas.

Con las velocidades de onda ultrasónica se puede determinar el Módulo de Young o Módulo Elásticos con la siguiente formula (Ecuación 5 y Tabla 12).

Ecuación 5

$$E = \rho \times v^2 \text{ [Gpa]}$$

Donde  $\rho$  = Densidad [kg/m<sup>3</sup>]

v = Velocidad de onda ultrasónica [m/s]

Muestra	X	Z
	Modulo Elástico [GPa]	Modulo Elástico [Gpa]
TGQ1	11.69	14.59
TRCQ1	37.18	37.07
TQGec	23.74	21.88
TRH1	19.59	15.36
TAH1	12.00	11.90
WT1	14.94	12.15
BT1	12.26	9.94
LPW1	27.12	27.60
TDW1	35.93	33.35
LPR1	32.88	33.18

Tabla 12. Tabla comparativa del módulo elástico paralelo y perpendicular a las capas.

Se debe de observar que velocidades de ultrasonido altas representan un módulo de elasticidad elevado. Adicionalmente los módulos elásticos calculados son correlacionados con la porosidad (Figura 82).

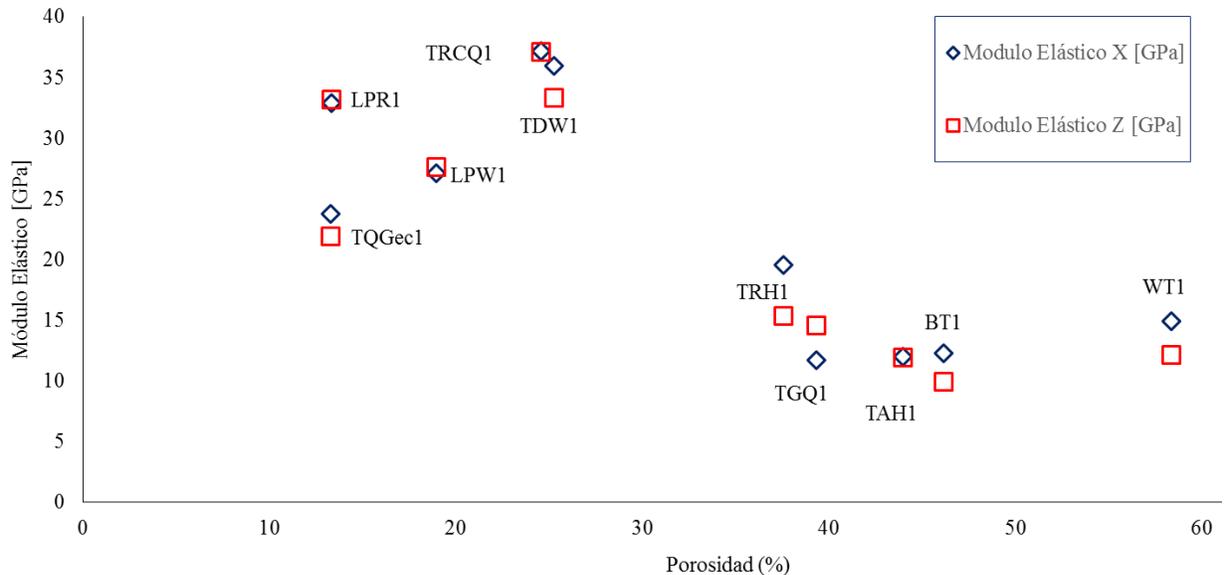


Figura 82. Módulos de elasticidad [GPa] contra porosidad (%) paralelas y perpendiculares a las capas

### Fuerza de partición por tensión

La fuerza máxima [kN] calculada en estas muestras siempre es mayor a la fuerza de partición por tensión [MPa] (Tabla 13), aunque para estas rocas la diferencia no es mucha, la fuerza máxima para la Ignimbrita Rosa de la Cañada es de 12.33 kN, la cual es la más alta en su eje Z y la más baja con 2.388 kN es para la Ignimbrita Amarilla de Huimilpan (Figura 83). Haciendo una comparación con la porosidad de las muestras, existe una relación lineal entre la fuerza de partición por tensión y la porosidad. Entre más baja sea la porosidad, menor es

Tabla 13. Fuerza de partición por tensión [MPa] y fuerza máxima [kN] de las muestras en direcciones paralelas (X) y perpendiculares (Z) a las capas.

Muestra	X		Z	
	F. Máxima [kN]	F. Tensión [MPa]	F. Máxima [kN]	F. Tensión [MPa]
TGQ1	4.057	2.97	5.49	3.58
TRCQ1	9.83	6.53	12.33	7.87
TRH1	3.9	2.94	4.875	3.52
TAH1	2.388	1.56	2.275	1.7
BT1	2.668	1.98	3.907	2.62
LPW1	6.362	5.1	6.493	6.12

la fuerza de partición por tensión y viceversa. Esta comparación está representada en la (Figura 84).

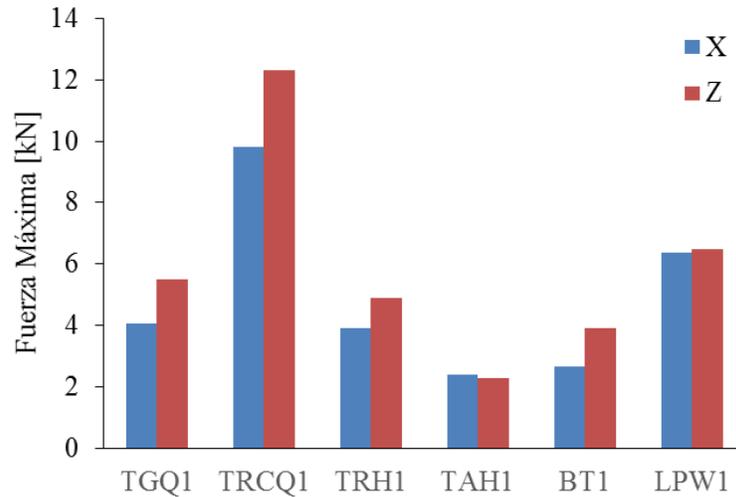


Figura 83. Fuerza máxima de las pruebas [kN]. Representado con azul: fuerza máxima en dirección paralela a las capas (x), con rojo: fuerza máxima en dirección perpendicular a las capas (z).

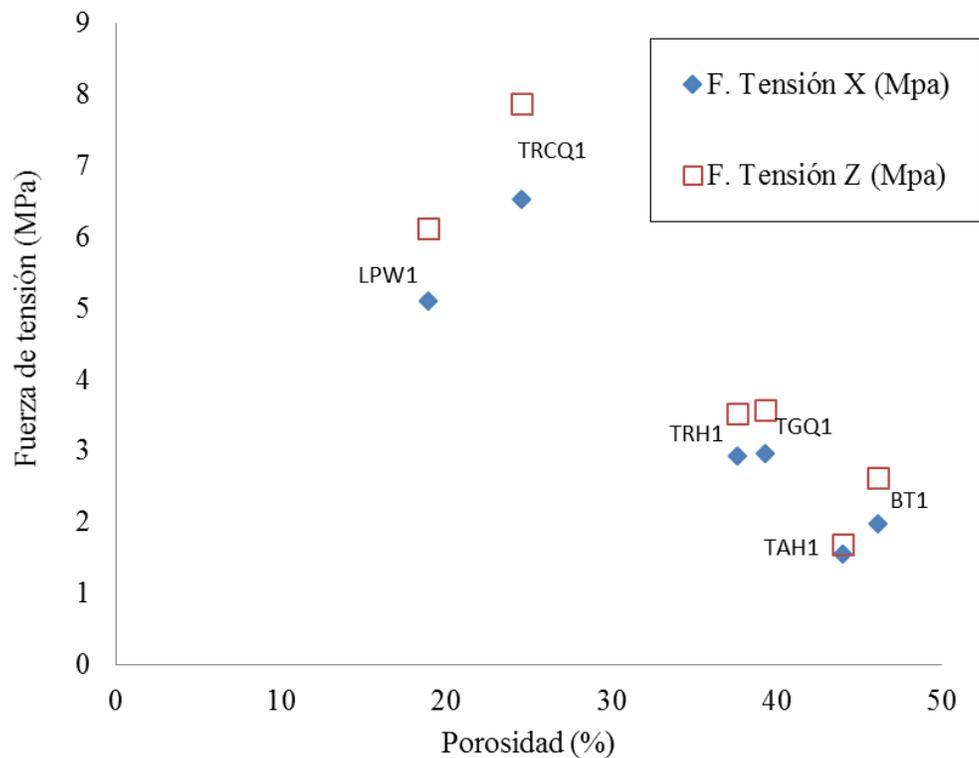


Figura 84. Fuerza de partición por tensión [MPa] contra porosidad (%) en dirección perpendicular y paralelas a las capas.

## Propiedades de intemperismo de las rocas

### Dilatación térmica

Las dilataciones térmicas de las muestras (Figura 85) varían de manera diferente aunque con un comportamiento similar para la mayoría. La expansión térmica más alta la tuvo la Ignimbrita Escolásticas Gris (TGQ1) en dirección perpendicular a la estratificación de 0.800 mm/m. comportamientos similares tuvieron la Ignimbrita Roja y la Ignimbrita Amarilla de Huimilpan (TAH1 y TRH1). La mayoría de las muestras tuvieron expansiones mayores de 0.1 mm/m hasta 0.8 mm/m Algo inusual paso con la Ignimbrita Colón, la cual sufrió un encogimiento a medida que la temperatura subió, probablemente al liberar agua. La Ignimbrita Escolásticas Negra (BT1) tuvo una expansión muy pobre en cualquiera de sus ejes.

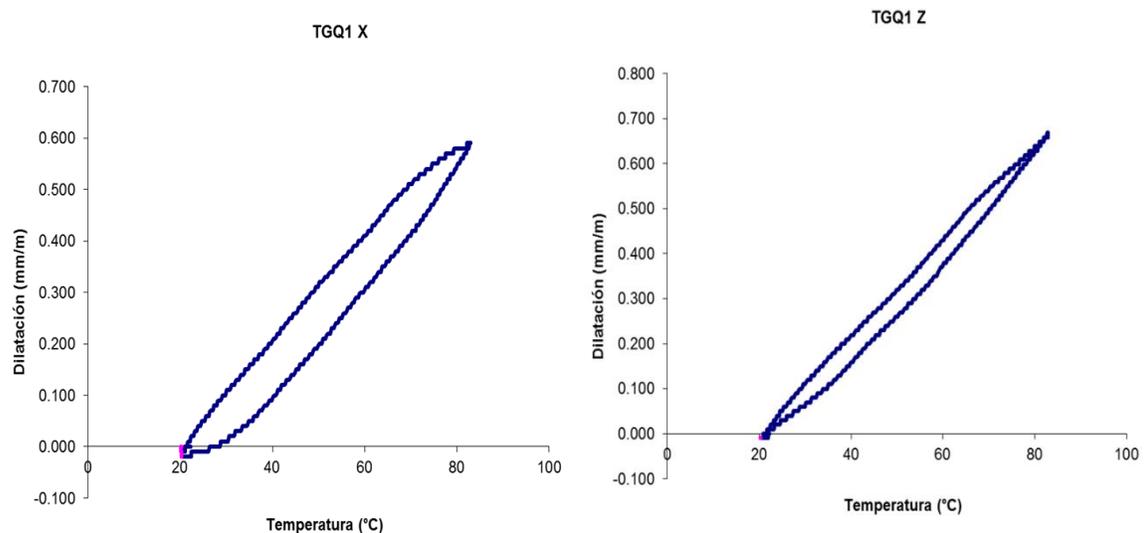
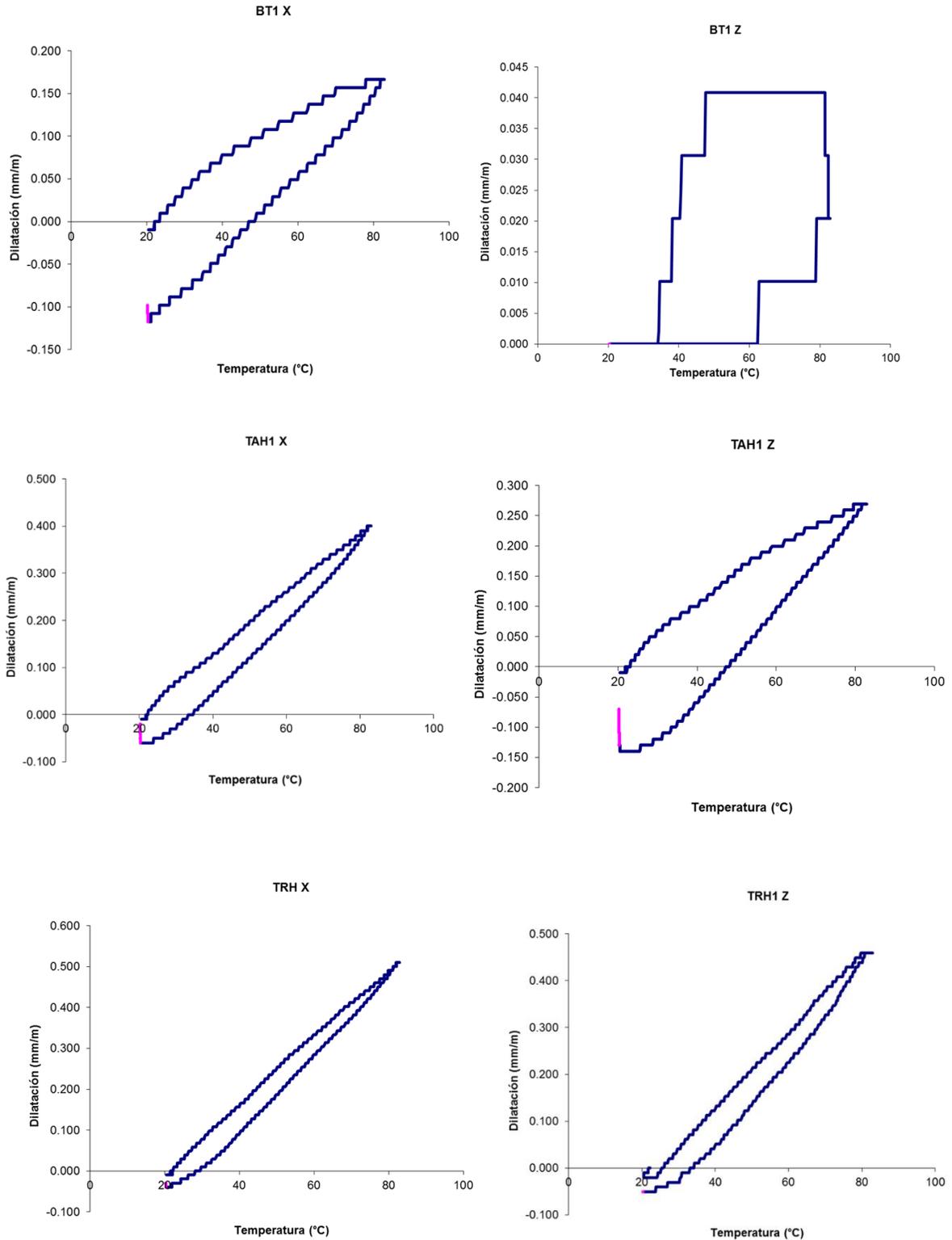
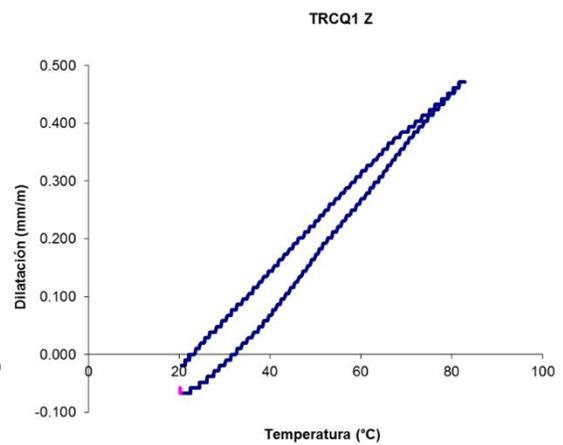
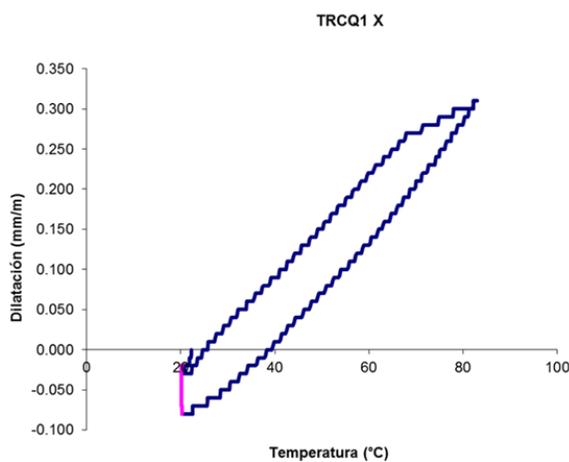
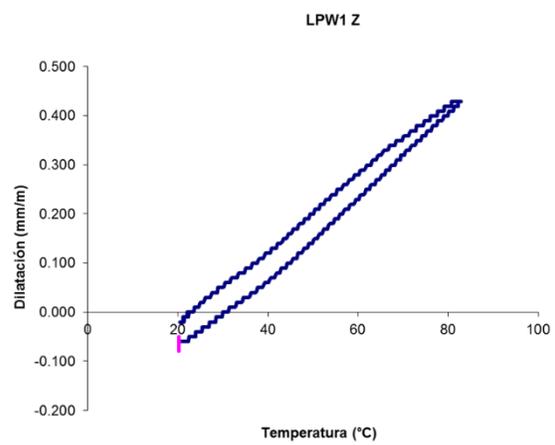
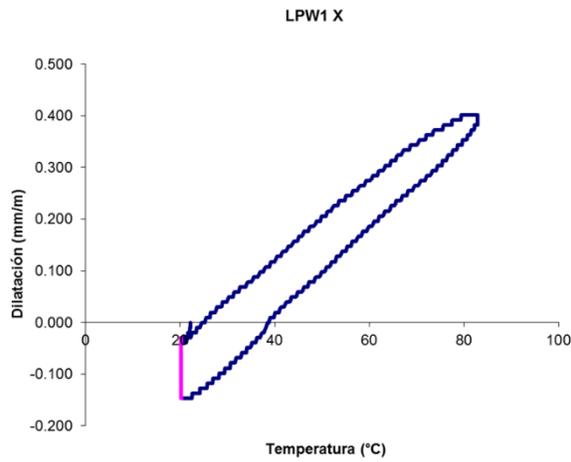
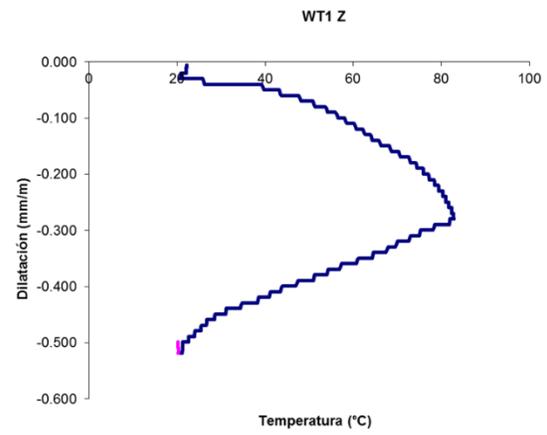
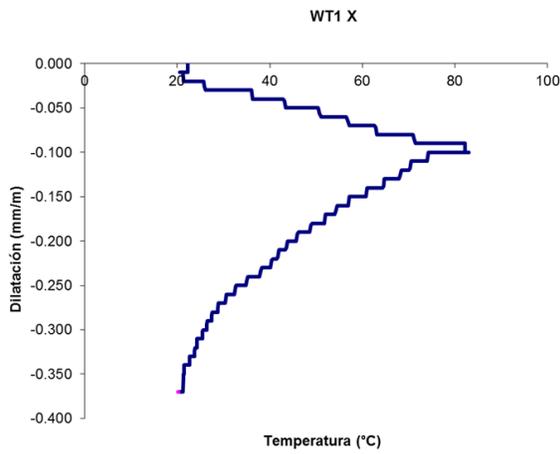


Figura 85. Graficas de la dilatación térmica de las muestras [mm/m] en direcciones paralelas y perpendiculares a las capas.

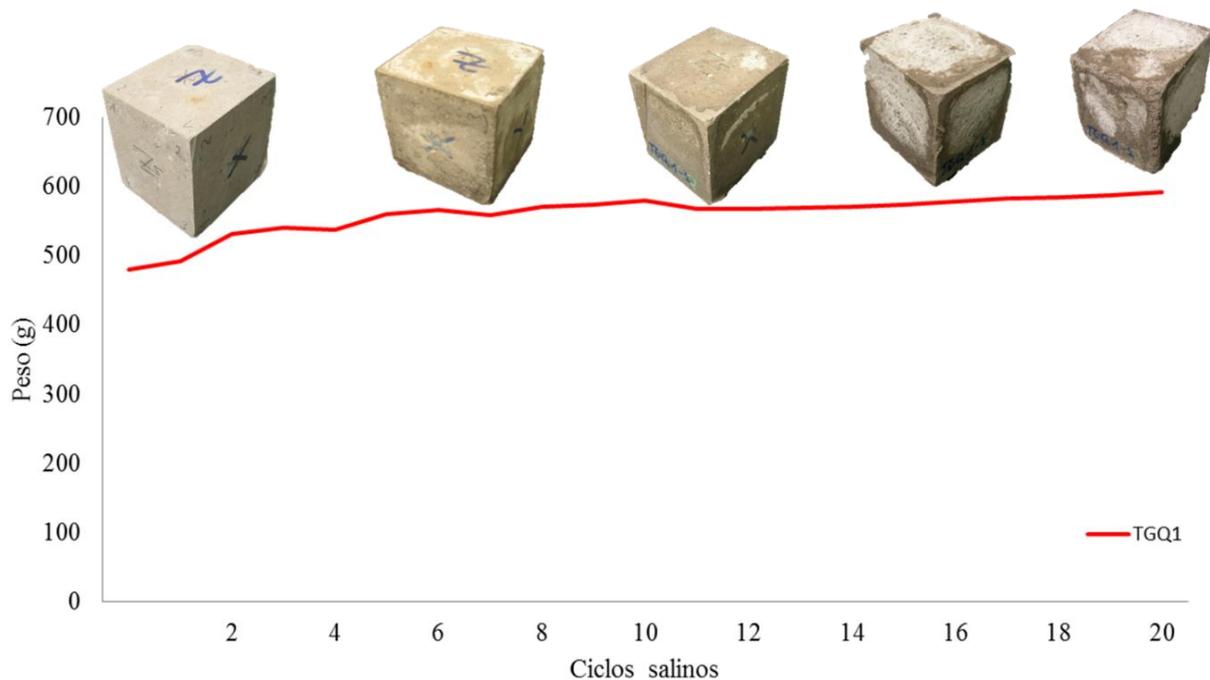




## ***Destrucción Salina***

### *Ciclos salinos*

El remarcado efecto de las sales en la roca está claramente representado en estos experimentos. Para las Ignimbritas Escolásticas Gris (Figura 86), Roja y Amarilla (Figura 87 y 88) de Huimilpan (TRH1 y TAH1) se puede observar una marcada eflorescencia salina la cual se presenta desde el centro de la muestra de manera esférica hacia sus bores aunada a una decoloración de sus tonalidades naturales. Estas rocas muestran una alta porosidad muy similares entre si además de una marcada absorción de agua. La Ignimbrita Escolásticas Gris y Roja de Huimilpan (TGQ1 y TRH1) aguantaron más de 20 ciclos mientras que la Amarilla de Huimilpan cedió a la sal a los 16 ciclos además de perder más del 50% del peso con el que se inició la prueba



**Figura 86.** Prueba de destrucción salina para la Ignimbrita Escolásticas Gis (TGQ1). Prueba de 20 ciclos.

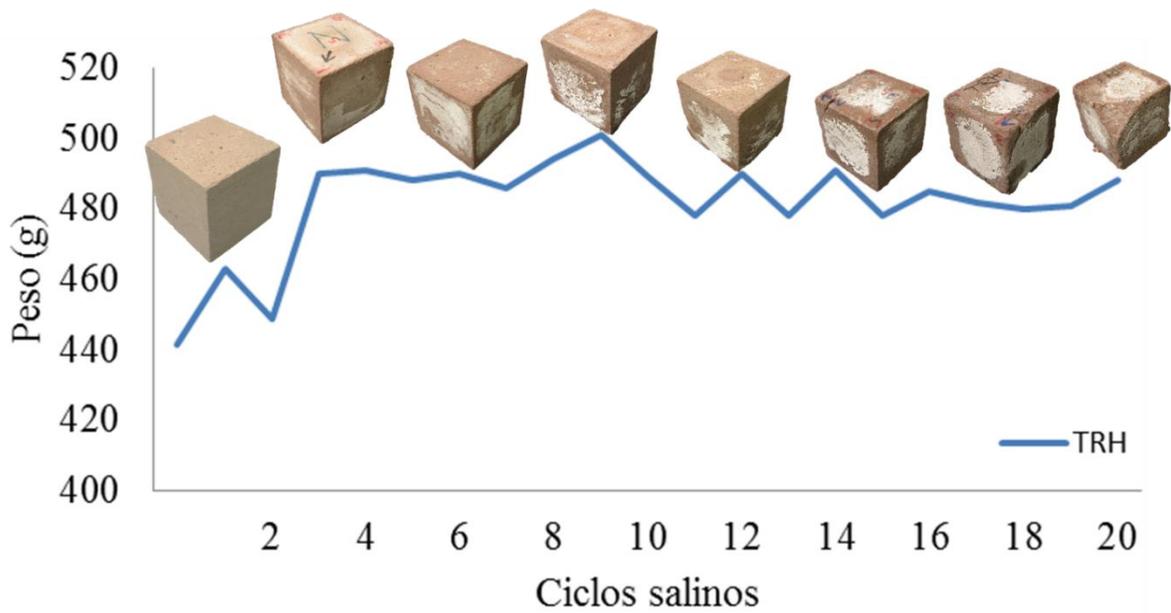


Figura 88. Prueba de destrucción salina para Ignimbrita Roja de Huimilpan (TRH1). Prueba hasta ciclo 20.

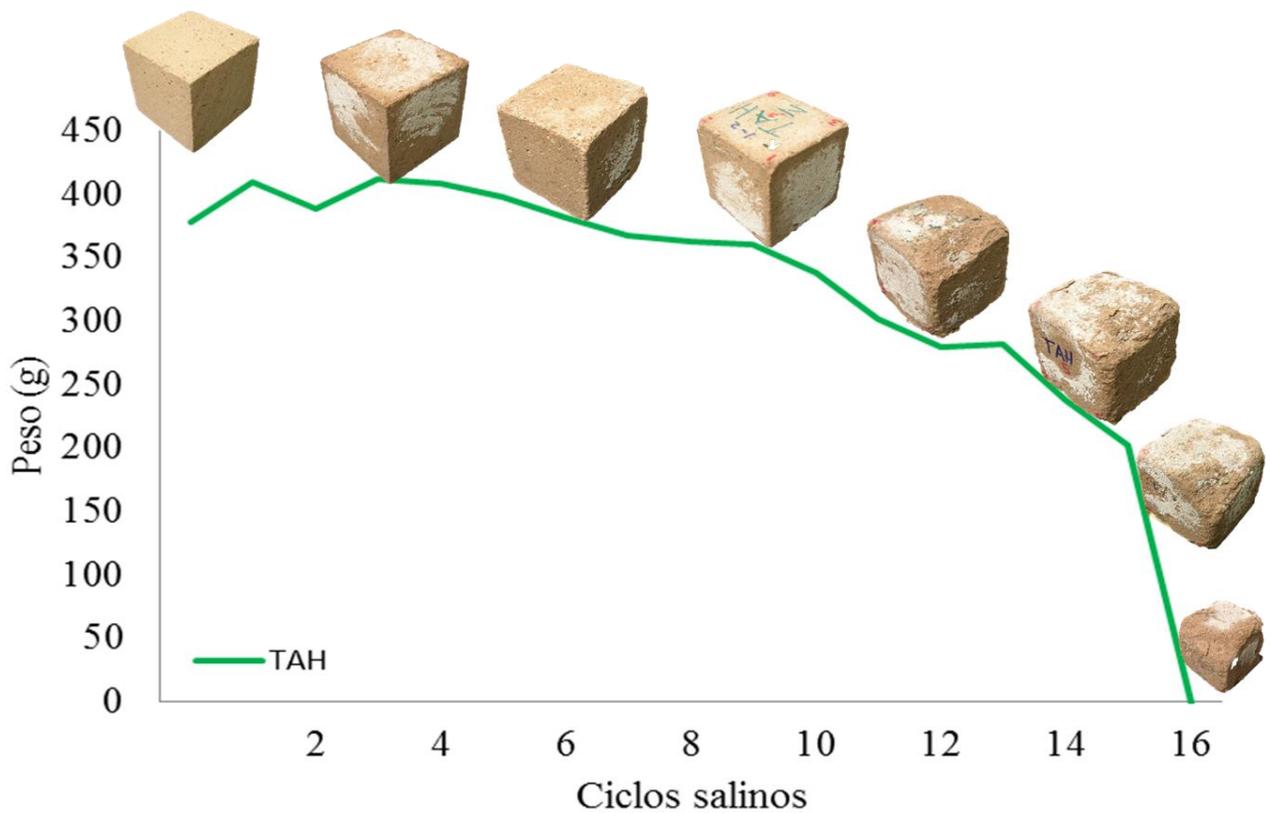


Figura 87. Prueba de destrucción salina para la Ignimbrita Amarilla de Huimilpan (TAH1). Destrucción en ciclo 16.

Para las muestras de la Ignimbrita Rosa de la Cañada (TRCQ1) y de la Amarilla de la Cañada (TQGeC1) no se presentó ninguna evidencia de cristalización salina debido a su baja porosidad (Figuras 89 y 90). Solo mostraron un incremento en peso probablemente debido a que la cristalización de la sal ocurre por el interior de la muestra y no por su exterior, esto puede ser debido a su elevado dominio de microporosidad y poros capilares.

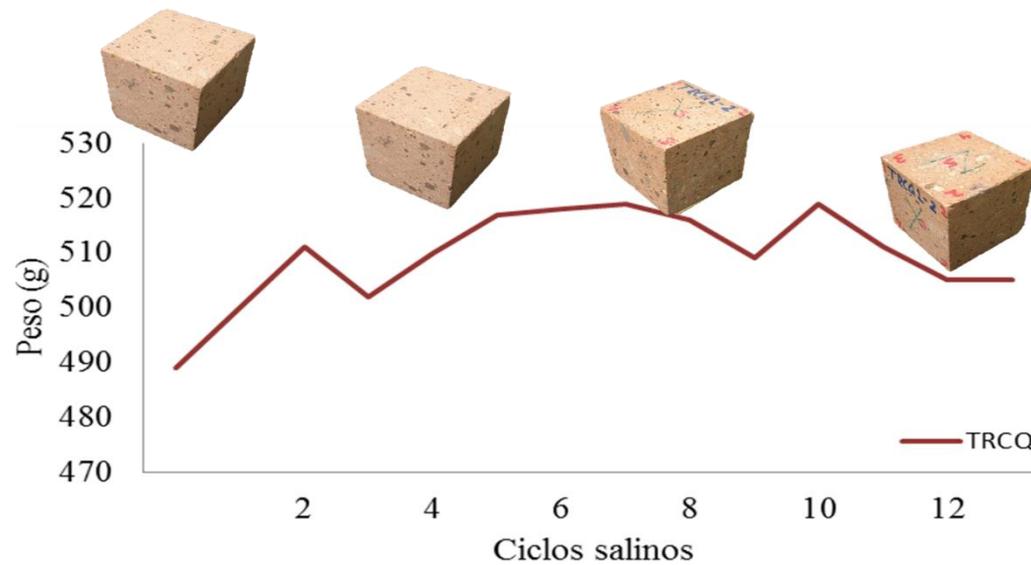


Figura 90. Prueba de destrucción salina para la Ignimbrita Rosa de la Cañada (TRCQ1). Prueba hasta ciclo 13

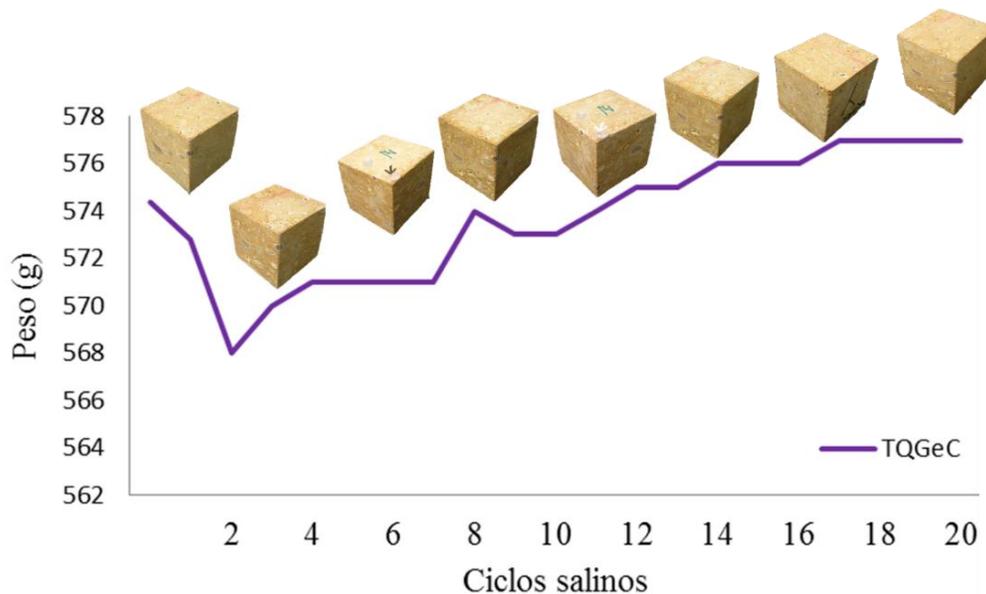


Figura 89. Prueba de destrucción salina para la Ignimbrita Amarilla de la Cañada (TQGeC1). Prueba hasta el ciclo 20

Las pruebas de destrucción salina para la Ignimbrita Negra de Escolásticas y para la Ignimbrita Colón (Figuras 91 y 92) fueron de menor cantidad de ciclos que las anteriormente descritas. La BT1 se destruyó en su 13 ciclo mientras la WT1 aguantó solo 7. Se puede establecer una correlación entre la porosidad de las muestras y sus ciclos de destrucción salina. La Figura 93 muestra dicha tendencia, la cual, al tener mayor porosidad menor es la cantidad de ciclos salinos que la destruyen aunque esto dependiera del grado de consolidación y cohesión de la muestra. Por ejemplo la muestra de la Ignimbrita Escolásticas Negra (BT1) y la muestra de la Ignimbrita Escolásticas Gris (TGQ1) tienen similar porcentaje de porosidad, pero no el mismo grado de cohesión, el grado de solides de la muestra BT1 es menor que el de la TGQ1. Lo mismo pasa con la Ignimbrita Amarilla de Huimilpan (TAH1) y la Ignimbrita Roja de Huimilpan (TRH1). En la Figura 94 se compara la fuerza de partición por tensión contra los ciclos de destrucción salina, no existe medición en la Ignimbrita Colón de la prueba brasileña de tensión ya que al momento de la preparación de la muestra esta se desintegraba debido a su baja cohesión, en la grafica se puede apreciar que entre menor es la fuerza de partición por tensión, menor es la cantidad de aguante de los ciclos salinos.

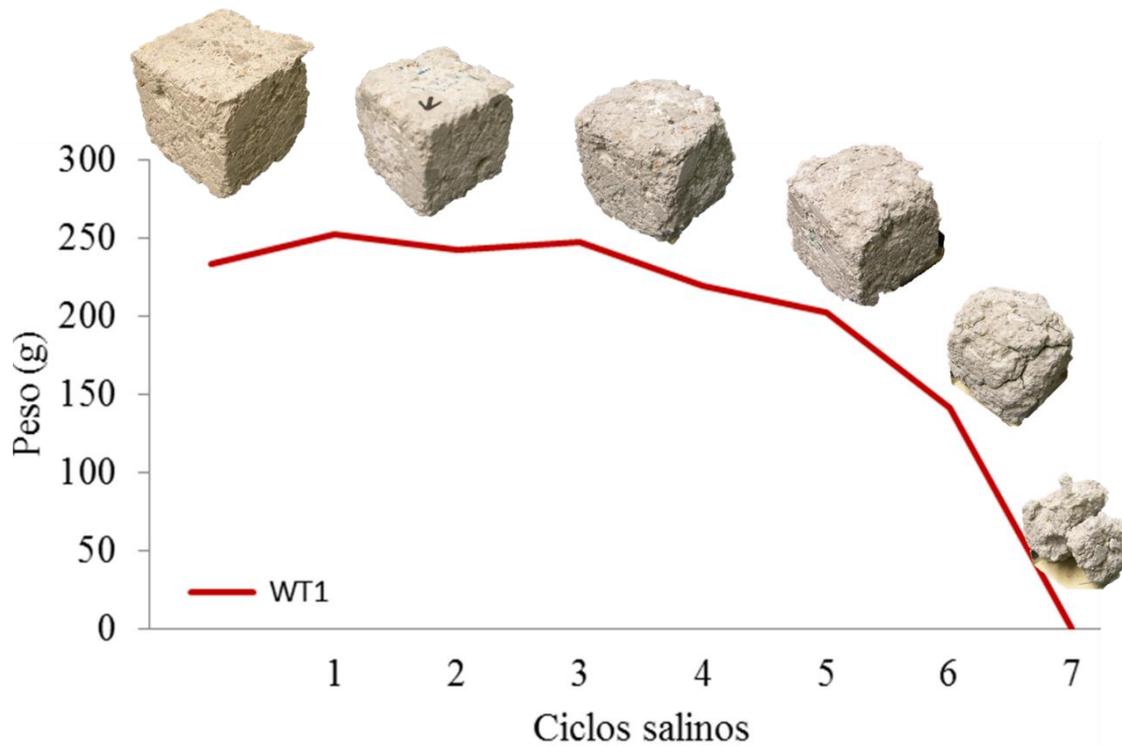


Figura 91. Prueba de destrucción salina de la Ignimbrita Colón (WT1).

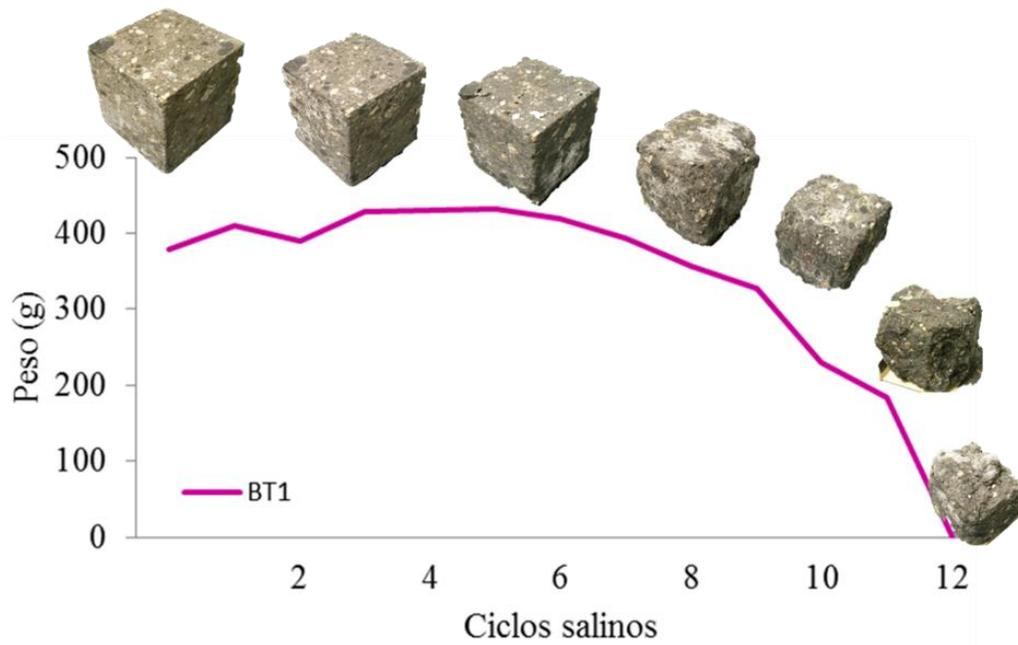


Figura 92. Prueba de destrucción salina para la ignimbrita Escolásticas negra (BT1).

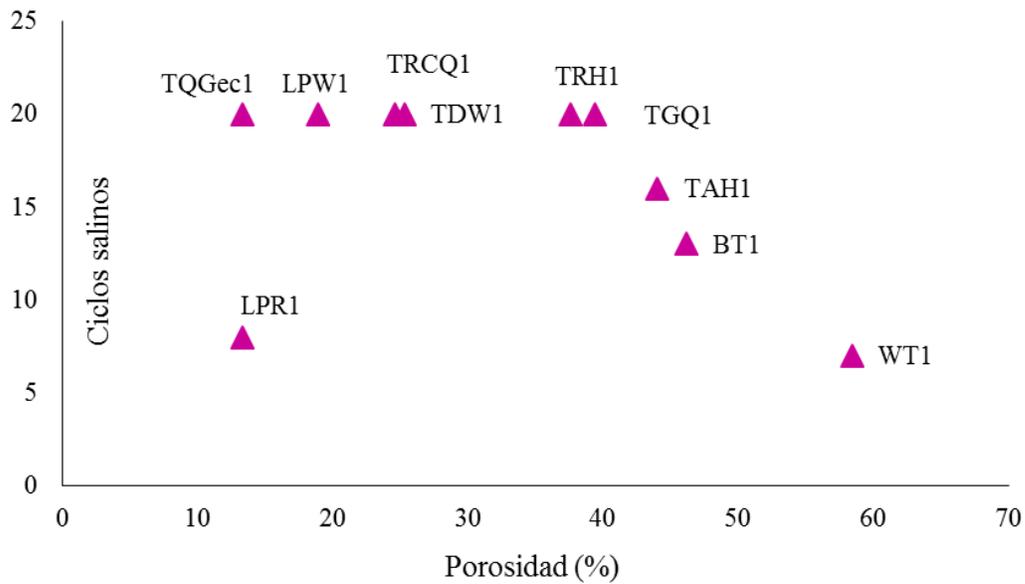


Figura 93. Grafica donde se muestra la porosidad contra los ciclos salinos

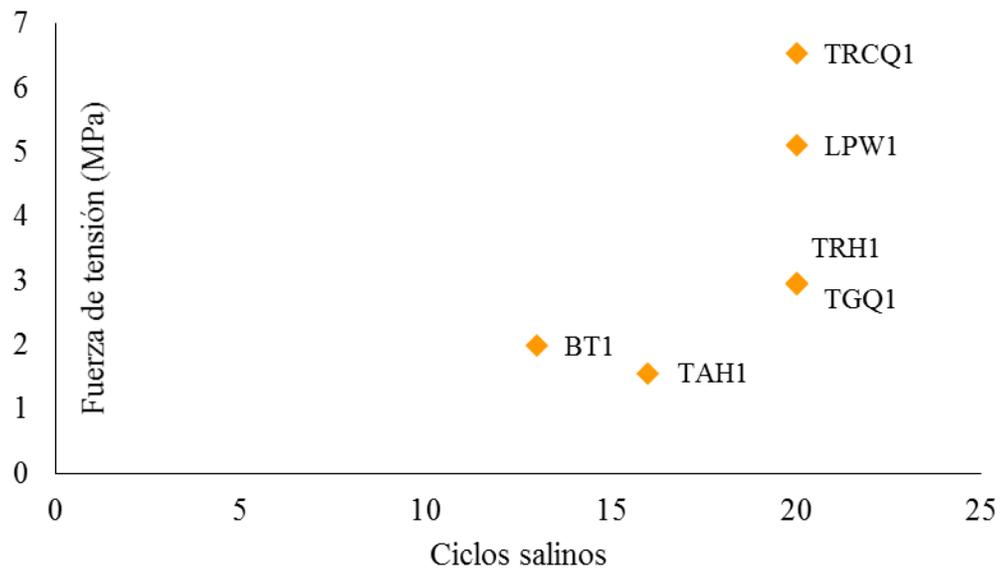


Figura 94. Grafica donde se compara los ciclos de destrucción salina contra la fuerza de tensión.

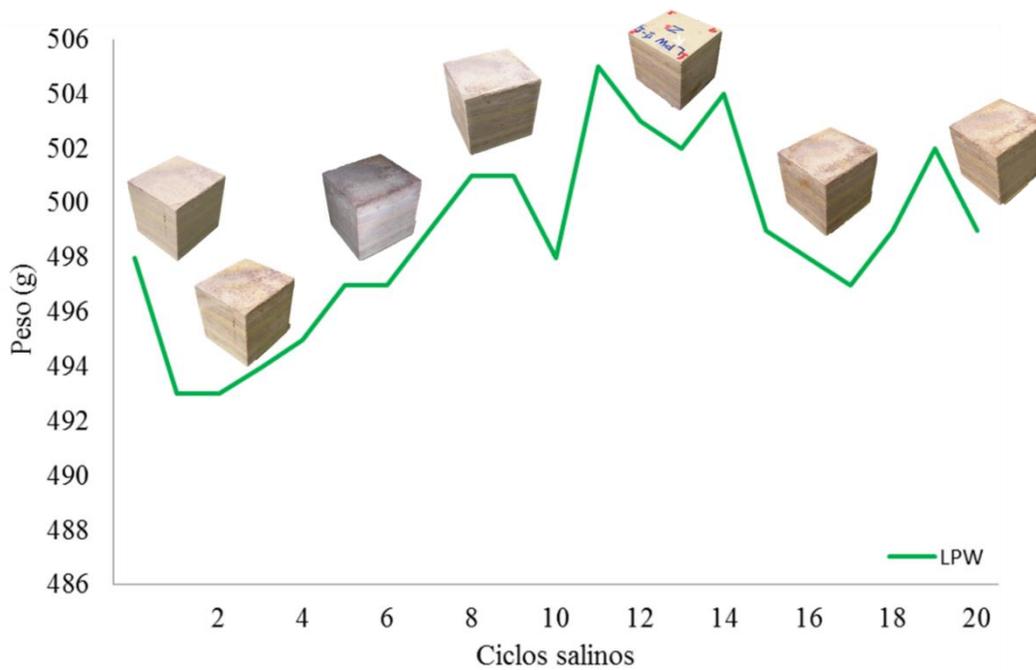


Figura 95. Prueba de destrucción salina para la Cantera blanca de las Palmas (LPW1). Prueba hasta ciclo 20.

Para las muestras de la Cantera blanca de Las Palmas y la Cantera blanca de Tierra Dura (Figuras 95 y 96) la prueba de destrucción salina duro más de 20 ciclos, no se observó eflorescencia salina alguna pero si se notó un incremento en peso en las muestras, lo que significa que la sal cristalizó por dentro de las muestras y no se observó en superficie. La prueba de destrucción salina para la muestra de Cantera Roja de Las Palmas (Figura 96) duro solo 8 ciclos, esto debido a la porosidad secundaria de la muestra debido a las grietas producidas en sus pliegues de flujo por contracción y enfriamiento. La Figura 97 también duró más de 20 ciclos.

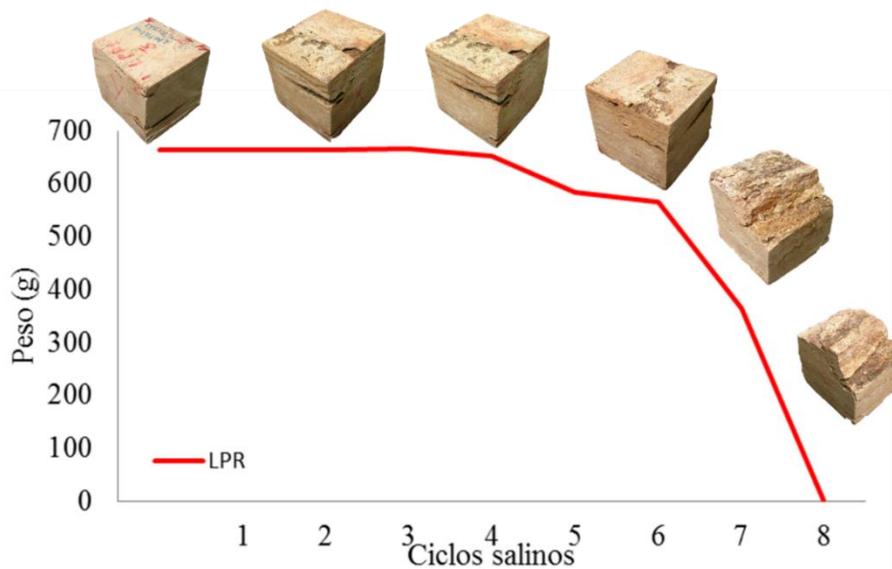


Figura 96. Prueba de destrucción salina de la Cantera Roja de las Palmas (LPR1).

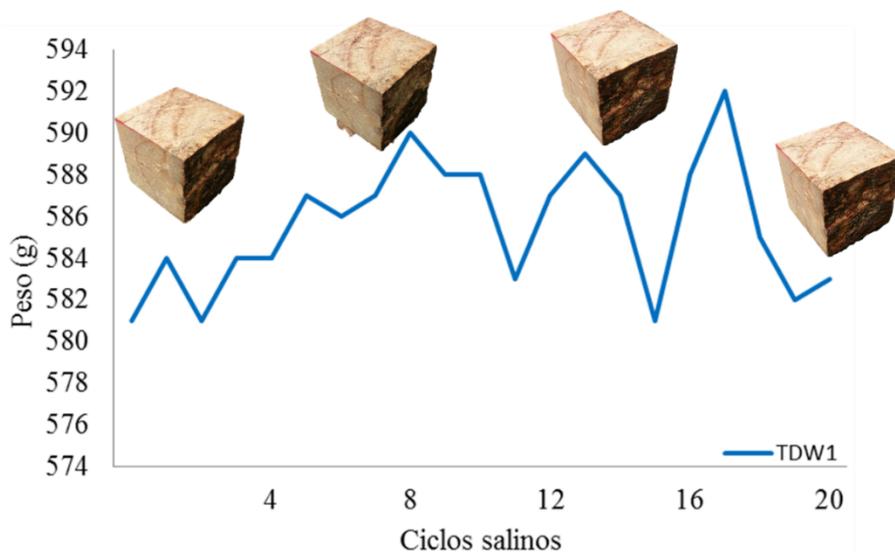
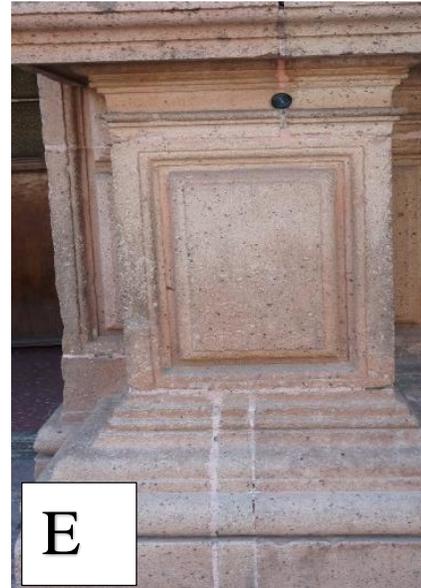
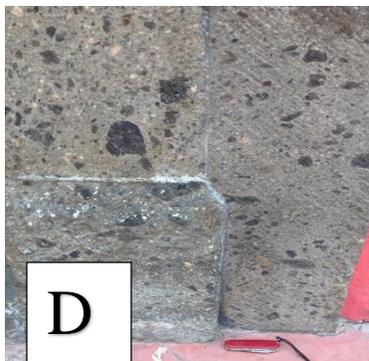
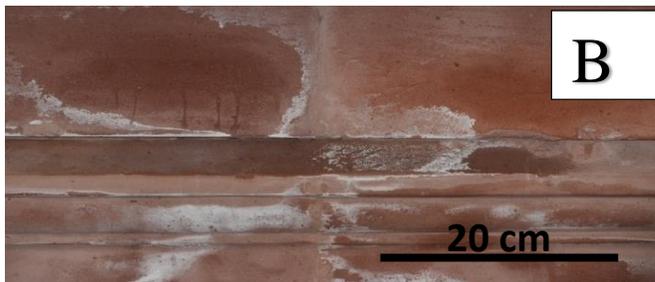


Figura 97. Prueba de destrucción salina de la Cantera Blanca de Tierra Dura (TDW1).

## Mapeo de monumentos en el Centro Histórico de Santiago de Querétaro

### Litologías

Las paredes y monumentos investigados están contruidos con los tipos de roca aquí mostrados.



- A.** Ignimbrita Escolásticas Gris (TGQ1). La mayoría de los edificios y monumentos históricos están contruidos con esta roca. Es de grano fino y los cristales no son visibles a simple vista. Se presenta en tonalidades grises claras y oscuras cuando existe decoloración. Se cuenta con una caracterización de esta roca en la arquería del Portal de Samaniego en la plaza de armas de la ciudad (Kral, 2014).
- B.** Ignimbrita Roja de Huimilpan (TRH1). De igual manera se presenta abundantemente en los monumentos históricos. Esta roca se presenta en un color rojo óxido y se presenta en un rojo oscuro cuando presenta decoloración. En ocasiones se puede llegar a confundir con la ignimbrita Escolásticas gris cuando existe alteración del color por depósito.
- C.** Ignimbrita Amarilla de Huimilpan (TAH1). A diferencia de las dos muestras anteriores, esta muestra no es tan abundante en todos los edificios y monumentos. Normalmente esta muestra se encuentra como un color alterno a las TRH1 y TGQ1. Presenta un color amarillo suave cuando la muestra está fresca y naranja cuando tiene alteración por decoloración.
- D.** Ignimbrita Escolásticas Negra (BT1). Esta ignimbrita se presenta de color oscuro con gran cantidad de piroclástos de color negro soportados en una matriz de ceniza fina de color negro a marrón. No es una roca que se utilice de manera abundante para la construcción en el centro histórico, sin embargo algunas propiedades inmuebles las han estado ocupando como remplazo en fachadas y decoración. Esta roca en la actualidad está muy de moda en el mercado de las rocas ornamentales y se está utilizando tanto en edificios históricos como en edificaciones modernas, tanto en Querétaro como en el interior de la república.
- E.** Ignimbrita Rosa de la Cañada (TRCQ1). Esta roca se extrae de la localidad de la Cañada, al Este de la ciudad de Santiago de Querétaro. Presenta una tonalidad rosa con agregados de cuarzo, sanidino y líticos con. Se encuentra en buena cantidad como piedra para fachada. Se cuenta con caracterización de esta roca en parte de la arquería del acueducto y en parte de las columnas del Portal de Samaniego en la plaza de armas (Kral, 2014). La gran mayoría del adoquinado de las calles del centro y banquetas (Arango-Guevara, 2006). Arango-Guevara *et al.* 2006, describen esta unidad como la

Ignimbrita Colon. Para este trabajo se le designo el nombre de Ignimbrita Rosa de La Cañada.

- F.** Ignimbrita Amarilla de la Cañada (TQGec1). Esta roca también se extrae de la localidad de la Cañada, su composición es muy parecida a la de la TRCQ, solo que se presenta con un grado de soldamiento mayor y presenta una tonalidad más pálida hasta dar un color amarillo. Esta roca se utilizó principalmente en algunas partes de la arquería del acueducto de Querétaro y en algunas de las columnas del Portal de Samaniego, en la plaza de armas de la ciudad (Kral, 2014). Esta roca también es utilizada como piedra de guarnición en las banquetas del centro.
- G.** Ignimbrita Colón (WT1). Esta roca se encuentra de manera escaza en el centro histórico de la ciudad, sin embargo, actualmente es una roca muy de moda ya que se está utilizando para todo tipo de construcciones modernas fuera de la ciudad, especialmente en su localidad tipo, la cual es Colón. Se trata de una roca muy liviana compuesta por pómez sin colapsar pobremente cementada y con algunos clastos alterados a arcillas.

#### *Mapeo litológico en la Plaza de los Fundadores de Querétaro*

Esta plaza se ubica en la calle Manuel Acuña, frente al Templo de la Cruz, en el corazón del Centro Histórico de Querétaro (Figura 98). Por este hecho se creó esta plaza en el 405 Aniversario, erigiendo las estatuas de Don Fernando de Tapía (Conín), Don Nicolás de San Luis Montañez, Fray Jacobo Daciano, Fray Junípero Serra y se encuentra el mercado de la Cruz y era conocida como “La placita”. Esta plaza conmemora a los que ayudaron en la formación de la mítica ciudad de Santiago de Querétaro (CONACULTA, Querétaro, 2015)



**Figura 98.** Imagen satelital con ubicación de la plaza de los fundadores de Querétaro delineada con color rojo, frente al convento de la Santa Cruz. Tomada de Google Earth.

El día 19 de octubre de 2013 el periódico El Universal publicó el artículo escrito por Mauricio Villalón sobre la remodelación de la plaza Fundadores de Querétaro. El titular de la delegación municipal del Centro Histórico de Querétaro, dio a conocer que los trabajos de remodelación en la Plaza Fundadores son con el propósito de hacer este lugar accesible para toda la ciudadanía, incluyendo aquellas personas con alguna discapacidad. El delegado del Centro Histórico de Querétaro recordó que dicho proyecto de remodelación lo encabeza la Secretaría de Obras Públicas del Municipio, por lo cual son ellos quienes tienen la información exacta y precisa de las remodelaciones a realizarse. El proyecto final está siendo sujeto de algunas cuestiones que el Instituto Nacional de Antropología e Historia se encuentra revisando; son detalles mínimos como la ubicación de macetones, ésta es la información que nos ha compartido la Secretaría de Obras Públicas del municipio de Querétaro, aseguró el delegado. Las Figuras 101, 102, 103, 104 y 105 muestran algunos de los nichos y bases para las estatuas de bronce de los fundadores de Querétaro, los cuales están contruidos con las rocas TGQ1, TRH1 y TAH1.

El presidente municipal agradeció al gobernador en turno porque tuvo a bien destinar los poco más de 21 millones de pesos que la federación destinó a la entidad para la remodelación de la Plaza Fundadores. Se constató que como quedó una plaza sin obstáculos, con una plataforma continua, bancas, una fuente a nivel de piso, nueva iluminación y más de 6 mil



**Figura 100.** Obras de remodelación en la Plaza fundadores de Santiago de Querétaro. Se puede observar la colocación del adoquín elaborado con la Ignimbrita Rosa de la Cañada (TRCQ1).



**Figura 99.** Taller de labrado para la elaboración de baldosas y adoquines en la localidad de la Cañada del Marqués.



**Figura 101.** Estatuas de algunos personajes ilustres y fundadores de Querétaro hechas en bronce y montadas en bases construidas con la Ignimbríta Escolásticas Gris (TGQ1).



**Figura 102.** Monumento dedicado a la Plaza Fundadores de Santiago de Querétaro inaugurado el 21 de Marzo del 2014 y construido con la ignimbríta roja de Huimilpan (TRH1), Amarilla de Huimilpan (TAH1) y Escolásticas Gris (TGQ1).

500 metros cuadrados de pavimento que en realidad se trata del adoquinado elaborado con la Ignimbríta Rosa de la Cañada del Marqués (Figuras 99 y 100).



Mapeo litológico del monumento dedicado a la fundación de Santiago de Querétaro en la Plaza de los Fundadores de la ciudad. Construido en el año 2014.

A



LITOLÓGÍAS

TGQ1



TRH1

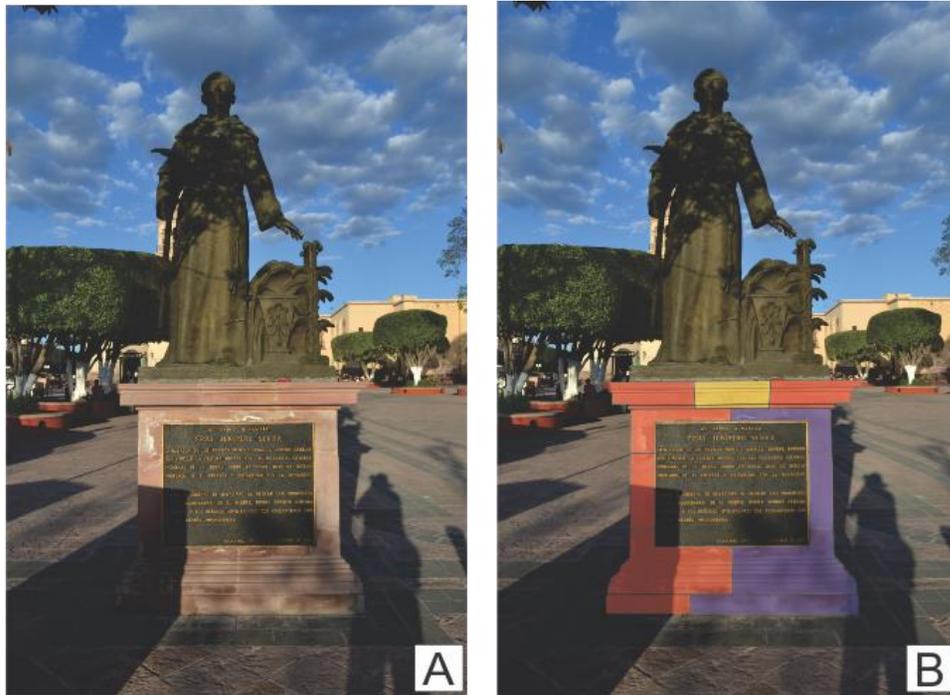


TAH1



B

Figura 103. Mapeo litológico 1



A) Mapeo litológico frontal del nicho de la estatua dedicada a Fray Junípero Serra

B) Litologías

- TGQ1
- TRH1
- TAH1

Figura 104. Mapeo litológico 2



A) Mapeo lateral de la estatua de Fray Junípero Serra.

B) LITOLOGÍAS

- TGQ1
- TRH1

Figura 105. Mapeo litológico 3

### *Mapeo litológico barda del Templo de la Virgen del Soriano*

Para la Figura 106, se realizó mapeo litológico, de la una porción de la barda del Templo de la Virgen del Soriano. Esta barda es reconstruida con la Ignimbrita Colón (WT1) miembro no soldado. Se utilizó para su reconstrucción el bloque tradicional o sillar, como lo es localmente conocido, debido a que es un material muy utilizado en la arquitectura moderna y preferido por arquitectos y constructores ya que es un material de baja densidad y bajo costo. Con color verde se representó al cemento que lo une. Es curioso notar la gran cantidad de cemento utilizado para poderlos unir, esto es probablemente debido a la enorme porosidad de esta roca y por lo tanto a la poca superficie de contacto que existe entre la roca y el cemento.

### *Mapeo de la casona (restaurante el arcángel) contra esquina de la presidencia municipal*

La Figura 107 representa un mapeo litológico en una porción de una casona antigua que se encuentra en contra esquina del Palacio Municipal de Santiago de Querétaro, la cual ahora está ocupada por un restaurante. Como se puede notar, la mayor parte de este edificio ha sido recubierto con revoque y pintura, dejando únicamente la porción de la esquina libre de este recubrimiento, probablemente para mostrar la parte original del edificio y de cómo se vio en algún momento de la historia. Se puede observar que se utilizó para la construcción de este edificio la Ignimbrita Escolásticas Gris (TGQ1) en su mayoría y la Ignimbrita Rosa de la Cañada (TRCQ1). Esto demuestra desde que tiempo se han utilizado estos tipos de roca para la construcción de edificios y monumentos, debido principalmente a su cercanía con lo que algunas vez fue la antigua ciudad de Querétaro y al fácil manejo y labrado de la roca, que hasta la fecha en muchas canteras se hace de manera artesanal y con técnicas muy rudimentarias, que le siguen aportando un valor, además de histórico y cultural, humano.

También se puede notar el remplazo de la roca por cemento.

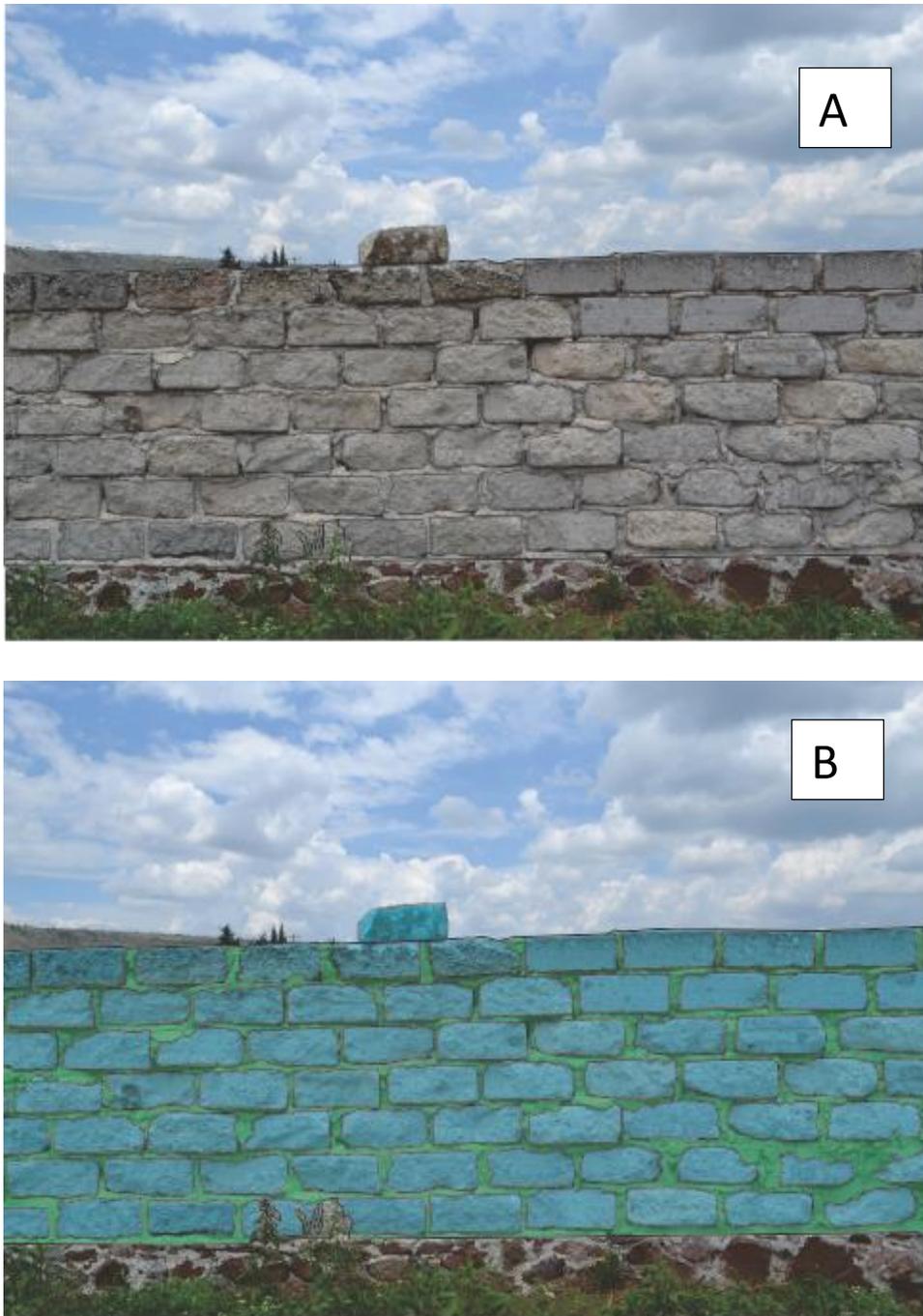


Figura 106. Mapeo litológico 4 Barda del templo de la Virgen del Soriano

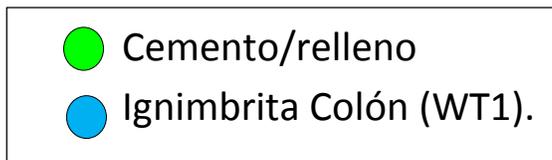




Figura 107. Mapeo litológico de la casona (restaurante el arcángel) contra esquina de la presidencia municipal

## ***Formas de intemperismo***

Las pérdidas individuales están divididas en tres diferentes clases de daños, una distinción está hecha la deposición de material, procesos de separación y pérdida de material. Dentro de estas clases, existen varios procesos de intemperismo (Siedel *et al.* 2011).

Según la guía ICOMOS-ISCS 2008 la clasificación para las rocas de construcción se divide en tres grandes clases que son,

- Deposición de materia,
- Procesos de separación
- Pérdida de material.

Dentro de estas clases existen varios procesos de intemperismo que se explican a continuación.

- Deposición de materia
  - Costra negra: La formación de costras es una de las más comunes y agresivas formas de deterioro especialmente las costras negras que normalmente están hechas de yeso (Platz, 2014). Dependiendo de la textura de la roca, esta puede penetrar centímetros dentro de la superficie de la roca. La costra oscura puede afectar masivamente la estética del objeto. Figura 108-A.
  - Eflorescencia salina: Las características del transporte de agua y de los parámetros de estructura del poro ocasionan la continua cristalización de sales dentro de la roca la cual finaliza con la eflorescencia. Figura 108-C.
  - Guano: Es el sustrato resultante de la acumulación masiva de excremento de aves y murciélagos, en este caso principalmente palomas. Este altera la composición química de los minerales en la roca, modificando sus características originales. Figura 108-D.
  - Grafiti: Modalidad de pintura libre que destaca por su ilegalidad. En este caso afecta las características de las rocas de manera estética, causando daños al patrimonio cultural. Figura 108-E.
  - Humedad: La presencia de humedad en las rocas, provoca un cambio en su coloración original, la intensidad de la decoloración por humedad en las rocas

está directamente ligada con sus características de poro y se relaciona con la cristalización de sales. Figura 108-G.

- Colonización biológica: Organismos incrustantes y comunidades microbianas comúnmente se encuentran en la cima de las paredes o en áreas de nivel de suelo. Mayormente involucra hongos o musco, en casos extremos hasta plantas; incluso los insectos pueden ser responsables del intemperismo biológico. El incrustamiento biológico a menudo ocurre en conjunto con otros tipos de costra o incrustaciones, por ejemplo con costras de yeso. Figura 108-K..
- Procesos de separación
  - Desintegración: Es el producto del extremo desacoplamiento elástico de los cristales y ocurre simultáneamente con masa de roca intacta Figura 108-I.
  - Descamación: Esta forma de intemperismo es muy común en las rocas. Es una pérdida significativa de material que se encuentra de manera paralela a la superficie de la roca (se descama) Figura 108-J.
- Pérdida de material
  - Erosión diferencial. Es la pérdida de material no uniforme de en las rocas. Figura 108-H.
  - Fracturamiento por estrés o carga: Es el resultado de una carga o estrés que rebasa la resistencia mecánica de la roca, este es el resultado del diseño pobre de edificios y de cargas asimétricas o cargas laterales. Figura 108-F.

A continuación se muestran mapeos del tipo de daño y sus intensidades para ilustrar la severidad del daño de cada roca de construcción y las intensidades fueron divididas en 5 diferentes clases. Estos mapas proporcionan una importante base de información para la evaluación de varias formas de daño a los monumentos y proveen ideas sobre su condición y posibles medidas de conservación y restauración

- Verde: Áreas libres de daño.
- Amarillo: Áreas con relativamente poco daño
- Naranja: Áreas con daño moderado.
- Rojo: Áreas con alto índice de daño.
- Morado: Áreas con severo grado de daño.



**Clasificación de formas de deterioro de las rocas de construcción del Centro Histórico de Santiago de Querétaro utilizando la guía ICOMOS-ICSC 2008**

- A) Costra Negra (Black Crust).
- B) Perdida de material.
- C) Eflorescencia salina
- D) Guano.
- E) Humedad
- F) Fracturamiento por estrés o carga.
- G) Decoloración y depósito.
- H) Erosión diferencial.
- I) Desintegración.
- J) Descamación (Scaleing).
- K) Colonización Biológica (Musgo).

Figura 108. Formas de intemperismo

### Monumento a los fundadores de Santiago de Querétaro.

Las Figuras 109, 112 y 113 representan a monumentos de nueva creación (2013) se identificaron dos formas principales de intemperismo, en color verde la eflorescencia salina y en color naranja la decoloración por humedad. Este tipo de daños principalmente se encuentran localizados en la parte alta de la estructura de la Figura 109 y en menor medida en la base, probablemente se localicen más en la parte superior debido a la construcción interna del monumento que favorece la acumulación de agua meteórica y su consecuente evaporación. Es curioso notar que la eflorescencia salina y la decoloración por humedad van de la mano. En algunos casos la decoloración por humedad se encuentra en la periferia de la eflorescencia



Figura 109. Formas de intemperismo Monumento a los fundadores.

En el mapeo de intensidad de daños se concentran los de mayor intensidad en la parte superior derecha de la estructura. Se puede notar claramente que estos daños no son causados por la absorción de agua del suelo por capilaridad de la roca si no por la acumulación de agua en la parte superior (Figura 110). Las Figuras 111 y 114 muestran intensidad de daño severo en las partes superiores e inferiores y claramente se correlacionan con los daños que presentan las rocas.

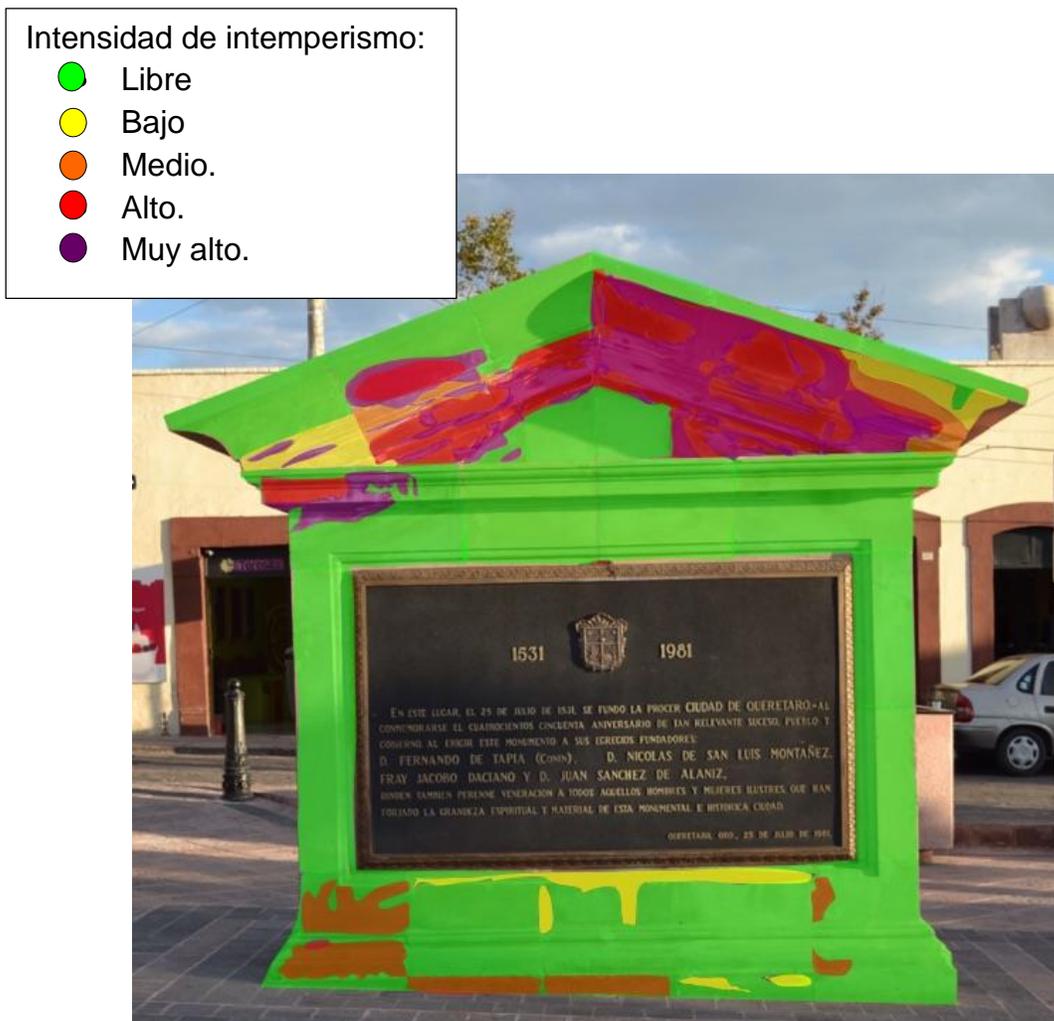


Figura 110. Intensidad de intemperismo Monumento a los Fundadores.

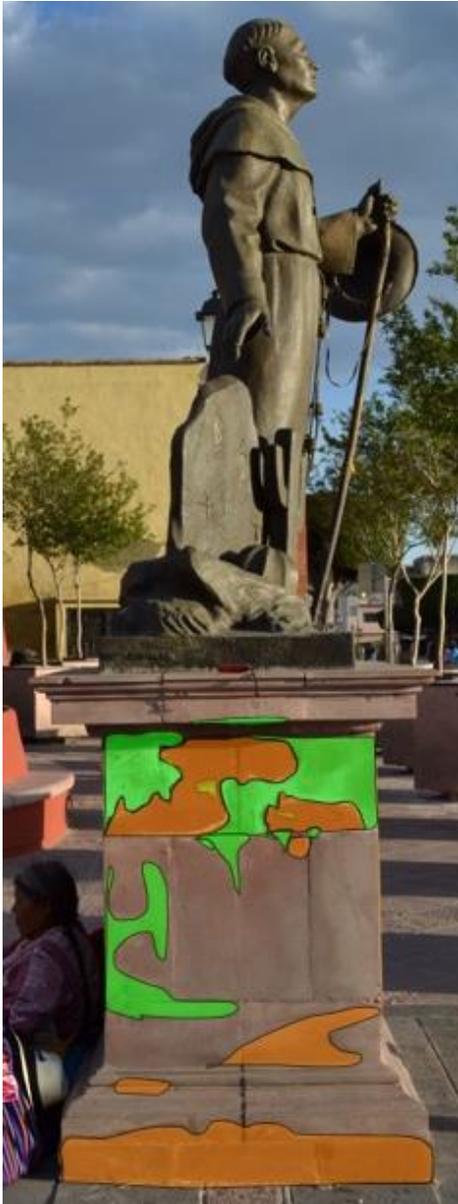


Figura 112. Formas de intemperismo  
Nicho de Luis de Montañez

Formas de intemperismo:  
● Verde: Eflorescencia salina  
● Naranja: Humedad.

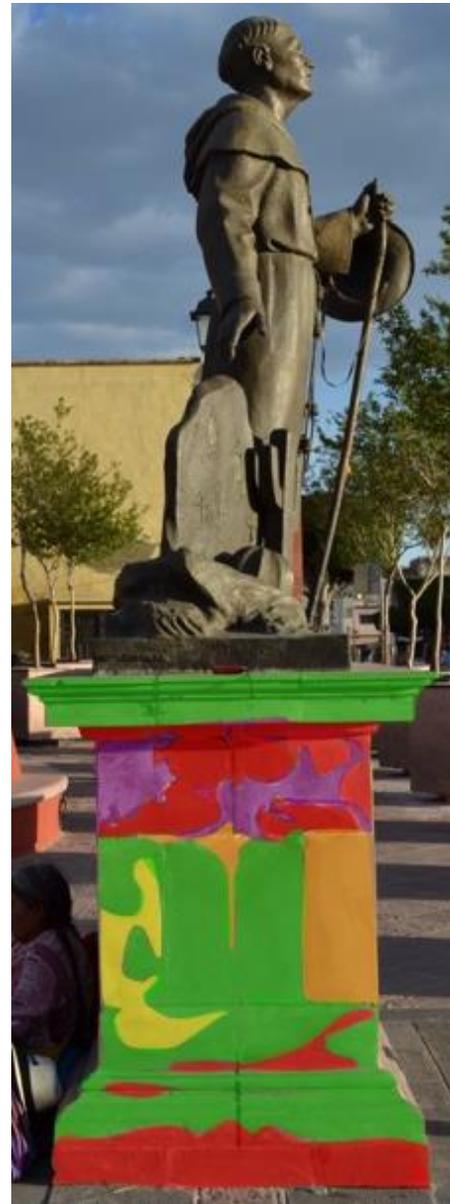


Figura 111. Intensidad de daños Nicho  
de Luis de Montañez

Intensidad de intemperismo:  
● Libre  
● Bajo  
● Medio.  
● Alto.  
● Muy alto.

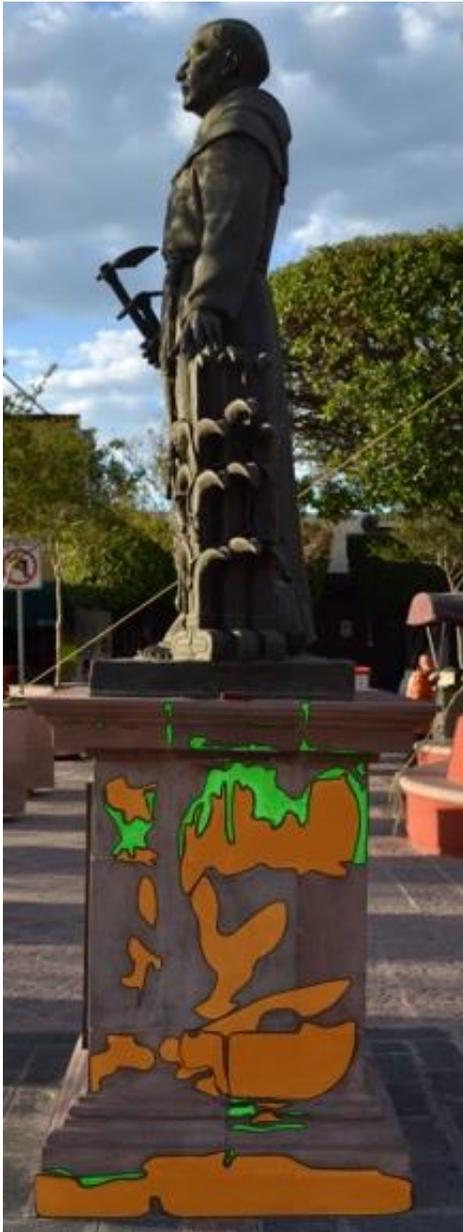


Figura 113. Formas de Intemperismo  
Nicho de Fray Junipero Serra



Figura 114. Intensidad de daños Nicho  
de Fray Junipero Serra

Formas de intemperismo:

- Verde: Eflorescencia salina
- Naranja: Humedad.

Intensidad de intemperismo:

- Libre
- Bajo
- Medio.
- Alto.
- Muy alto.

La Figura 115 representa el mapeo de daños en la barda exterior del Templo de la Virgen del Soriano. En esta barda se encontraron 2 tipos de deterioros principales, los cuales son: Pérdida de material por desintegración y costra negra. El mayor de estos deterioros es la pérdida de material por desintegración, representado con color rojo. Este tipo de deterioro se debe a la baja cohesión de los componentes en esta roca (WT1), a la gran absorción de agua capilar y la fácil cristalización de sales provenientes del suelo. Se puede ver claramente que existen remplazos de roca nueva en la barda, debido a la completa destrucción de la roca anterior. La costra negra es debido a los efectos de la contaminación atmosférica y solo se encuentra en la parte superior de la barda. Para el mapeo de intensidad de daños (Figura 116) se determinó daño severo en la mayoría de la estructura, representado con color morado y con bajo daño, representado en color amarillo, los nuevos bloques de reemplazo; esto quiere decir que esta roca se deteriora en muy poco tiempo, pero lo hace debido a las características descritas en los capítulos anteriores.

En la Figura 117 A., se identificaron 5 tipos de deterioros, los cuales son: Eflorescencia salina, costra negra, desintegración, pérdida de material y decoloración. En este mapeo se puede notar claramente la relación de la decoloración con la eflorescencia salina y la desintegración, al igual que en los monumentos de nueva creación de la Plaza Fundadores. La costra negra se encuentra en las rocas que conforman el balcón del edificio. La pérdida de material mecánica (representada con azul) ha sido provocada mayormente por la influencia antropogénica del sitio.

En la Figura 117 B., se presenta el mapeo de intensidad de daños desde “Libre” hasta “Severo”. En la Figura se puede observar que hay piezas de roca que están libres de daño, pero la realidad es que son piezas elaboradas con cemento para así “restaurar” partes del edificio, que muy probablemente se encontraban en condiciones de intensidad de daño críticas, que si corrigen el daño por poco tiempo, pero claramente, esto muestra las pobres medidas que se toman para la intervención, restauración y preservación de los monumentos que son nuestro patrimonio histórico.



- Cemento / relleno.
- Costra negra.
- Perdida de material por desintegración.

Figura 115. Mapeo de formas de intemperismo Muro del templo de la Virgen del Soriano.



- Cemento / relleno
- Bajo
- Moderado
- Alto
- Severo

Figura 116. Mapeo de intensidad de daños Muro del templo de la Virgen del Soriano

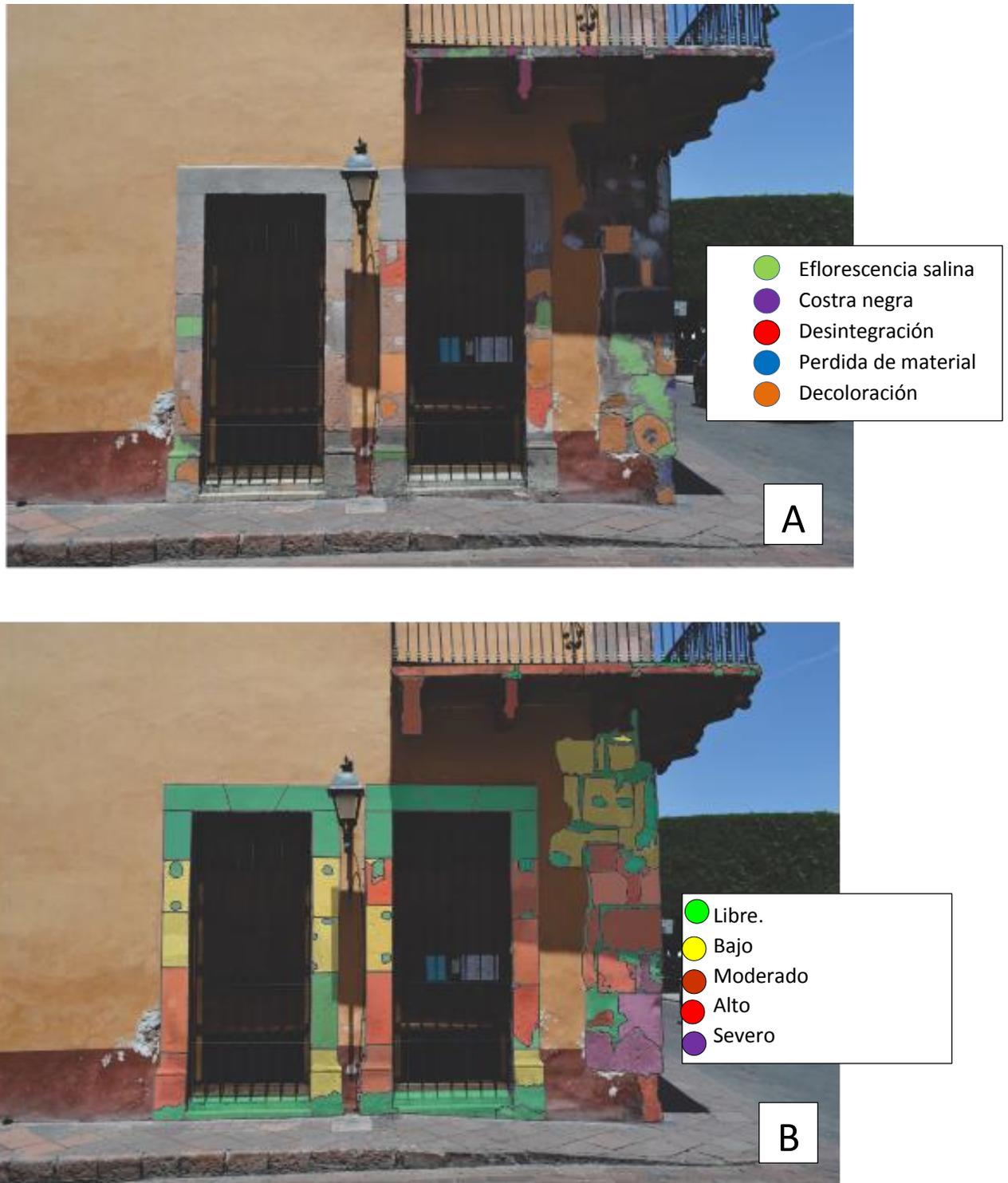


Figura 117. Casona Centro Histórico de Santiago de Querétaro A) Mapeo formas de intemperismo. B) Mapeo intensidad de daños

## Conclusiones

Ya que las rocas naturales de construcción en el Centro Histórico de Santiago de Querétaro son de gran importancia, las observaciones obtenidas sobre las propiedades de las rocas, sus características de intemperismo y el resultado de daño estructural grave y de importancia.

Este capítulo describe los resultados obtenidos en laboratorio sobre petrografía, las propiedades geotécnicas y sus propiedades de intemperismo, así como la discusión para caracterizar la viabilidad de las rocas hablando en términos de calidad de las rocas de construcción de la región. Adicionalmente se hace una comparación con las características determinadas a lo largo de este trabajo para identificar diferentes posibles causas del daño provocado por el intemperismo. Recomendaciones individuales de cada roca en términos de idoneidad como rocas de construcción ilustra los descubrimientos de este trabajo.

### ***Propiedades de espacio de poro y densidad***

La porosidad, densidad y radio del poro controlan la resistencia de intemperismo de una roca utilizada en el ámbito ornamental y de la construcción. El tamaño del espacio del poro regula la entrada de humedad a la roca, ya sea en su fase líquida o gaseosa. Las muestras de ignimbritas analizadas a excepción de las de alto grado de soldamiento y lavas félsicas (TRCQ1, TQGec1, LPW1, TDW1) muestran porosidades muy altas con un promedio elevado predominante de poros capilares y macroporos. La distribución de radio de poro predominantemente unimodal de la Ignimbrita Escolásticas Gris (TGQ1), Roja de Huimilpan (TRH) y Rosa de la Cañada (TRCQ1) con un bajo porcentaje de microporosidad es causa de un moderado a alto soldamiento de la ignimbrita, lo que genera que tengan buena cohesión. Las muestras con muy baja porosidad como la Ignimbrita Amarilla de la Cañada (TQGec1), la Cantera Blanca de las Palmas (LPW1) y la Cantera Blanca de Tierra Dura (TDW1) muestran una tendencia unimodal con una alta concentración en microporosidad debido a su alto grado de soldamiento. Las muestras que presentan tendencias bimodales son la Ignimbrita Amarilla de Huimilpan (TAH1), la Ignimbrita Escolásticas Negra (Toba Amealco BT1). Y la Ignimbrita Colón (WT1). Estas muestras además de presentar una alta concentración de macroporosidad presentan una cantidad moderada de microporosidad debido a su bajo grado de soldamiento y a que presentan ciertos productos de alteración como algunas arcillas, lo que genera baja cohesión en la roca.

Concordantemente las rocas son capaces de transportar agua y retenerla en fase líquida y de vapor. Las muestras analizadas que tienen un alto porcentaje de microporos y no de poros capilares no son tan capaces de transportar fluidos considerando que las ignimbritas que muestran alto grado de soldamiento como las anteriormente mencionadas además de presentar cierta silicificación por procesos hidrotermales no son muy propicias a transportar líquido. Las muestras que arrojaron resultados de tendencias bimodales si dejan pasar los fluidos pero una parte de ellos queda atrapado en el porcentaje de microporosidad que tiene cada muestra alterándola aún más. Es por esto que estas muestras presentan cierto contenido de arcillas, las cuales ayudan a retener los fluidos y a alterar aún más a la muestra. Aun a simple vista uno puede identificar la suavidad y fragilidad de estas rocas a la meteorización.

Todas las muestras de ignimbritas y lavas analizadas son de composición riolítica-dacítica ricas en cuarzo y en feldespatos y plagioclasas, por lo que la densidad de matriz estuvo en un rango de entre 2.24 a 0.91 g/cm<sup>3</sup>. La densidad del cuarzo es de 2.65 g/cm<sup>3</sup>. Aunque las muestras sean ricas en cuarzo y en otros minerales félsicos y su densidad sea más baja que la del cuarzo es debido a su gran porcentaje de porosidad. Incluso la Ignimbrita Colón (WT1) resulto con una densidad más baja que la del agua al tener 0.91 g/cm<sup>3</sup> se trata de una ignimbrita completamente de composición riolítica ya que está compuesta en su mayoría por pómez sin colapsar. Esta muestra resulto con la porosidad más alta al tener un 65 % de porosidad. Las muestras con un aumento mayor de porcentaje de densidades debido a reducción de porcentaje de porosidad por el grado de soldamiento.

### ***Propiedades de transporte y retención de agua***

Las propiedades de transporte y retención de agua puede ser diferente dependiendo de los tipos de rocas que se tengan en una región por ejemplo estas propiedades no son iguales cuando se trata de calizas y areniscas (Platz, 2014). Las ignimbritas analizadas en este trabajo, estas características pueden ser correlacionadas con sus propiedades de espacio de poro arriba mencionadas. Las ignimbritas con las porosidades más altas muestran los coeficientes más altos de absorción de agua en la prueba de absorción de agua por capilaridad, con una alta absorción de agua en un corto periodo de tiempo. Las muestras que exhiben estos comportamientos están caracterizadas por un alto contenido de poros capilares y macroporos, dichas características producen que estas muestras tengan una alta absorbencia.

Las muestras con menos absorción de agua son la Ignimbrita Amarilla de la Cañada (TQGec1), la Cantera blanca y roja de las Palmas (LPW1 y LPR1) y la ignimbrita Rosa de la Cañada (TRCQ1). Estas rocas muestran bajas porosidades y una distribución de radio de poro unimodal en la zona de poros capilares y microporos pero muestran baja absorción de agua por capilaridad. En particular la muestra (TQGec1) con un radio promedio de poro de  $0.035 \mu$ . Debido a su alta proporción de microporos tiene la absorción capilar de agua más baja de todas las muestras. Las ignimbritas anteriormente mencionadas muestran un promedio de radio de poro bajo, una baja porosidad y por lo tanto un bajo coeficiente de absorción de agua capilar. En contraste las muestras con alta porosidad y una distribución unimodal de radio de poro en la zona de macroporos y poros capilares son las que mayor absorción de agua por capilaridad. Estas muestras fueron las Ignimbritas Gris y Negra de Escolásticas (TGQ1 y BT1), la Roja y Amarilla de Huimilpan (TAH1 y TRH1) y la Ignimbrita Colón (WT1). Sigismund y Dürrast (2011), indican diferentes promedios de absorción de agua para varios tipos de rocas como areniscas y calizas pero no en ignimbritas. López-Doncel *et al.* (2013), obtuvieron resultados parecidos en la Toba Loseros, utilizada en el centro histórico de Guanajuato.

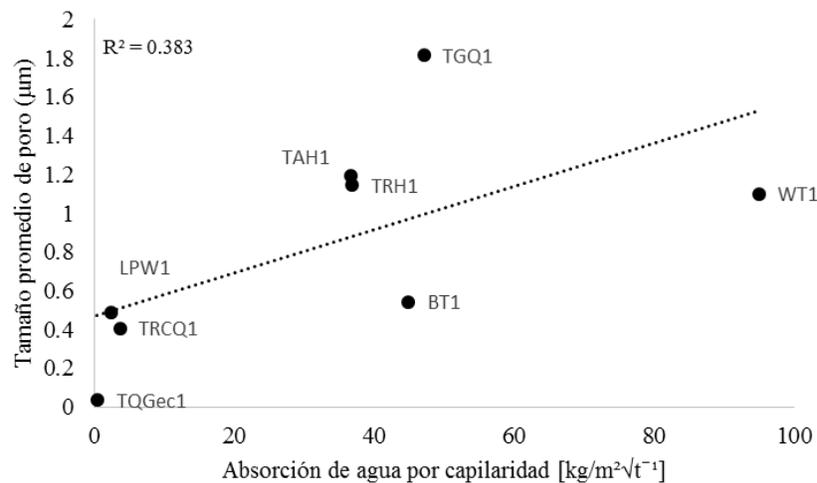
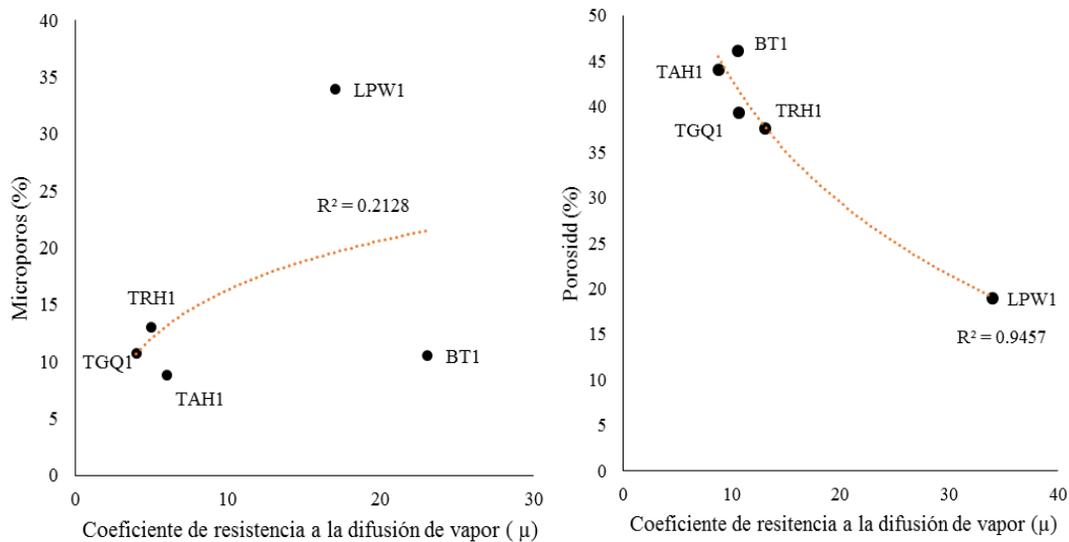


Figura 118. Valor del tamaño promedio de poro contra el valor de la absorción de agua por capilaridad mostrando un coeficiente de correlación de 0.383

La Figura 118 muestra que existe una correlación lineal entre el tamaño promedio de poro con el valor de la absorción de agua por capilaridad. Esto quiere decir que el porcentaje de porosidad no se ve afectado por el tamaño del poro pero si por la cantidad o concentración

de poros de diversos tamaños en la muestra. Tomando como ejemplo la muestra BT1 y TGQ1. Estas muestras presentan porcentajes de porosidad muy similares, sin embargo, el



**Figura 119.** Gráfica donde se muestra el porcentaje de microporos contra el coeficiente de resistencia a la difusión de vapor de agua (M; el coeficiente de correlación es bajo ( $R^2$ ) de 0.2128). La segunda gráfica muestra el porcentaje de porosidad contra el coeficiente (M). El coeficiente de correlación ( $R^2$ ) es muy alto de 0.9457.

radio promedio de tamaño de poro varía en más de una micra, lo cual indica que la concentración de macroporos en la TGQ1 es mayor y dan como resultado la porosidad de 40%; en cambio la muestra BT tiene una porcentaje de porosidad de 40% pero es la suma de los microporos y macroporos en la muestra. Las dos muestras absorben la misma cantidad de agua en la prueba. El coeficiente de resistencia a la difusión de vapor muestra una dependencia lineal cuando se compara con la porosidad (Figura 119).

### ***Propiedades geotécnicas***

En adición a la velocidad de onda ultrasónica y la fuerza de partición por tensión ejercida a las rocas, estas pueden ser vistas en un modo positivo dependiendo del porcentaje de porosidad que estas tengan. Las rocas con baja velocidad de onda ultrasónica usualmente también exhiben poca fuerza de resistencia a la partición por tensión. Esto se analiza mejor cuando se compara la porosidad con los dos parámetros adelante mencionados (Figura 121). Aquí se puede establecer el argumento que señala pues, que las rocas con alto porcentaje de porosidad tienen baja resistencia a la fuerza de partición por tensión y por lo tanto tienen velocidades de onda ultrasónica bajas. Esto es algo especial de apreciar en la muestra de la

Ignimbrita Amarilla de Huimilpan (TAH1), que aunque no es la más porosa de todas, tiene una velocidad de onda ultrasónica promedio de 1.55 km/s y una resistencia máxima a la fuerza de partición por tensión de 1.6 MPa. Siegesmund y Snethlage, (2011) mencionan que la velocidad de onda ultrasónica decrece en relación con el incremento de contenido de cuarzo en rocas sedimentarias como las areniscas. Se podría asumir que el mismo principio prevalece para las ignimbritas estudiadas en esta investigación, sin embargo, todas las muestras en este trabajo analizadas tienen una composición riolítica con contenidos de cuarzo regulares para esta composición. Aquí se puede establecer que el grado de soldamiento es la clave para determinar el porcentaje de porosidad en una ignimbrita. Por lo tanto, entre más grado de soldamiento tenga, menor será la presencia de poros, tendrá mayor incremento en las velocidades de onda ultrasónica y la resistencia a la fuerza de partición por tensión será mucho mayor. De la misma manera ocurrirá en un sentido inversamente proporcional si la muestra tiene bajo grado de soldamiento. Esta tendrá mayor porcentaje de porosidad, menor velocidad de onda ultrasónica y menor resistencia a la fuerza de partición por tensión. Se necesitaría hacer más investigación relacionada con estas propiedades de las ignimbritas ya que se puede llegar a un punto intermedio en donde la muestra sea porosa y muestre propiedades mecánicas positivas. Se tendría que analizar mejor la cohesión intragranular de la muestra, ya que esta propiedad tiene la misma importancia que el grado de soldamiento en las ignimbritas. Las muestras en este trabajo analizadas presentan los puntos extremos intermedios de los grados de soldamiento. Se puede observar que la composición riolítica de la muestra no afecta las velocidades de onda ultrasónica ni que afecte la medición de la resistencia de la fuerza de tensión.

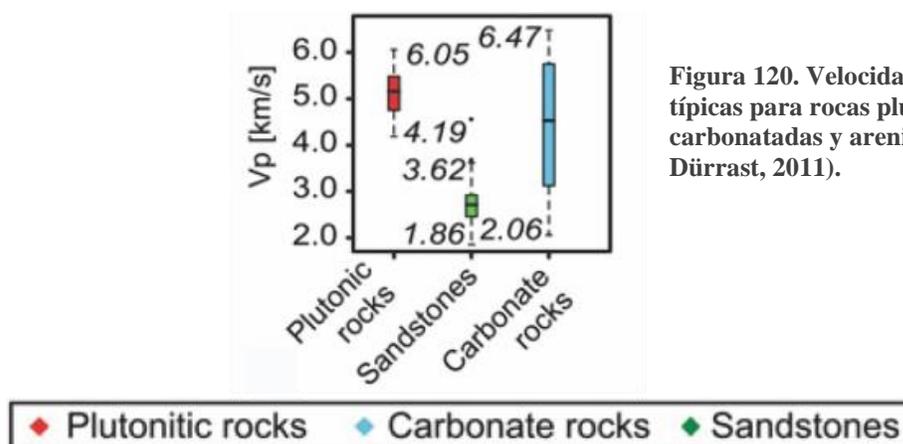


Figura 120. Velocidades de onda ultrasónica típicas para rocas plutónicas, rocas carbonatadas y areniscas (Siegesmund y Dürrast, 2011).

Se puede notar claramente que el factor decisivo que afecta estas dos propiedades es la porosidad de cada muestra (Figura 121).

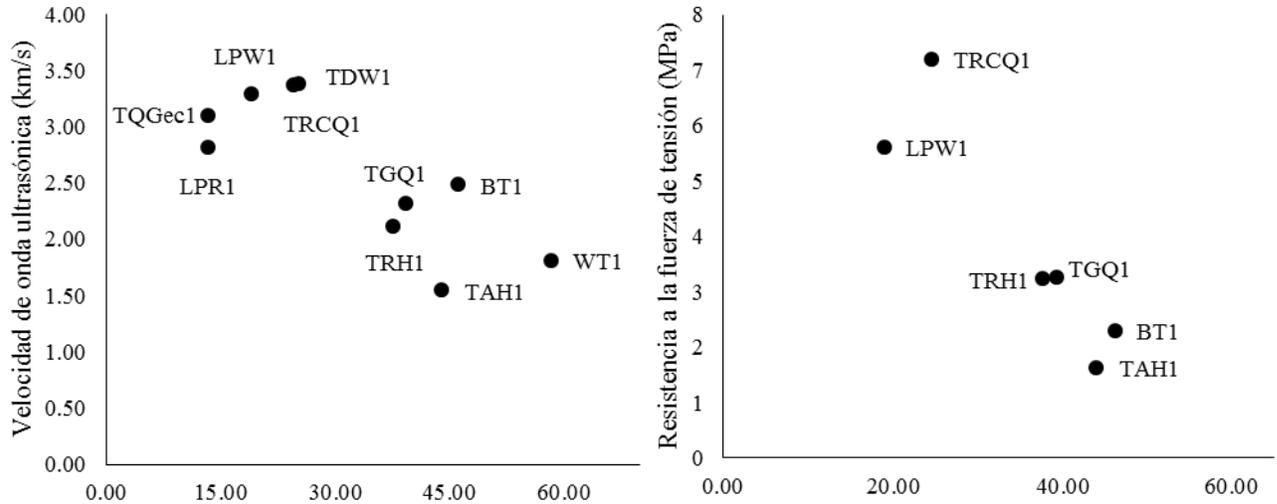


Figura 121. Velocidad de onda ultrasónica promedio [km/s] y Resistencia a la fuerza de partición por tensión [MPa] contra el porcentaje de porosidad.

Siegesmund y Dürrast (2011) definieron el rango de velocidades de onda ultrasónica para los tipos de roca mencionados en la Figura 120. En la literatura hasta la fecha no existe mucha información sobre la velocidad de onda ultrasónica para ignimbritas de composición félsica, Wedekind *et al.* (2013) realizaron mediciones para calcular propiedades geotécnicas a 14 ignimbritas. 9 de ellas mexicanas, 4 alemanas y 1 húngara (Figura 122).

Stone type	Direction	WB	ED	HW	RP	HD	BT	LS	CR	CA	TY	CH	GR	BP	CF
Splitting tensile strength dry	X	1.46 <sup>a</sup>	3.30 <sup>b</sup>	2.43 <sup>a</sup>	1.91 <sup>a</sup>	3.70	6.04	6.29	3.94	0.99	5.43	5.13	2.27	6.90	10.65
$\beta_{sz}$ (MPa)	Z	1.76 <sup>a</sup>		3.23 <sup>a</sup>	2.85 <sup>a</sup>	4.62	6.95	8.25	4.02	1.05	5.71	5.61	2.24	5.89	9.89

Figura 122. Resultados de la prueba brasileña de tensión en seco de las tobas volcánicas estudiadas por Wedekind *et al.* (2013). Las ignimbritas mexicanas están sombreadas con el color verde. Las alemanas con amarillo y la muestra húngara con rojo..

Es importante notar que los resultados obtenidos por este equipo de investigadores, son muy similares a los obtenidos con esta investigación. El resultado más bajo que tuvo en el prueba brasileña de tensión fue de 0.99 MPa para la muestra CA (Cantera Amarilla de Guadalajara).

Se puede notar la increíble similitud que tiene con el resultado de la Ignimbrita amarilla de Huimilpan (TAH1). Esta muestra también tiene similitud con los resultados de las muestras alemanas (WB y RP). Algo en particular en esta parte de la investigación es notar que la ignimbrita Amarilla de Huimilpan (TAH1) y la Ignimbrita Escolásticas Negra (BT1) presentan porosidades similares, pero en la prueba brasileña de tensión, tuvo mayor desempeño la BT1 (Figura 123).

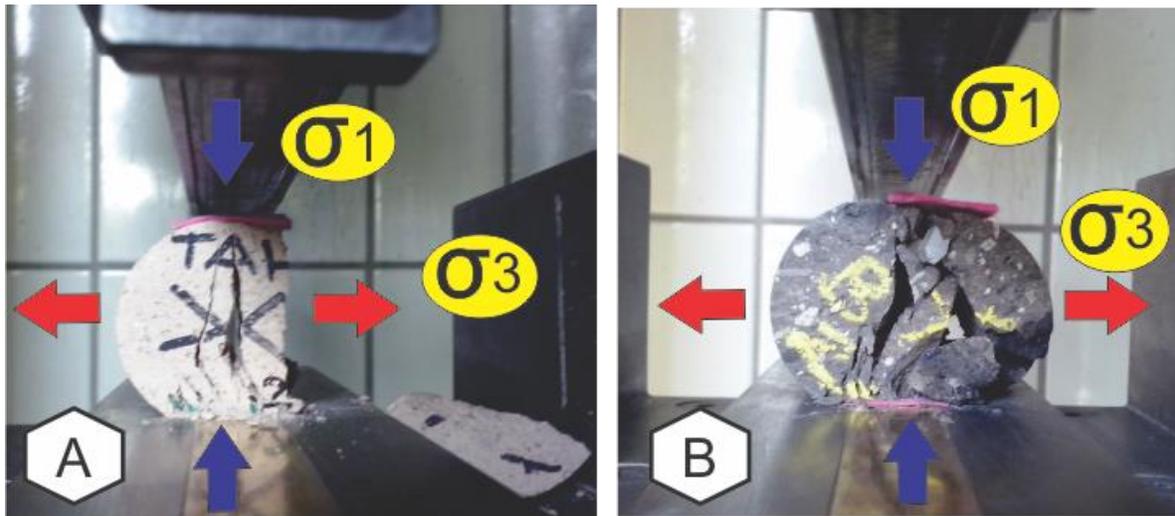


Figura 123. Prueba brasileña de tensión en seco comparando dos ignimbritas. A) Prueba brasileña para la muestra TAH1. B) prueba brasileña para muestra BT1. Representado con flechas azules el esfuerzo principal  $\sigma_1$  y perpendicular a este con flechas rojas el esfuerzo menor  $\sigma_3$ .

## Propiedades de intemperismo

### Expansión térmica

La expansión térmica no es lineal para todas las muestras. se genera una curva casi perfecta. Platz (2014), realizó expansión térmica a muestras de diferentes areniscas (Figura 124), y concluyó que una alta concentración de minerales arcillosos y un calentamiento entre 70° y 80° grados celsius, provoca una expansión en el tamaño de las areniscas de manera positiva además de correlacionarse el porcentaje de porosidad contra la expansión térmica en mm/m.

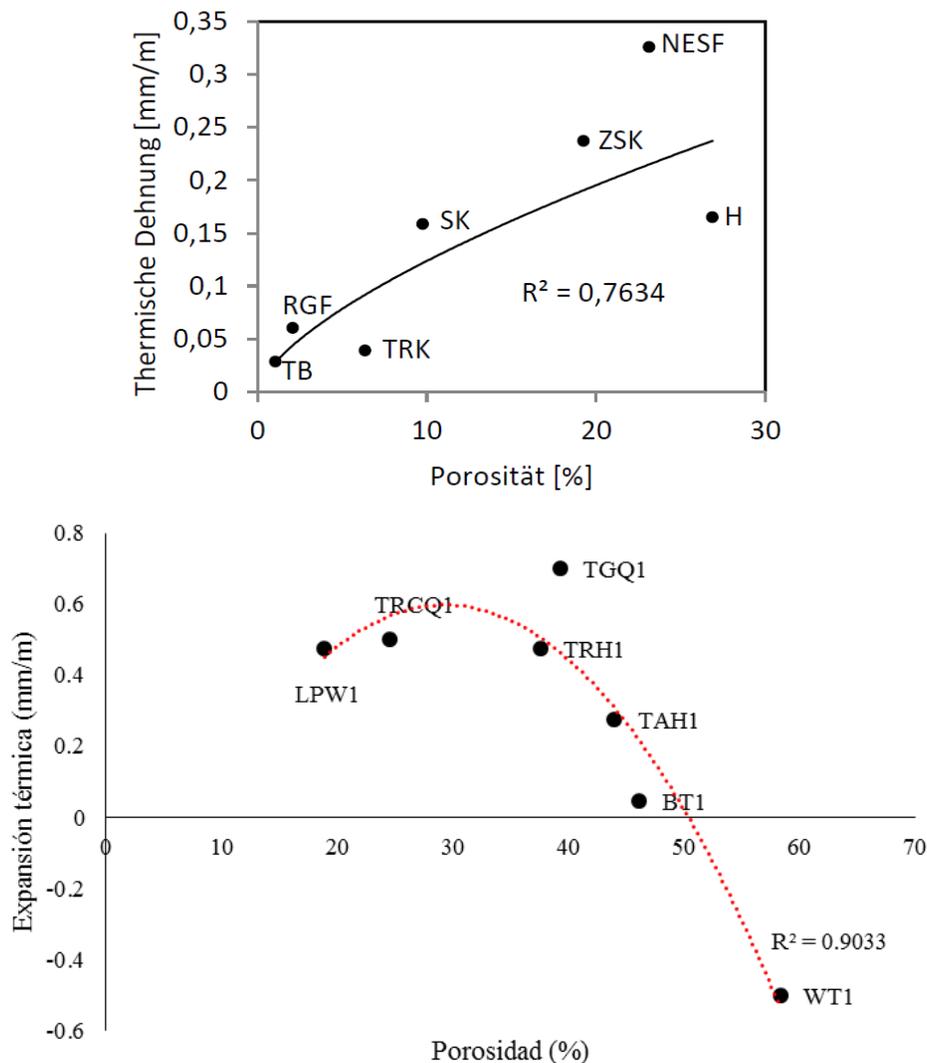


Figura 124. Comparativa de expansión térmica contra porosidad entre las muestras de Platz, 2014 y las de este estudio.

Sin embargo para el caso de las ignimbritas estudiadas sucede exactamente lo contrario. Como lo indica la Figura 124, la expansión térmica incluso resultó ser negativa

con el aumento del porcentaje de porosidad. Esta investigación esta enfocada a arrojar nuevos conocimientos sobre el comportamiento de las ignimbritas utilizadas como rocas naturales de construcción. Con este estudio se esperaba que las muestras tuvieran comportamientos similares a las demas rocas analizadas y cuyos resultados estan presentes en la literatura actual. No obstante, este trabajo no va enfocado a encontrar porque se encogen las ignimbritas con el aumento de la temperatura. Se debería realizar una investigación más profunda sobre este tópico para poder tener resultados más contundentes y sólidos. Se cuenta con una idea general o hipótesis sobre el porque ocurre la reducción de tamaño con la expansión térmica. Todas las ignimbritas analizadas en este trabajo son de composición félsica, lo cual indica que tienen alta concentración de volatiles. Muchos de estos volatiles son atmosféricos, como el vapor de agua y el CO<sub>2</sub>, que se alojan en estas rocas por el gran porcentaje de porosidad que presentan. Al someterse a la prueba de ciclos térmicos, la cual es una prueba con una temperatura inicial de 20 °C que alcanza una temperatura máxima de 80 °C en 14 horas. Este cambio gradual en la temperatura produce una evaporación de los volatiles presentes en la muestra, que ayudados por el gran porcentaje de porosidad y el bajo coeficiente de resistencia a la difusión de vapor, las muestras llegan a encojarse por esa disminución de volumen. Son capaces de volver a su tamaño original sin mucha deformación, pero que en periodos largos de tiempo, este cambio constante en el tamaño de la muestra llega a afectarla negativamente. En la petrografía de estas muestras se encontraron una moderada a nula concentración de minerales arcillosos al igual que en los estudios de difracción de Rayos X. Podemos tomar de ejemplo a la ignimbrita Colón (WT1), la cual tuvo una disminución de tamaño de -0.5 mm/m. Esto probablemente sea porque esta compuesta en su gran mayoría por pómez que al momento de ser calentada libera vapor de agua y se encoge de tamaño, ayudada tambien por su altísima porosidad. Otra muestra con alto porcentaje de porosidad y con muy baja expansión fue la ignimbrita Escolásticas negra (BT1). Esta muestra tambien tiene un contenido razonable de pomez blanca y negra.

### *Características de intemperismo*

De los resultados obtenidos con esta investigación y de su correlación con el comportamiento al intemperismo podemos tener una idea más clara sobre la idoneidad de las muestras como rocas de construcción.

Comparando el mapeo de daños de las diferentes paredes de edificios del centro histórico de Santiago de Querétaro con la ocurrencia de los daños a las diferentes muestras en el laboratorio, los resultados son impactantemente similares. Es sorprendente que la línea de las Ignimbritas Escolásticas Gris y Negra (TGQ1, BT1), Amarilla y Roja de Huimilpan (TAH1, TRH1) e Ignimbrita Colón (WT1) tengan los mayores patrones de intemperismo. Esto es debido a su alto porcentaje de porosidad

Estas rocas con alto porcentaje de porosidad absorben fácilmente aguas ricas en sales del subsuelo como nitratos y sulfatos. Estas sales al entrar dentro de los poros y evaporarse el agua que las transporta, cristalizan inmediatamente dentro de los poros, particularmente en las zonas de las estructuras a nivel del suelo. Estas sales a lo largo del tiempo destruyen las rocas.

Como recomendación para futuros proyectos, sería conveniente investigar con exactitud qué tipos de sales están presentes en suelo del Centro Histórico de Santiago de Querétaro, ya que conociendo la química de las sales se pueden hacer mejores inferencias sobre el tipo de reacción que se lleva a cabo en las rocas volcánicas ácidas, como es el caso de las muestras de ignimbritas riolíticas de la región.

La mayoría de los mapeos de daños exhibe un patrón en el deterioro de las rocas. Particularmente en la relación eflorescencia salina / decoloración. Esta forma una relación espacial en forma de aureola. Hacia el centro de la aureola la eflorescencia salina es donde tiende a formarse y hacia la parte exterior la decoloración (Figura 125). Esto ocurre en las rocas altamente porosas y relativamente nuevas, como es el caso de los nichos y monumentos de la Plaza Fundadores de Querétaro. La Figura 125 representa a la muestra TRH1 en un ciclo de eflorescencia salina avanzado. La eflorescencia está representada con color verde, la decoloración con anaranjado y la pérdida de material por separación o desintegración con rojo. Se debe notar el patrón de esférico de la cristalización salina dentro del cubo. Esta esfera de sal comienza a cristalizar en el centro y a medida que los ciclos salinos van ocurriendo, esta esfera crece y finalmente destruye la roca por dentro al ser rebasada la fuerza de cohesión de la roca por la fuerza de cristalización de la sal.

El gran porcentaje de porosidad, la interconectividad de los poros y el tamaño de poro permiten la fácil circulación y transporte de fluidos. Esto resulta ideal porque la roca no

retiene humedad y ayuda a que sus minerales no se vean alterados por la presencia de agua. Ahora veamos la desventaja de una roca al poseer las características arriba mencionadas. En un lugar con rápida evaporación y clima extremo como lo es el centro de México, la concentración de sales en el suelo es muy alta; si se tiene una roca porosa absorberá el agua rica en sales del suelo permitiendo así su cristalización después de la evaporación. Si el ciclo de circulación de agua con sales se repite resulta en un daño terrible y finalmente en la completa destrucción de la roca.

El aguate de una roca con las propiedades arriba mencionadas solo estará en función del justo grado de soldamiento durante la formación de la roca.

Cuando las rocas son más antiguas, la eflorescencia salina provoca la pérdida de material por desintegración, descamación y la completa destrucción de las rocas. También existe decoloración tanto en la roca como en el material desintegrado.

Es increíblemente impactante que en los análisis de laboratorio las rocas tengan patrones de eflorescencia y decoloración similares a los que ocurren en la naturaleza.

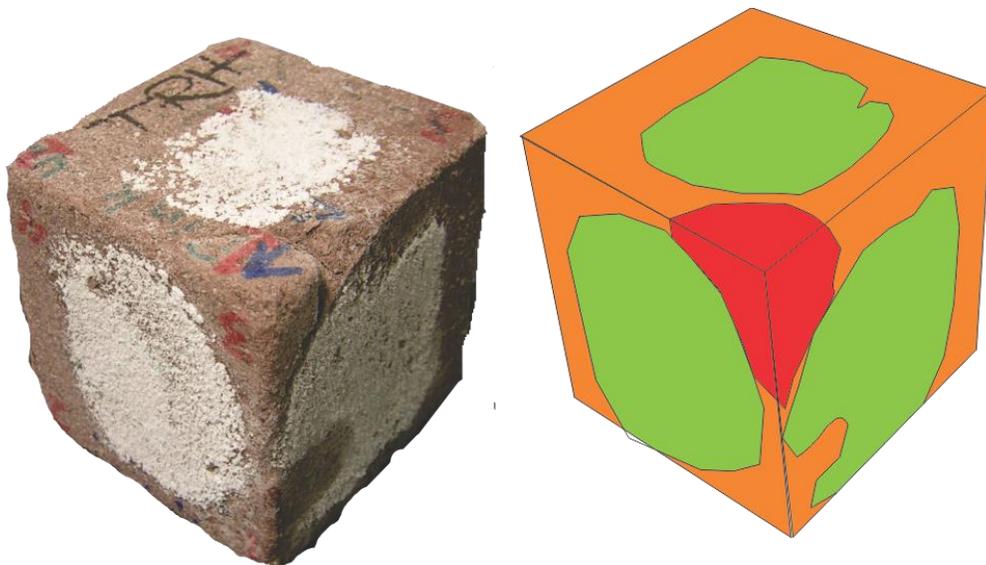


Figura 125. Patrón de esférico de eflorescencia salina para muestras porosas.

## Referencias

- Aguirre-Díaz, G. J., (1996), Volcanic stratigraphy of the Amealco caldera and vicinity, central Mexican volcanic belt. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 13, pp 238-251.
- Aguirre-Díaz, G. J., y López-Martínez, M., (2001), The Amazcala Caldera, Queretaro, Mexico. *Geology and geochronology. Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 111, 203-218.
- Aguirre-Díaz, G. J., (2001), Recurrent magma mingling in successive ignimbrites from Amealco caldera, central Mexico. *Bull. Volcanol.* 63, 238-251
- Aguirre-Díaz, G. J., y López-Martínez, M., (2009), Geologic evolution of the Donguinyó-Huichapan caldera complex, central Mexican Volcanic Belt, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 179, pp133-148: Elsevier.
- Aguirre-Díaz, G. J., (2009), Mezcla de vidrios en la Ignimbrita Escolásticas, Querétaro: dos modelos de emplazamiento en una sola ignimbrita, en *Unión Geofísica Mexicana, Reunión Anual 2015, Puerto Vallarta, Jal., México: México, Unión Geofísica Mexicana, Resúmenes con Programas*, 29(1) p. 116.
- Aguirre-Díaz, G. J., Aguillón-Robles, A., Tristán-González, M., Labarthe-Hernández, G., López-Martínez, M., Bellon, H., y Nieto-Obregón, J., (2013, June), Geologic setting of the Peña de Bernal Natural Monument, Querétaro, México: An endogenous volcanic dome. *Geosphere*, 9. 557-571.
- Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, A. F., Reyes-Zaragoza, M. A., Orozco-Esquivel, M. T., Ojeda-García, A. C., y Vassallo, L. F., (2001), Estratigrafía y deformación extensional en la región San Miguel de Allende-Querétaro, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 18, 129-148.
- Almaguer-Rodríguez, J., (2010), Estudio geoquímico de elementos trazas en unidades volcánicas del CVSLP: método ICP-MS (Validación del método), San Luis Potosí, México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería, Tesis de Licenciatura, 97pp.

- Arango-Guevara, A. F., Mitre-Salazar, L. M., y Martínez-Reyes, J., (2007). Actualización del conocimiento geológico en la cuenca del Río Chichimequillas, Estado de Querétaro, México. *Trabajos de Geología, Univ. de Oviedo*, 27, 29-39.
- Arango-Guevara, L. F., (2006), Caracterización geológico-ambiental de la cuenca del Río Chichimequillas, Estado de Querétaro. Tesis de Maestría. Centro de Geociencias, UNAM campus Juriquilla, Querétaro: México.
- Brady, John B., Newton, Robert M., and Boardman, Shelby J., 1995, New Uses for Powder X-Ray Diffraction Experiments in the Undergraduate Curriculum. *Jour. Geol. Education*, v. 43(5), 466-470.
- Brimblecombe, P., (2011), Environment and Architectural Stone. En *Stones in Architecture: Properties, Durability 4<sup>th</sup> Edition* (86). Germany: Springer.
- Busby, C., (2008), Large igneous province of the month: Geology of the Sierra Madre Occidental, Mexico. Noviembre 9, 2008, de University of California Santa Barbara  
Sitio web: <http://www.largeigneousprovinces.org/08nov.html>
- Cerca-Martínez, L. M., Aguirre-Díaz, G. J., López-Martínez, M., (2000), The geologic evolution of the southern Sierra de Guanajuato, Mexico: a documented example of the transition from the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt: *International Geology Review*, 42, 131-151.
- Charola, E., Steiger, M., y Sterflinger, K., (2011), Weathering and deterioration. en: *Stones in Architecture: Properties, Durability*, ed. Siegesmund y Snethlage, R., 4<sup>th</sup> Edition, edn, Springer, Berlin. pp 227-316
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Servicio Meteorológico Nacional: Normales climatológicas Querétaro, Querétaro (en línea), [smn.conagua.gov.mx](http://smn.conagua.gov.mx), base de datos, <http://smn.cna.gob.mx/index>, acceso libre, consultado: 6 de Enero 2015.
- Consejo Nacional para la Cultura y las Artes (CONACULTA), Plaza Fundadores de Querétaro, (en línea): [www.conaculta.gob.mx/regiones\\_de\\_mexico/centro\\_occidente](http://www.conaculta.gob.mx/regiones_de_mexico/centro_occidente); acceso libre, consultado 17 de Abril 2015.

- Dávalos-Álvarez, O. G., Nieto-Samaniego, A. F., Alaniz-Álvarez, S. A., y Gómez-González, J. M., (2005), La fases de la deformación cenozoica en la región de Huimilpan, Querétaro, y su relación con la sismicidad local. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 22, pp. 129-147
- Ego, F., y Ansan, V., (2002), Why is the Central Trans-Mexican Volcanic Belt (102°-99° W) in transtensive deformation? *Tectonophysics*, v. 359, pp. 189-208.
- Eguiluz de Antuñano, S., Aranda-García, M., y Marrett, R., (2000). Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, v. 53, pp 1-26.
- Ferrari, L., (2000), Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década, México; *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53(1), 84-92
- Ferrari, L., (2004), Slab detachment control on mafic volcanic pulse and mantle heterogeneity in central Mexico: *Mexico, Geology*, v. 32, pp. 77-80.
- Ferrari, L., López-Martínez, M., Aguirre-Díaz, G. J., Carrasco-Núñez, G. (1999), Space-time patterns of Cenozoic arc volcanism in central Mexico: From the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt. *Geology*, 27, 303-306.
- Ferrari, L., Pasquarè, G., Venegas-Salgado, S., y Romero-Ríos, F., (1999), Geology of the western Mexican Volcanic Belt and adjacent Sierra Madre Occidental and Jalisco Block. *Geological Society of America Special Paper*, 334, 22.
- Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., Bryan, S., (2005), Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica, México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 343-378.
- Fleischer, M., y Pabst, A., (1983), New mineral names, USA: *American Mineralogist*. 68, 280-283 pp.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M. T., y Ferrari, L., (2007), Igneous petrogenesis of the Trans-Mexican Volcanic Belt. En *Geology of México: Celebrating the Centenary of the Geological Society of México: Geological Society of America Special Paper 422-5(53)*. Boulder, CO.,USA: GSA.

- González Sámano, P. S. (2012), La Formación Cantera; Su utilización, durabilidad y deterioro como roca natural de construcción. Ejemplos en edificios históricos de la Ciudad de San Luis Potosí. Trabajo Recepcional. Área Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, México.
- Hernández-Rojas, J. (2007), Reconstrucción de la dinámica eruptiva de la Pómez Ezequiel Montes, Qro, Tesis de Maestría. Centro de Geociencias UNAM Campus Juriquilla, Querétaro, México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2005, Censo de Población y Vivienda, 2005, Prontuario de información estadística municipal de Querétaro, Querétaro, México.
- International Council on Monuments and Sites & International Scientific Committee for Stone., (2008), Monuments and Sites XV: Illustrated glossary on stone patterns, ICOMOS-ISCS, 15, 1-86.
- Jicha, B. R., Scholl D. W., y Rea, D. K. (2009). Circum-Pacific arc flare-ups and global cooling near the Eocene-Oligocene boundary. *Geology*, v. 37, pp. 303-306.
- Kral, A. G., (2014), Tuffsteine in Querétaro-City (México): Schadensanalyse, Verwitterungsverhalten und gesteintechnische Untersuchungen. Bachelorarbeit. Geowissenschaftliches Zentrum der Georg-August-Universität Göttingen: Deutschland
- Le Maitre R. W., y International Union of Geological Sciences., (2002), Volcanic rocks: classification and nomenclature, En *Igneous Rocks: A classification and glossary of terms* 2<sup>nd</sup> Edition (3). New York, USA: Cambridge University Press.
- López-Doncel, R., Wedekind, W., Dohrmann, R., y Siegesmund, S., (2013), Moisture expansion associated to secondary porosity: an example of the Loseros Tuff of Guanajuato, Mexico. *Environ Earth Sci*, 69, 1189-1201
- Márquez, A., Oyarzun, R., Doblaz, M., y Verma, S. P., (1999), Alkalic (ocean-island basalt type) and calc-alkalic volcanism in the Mexican volcanic belt: A case for plume-related magmatism and propagating rifting at an active margin? *Mexico: Geology*, 27(1), 51-54.

- Nieto-Samaniego, A. F., Alaniz-Álvarez, S. A., & Camprubí, A. (2007), Stratigraphy, structure and Cenozoic tectonic evolution. En *Geology of México: Celebrating the Centenary of the Geological Society of México: Geological Society of America Special Paper 422-2(30)*. Boulder, CO., USA: GSA.
- Pacheco-Martínez, J., (2007), Modelo de subsidencia del valle de Querétaro y predicción de agrietamientos superficiales. Tesis Doctoral. Centro de Geociencias, UNAM Campus Juriquilla, Querétaro: México.
- Pardo, M., y Suarez, G., (1993), Steep subduction geometry of the Rivera Plate beneath the Jalisco Block in western Mexico: *Geophysical Research Letters*, 20(21), 2391-2394.
- Platz, T. V., (2014). *Werksteine im Saale-Unstrut-Gebeit: Bauschäden, Verwitterungscharakteristik und gesteintechnische Eigenschaften*. Masterarbeit. Geowissenschaftliches Zentrum der Universität Göttingen. Deutschland
- Rodríguez-Jiménez, P., Ruiz-Cruz, M. D., y Carrasco, F., (1988), Formación de corrensita en turbiditas calcáreas con sílex del campo de Gibraltar (SW de España), España: *Estudios Geol.*, 44, 19-29 pp.
- Ruedrich, J., Bartelsen, T., Dorhmann, R., Siegesmund, S., (2011), Moisture expansion as a deterioration factor for sandstone use in buildings. *Environ Earth Sci.* published on line 17 October, doi: 10.1007/s12665-010-0767-0
- Siedel, H., Siegesmund, S., y Sterflinger, K., (2011), Characterisation of stone deterioration on buildings. En *Stones in Architecture: Properties, Durability 4<sup>th</sup> Edition* (64). Germany: Springer.
- Siegesmund S., y Snethlage R., (2011), *Stone in Architecture: Properties, Durability 4<sup>th</sup> Edition*. Germany: Springer. pp 1-411.
- Siegesmund, S., y Dürrast, H., (2011), Physical and mechanical properties of rocks. En *Stones in Architecture: Properties, Durability 4<sup>th</sup> Edition* (130). Germany: Springer.
- Siegesmund, S., y Török, Á., (2011), Building Stones. En *Stones in Architecture: Properties, Durability 4<sup>th</sup> Edition* (86). Germany: Springer.

- Sneath R., (2011), Natural stones in architecture: Introduction. En *Stones in Architecture: Properties, Durability* 4th Edition (11). Germany: Springer.
- Sun, S.S., y McDonough, W.F., (1989), Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. En: *Magmatism in the ocean basins*. Saunders, A.D. y Norry, M.J. (Editores), Geological Society of London. 42: 313-345.
- Velasco Sánchez, A., (2013), Estudio petrográfico, petrofísico y geoquímico de las rocas de construcción del templo de la compañía de Jesús, Guanajuato, México. Trabajo Recepcional. Área Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí: México.
- Villalón, M., (2013), Inauguran Plaza Fundadores, El Universal Querétaro, de <http://m.eluniversalqueretaro.mx>
- Verma, S. P., (2002), Absence of Cocos plate subduction related basic volcanism in southern Mexico: A Unique case on Earth? *Mexico, Geology*, 30(12), 1095-1098.
- Wedekind, W., López-Doncel, R., Dohrmann, R., Kocher, M., y Siegesmund, S., (2013). Weathering of volcanic tuff rocks caused by moisture expansion. *Environ Earth Sci*, 69, pp 1203-1224.

### **Normativa DIN**

- DIN EN 772-4: Methods of test for masonry units - Part 4: Determination of density and bulk density and total porosity and the open porosity of bricks made of natural stone; German version (Beuth, 1998).
- DIN 66133: Determination of pore volume distribution and specific surface area of solids by mercury intrusion ( Beuth, 1993).
- DIN 15148 : Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water absorption coefficient by partial immersion ( Beuth, 1987).
- DIN EN 12572 : Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapor transmission rate ( Beuth, 2001).
- DIN 22024 : Determination of Tensile splitting strength of hard rocks ( Beuth, 1989).