



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

ÁREA CIENCIAS DE LA TIERRA

ESTUDIO PETROGRÁFICO, PETROFÍSICO Y GEOQUÍMICO DE LAS  
ROCAS DE CONSTRUCCIÓN DEL TEMPLO DE LA COMPAÑÍA DE  
JESÚS, GUANAJUATO, MÉXICO.

TRABAJO RECEPCIONAL  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO GEÓLOGO

PRESENTA:

ANAKAREN VELASCO SÁNCHEZ

ASESOR:

DR. RUBÉN LÓPEZ DONCEL



SAN LUIS POTOSÍ

2013

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
Resumen.....	1
Introducción.....	3
Objetivo.....	4
Método de trabajo.....	4
a) Trabajos Previos.....	5
b) Trabajo de Campo.....	6
c) Trabajo de Laboratorio.....	7
d) Gabinete Final.....	13
I.GENERALIDADES.....	14
I.1 Antecedentes históricos del Templo de la Compañía de Jesús.....	14
I.2 Localización.....	16
I.3 Marco geológico.....	17
I.4 Estratigrafía.....	18
I.5 Geología regional.....	22
I.6 Registro histórico de la meteorología de la ciudad de Guanajuato.....	23

II.MAPEO, INTEMPERISMO Y DETERIORO DE LAS ROCAS NATURALES USADAS	EN	EL
TEMPLO.....		28
III.PROPIEDADES PETROGRÁFICAS, PETROFÍSICAS Y GEOQUÍMICAS.....		34
III.1 Petrografía.....		34
III.2 Porosidad.....		42
III.3 Densidad.....		48
III.4 Propiedades hígricas e hídricas.....		51
III.5 Compresión y resistencia.....		57
III.6 Elementos mayores.....		60
IV. COMPARACIÓN DE LAS ROCAS ESTUDIADAS.....		61
CONCLUSIÓN Y DISCUSIÓN.....		67
BIBLIOGRAFÍA.....		69

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Canteras cercanas a la localidad Escolásticas, Querétaro en donde se obtiene la Toba Escolásticas.....	6
Figura 2. Laminado de muestras.....	8
Figura 3. Preparación de muestras para la prueba de difracción de rayos X.....	9
Figura 4 Porosímetro de mercurio.....	10
Figura 5. Muestras sumergidas en agua destilada para la prueba de expansión hídrica.....	11
Figura 6. Muestra sometida a prueba de compresión.....	12
Figura 7. Fotografía del Templo de la Compañía de Jesús.....	15
Figura 8. Mapa de localización del Templo de la Compañía de Jesús.....	16
Figura 9. Fotografía de la Riolita La Bufa en fachada del Templo de La Compañía de Jesús.....	20
Figura 10. Afloramiento de la toba Escolásticas.....	21
Figura 11. Mapeo de la fachada principal del Templo de la Compañía de Jesús.....	25



Figura 12. Mapeo fachada lateral del Templo de la Compañía de Jesús.....	27
Figura 13. Zonas dañadas por descamación en una parte de la fachada lateral del Templo de la Compañía de Jesús.....	29
Figura 14: Daños que muestran las rocas utilizadas en la fachada del Templo.....	30
Figura 15. Fotografía muestra de mano de la Riolita La Bufa.....	34
Figura16. Fotomicrografía de la Riolita La Bufa.....	36
Figura 17. Resultados difracción de rayos X Riolita La Bufa.....	37
Figura 18. Riolita La Bufa en el microscopio de barrido electrónico.....	38
Figura 19. Fotografía muestra de mano Toba Escolásticas.....	39
Figura 20. Fotomicrografía de la Toba Escolásticas.....	40
Figura 21. Resultado difracción de rayos X Toba Escolásticas.....	41
Figura 22. Radio de poro efectivo de la Riolita La Bufa.....	46
Figura 23. Radio efectivo de la toba Escolásticas.....	47

Figura 24. Grafica de expansión higrca de la Riolita La Bufa.....	53
Figura 25 Grafica de expansión higrca de la toba Escolásticas.....	54
Figura 26. Grafica de expansión hídrica de la Riolita La Bufa.....	55
Figura 27. Grafica de expansión hídrica de la toba Escolásticas.....	56
Figura 28. Drifractogramas de la Riolita La Bufa y la toba Escolásticas.....	65

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Temperatura media año 2012, tomada y modifica del Servicio Meteorológico Nacional.....	24
Tabla 2. Temperatura máxima promedio año 2012, tomada y modificada del Servicio Meteorológico Nacional.....	25
Tabla 3. Temperatura mínima año 2012, tomada y modificada del Servicio Meteorológico Nacional.....	26
Tabla 4. Precipitación media anual 1941-2012, tomada y modificada del Servicio Meteorológico Nacional.....	27
Tabla 5. Datos de distribución radio de poro de la Riolita La Bufa y la Toba Escolásticas.....	45
Tabla 6. Pesos de las muestras en diferentes condiciones de la Riolita La Bufa y La Toba Escolástica.....	49
Tabla 7. Densidades y porosidad de la Riolita La Bufa y la Toba Escolástica.....	50
Tabla 8. Resultados fuerza de tensión Riolita La Bufa y toba Escolásticas.....	59
Tabla 9. Elementos mayores en la Riolita La Bufa y la toba Escolásticas.....	60

## INTRODUCCIÓN

Las rocas volcánicas son desde tiempos históricos un recurso importante en la construcción. Su uso varía desde esculturas monumentales en antiguas culturas hasta modernas edificaciones alrededor del mundo. Las causas para que estas rocas sean tan apreciadas en la construcción consisten mayormente en tres aspectos, el primero es que algunas de estas rocas en particular las tobas son relativamente blandas y por lo tanto fáciles de trabajar. El segundo aspecto es su abundancia, debido a que las tobas se encuentran en muchos lugares alrededor del mundo y prácticamente en todos los tiempos geológicos y la tercera razón es porque las tobas muestran gran variedad de colores, composición, tamaños de granos, acomodo y texturas que hacen que estas rocas sean muy atractivas para la construcción y el arte (Wedekind et al., 2012)

El deterioro que sufren estas rocas ya sea de origen natural (fenómenos atmosféricos y agentes climáticos) o antropogénico han llevado al hombre a realizar estudios especializados sobre su comportamiento así como su origen, composición y propiedades físicas de las rocas y con estos conocimientos poder determinar las acciones a realizar para la preservación de sus monumentos.

En la ciudad de Guanajuato existen actualmente varias edificaciones que presentan este tipo de problemática, dentro de las cuales se encuentra el Templo de la Compañía de Jesús que por su importancia es muy buena para la realización de este tipo de estudios en donde se obtuvieron datos petrográficos, petrofísicos y

geoquímicos de las rocas que componen su fachada con la finalidad de entender porque se deterioraran de la manera en la que lo hacen.

## Resumen

El presente trabajo está orientado a describir las rocas naturales de construcción, el deterioro y los efectos de la intemperización que ha presentado la fachada del Templo de la Compañía de Jesús ubicada en la ciudad de Guanajuato, además de describir las propiedades petrográficas, petrofísicas y geoquímicas tanto de las rocas naturales originales (Riolita La Bufa) como de la usada para su restauración (toba Escolástica).

La porosidad es sin duda una de las propiedades más importantes en relación con el deterioro debido a que puede condicionar el transporte del agua y por lo tanto su durabilidad. Se determinó que la Toba La Bufa tiene una porosidad de casi el 20%, de la cual el 70% son microporos y el 30% restante corresponde a poros capilares, mientras que la toba Escolástica posee una porosidad cercana al 50% de la cual el 20% corresponde a microporos y el 80% son poros capilares, que es prácticamente lo opuesto a la Riolita La Bufa. El tamaño de los poros es un factor determinante en la durabilidad de las rocas debido a que condiciona la entrada y movilidad de los fluidos y minerales en su interior y controla los diferentes mecanismos relacionados con el deterioro de las rocas porosas que dependen fuertemente del tamaño del poro, como la evaporación-condensación o presión de cristalización de sales, así como la expansión hídrica en donde muy comúnmente mientras mayor es la

microporosidad mayor va a ser la expansión. No únicamente el tamaño de poro y su distribución constituyen factores determinantes ya que la efectividad de la porosidad (poros conectados entre sí), también va a facilitar la absorción, transmisión y movilidad de los flujos a través de la roca. El contenido de minerales arcillosos es importante ya que combinado con la porosidad pueden provocar expansión. Los valores de expansión hídrica de la Riolita La Bufa y la toba Escolásticas son de 0.9 mm/m y 0.045 mm/m respectivamente. Geoquímicamente la Toba Bufa se puede clasificar como una ignimbrita riolítica mientras que la toba Escolásticas es intermedia y es menos rica en Fe que la primera. Considerando las propiedades de las rocas utilizadas, su utilización conjunta en los trabajos de restauración causará un aumento significativo en la absorción de agua y permitirá un rápido flujo a través de la roca sustituta, con lo cual la roca original estará en contacto más rápidamente y en mayor proporción a la humedad. Esto puede provocar aumento en la expansión, disolución y principalmente rápida oxidación, factores que aceleran el deterioro y el decaimiento de la roca.

## Objetivo

Entender la problemática relacionada con el deterioro y los efectos de la intemperie que se ha presentado en la fachada del Templo de la Compañía de Jesús ubicada en la ciudad de Guanajuato. Se pretende obtener información sobre las propiedades físicas y químicas de las rocas que componen esta edificación así

como los probables efectos a ocurrir en la roca que se está usando en la restauración.

### Método de trabajo

El Templo de la Compañía de Jesús se encuentra ubicado en el centro histórico de la ciudad de Guanajuato y está construida con rocas de la Formación La Bufa y la Toba Loseros, que ya ha sido estudiada por López Doncel, como rocas base de la construcción que actualmente se están reemplazando por la Toba Escolástica. Se realizó trabajo de campo así como de laboratorio para poder determinar las siguientes propiedades de las rocas estudiadas:

- Tipos de deterioro.
- Petrografía.
- Porosidad de las rocas.
- Densidad de las rocas.
- Propiedades hídricas e hígricas.
- Compresión y resistencia.

#### a) Trabajos previos

Dentro de esta etapa se recopiló toda la información posible sobre el Templo de la Compañía de Jesús, tomando como base las publicaciones *Historical building stones of Guanajuato, México: Weathering, properties and restoration* de López-

Doncel *et al.* (2012), así como *Hygric and hydric expansion of tuff exclusively caused by clay minerals?* de Wedekind *et al.* (2012), y para las consultar sobre las metodologías se usaron diferentes boletines especiales entre los que se encuentran *Insolation weathering and hygric dilatation: two competitive factors in Stone degradation* de Weiss *et al.* (2004), *quality assessment of replacement stones for the Cologne Cathedral: mineralogical and petrophysical requirements* de Graue *et al.* (2011), *Moisture expansion as a deterioration factor for sandstone used in buildings* de Ruedrich *et al.* (2011), así como el trabajo recepcional La Formación Cantera; su utilización, durabilidad y deterioro como roca natural de construcción. Ejemplos en edificios históricos de la ciudad de San Luis Potosí de González Sámano. (2012). Los datos correspondientes al clima de la ciudad de Guanajuato fueron consultados en la página del Servicio Meteorológico Nacional.

#### b) Trabajo de campo

Esta etapa se realizó en el centro histórico de la ciudad de Guanajuato en donde se reconocieron las rocas que son parte de la estructura del Templo de la Compañía de Jesús y se identificó el tipo de daños que han experimentado, en donde y como se han visto afectadas. Para la obtención de las muestras se localizaron los tajos de extracción de la toba Escolástica, llamada de manera informal así debido a la cercanía que tiene con la comunidad de Las Escolásticas, en el estado de Querétaro, su extracción se realiza en forma de bloque y es usada en su mayoría para trabajos artesanales en canteras de la localidad, así como de la Riolita la Bufa



cuya extracción se realizaba principalmente del cerro de la Bufa localizado en las cercanías de la ciudad de Guanajuato (Figura 1).



Figura 1. Canteras localizadas al sur de la localidad de Escolásticas, Querétaro con coordenadas UTM 0370942, 2258113 en donde se obtiene la toba Escolástica

### c) Trabajo de laboratorio

Corresponde a la etapa en la cual se prepararon los especímenes de rocas recolectadas para su análisis completo. Para la realización de las láminas delgadas, se partió inicialmente con el corte de las muestras en forma de cubo utilizando una cortadora de disco de diamante de 8" (Buehler) para después añadirles un abrasivo (en este caso se utilizó carburo de silicio) y desbastarlas hasta obtener una superficie completamente plana para colocarlas en un porta objetos que deberá tener la resina que servirá de adhesivo con la roca (la resina fue calentada previamente), estos se unen haciendo presión para no producir burbujas entre ambos, y se deja secar por un promedio de 6 horas (Figura 2).

Una vez que la resina se ha secado, se procede a desbastar el volumen de roca sobrante utilizando la pulidora hasta lograr un espesor promedio de 30 micras. Finalmente se realizó el análisis petrográfico de la lámina.

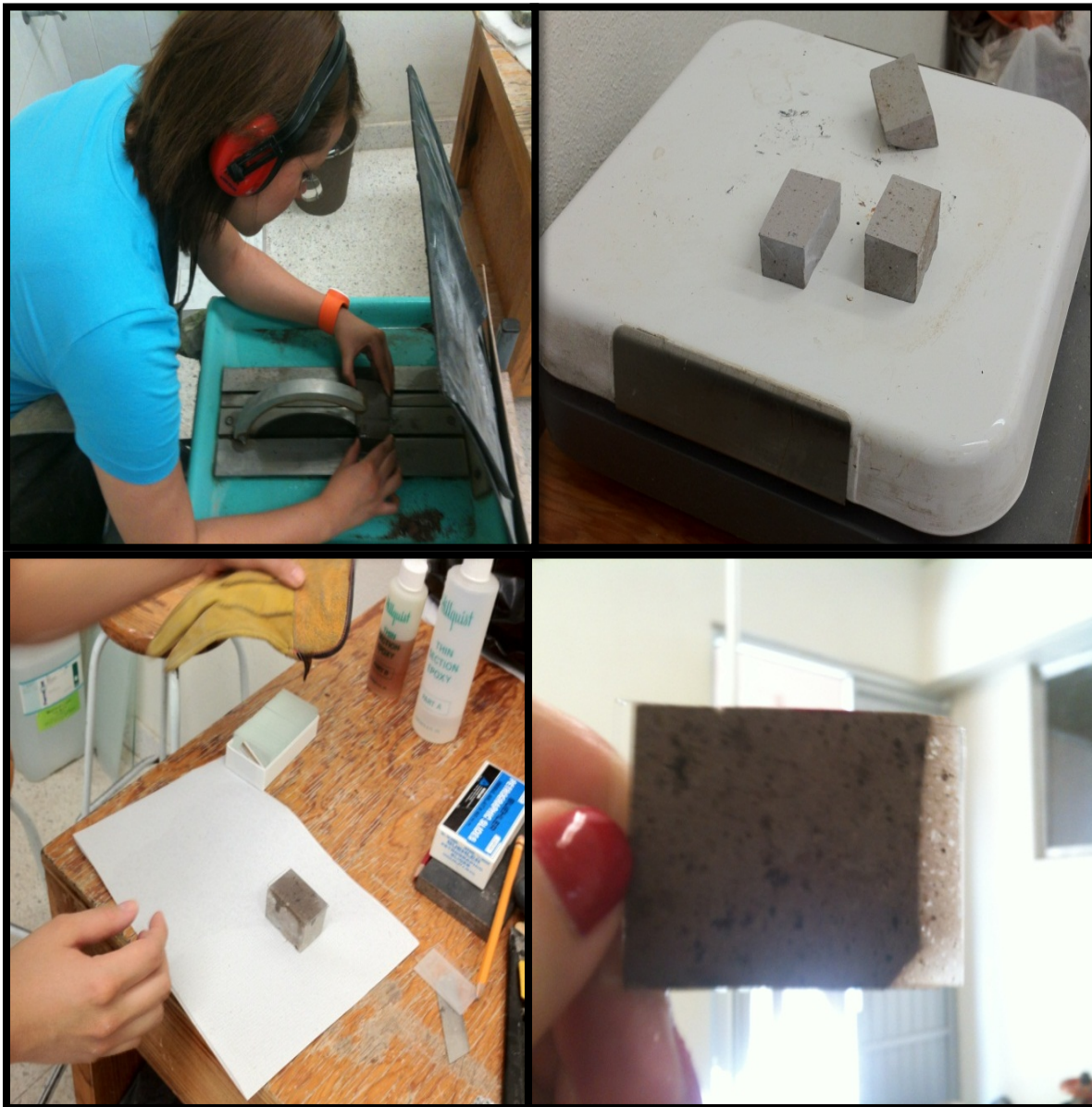


Figura 2. Laminado de muestras realizado en los laboratorios del Instituto de Geología de la IIASI P



Adicionalmente las muestras fueron analizadas usando la difracción de rayos X, que es un método que permite identificar las fases cristalinas de los minerales, comienza con la preparación de un cristal y consiste en la irradiación con rayos X en estos pequeños cristales que actúan dispersándolos en direcciones e intensidades determinadas que dependen del ordenamiento que tengan los átomos a nivel microscópico, con esta información de dirección e intensidad de cada rayo se obtiene la estructura molecular que posteriormente será relacionada con las propiedades del material, que finalmente permitirá obtener la identificación de la composición mineralógica de la muestra (Figura 3).



Figura 3. Preparación de las muestras para la prueba de difracción de rayos X.

Para determinar la densidad de matriz y la densidad aparente se utilizó el método de Arquímedes, con el cual se puede medir el empuje que actúa sobre la muestra una vez que está sumergida en agua destilada; este método también sirvió para poder determinar la porosidad total, mientras que la porosidad de la roca se obtuvo con el uso del porosímetro de mercurio (Figura 4).



Figura 4. Porosímetro de mercurio utilizado para la obtención de la porosidad de las muestras.

La expansión hídrica e higríca de cada roca se midió en muestras cilíndricas con un diámetro de 1mm y una longitud de 10mm. Para las mediciones de expansión hídrica estas muestras cilíndricas fueron completamente sumergidas en agua destilada (Figura 5), mientras que para el análisis de la dilatación higríca se utilizó una humedad relativa (valor-RH) del 20% que se incrementó de forma gradual hasta alcanzar un RH del 95%. La temperatura se mantuvo de manera constante a 30°C durante toda la duración del experimento.



Figura 5. Muestras sumergidas en agua destilada para la prueba de expansión hídrica.



Para las pruebas de compresión y resistencia (Figura 6), se utilizaron muestras cilíndricas con caras coplanaras de 50 mm de diámetro, 50 mm de longitud 40 mm de diámetro, y 20 mm de longitud respectivamente. La carga aplicada en la prueba de compresión se realizó con ayuda de una máquina de ensayo servo-hidráulico con un marco de prueba de rigidez y una capacidad de carga de 300 kilo-Newton, mientras que las mediciones que se realizaron en la prueba de resistencia fueron determinadas por medio del “*Brazilian test*”.



Figura 6. Muestra sometida a la prueba brasileña en máquina de fuerza de tensión directa.

#### d) Gabinete final

Con los datos obtenidos gracias a las pruebas anteriores se comenzó con la elaboración del reporte en el cual se explica con mayor detalle los procedimientos y resultados obtenidos de las mismas. Para la elaboración de los mapas de localización así como las figuras del mapeo de las rocas utilizadas en el Templo de la Compañía de Jesús se utilizó el programa *Arc Map*.

Los resultados de las pruebas con las cuales se determinaron las propiedades petrofísicas de las rocas se trabajaron en *Microsoft Excel*. La elaboración del texto se realizó con *Microsoft Word*. Los datos experimentales se obtuvieron de los laboratorios de la Universidad de Göttingen, Alemania y las interpretaciones se realizaron en las instalaciones del Instituto de Geología de la UASLP.

El registro histórico de la meteorología de la ciudad de Guanajuato fue obtenido de la página web del SMN (Servicio Meteorológico Nacional) y fueron modificados para mostrar los datos de interés.

Para la identificación de los minerales de las rocas estudiadas se utilizaron microscopios petrográfico y de barrido electrónico, así como un difractómetro de rayos X y cuyos resultados se trabajaron en el programa *X'Pert HighScore Plus*.

## **I.GENERALIDADES**

### **I.1 Antecedentes históricos del Templo de la Compañía de Jesús**

La antigua ciudad minera de Guanajuato, en el centro de México, pertenece a una de las ciudades más importantes de América Latina, que conserva uno de los legados históricos más importantes de edificios coloniales, incluso la ciudad fue declarada Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO. Prácticamente todas las construcciones coloniales fueron construidas con rocas naturales del lugar. (López-Doncel *et al.*, 2012).

El Templo de la Compañía de Jesús es una de las iglesias jesuitas más grandes construidas por la Compañía de Jesús durante la época de la Nueva España. Los trabajos comenzaron en 1746 por iniciativa de José Manuel Sardaneta, primer marqués de Rayas, quien financió casi toda la construcción y finalizaron en 1765.

En una roca tallada sobre el templo se señala que realizó su traza Fray José de La Cruz, pero que quien dirigió los trabajos fue el arquitecto y constructor de retablos Felipe de Ureña, quien probablemente terminó la única torre de estilo neoclásico que data de 1883 ya que la cúpula original se derrumbó en 1808.

Considerado como el templo de mayores dimensiones de la ciudad, la fachada tallada en cantera rosa es de estilo churrigueresca, de tres puertas con estípites en los que se alternan nichos para imágenes de santos Jesuitas. Tras la expulsión de los Jesuitas de Nueva España, el Templo de la Compañía de Jesús pasó a la Congregación del Oratorio de San Felipe Neri y fue reabierto en 1794 (Figura 7)





Figura 7 Fotografía de la fachada principal del Templo de la Compañía de Jesús.

## I.2 Localización

El templo estudiado se encuentra localizada en la calle Ponciano Aguilar esquina con la calle Del Truco y cuenta con las siguientes coordenadas  $21^{\circ}01'01''$  de Latitud Norte y  $101^{\circ}15'08''$  de Longitud Oeste en el Centro Histórico de la ciudad de Guanajuato (Figura 8).

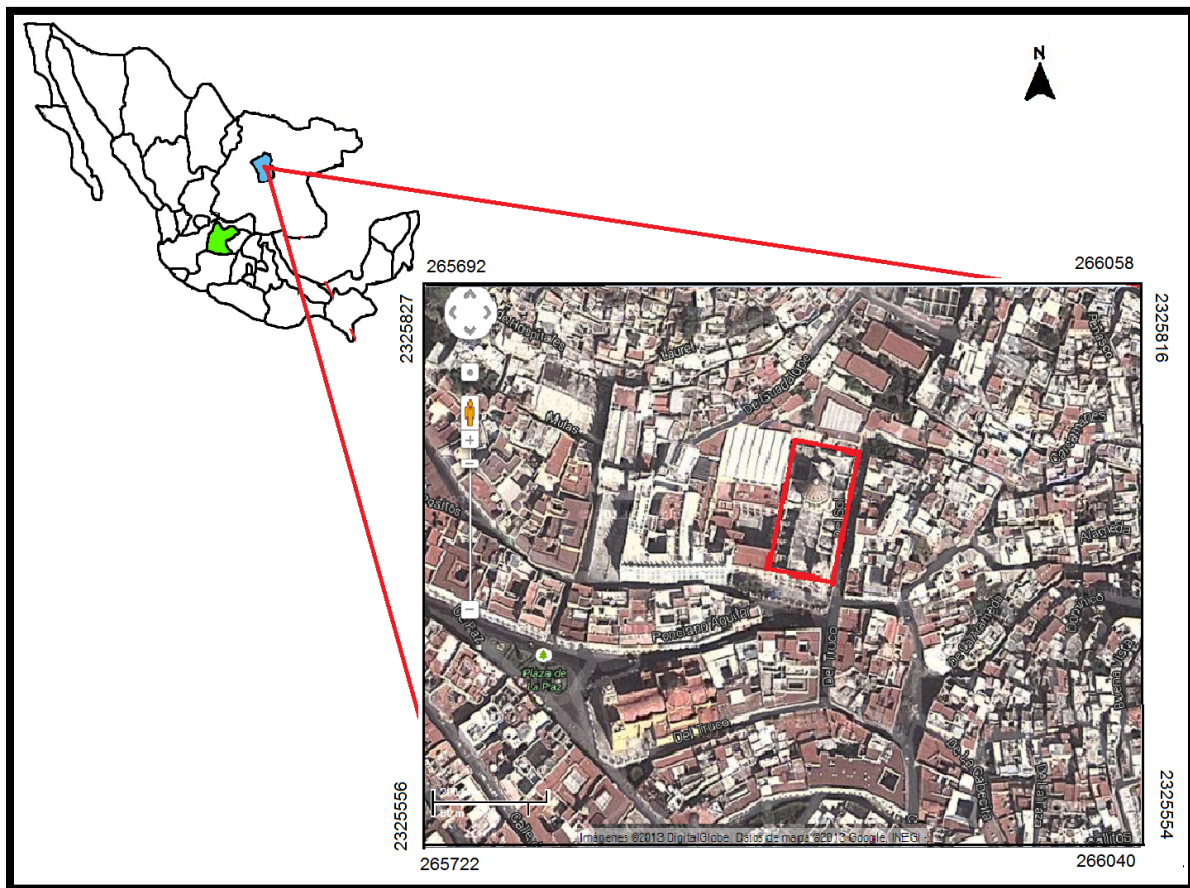


Figura 8. Mapa de localización del Templo de la Compañía de Jesús.

### 1.3 Estratigrafía

#### Formación Losero

Definición: Originalmente Edwards (1956), la designó como arenisca La Bufa y Guiza, (1949), la llama tobas “loseros”, nombre que posteriormente se conservó informalmente, para designar a un horizonte delgado (5-25 m), situado estratigráficamente entre el Conglomerado Guanajuato y Riolita Bufa.

Distribución: Aflora principalmente en las inmediaciones de la Ciudad de Guanajuato.

Litología y espesor: Esta formación se presenta en forma aparentemente concordante sobre el Conglomerado Rojo Guanajuato, y consiste de material volcanoclástico del tamaño de arena fina a media, con muy buena clasificación; presenta estratificación fina a media y diferentes coloraciones (rojo, morado y verde predominante) por alteración. La mayoría de sus granos son de cuarzo, plagioclasa y fragmentos de líticos volcánicos (Edwards, 1956), con más del 20% de calcita como cementante. Los granos son angulares a subangulares. Aproximadamente el 15% de los fragmentos líticos están cloritizadas, imprimiendo una coloración verde a la mayoría de la Formación (Buchanan 1980). Su espesor es más o menos constante en la mayoría de sus afloramientos (10-20 m).

Relaciones estratigráficas: sobreyace con un contacto abrupto al Conglomerado de Guanajuato. En ocasiones es concordante y en otras discordante. Subyace con un contacto brusco a la Riolita La Bufa.

Edad: La edad de esta unidad está dada por su posición estratigráfica entre el Conglomerado Guanajuato (Eoceno medio-tardío) y la Riolita La Bufa fechada en  $37.6 \pm 3.0$  ma (Gross, 1975), lo que la sitúa en el Eoceno tardío.

### Riolita La Bufa

Definición: Originalmente fue nombrada como “Riolita” por Wandke *et al.* (1928) y posteriormente por Echevoyén *et al.* (1970) la nombran como Riolita La Bufa.

Litología y espesor: De acuerdo a Labarthe *et al.* (1996) se trata de flujos piroclásticos de composición riolítica, de color gris rosáceo a crema, en general bien soldados, salvo en su base en donde algunos sitios está sin soldar a parcialmente soldada. Tiene un 10% de fenocristales de cuarzo y sanidino en una matriz desvitrificada. Presenta aisladamente pómez bien colapsada y una cierta abundancia de líticos rojizos de 1 a 3 cm, siendo de mayor tamaño y más abundantes hacia su base.

En la zona poniente del Distrito Minero de Guanajuato, en los afloramientos al oriente de Yerbabuena, se observa su base, la cual se puede describir como un derrame de ceniza parcialmente soldada, con matriz ligeramente desvitrificada, con 3-5 % de fenocristales principalmente de cuarzo de 2-3 mm, pómez sin o ligeramente colapsada algunas de ellas ligeramente cloritizadas, tiene líticos que alrededor de algunos de ellos se formó un halo de alteración concéntrica, en general su base es rica en líticos que incluyen fragmentos del Conglomerado

Guanajuato y del Basamento Mesozoico, en algunas zonas se presentan fragmentos aislados hasta de 40 cm.

Hacia arriba el derrame de ceniza adquiere mayor soldamiento y la roca es de color café rosáceo, de textura porfirítica parcialmente desvitrificada, con un 5% de fenocristales de cuarzo anhedral de 2-3 mm y poco sanidino, ferromagnesianos alterados que aparentemente fueron micas. Presenta pómez parcialmente colapsada hasta de 2 cm de diámetro y líticos de diferentes rocas, siendo los fragmentos más comunes de 1-3 cm. Además de presentar una estructura de apariencia almohadillada con desarrollo de innumerables huecos alargados. De acuerdo a la descripción anterior y a la similitud que tiene con nuestras muestras creemos que de esta unidad fueron obtenidas las rocas que usaron en la fachada del Templo (Figura 9).

Su espesor máximo es de 360 m (Randall, 1994); de 180 m en el camino de Guanajuato al Cedro (Echegoyén *et al.*, 1970). En los afloramientos al sur de la Ciudad de Guanajuato en el Cerro La Bufa y Las Gachas es del orden 100-200 m.

Relaciones estratigráficas: Sobreyace a la Formación Loseros o al Conglomerado Guanajuato y subyace también discordantemente a la Formación Calderones. Se le llega a encontrar también como remanentes sobre la Andesita Cedros al norte de Carboneras y a unos 15 km al nororiente de Calderones.



Edad y correlación: La edad fue determinada por Gross (1975) por el método K/Ar y reporta  $37.0 \pm 3$  m.a, lo que la ubica en el Oligoceno.



Figura 9. Fotografía de la Riolita La Bufo en la fachada del Templo de la Compañía de

toba Escolástica.

Esta unidad se encuentra constituida por tobas que se encuentran en las cercanías al municipio de Escolásticas al sur de la ciudad de Querétaro.

De acuerdo a la carta geológico-minera de Querétaro F14-10 esta unidad pertenece a una actividad volcánica que corresponde al Cinturón Volcánico Mexicano con una duración del Plioceno hasta el Pleistoceno. Se puede observar en la parte externa de la roca una coloración rojiza producto de la oxidación y meteorización a través del tiempo (Figura 10).



Figura 10. Afloramiento Toba Escolástica.

#### I.4 Geología regional

Las ignimbritas La Bufa y Escolásticas pertenecen a dos provincias volcánicas diferentes, por lo que se hará una breve descripción para cada una de ellas.

El Centro Volcánico de Guanajuato (CVG) está localizado en la parte central de México, en la porción suroriental de la Provincia Volcánica de la Sierra Madre Occidental. Este centro volcánico forma parte de la Sierra de Guanajuato (SG) que es una cadena de montañas que se extiende por más de 100 km con orientación NW-SE. Esta sierra coincide con los límites entre dos provincias fisiográficas de México, la Mesa Central y el Cinturón Volcánico Mexicano (Raisz, 1959). El CVG pertenece a la porción sur de la Mesa Central. En general las rocas que afloran en la región de la SG se agrupan en dos conjuntos: uno inferior pre-Terciario, compuesto por rocas metamorfoseadas, tectónizado e intrusionado que sirve de basamento a otro paquete superior de edad cenozoica formado por rocas continentales y volcánicas (Aranda-Gómez y Nieto-Samaniego, 1987).

La secuencia inferior de la SG incluye rocas con metamorfismo de bajo grado que incluyen rocas sedimentarias formando paquetes de lutita, limolita, arenisca y caliza y rocas volcánicas básicas, compuestas de lavas almohadilladas. Este paquete vulcano-sedimentario se ha considerado como parte del Terreno Guerrero de edad Jurásico-Cretácico (Centeno-García *et al.*, 1993).

El paquete volcánico del Terciario correspondiente al CVG, está restringido a la región de la ciudad de Guanajuato, donde se encuentra subyaciendo a unos 1500 m de sedimentos clásticos (Lechos Rojos) de edad Paleoceno-Eoceno, los cuales



se encuentran extendidos de manera irregular sobre varias localidades del sur y suroriente de la Mesa Central (Edward, 1955). La cadena montañosa de la S G se encuentra formada en gran parte por rocas efusivas y volcánicas cuyo vulcanismo se inició en el Eoceno en algunas partes de la SG con un vulcanismo andesítico y continuó de forma voluminosa durante el Oligoceno. La secuencia volcánica local del CVG está compuesta en su base por las oleadas piroclásticas de la Formación Loseros, sobre la cual descansa de manera concordante el flujo piroclástico masivos de gran volumen la Ignimbrita La Bufa, la cual está cubierta por las capas de flujos piroclásticos de la Formación Calderones. Sobre el paquete piroclástico anterior se localiza los flujos de lava de la Riolita Chichindaro y andesita basáltica (Andesita Cedros). La secuencia piroclástica mencionada está restringida al CVG, no así las Riolita Chichindaro que cubre gran parte de la cordillera de la SG.

La ignimbrita Escolástica pertenece a un ambiente volcánico diferente al de la SG, pues esta se derivó de la Caldera de Amealco, localizada dentro de la Faja Volcánica Transmexicana. Este flujo piroclástico forma parte de la Toba Amealco, cuya erupción fue a través de la Caldera Amealco, que se localiza al sur de la ciudad de Querétaro, en el sector central del Cinturón Volcánico Mexicano (Aguirre-Díaz, 2001). Esta caldera suministró una serie de flujos piroclásticos que varían en composición desde traquiandesitas a traquidacitas, en menor cantidad flujos de composición riolítica; por lo general están bien soldados y algunos de ellos presentan juntas columnares.

Su edad radiométrica varía de 4.5 a 4.7 ma y conforman un paquete calculado de 77 km<sup>3</sup> (Aguirre-Díaz, 2001).

## I.5 Registro Histórico de la meteorología de la Ciudad de Guanajuato

El deterioro que presentan las rocas se debe principalmente a la cantidad de agua que absorben es por eso que se realizó un registro histórico de la ciudad de Guanajuato en donde de acuerdo a la página del INEGI el 43 % de la superficie del estado está representado por clima seco y semiseco, localizado principalmente en la región norte; 33 % de la superficie hacia la parte suroriente y oriente, se presenta el clima cálido subhúmedo y 24 % restante presenta clima templado subhúmedo.

Por medio de la página web del SMN (Servicio Meteorológico Nacional) se obtuvieron los datos de media, máxima y mínima temperatura del año 2012, así como la precipitación del mismo año que hubo en la ciudad de Guanajuato. De acuerdo a la siguiente tabla (Tabla 1) se concluye que la temperatura va ascendiendo en los meses de marzo y abril, alcanzando la temperatura máxima en el mes de abril con 25°C y decrece conforme van pasando los meses, alcanzando la temperatura mínima en enero con 14°C. En el año 2012 la temperatura media fue de 20°C.

La temperatura promedio más alta es alrededor de 32°C, y se presenta en los meses de abril y mayo (Tabla 2) mientras que la temperatura promedio más baja, es de alrededor de los 5°C y se presenta en el mes de enero (Tabla 3).



Servicio Meteorológico Nacional



Temperaturas °C  
Media (Año 2012)

Estado	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Aguascalientes	12.9	14.0	17.7	18.5	21.5	21.6	19.7	20.0	19.0	18.6	15.8		18.1
Baja California	15.6	13.4	14.1	17.6	22.0	23.9	24.5	27.9	26.2	22.3	17.2		20.4
Baja California Sur	17.6	17.2	18.7	21.1	24.0	26.3	28.6	30.0	28.9	25.7	22.4		23.7
Campeche	23.9	25.2	26.9	28.2	29.5	27.7	27.9	27.7	26.7	26.5	23.6		26.7
Chiapas	23.2	23.6	24.4	23.5	26.2	25.3	25.3	25.4	25.1	24.6	22.6		24.5
Chihuahua	11.2	12.3	15.3	25.1	23.3	26.5	24.1	24.8	21.8	19.9	15.5		20.0
Coahuila	14.6	15.5	20.7	24.3	26.5	28.8	28.3	29.5	26.1	23.2	18.5		23.3
Colima	23.7	23.8	24.2	20.4	26.7	26.6	27.8	27.5	27.3	28.0	26.5		25.7
Distrito Federal	13.9	15.1	17.5	17.9	19.0	18.8	17.6	18.1	17.5	17.5	15.1		17.1
Durango	12.1	13.1	16.4	19.9	22.1	23.6	22.2	22.2	20.1	19.0	15.9		18.8
Estado de México	10.8	12.4	14.3	14.8	16.8	16.3	16.2	16.4	16.9	15.1	12.5		14.8
Guanajuato	14.6	24.0	18.3	25.5	22.4	22.0	20.4	20.5	19.9	19.7	16.4		20.3

Tabla 1, Temperatura media año 2012 tomada y modificada del Servicio Meteorológico Nacional



Servicio Meteorológico Nacional



Temperaturas °C  
Máxima Promedio (Año 2012)

Estado	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Aguascalientes	23.0	21.2	28.1	28.9	31.4	30.2	26.5	27.2	26.4	28.1	24.4		26.9
Baja California	21.8	19.8	21.8	24.8	30.6	31.3	31.1	34.4	33.1	30.0	24.3		27.5
Baja California Sur	25.4	23.7	26.4	28.3	31.8	33.0	34.6	35.5	34.1	31.9	28.7		30.3
Campeche	29.5	30.2	33.7	35.0	35.9	32.8	33.2	33.5	32.1	31.8	29.5		32.5
Chiapas	29.8	28.6	31.5	30.3	32.2	30.3	30.8	30.7	30.4	29.7	28.5		30.2
Chihuahua	21.4	20.8	25.7	33.0	32.6	35.2	30.6	32.1	29.2	28.7	24.0		28.5
Coahuila	22.9	21.9	29.3	31.0	34.1	36.2	35.1	36.9	33.0	30.6	25.3		30.6
Colima	30.6	29.2	31.2	30.0	32.8	31.4	32.7	32.6	32.0	33.2	31.8		31.6
Distrito Federal	20.8	20.6	25.3	24.6	26.3	24.7	23.0	23.1	23.3	24.3	21.3		23.4
Durango	22.3	22.1	27.5	30.3	31.9	32.5	29.4	29.9	27.7	28.0	25.1		27.9
Estado de México	18.3	18.8	23.1	22.8	24.7	22.6	21.8	22.2	23.0	22.9	20.0		21.9
Guanajuato	23.8	29.9	28.1	32.6	31.5	29.5	26.6	27.0	26.9	28.5	24.7		28.1

Tabla 2, Temperatura máxima promedio año 2012, tomada y modificada Servicio Meteorológico Nacional



Servicio Meteorológico Nacional



Temperaturas °C  
Mínima Promedio (Año 2012)

Estado	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Aguascalientes	3.2	6.4	7.9	8.1	11.8	13.2	12.8	13.0	11.7	9.2	7.2		9.5
Baja California	9.4	6.5	6.8	10.3	13.6	16.6	17.6	21.5	19.3	14.6	10.1		13.3
Baja California Sur	9.9	10.2	11.5	13.7	16.4	19.6	22.4	24.5	23.7	19.4	15.8		17.0
Campeche	18.8	19.6	20.5	21.3	23.3	22.9	22.3	22.3	21.4	21.2	17.4		21.0
Chiapas	16.9	18.0	17.9	16.5	20.4	20.4	19.7	20.2	19.8	19.5	16.5		18.7
Chihuahua	1.0	3.4	5.4	17.1	14.0	18.0	17.5	17.7	14.5	11.2	6.8		11.5
Coahuila	6.6	8.6	12.5	17.4	19.0	21.6	21.2	22.2	19.3	15.9	11.4		16.0
Colima	17.1	17.8	17.8	10.6	20.7	22.1	22.7	22.5	22.7	22.7	20.9		19.8
Distrito Federal	7.2	9.3	10.0	11.0	11.9	13.1	12.3	13.4	11.8	10.8	8.7		10.9
Durango	2.0	3.7	5.9	9.3	12.4	14.9	14.8	14.6	12.5	10.0	6.5		9.7
Estado de México	3.2	5.7	6.0	6.5	8.8	10.1	10.4	10.8	10.9	7.3	5.1		7.7
Guanajuato	5.6	17.5	9.1	18.2	13.4	14.6	14.2	14.1	13.1	10.8	8.0		12.6

Tabla 3, Temperatura mínima promedio año 2012, tomada y modificada Servicio Meteorológico Nacional

En cuanto a la precipitación durante el año 2012, las lluvias se presentaron en verano principalmente en los meses de junio a septiembre, el mes con menor precipitación fue marzo con 7.7 mm y los meses con mayor precipitación fueron julio y agosto con 133.8 mm y 129.0 mm respectivamente. La precipitación media del estado de Guanajuato es de 615.4 mm anuales (Tabla 4).

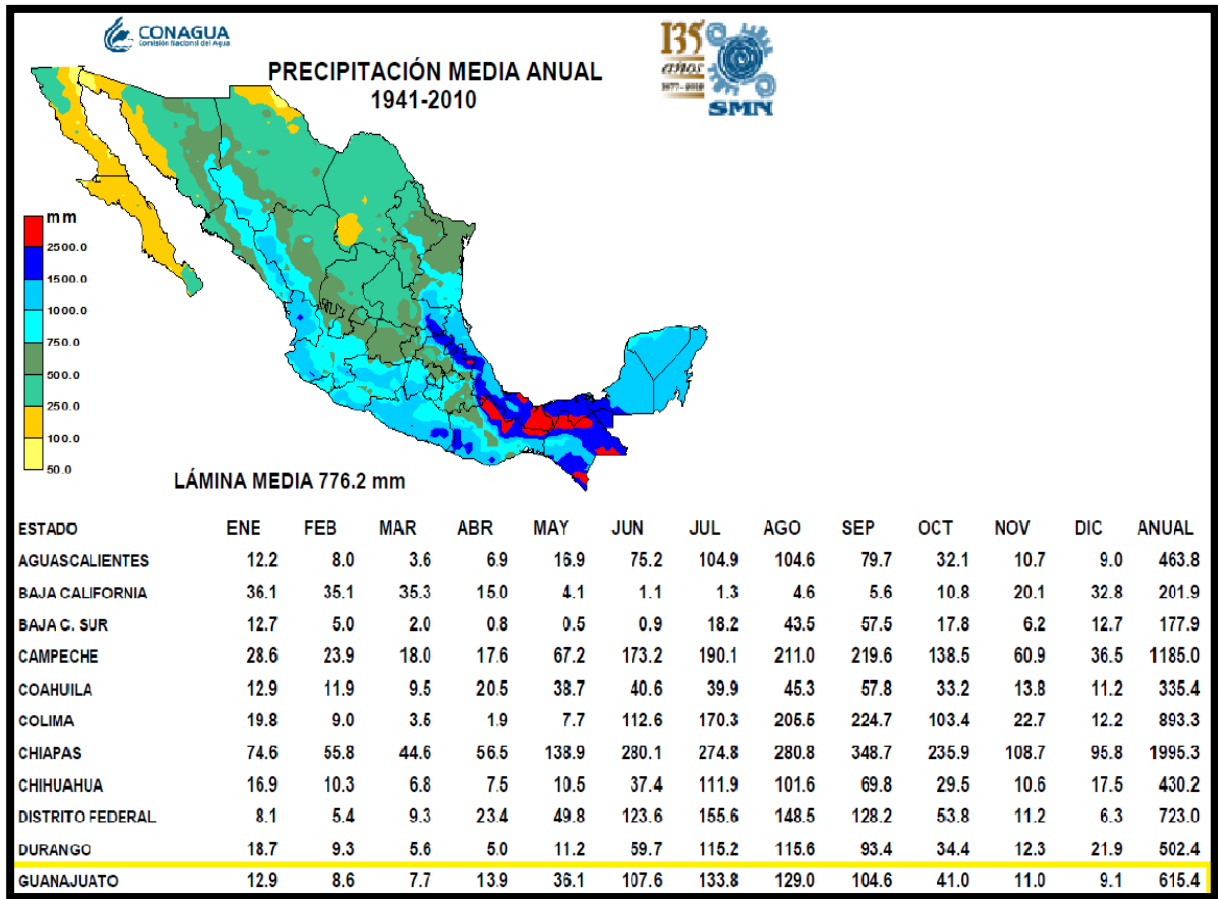


Tabla 4 Precipitación media anual 1941-2010, tomada y modificada Servicio Meteorológico Nacional.

Los datos obtenidos del Servicio Meteorológico Nacional son representativos debido a que los procesos que han influido en el deterioro de las rocas están cambiando a una tasa muy rápida como resultado de las variaciones en el clima (Smith *et al*, 2002).

## **II MAPEO, INTEMPERISMO Y DETERIORO DE LAS ROCAS NATURALES USADAS EN EL TEMPLO**

Las rocas utilizadas en la construcción y restauración del Templo de la Compañía de Jesús son en su mayoría la Toba Loseros, Riolita La Bufa y La Toba Escolásticas que se pueden encontrar no solo en esta edificación sino por escaleras, columnas y otras fachadas dentro de la ciudad de Guanajuato.

En este trabajo nos vamos a enfocar principalmente en la Riolita La Bufa (que es la roca que están remplazando) y en la Toba Escolástica (que es la roca remplazante), y en su distribución en la fachada del Templo de la Compañía de Jesús. (Figura 11 y Figura 12).



Figura 11. Mapeo de la fachada principal del Templo de la Compañía de Jesús

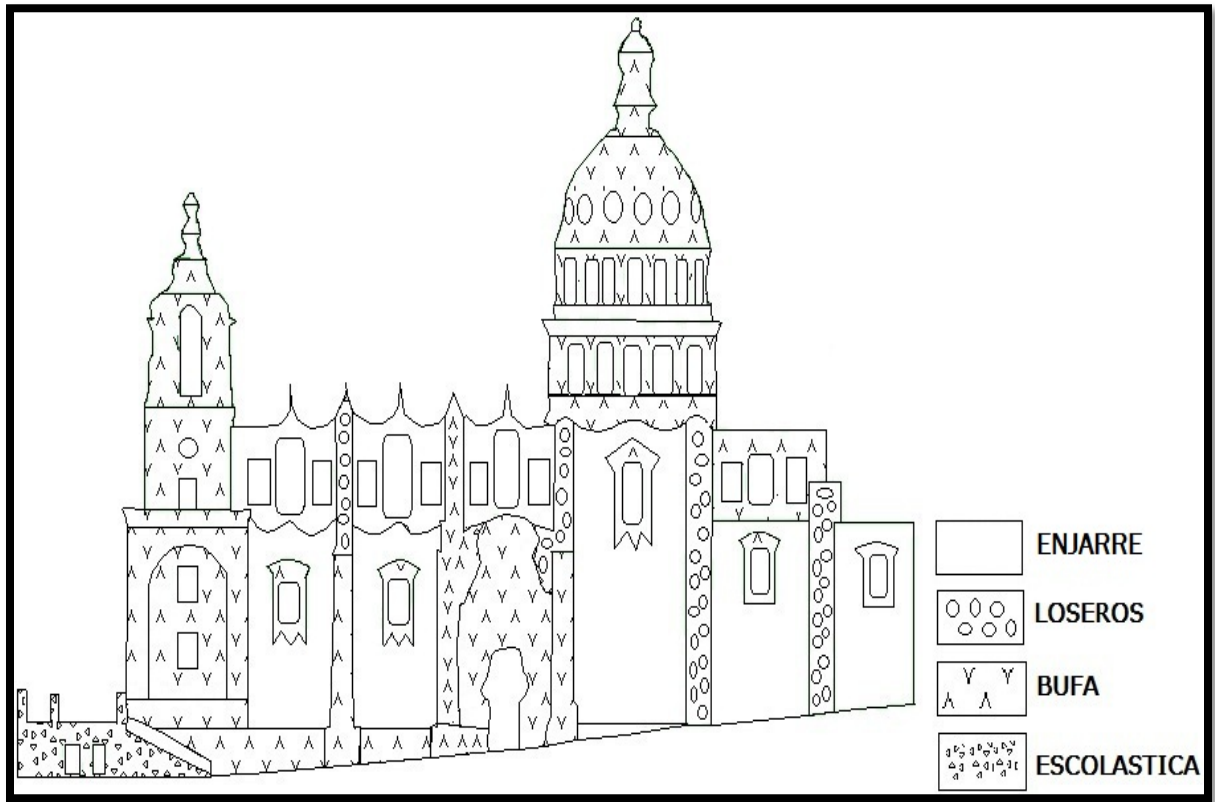


Figura 12. Mapeo fachada lateral del Templo de la Compañía de Jesús.

El intemperismo que están sufriendo estas rocas en la fachada del Templo de la Compañía de Jesús es la descomposición, desgaste, desintegración o destrucción de las rocas debido a la exposición a los agentes de la intemperie (agua, aire, variaciones en la temperatura, acción de organismos entre otras). El intemperismo puede ser mecánico o físico; el intemperismo físico es la desintegración de la roca en pedazos cada vez más pequeños, o bien puede ser de tipo químico que es la descomposición de los componentes originales de la roca a otros diferentes. En las rocas estudiadas se puede encontrar la acción de ambos tipos de intemperismo. Las variaciones de humedad y temperatura inciden en ambas formas de Intemperismo afectando así a la roca desde el punto de vista mecánico, mientras que el agua y el calor favorecen las reacciones químicas que alteran la roca.



El Intemperismo físico consiste en la desintegración de las masas de rocas y de los minerales por procesos mecánicos. Los esfuerzos que conducen a la ruptura pueden provenir del interior de la masa rocosa o ser aplicados externamente. En este caso los procesos más comunes de desintegración que se encuentra en La Toba La Bufo son la insolación que es el fenómeno de expansión y contracción térmica del material por variaciones de temperatura, la exfoliación que es una forma de meteorización que conduce, no a la desintegración granular de la roca, sino a su descamación debido a que se desprenden de la roca láminas o capas curvas (Figura 13).

El Intemperismo químico está compuesto por varios factores entre los que se encuentran, la composición mineralógica original, la profundidad de los materiales, las variaciones de la temperatura y de la humedad. El Intemperismo químico se presenta de diferentes formas; la disolución que es la forma más sencilla de ataque químico y consiste en disociar moléculas de rocas a través de ácidos, la hidratación que es la fragmentación de la roca como consecuencia del aumento producido por el agua de cristalización, la hidrólisis que consiste en la incorporación de iones de  $H^+$  y  $OH^-$  a la red estructural de los minerales, la oxidación en la cual los componentes de las rocas reaccionan con el oxígeno que se encuentra disuelto en el agua y finalmente la reducción que consiste en disminuir o perder oxígeno ( lo contrario a la oxidación).

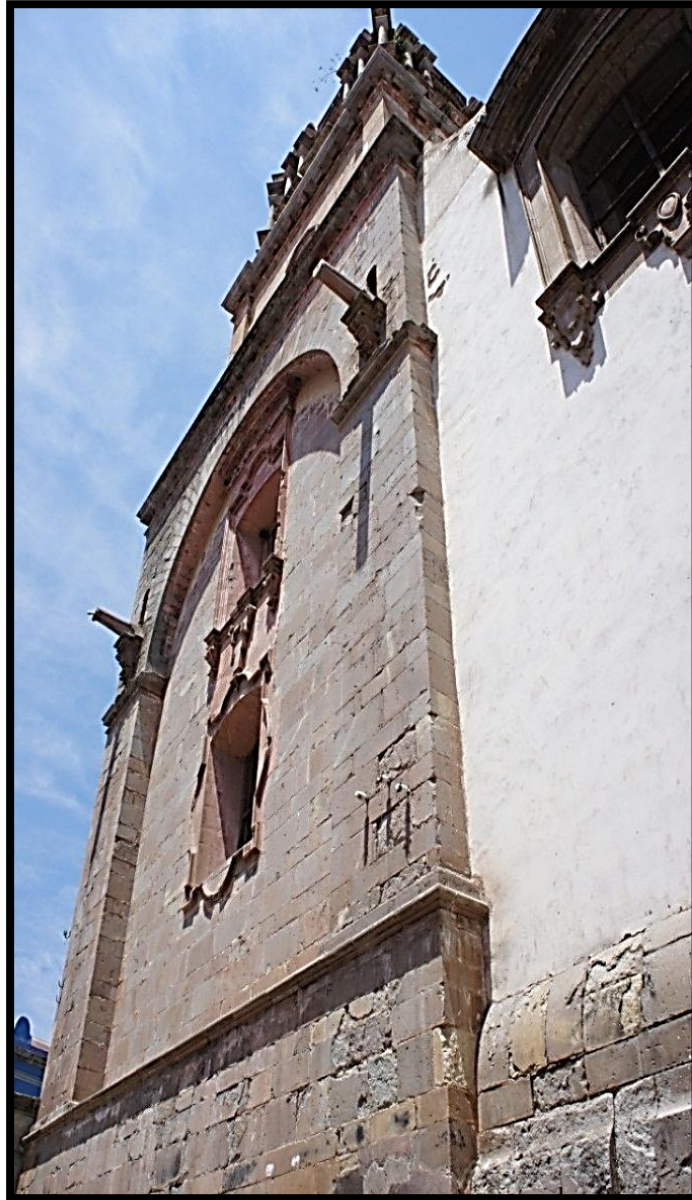


Figura 13. Zonas dañadas por descamación en una parte de la fachada lateral del Templo de la Compañía de Jesús.

Las rocas utilizadas en la construcción del Templo de la Compañía de Jesús muestran diferentes tipos de alteración producidos por los cambios en el clima, entre los cambios más comunes se encuentran el deterioro de la superficie y su desgaste así como la descamación, la desintegración estructural y la oxidación, se

pueden observar estas alteraciones alrededor de un 70% de la fachada del templo (Figura 14).

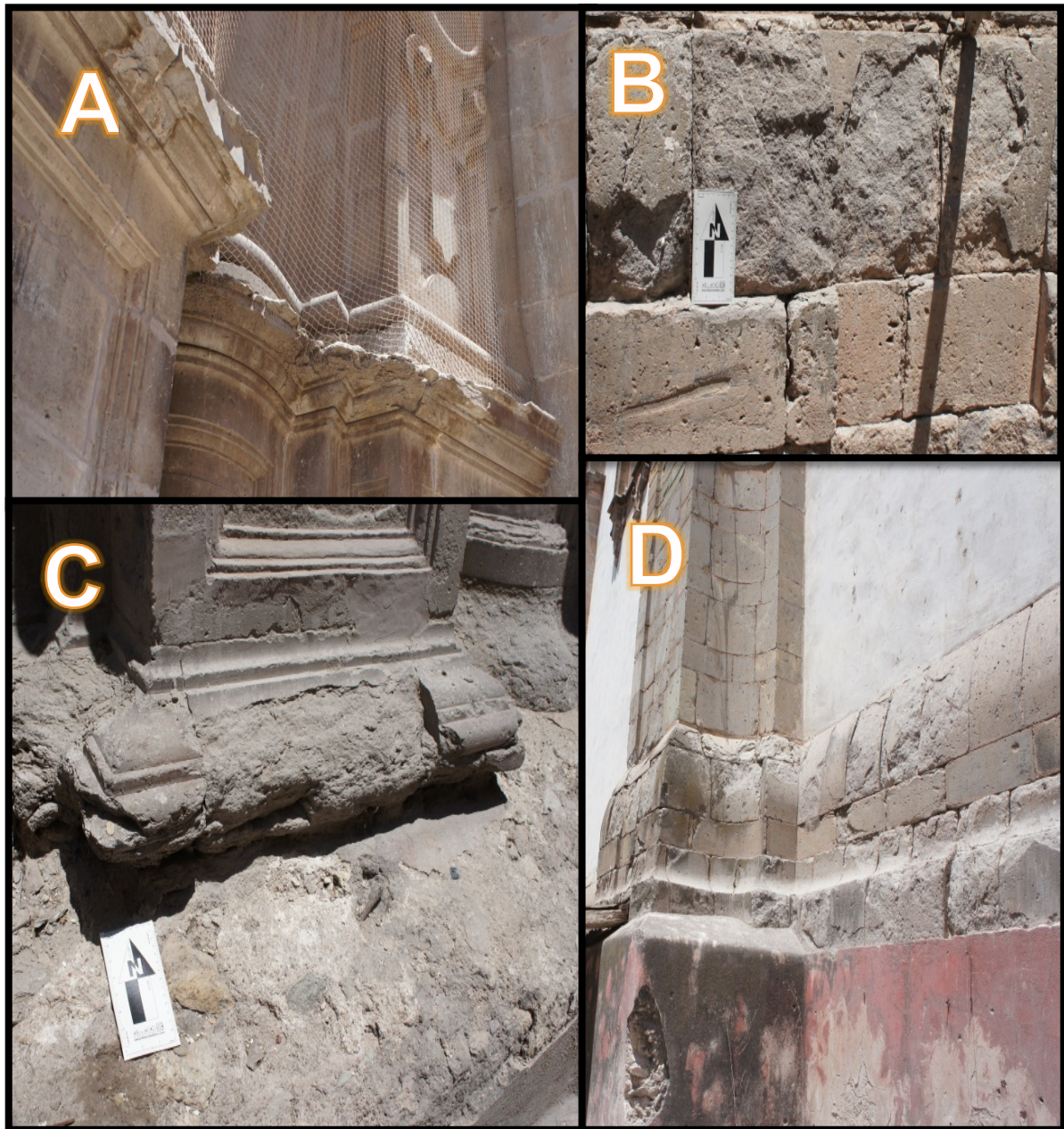


Figura 14. Daños que muestran las rocas utilizadas en la fachada del Templo, las figuras A y D muestran pérdida de material, las B y C muestran descamación.



### III PROPIEDADES PETROGRÁFICAS, PETROFÍSICAS Y GEOQUÍMICAS.

#### III.1 Petrografía

Macroscópicamente la Riolita La Bufa es una roca ígnea extrusiva de color rosado a rojo claro con tonalidades grisáceas, presenta una textura porfirítica con fenocristales que varían de 0.5 a 3 mm de diámetro y corresponden al 30 % del volumen total de la roca en una matriz desvitrificada, es una roca de composición félsica.

La roca está constituida principalmente por cuarzo, plagioclasa, feldespato y algunos componentes líticos (Figura 15).

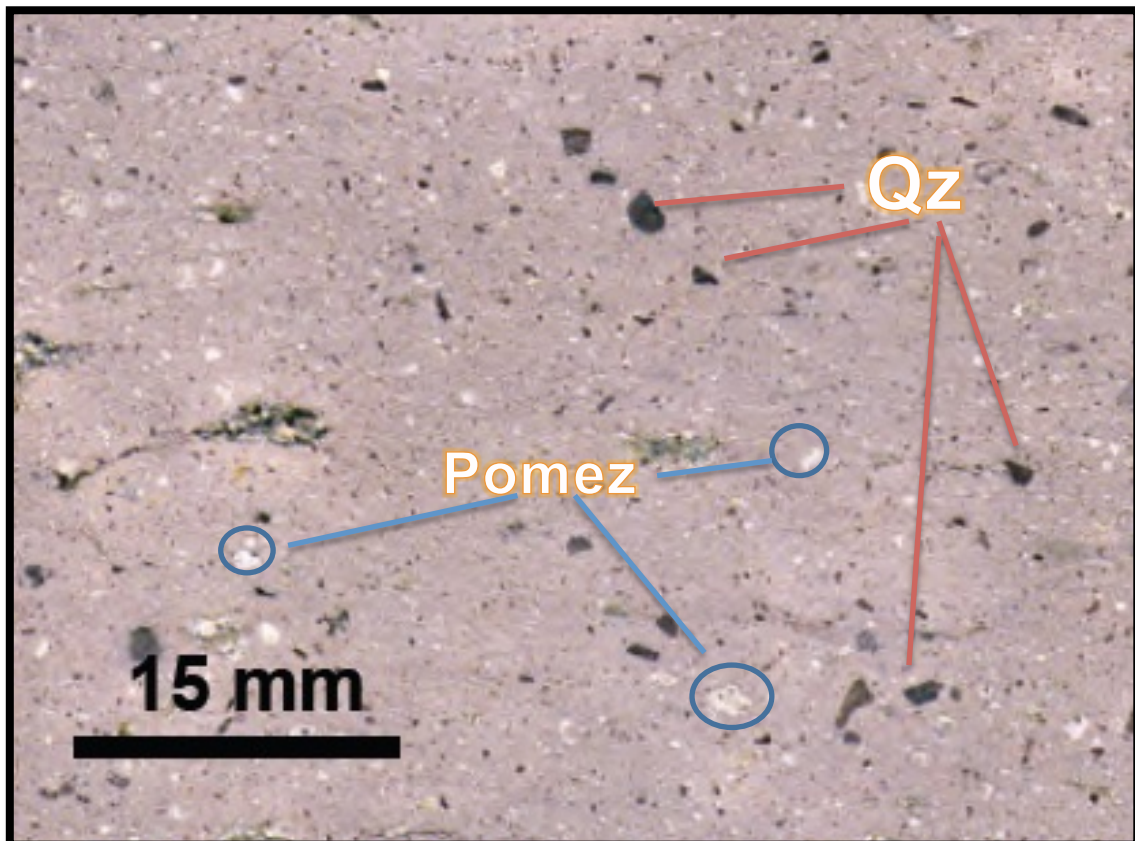


Figura 15. Fotografía de muestra de mano de Riolita La Bufa. Qz= cuarzo.

La roca contiene alrededor del 15% de cuarzo que se presenta en cristales euhedrales con tamaños que van de los 0.5 a 1 mm de diámetro y no presentan ningún tipo de arreglo. La plagioclasa se presenta de subhedral a euhedral en aproximadamente un 20% de la roca con tamaños de 1 mm y menores. Los fenocristales de feldespato se encuentran dispersos en toda la roca y presentan tamaños de alrededor de 1 milímetro. En la roca también se puede observar el contenido de pómez aislada, contiene abundantes componentes líticos de un color rojo oscuro que van de angulares a subangulares con tamaños de 2 a 1.5 mm de diámetro conforman del 20 al 25% del volumen total de la roca.

Para realizar la descripción microscópica de las muestras se realizaron análisis petrográficos en láminas delgadas en microscopio de polarización

Microscópicamente la Riolita La Bufa es una roca formada por fenocristales de cuarzo alrededor del 25%, plagioclasa en un 20%, óxidos en un 10%, componentes líticos en un 10% y una matriz que representa el 35% (Figura 16).

El cuarzo se presenta de forma anhedral, los cristales están soportados en la matriz y se encuentra distribuido en toda la roca. Los cristales de feldespato se encuentran también soportados en la matriz y se presentan de forma anhedral a subhedral, en ellos se puede distinguir la macla de *Carlsbald* con lo que se pueden identificar como sanidino, también se puede identificar otro tipo de macla (macla polisintética) que indica que la albita también es un componente de esta roca y se presenta en cristales subhedrales con tamaños de 0.1 mm distribuidos en toda la superficie de la roca.

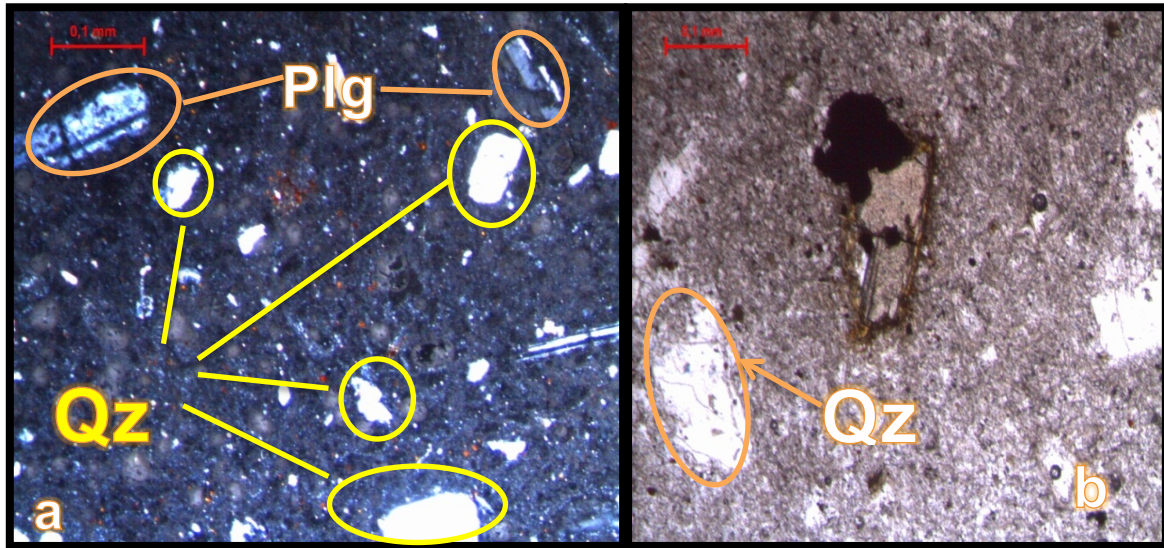


Figura 16. Fotomicrografía de la Riolita La Bufo a) vista en luz polarizada y b) vista en luz natural. Qz = cuarzo. Plg = plagioclasa

Los componentes líticos y óxidos de hierro se encuentran en tamaños menores a los 0.5 mm y distribuidos de forma más o menos regular en la muestra.

La roca presenta una matriz de grano fino compuesta principalmente de hematita que es la causa principal para que la roca tenga ese color rojizo.

Para complementar el análisis mineralógico de las muestras estas fueron analizadas con el método de difracción de rayos X.

Con los resultados obtenidos en el análisis de difracción de rayos X (Figura 17), se puede observar que la Riolita La Bufo se encuentra compuesta en su mayoría de cuarzo, albita, hematita (descritas en las láminas delgadas) y que además presenta muscovita como uno de sus componentes.

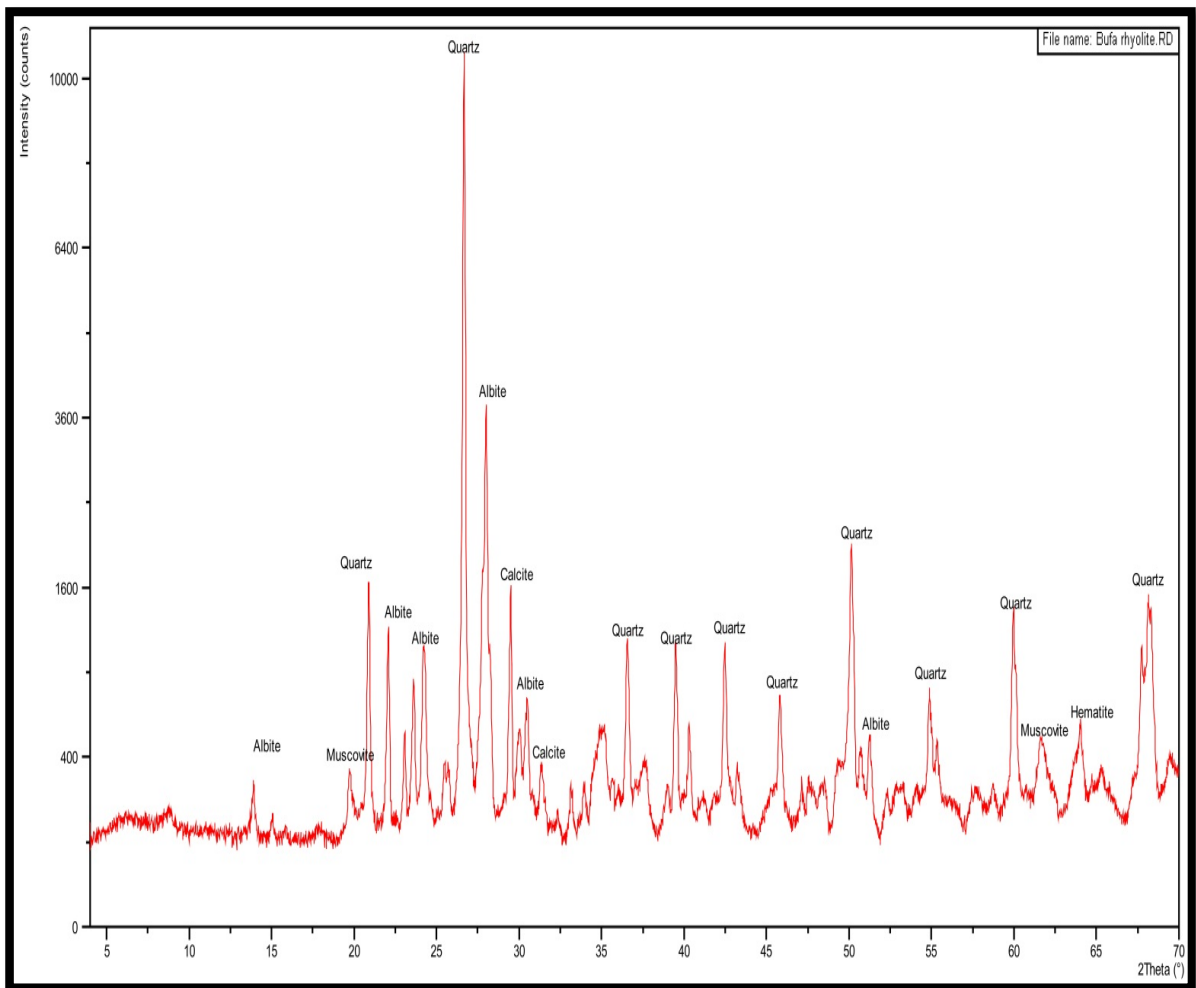


Figura 17. Resultados de la difracción de rayos X para la Riolita La Bufo.

Los análisis realizados con el microscopio de barrido electrónico indican que hay presentes en la roca esmectita que provienen de la alteración de vidrio volcánico y que es una arcilla expandible al ser hidratada, su matriz es rica en illita que es arcilla no expansiva micácea producto de alteración o meteorización de muscovita y feldespato en ambiente de meteorización hídrica y térmica. También se encontró que la roca contiene cristales de biotita y óxidos de hierro del grupo de la hematita (Figura 18).

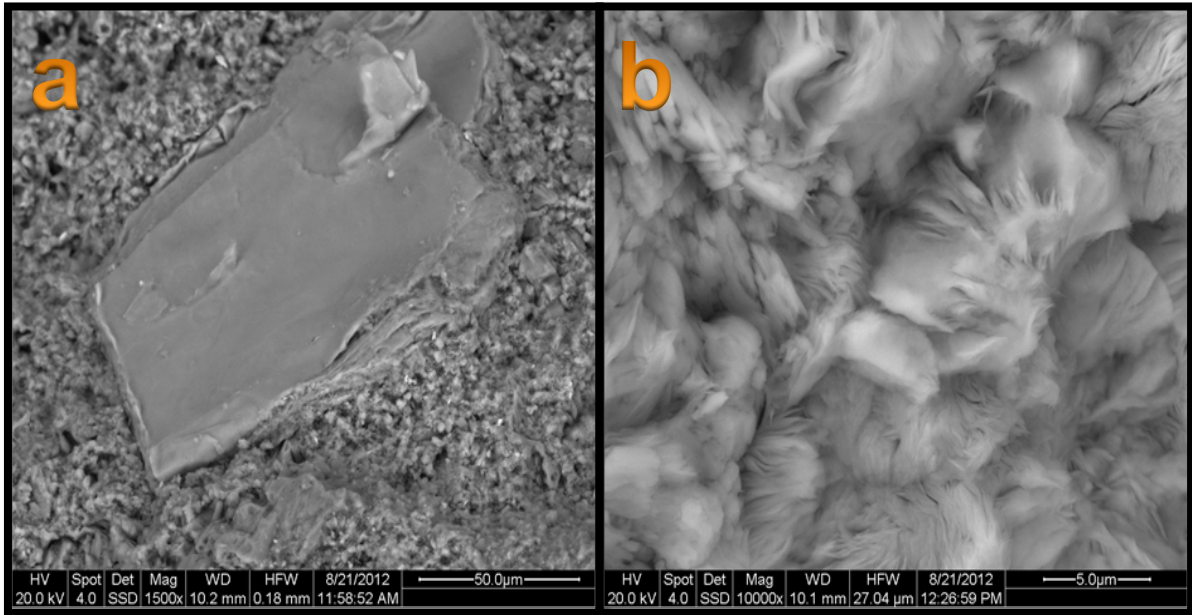


Figura 18. Riolita La Bufa en el microscopio electrónico barrido, a) cristal de flogopita en biotita, b) matriz rica en illita.

La toba Escolástica macroscópicamente es una roca ígnea de color café claro a rosa grisáceo, de composición intermedia, presenta una textura piroclástica, presenta una cantidad muy pequeña de fenocristales alrededor del 5% del volumen total de la roca y varían de tamaño de 1 mm a menores.

La roca está constituida principalmente por plagioclasa, feldespatos y cristobalita. (Figura 19).



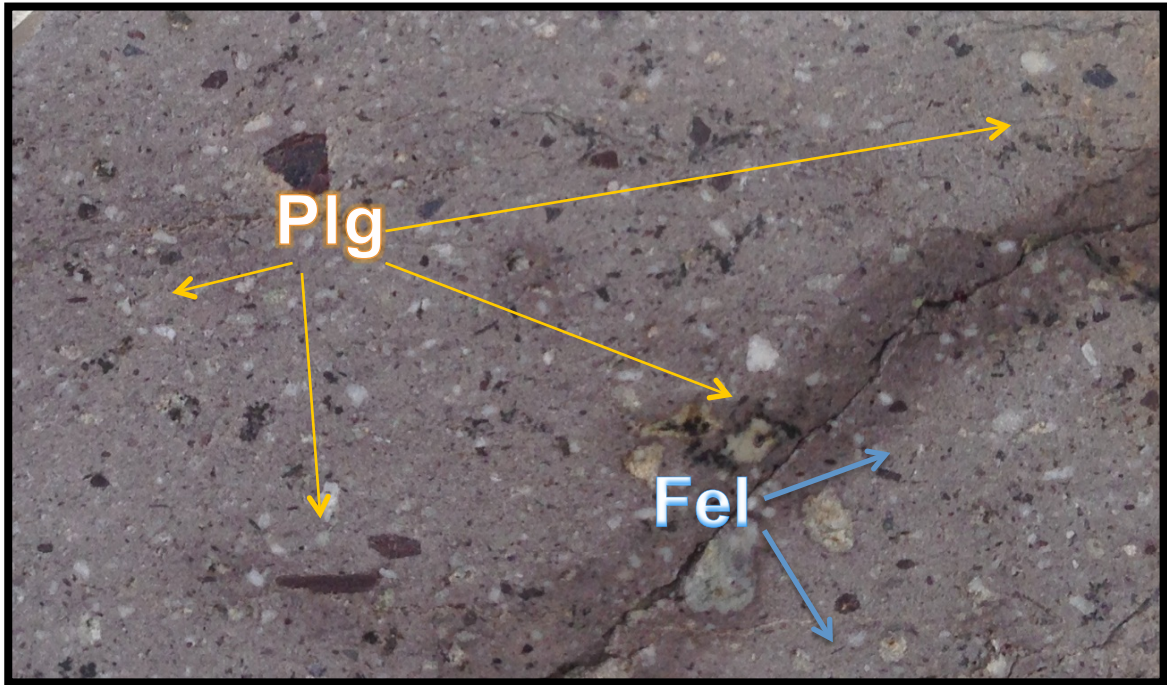


Figura 19. Fotografía muestra de mano de la Toba Escolástica medida en mm. Plg = plagioclasas, Fel = feldespatos

La plagioclasa se presenta en cristales que van de angulares a subangulares con tamaños menores a un milímetro, se presenta distribuida de forma regular por toda la roca y representa alrededor del 10% de esta.

El feldespato representa alrededor del 5-10% del volumen total de la roca, con tamaños que varían de 0.5 a 0.2 milímetros, sus cristales son hipidiomorfos y está distribuido de forma regular en la muestra.

También se puede observar cristobalita y sus cristales van de angulares a subangulares con tamaños menores a 5 mm de diámetro.

En muestra de mano se puede observar una coloración rojiza en la parte externa de la roca que es producto de la meteorización y oxidación a través del tiempo.

En lámina delgada se observa que la roca está formada por plagioclasa en mayor cantidad seguida por feldespatos potásicos y cristobalita (Figura 20).

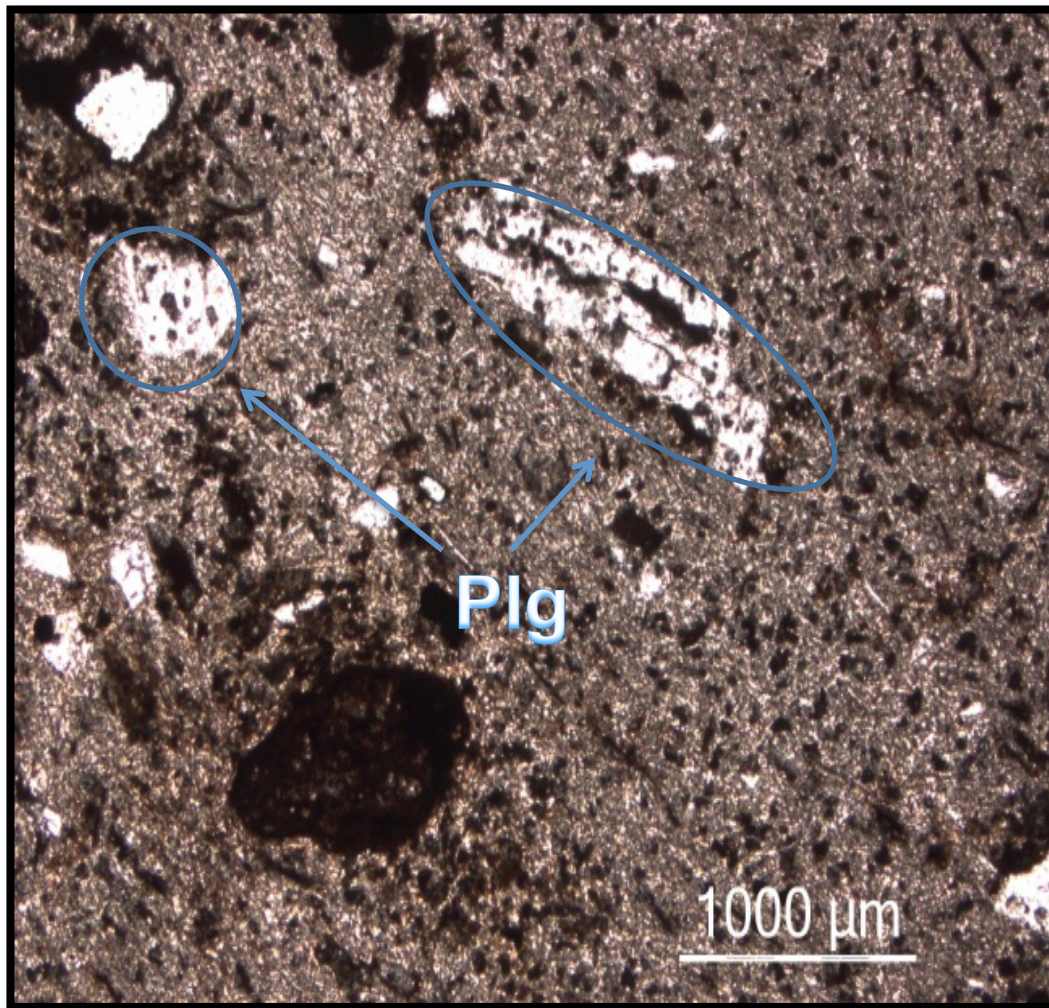


Figura 20. Fotomicrografía de la Toba Escalástica vista en luz natural. Plg = plagioclasa

Las plagioclasas se presentan en cristales anhedrales soportados en la matriz de la roca, están distribuidos de forma regular en la muestra y se puede ver la macla polisintética por lo que se especifica que se trata de cristales de albita.

Los feldespatos alcalinos se encuentran en cristales que van de anhedrales a subhedrales y se puede apreciar en ellos maclas polisintéticas que indican que se trata de cristales de anortoclasa.

La cristobalita que es resultado del polimorfismo del cuarzo se presenta en cristales anhedrales soportados en la matriz y de forma irregular sobre la muestra.

Con los análisis de difracción de Rayos X se observa que la Toba Escolástica está compuesta principalmente de albita, cristobalita, anortoclasa, como se describió en las láminas delgadas y que además está compuesta también por tridimita que es la forma estable del  $\text{SiO}_2$  y que a mayores temperaturas se transforma en cristobalita, debido a su contenido mineralógico podemos inferir que esta toba fue expuesta a altas temperaturas y por lo tanto tiene soldamiento más fuerte, es más compacta y resistente que es contrario a la Riolita La Bufa que al no estar expuesta a tanta temperatura no es tan fuerte y no tiene tanto soldamiento.(Figura 21).

En el microscopio electrónico de barrido se indica que también se encuentra presente en la roca la esmectita que proviene de la alteración de vidrio volcánico y que es una arcilla expandible al ser hidratada.

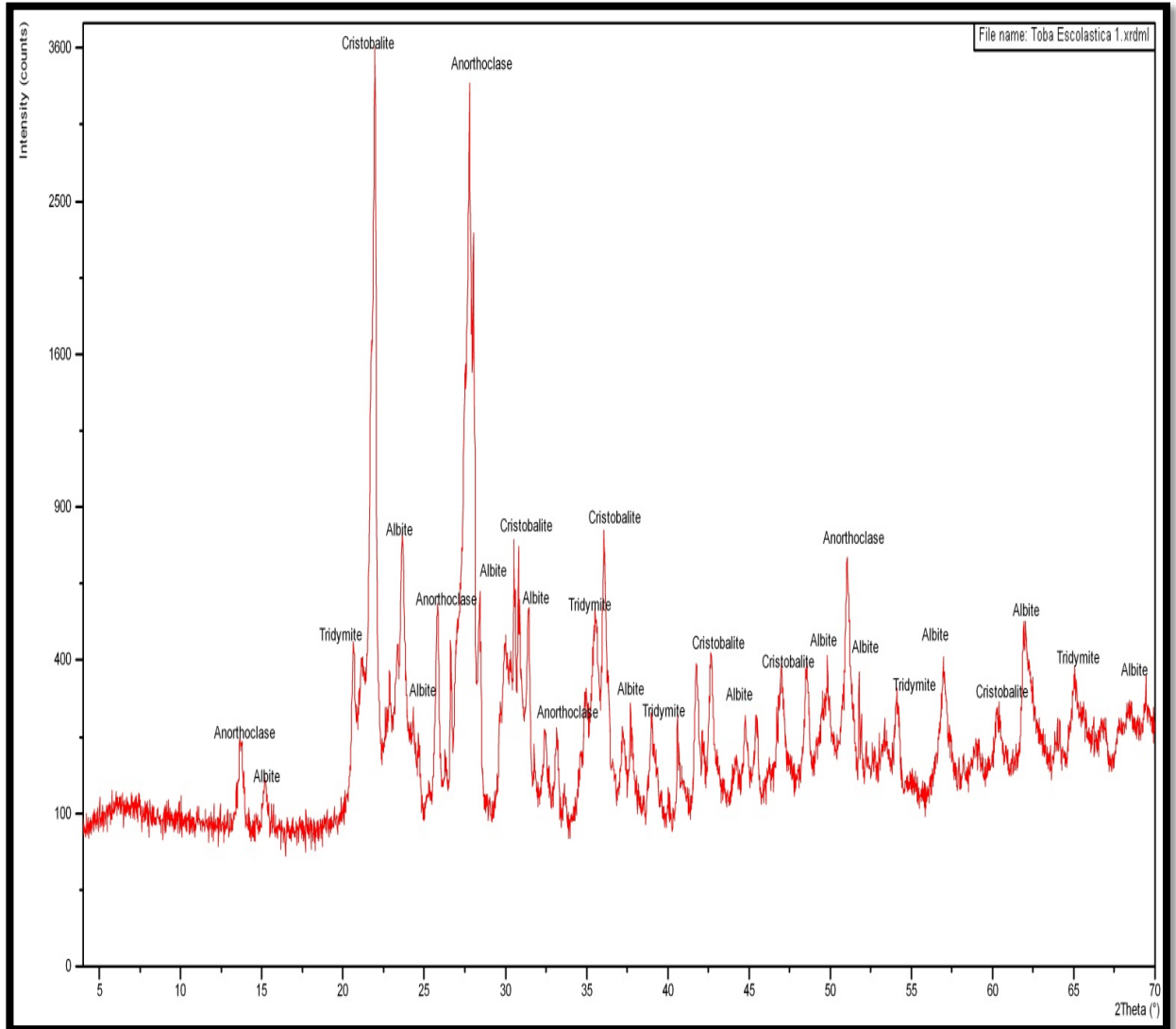


Figura 21 Resultados de la difracción de rayos X de la toba Escolástica.

## III.2 Propiedades petrofísicas

### III.2.1 Porosidad

Debido al proceso de formación de las rocas y a la distribución de esfuerzos locales en las mismas, los granos no están en contacto continuo unos con otros, dejando espacios vacíos dentro de ellas. El conjunto de espacios vacíos en las rocas recibe el nombre de poros.

Si los poros y fisuras de un material granular se deformaran hasta que desaparecieran, al ser este sometido a una gran presión hidrostática, se obtendría un sólido ideal denominado matriz rocosa. Por lo tanto, el volumen total de la roca está compuesto por la suma entre el volumen de poros y el volumen de la matriz, tal como se muestra en la siguiente expresión:

$$V_{total} = V_{matriz} + V_{poros}$$

La porosidad de un material es una medida de la capacidad de almacenamiento de fluidos que posee el mismo y está definida como la relación entre el volumen total ocupado por los poros y el volumen total del sólido, (Mendoza, 1998) lo que se ilustra por medio de la relación:

$$\phi = \frac{V_{poros}}{V_{total}}$$

La porosidad puede ser clasificada en base a dos aspectos generales:

- El origen de la roca
- La comunicación entre los poros

De acuerdo al origen de la roca, la porosidad puede ser dividida en primaria, la cual se origina durante el proceso de depositación de los materiales que dan origen a la roca, y secundaria, que es el resultado de procesos, tanto naturales como artificiales, posteriores a la formación de la roca.

En general, las rocas con porosidad primaria presentan características más uniformes que aquellas con porosidad secundaria debido a que después de producirse la deposición de sedimentos, la roca puede ser sometida a procesos físicos, químicos y biológicos que generan modificaciones del volumen poroso del sistema y/o a procesos geológicos de deformación que generan fisuras o desplazamiento de los granos que conforman la matriz rocosa.

Algunos de los procesos que dan origen a la porosidad secundaria son: la compactación mecánica, la precipitación de minerales, la disolución, el fracturamiento y la recristalización entre otras (Da Silva-Rodríguez, 2011).

En base al tipo de comunicación entre los poros de la roca la porosidad puede denominarse:

1. Total o absoluta, que se refiere a la fracción del volumen rocoso que no está ocupado por la matriz.

2. Interconectada o efectiva, la cual se define como el volumen total de espacios que pueden contener fluidos y se encuentran comunicados entre sí.

3. No interconectada o no efectiva, que representa la fracción del volumen total de la roca que está conformada por los poros que se encuentran aislados.

La porosidad de un material pétreo es un parámetro de conjunto que se define como la relación entre el volumen total de poros y el volumen total de la roca. La porosidad de la roca se puede clasificar dependiendo del grado de interconexión con el exterior. Se define porosidad efectiva de la roca como el volumen de poros que presentan un cierto grado de interconexión con el exterior de forma que un fluido puede ser transportado a su través, por el contrario la porosidad cerrada es aquel volumen de poros de una roca que no presenta ningún tipo de comunicación con el exterior (Dullien, 1992).

***Distribución radio de poro %***

<b><i>Muestra</i></b>	<b><i>0.001--0.01 <math>\mu m</math></i></b>	<b><i>0.01--0.1 <math>\mu m</math></i></b>	<b><i>0.1—1 <math>\mu m</math></i></b>	<b><i>1—10 <math>\mu m</math></i></b>	<b><i>10—100 <math>\mu m</math></i></b>
<b><i>La Bufa</i></b>	<b><i>3.87</i></b>	<b><i>78.29</i></b>	<b><i>17.36</i></b>	<b><i>0.2</i></b>	<b><i>0.28</i></b>
<b><i>Escolástica</i></b>	<b><i>2.71</i></b>	<b><i>3.38</i></b>	<b><i>4.38</i></b>	<b><i>86.91</i></b>	<b><i>2.62</i></b>

Tabla 5. Datos de distribución radio de poro de Riolita La Bufa y toba Escolástica.



De acuerdo a los anteriores datos (Tabla 5) podemos observar que en la muestra de La Bufa la porosidad se encuentra distribuida entre microporos (0.001  $\mu\text{m}$  a 0.01  $\mu\text{m}$ ) hasta poros capilares (0.1  $\mu\text{m}$  a 1 $\mu\text{m}$ ), más del 70% de los poros son microporos (< 0.1  $\mu\text{m}$ ). Mientras que en la muestra de la Toba Escolástica se puede observar que la porosidad se encuentra distribuida desde microporos (0.001  $\mu\text{m}$  a 0.01  $\mu\text{m}$ ) hasta poros capilares (10  $\mu\text{m}$  a 100  $\mu\text{m}$ ) a diferencia de La Bufa la Toba Escolástica presenta más del 80% de macroporos (> 1  $\mu\text{m}$ ). En este caso la microporosidad juega un papel importante porque una vez que alcanza su tamaño crítico el agua queda atrapada en los poros impidiendo que la roca pueda drenarla ocasionando la disolución de minerales lo que a su vez afecta la durabilidad de la roca.

Los resultados de la porosimetría en la muestra de la Riolita La Bufa (Figura 22) muestran que la porosidad efectiva es únicamente del 19.49% y que de acuerdo a la clasificación de Von Moos y Quervaín (1948), se clasifica como una roca muy porosa pero debido a que la mayoría de los poros son microporos ocasiona que haya baja circulación del agua y vapor en la roca ocasionando que el agua y gases queden retenidos en el interior de la roca originando una mayor velocidad en el proceso de erosión.



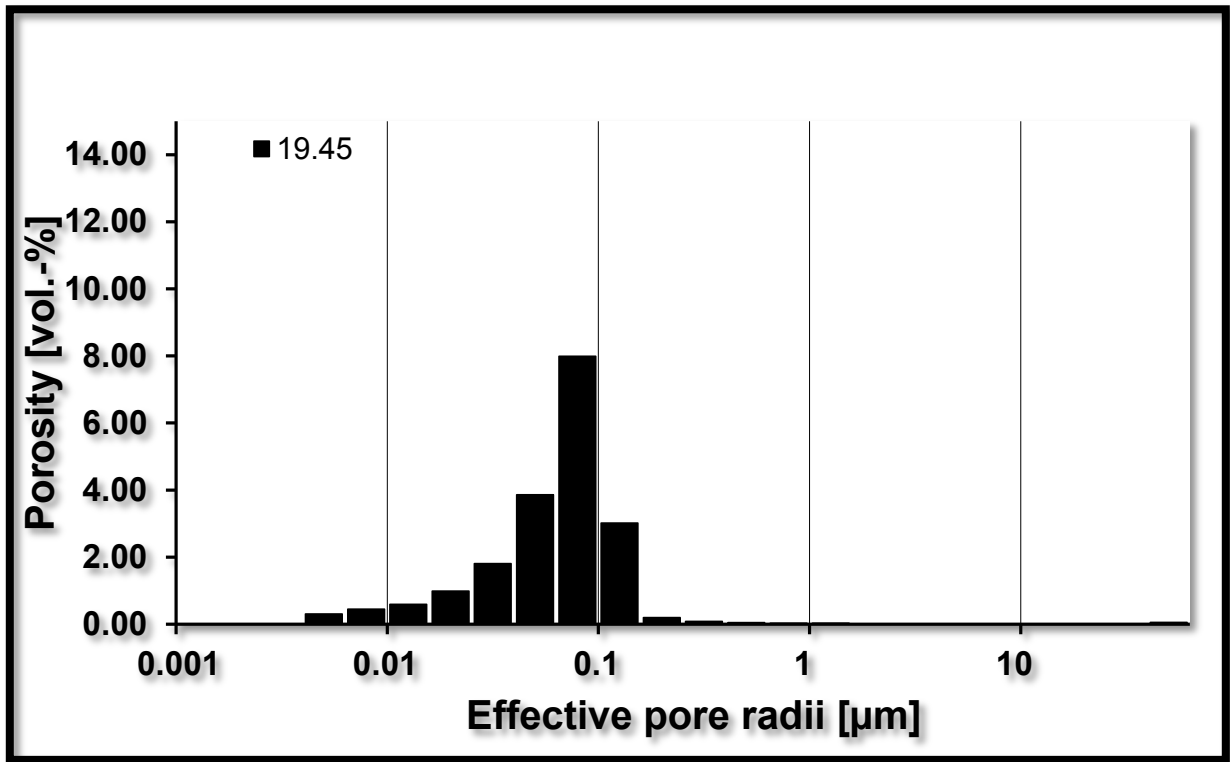


Figura 22. Radio de poro efectivo Riolita La Bufa

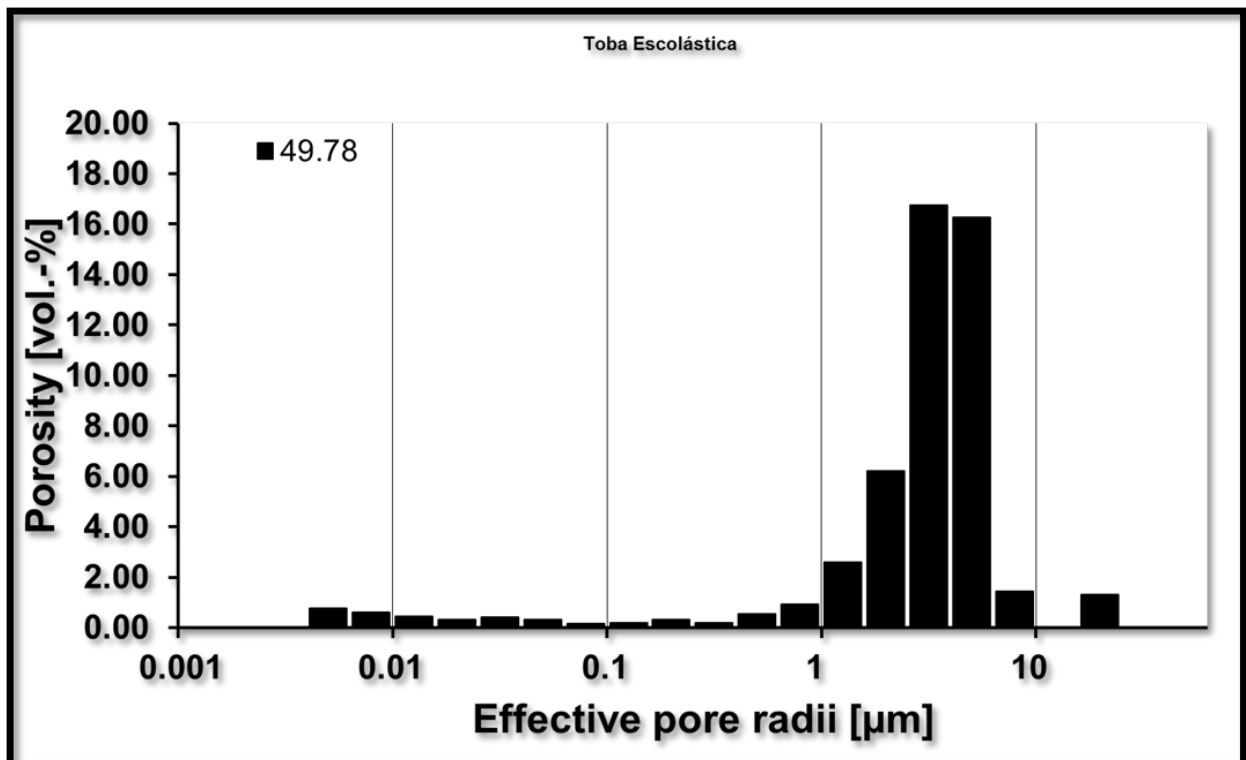


Figura 23 Radio de poro efectivo toba Escolásticas.

Mientras que los resultados de la porosimetría en la muestra de la Toba Escolástica (Figura 23), indica que la porosidad efectiva es del 49.78% y que de acuerdo a la clasificación de Von Moos y Quervaín (1948), se puede clasificar como una roca que tiene muchos espacios de poro y que refleja una alta circulación y transporte de líquidos y gases en la roca.

### III.2.2. Densidad

La densidad es un parámetro físico básico en la caracterización de las rocas que depende fuertemente de su composición mineralógica y porosidad

La densidad de un material puede ser de dos tipos, la primera es la densidad de la matriz y la segunda es la densidad aparente o también conocida como "*bulk density*".

En la densidad aparente se incluyen la matriz y la porosidad, mientras que en la densidad de la matriz únicamente se toman en cuenta los componentes.

Para la obtención de los datos de densidad se pueden utilizar diferentes procedimientos, entre ellos está el método del peso hidrostático que se basa en el principio de Arquímedes que fue el que se utilizó para la obtención de los datos en estas muestras, el cual mide el empuje que hay en una muestra sumergida en el agua. Otro método que puede aplicarse es el desplazamiento de mercurio en donde se introduce la muestra en una probeta con mercurio y su ascenso en el nivel, mide el volumen, pero como el mercurio es un líquido que no moja no va a

penetrar en los poros, por lo tanto el volumen determinado va a ser el volumen total, lo que hace a este método menos preciso y más rápido.

<i>Muestra</i>	<i>Peso en seco (g)</i>	<i>Peso sumergida(g)</i>	<i>Peso mojada (g)</i>
<i>La Bufa</i>	581.64	358.78	631.85
<i>Toba Escolástica</i>	425.28	257.28	569.55

Tabla 6. Pesos de las muestras en diferentes condiciones de la Riolita La Bufa y la toba escolástica.

Para la obtención de los datos (Tabla 6) se tomaron en cuenta los siguientes parámetros:

- El peso de la muestra completamente seca.
- El peso de la muestra saturada por completo.
- El peso de la muestra sumergida por completo en el agua.

Con los datos anteriores se puede determinar los valores de densidad y porosidad de las muestras (Tabla 7).

<i>Muestra</i>	<i>Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)</i>	<i>Densidad de la matriz (g/cm<sup>3</sup>)</i>	<i>Porosidad (%)</i>
<i>La Bufo</i>	2.13	2.61	18.39
<i>Toba Escolástica</i>	1.36	2.53	46.2

Tabla 7. Densidades y porosidad de la Riolita La Bufo y la toba Escolástica

Los valores de densidad obtenidos en La Bufo muestran una roca con densidades muy similares debido a la baja porosidad que esta presenta, es una roca no muy densa que se encuentra relativamente por debajo de los valores promedio que generalmente van de 2.45 g/cm<sup>3</sup> a 2.6 g/cm<sup>3</sup>, mientras que en la Toba Escolástica se tienen datos que se encuentran muy por debajo del promedio para este tipo de rocas y presenta una porosidad muy alta a comparación con la Riolita La Bufo. Por su contenido de minerales y composición se puede decir que la muestra La Bufo es más densa en comparación que la Toba Escolástica, pero debido a su baja porosidad también la hace más susceptible a la disolución de los mismos.

### III.2.3 Propiedades hígricas e hídricas

La deformación o alteración en las dimensiones de las rocas se debe a diferentes procesos que están relacionados principalmente con el cambio de temperatura y el contenido de humedad en la roca porosa, este proceso de deformación originado por los cambios de humedad es conocido como expansión hígrica (humedad relativa) e hídrica (en contacto con el agua).

El agua es uno de los agentes de deterioro más importantes de los materiales pétreos por lo que la caracterización de las propiedades hídricas de las rocas es básica para evaluar su durabilidad y proporcionar un uso adecuado. La presencia de agua en el interior de la roca va a condicionar fuertemente la degradación química (disolución, precipitación, hidrólisis, oxidación, etc.), física (presión, cristalización de sales y de hielo, etc.), y biológica, e incluso disminuye las propiedades mecánicas de la roca (Benavente, 2003).

Es importante resaltar el papel que juega el agua en la durabilidad de las rocas ornamentales durante la acción cíclica de humedad-sequedad. La fatiga que puede sufrir una roca en su vida útil por los procesos de expansión contracción se deben a que las rocas se pueden expandir cuando están saturadas en agua, a que el agua absorbida sobre la superficie de los granos reduce su cohesión por la energía interfacial agua-superficie del mineral y por lo tanto va a disminuir la cohesión de la roca (Gauri y Bandyopadhyay, 1999), cuando la roca está parcialmente saturada se genera una presión capilar debido a la tensión interfacial entre la superficie de los

poros-el agua líquida-el aire (Hall y Hoff, 2002). Además el deterioro que se produce en las rocas por este mecanismo cíclico se puede intensificar por la cristalización del hielo y las sales, y por la presencia de arcillas (Winkler, 1997).

Las expansiones hídrica e hígrica están controladas por la temperatura y la humedad relativa que se encuentra en el aire, por los tipos de poros, su número y tamaño. Estas propiedades en los materiales dependen principalmente del área que se encuentre expuesta, teniendo como reacción una expansión o contracción del material originada por los cambios.

La higroscopicidad de un material depende como ya se mencionó anteriormente del área superficial expuesta, pero también incluye la de los poros y canales capilares por lo que materiales que tengan una porosidad total idéntica, pero con poros más finos (microporos) van a ser más higroscópicos que los que presentan poros más grandes debido a que los primeros tienen mayor superficie específica. Un valor alto de dilatación hígrica en una roca puede ser comparado con mojar de manera directa la superficie con agua líquida (Ruedrich *et al.*, 2005).

La combinación tanto de la expansión hídrica y la expansión hígrica se pueden considerar como factores de importancia alta ya que pueden resultar en un cambio de volumen en la roca e influyen en el comportamiento de erosión y desgaste que tienen las rocas utilizadas en construcciones y edificaciones.

Para la prueba de expansión se utilizaron muestras cilíndricas con un diámetro de 10 mm y una longitud de 100 mm. En las mediciones de expansión hídrica, estas muestras cilíndricas fueron completamente sumergidas en agua destilada en donde fueron tomados mil puntos cada dos segundos, mientras que para el análisis de la expansión hídrica se utilizó una humedad relativa (valor-HR) del 20% que se incrementó de forma gradual hasta alcanzar un HR del 95%. La temperatura se mantuvo de manera constante a 30°C durante el experimento y fueron tomados más de cinco mil datos.

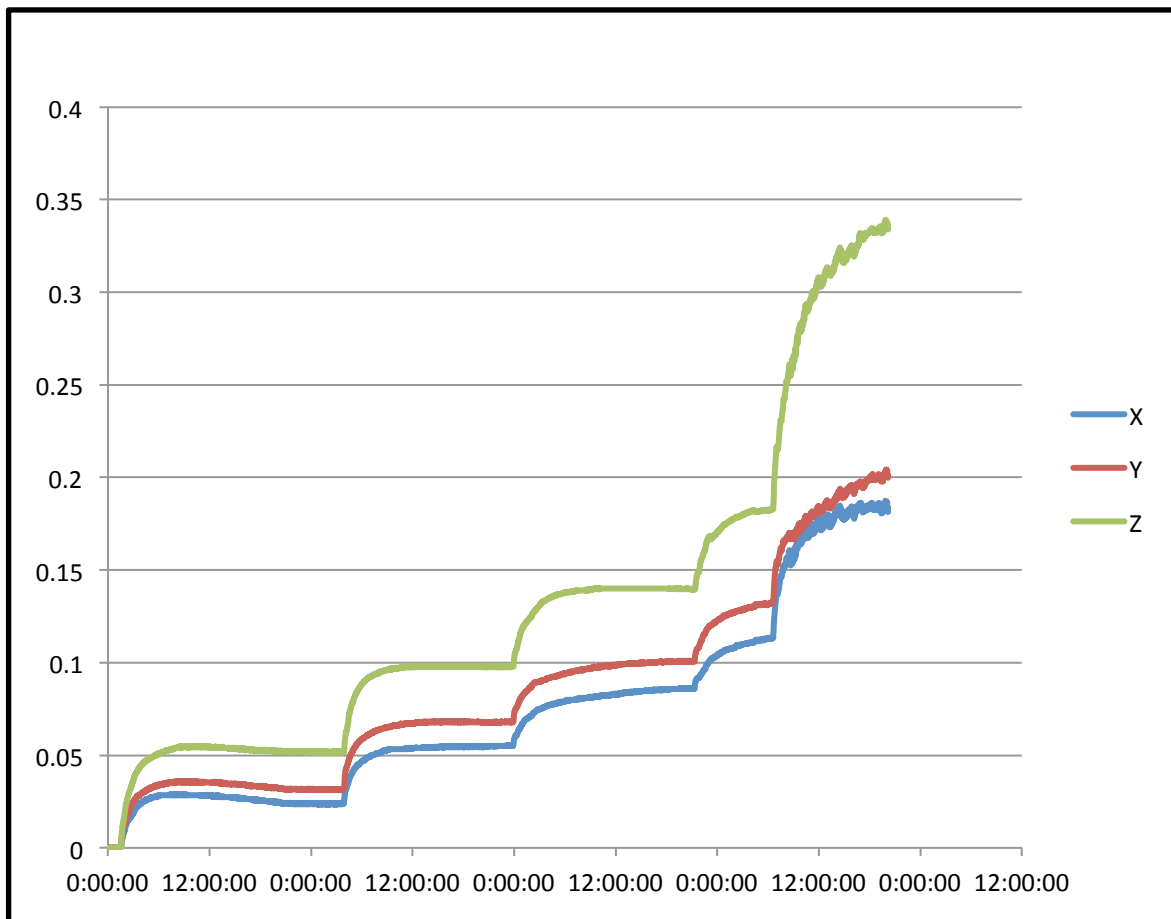


Figura 24. Grafica expansión hídrica de los ejes X, Y y Z de la Riolita La Bufa

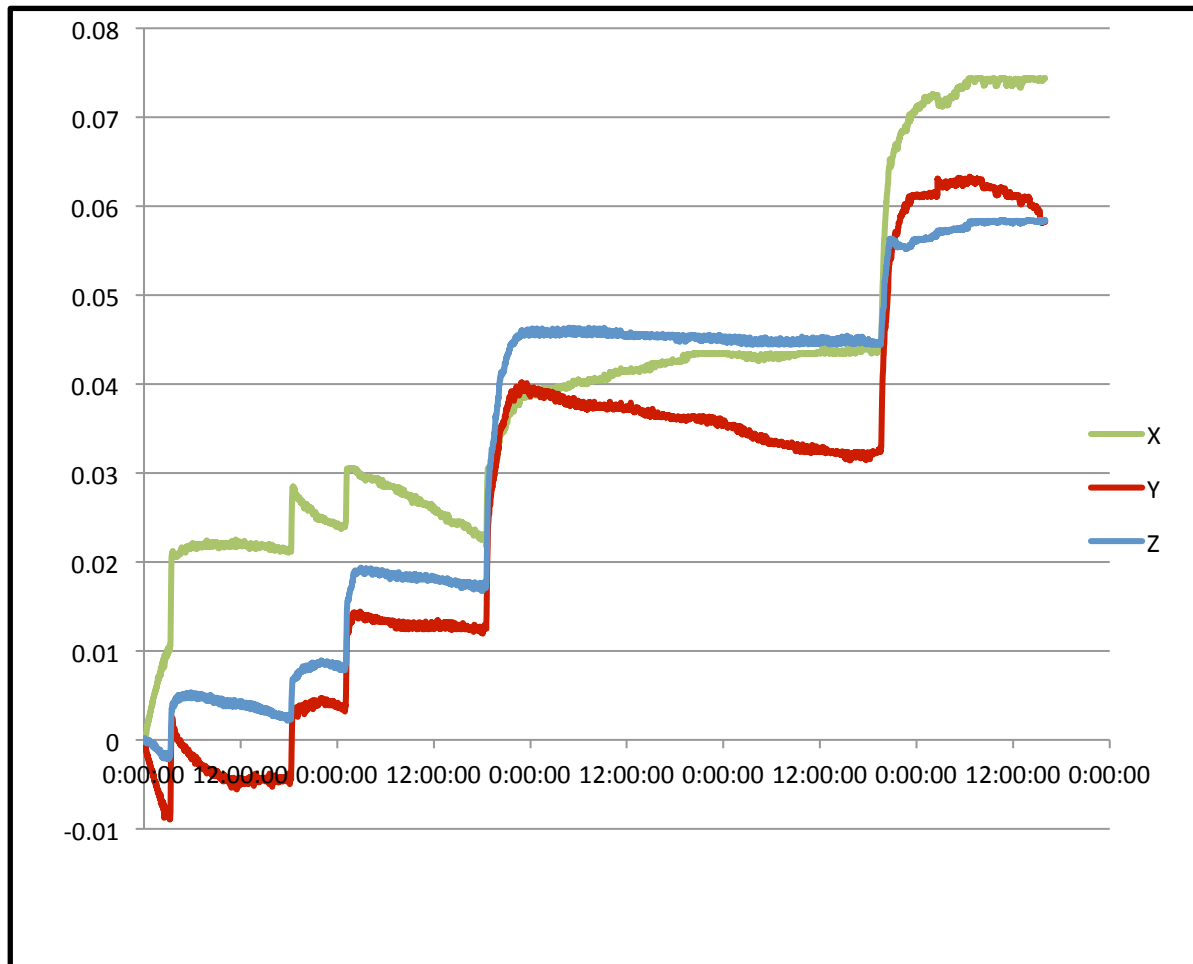


Figura 25: Grafica de expansión higrca de los ejes X, Y y Z de la toba Escolásticas.

Con los gráficos anteriores (Figura 24 y Figura 25) se observa el comportamiento que tuvieron las muestras al ser sometidas a la prueba de expansión higrca. En donde la Riolita La Bufa muestra un aumento de sus dimensiones conforme se aumenta la humedad relativa, en donde el eje que sufre un mayor cambio de dimensiones es el eje Z y la roca no muestra periodos de estabilización, mientras que la Toba Escolástica al principio de la prueba muestra una contracción de sus dimensiones y conforme se va aumentando la humedad relativa la roca va incrementando sus dimensiones, pero contrario al comportamiento de la Riolita La



Bufo no lo hace de forma continua. También se observa que la toba Escolástica presenta periodos de estabilización o contracción y el eje que sufre un mayor cambio es el eje x. Mientras que el eje z de la Riolita La Bufo es el que mayor cambio sufre solo llega a 0.34 mm/m se observa que el eje x de la Toba Escolástica llega a 0.075 mm/m de expansión lo que indica que es una roca que sufre menos cambios que la Riolita La Bufo y que adsorbe una pequeña cantidad de humedad del ambiente.

En los siguientes gráficos (Figura 26 y Figura 27) se presentan los resultados obtenidos en la prueba de expansión hídrica de las muestras de la Riolita La Bufo y de la Toba Escolástica.

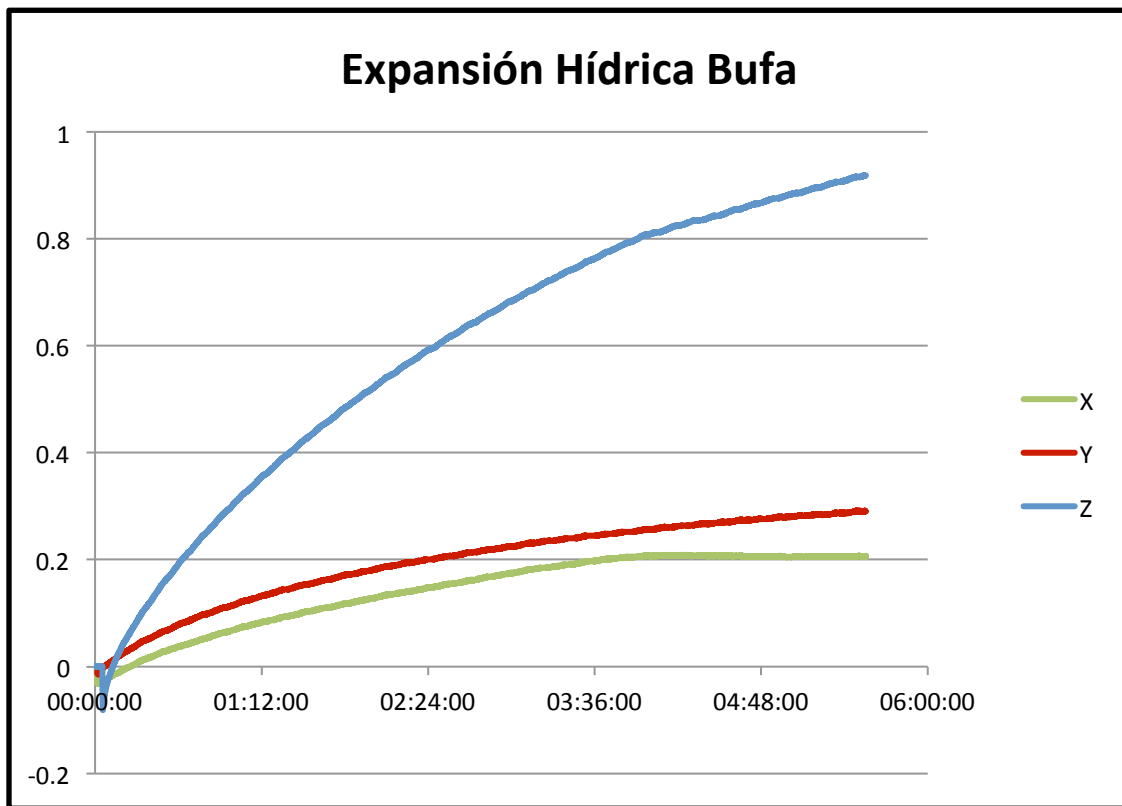


Figura 26. Grafica de expansión hídrica de los ejes X, Y y Z de la Riolita La Bufo.

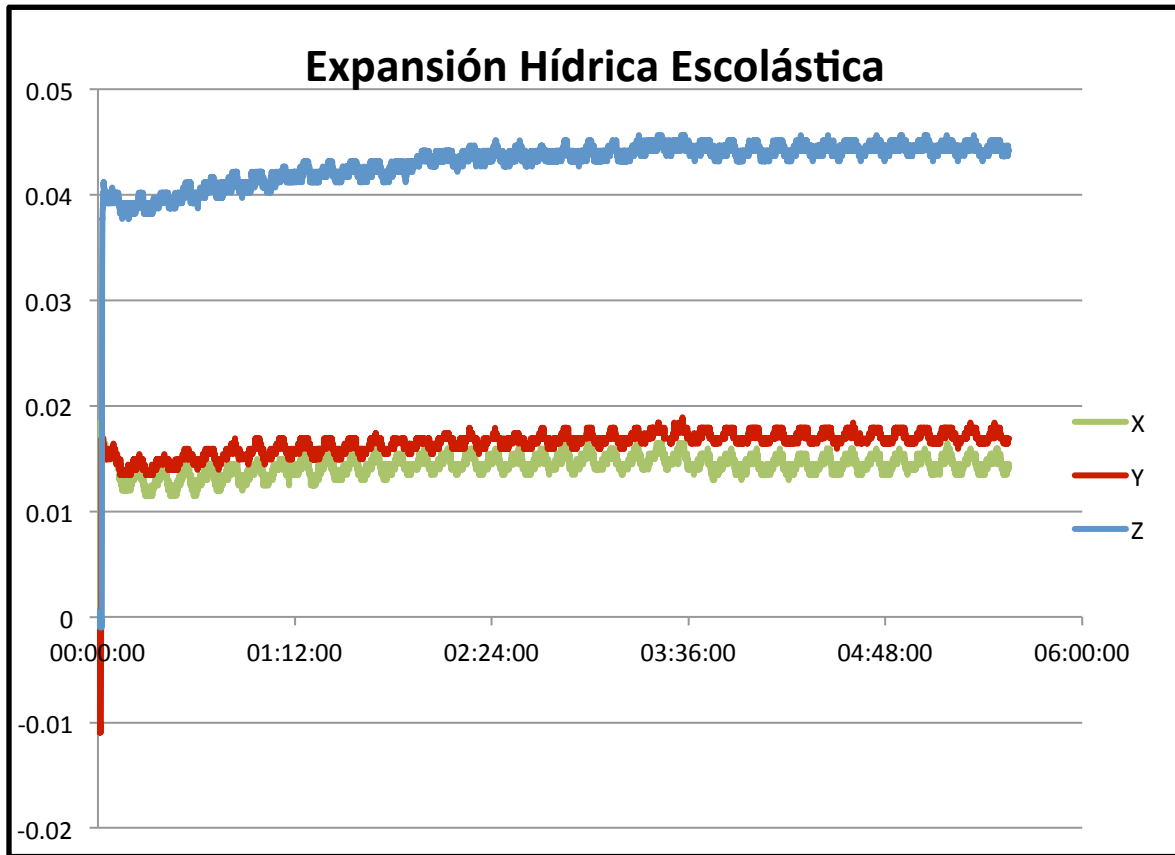


Figura 27. Grafica de expansión hídrica de los ejes X, Y y Z de la toba Escolástica.

Con las gráficas anteriores se da cuenta del comportamiento que tuvieron las muestras al ser sometidas a la prueba de expansión hídrica. En donde la Riolita La Bufa muestra un aumento de todos sus ejes y en sus dimensiones conforme incrementa el tiempo, el eje que sufre un mayor cambio de dimensiones es el eje Z llegando a un valor máximo de 0.9 mm/m de expansión muy por arriba de sus otros dos ejes que en promedio tienen una valor máximo de 0.3 mm/m, y la roca no muestra periodos de estabilización. Mientras que la toba Escolástica al principio de la prueba alcanza casi su valor máximo y conforme va aumentando el tiempo la roca va incrementando sus dimensiones pero también muestra periodos de

estabilización o contracción que es lo contrario al comportamiento de la Riolita La Bufa. También se observa que en la toba Escolástica el eje que sufre un mayor cambio es el eje z llegando a valores de expansión de 0.045 mm/m. Con lo anterior se puede establecer que la Toba Escolástica al ser la roca que presenta menor cambio en sus dimensiones podría considerarse una roca más estable y que sufre menos cambios que la Riolita La Bufa.

#### III.2.4 Compresión y resistencia

Estas propiedades nos permiten ver la capacidad que tiene la roca de resistir acciones externas o internas que implican la aplicación de fuerzas sobre las mismas. El comportamiento de las rocas frente a las tensiones o esfuerzos pueden producir deformaciones y roturas en las rocas dependiendo de las propiedades petrológicas de las mismas (grado de cementación, tipo de porosidad.) y de las condiciones externas en la que la roca sufre dichas tensiones (presiones, temperatura, presencia de agua.). Además la resistencia es un parámetro importante que condiciona la durabilidad de las rocas debido a la resistencia que opone a la acción de los agentes de deterioro (Benavente, 2003).

La resistencia a la compresión es el peso por unidad de área a la que el material falla, como las rocas estudiadas en este trabajo se encuentran en edificios y estos a su vez suelen estar sometidos a condiciones no confinadas, la resistencia a la compresión uniaxial (carga máxima) se midió en una prensa hidráulica que registra el esfuerzo compresor y la deformación lineal.

La porosidad efectiva tanto como la porosidad no efectiva o cerrada van a condicionar fuertemente las propiedades mecánicas del material pétreo, cualquier porosidad va a tener un efecto negativo en la resistencia del material por una razón básica, y es que los poros reducen el área de la sección mecánicamente útil a través de la cual se va a aplicar la carga.

Los resultados de la compresión uniaxial que se realizó en la Riolita La Bufa oscilan entre los 59.5 a 72 N/mm<sup>2</sup> con una anisotropía del 17% y con un modelo de elasticidad con valores de 6.55 a 9.76 kN/mm<sup>2</sup>.

La resistencia a la tensión es el esfuerzo tensional por unidad de área a la que el material falla o se rompe por fracturación extensional, la prueba que se realizó para la obtención de estos datos fue la prueba brasileña, en donde la roca se somete a una carga compresional con una configuración uniaxial que va a resultar en un campo homogéneo de esfuerzos tensionales.

La fuerza de tensión puede ser calculada con la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{2P}{\pi * l * d}$$

En donde  $\sigma$  es la resistencia a la tensión (kg/cm<sup>2</sup>), P es la carga máxima aplicada (Kg), l es la longitud del cilindro (cm) y d es el diámetro del cilindro (cm).

Las fuerzas de tensión que se obtuvieron se enlistan en la siguiente tabla (Tabla 8).

<i>Tipo de muestra</i>	<i>Dirección/Anisotropía</i>	<i>Riolita La Bufa</i>
	X	44.01
<i>Fuerza de tensión repartida, en seco (Mpa)</i>	Z	52.09
	<i>Anisotropía (%)</i>	15.5
	X	28.1
<i>Fuerza de tensión repartida, en muestra saturada en agua (MPa)</i>	Z	35.3
	<i>Anisotropía</i>	20.4
<i>Reducción de la fuerza de tensión repartida [%], Ø</i>		34

<i>Tipo de muestra</i>	<i>Dirección/Anisotropía</i>	<i>toba Escolástica</i>
	X	20.67
<i>Fuerza de tensión repartida, en seco (Mpa)</i>	Z	18.92
	<i>Anisotropía (%)</i>	6.3
<i>Fuerza de tensión repartida, en</i>	X	17.09

<i>muestra saturada en agua</i>	Z	17.92
<i>(MPa)</i>		
	<i>Anisotropía</i>	4.6
<i>Reducción de la fuerza de</i>		
<i>tensión repartida [%], Ø</i>		11.3

Tabla 8. Resultados fuerza de tensión Riolita La Bufa y toba Escolástica, realizados en máquina de fuerza de tensión directa.

La fuerza de tensión para la Riolita La Bufa en seco oscila entre los 44.01 a 52.09 MPa con un porcentaje de anisotropía del 15.5%, mientras que los valores para la muestra saturada en agua oscilan entre los 28.1 a 35.3 MPa con un porcentaje de anisotropía del 20.4 %, la anisotropía que presenta en esta prueba es muy similar a la que presentó en la compresión y ambos casos es un poco elevada lo que indica que la roca no es muy estable y resistente a la fuerza de tensión. La reducción de la fuerza de tensión repartida tiene un porcentaje del 34%. Mientras que la fuerza de tensión para la toba Escolástica en seco oscila entre los 20.67 a 18.92 MPa con un porcentaje de anisotropía del 6.3 %, mientras que los valores para la muestra saturada en agua oscilan entre los 17.09 a 17.92 MPa con un porcentaje de anisotropía del 4.6 %, la reducción de la fuerza de tensión repartida tiene un porcentaje del 11.3%.

### III.3 Geoquímica de elementos mayores

Fue posible obtener análisis por elementos mayores de las muestras (Tabla 9); lo que nos apoya para la descripción de la petrología, a partir de estos análisis se calculó la norma CIPW (cálculo realizado con el programa SINCLAS, Verma et al., 2002) arrojando como principales minerales componentes de las muestras analizadas en Riolita Bufo:  $qz= 33.8\%$ ;  $or= 14.3\%$ ;  $ab= 35.8$ ;  $an= 12.2\%$ ;  $c= 0.15$ ;  $hy= 0.9\%$ ;  $mt= 1.8\%$ ; mientras que en la toba Escolásticas se obtuvo:  $qz= 37.2\%$   $or= 23.7\%$ ;  $ab= 33.1$ ;  $an= 3.03\%$ ;  $c= 0.15$ ;  $hy= 0.44\%$ ;  $mt= 1.57\%$ ; considerándose como rocas hiperaluminosas por contener corindón normativo; además de que presentan un índice de diferenciación  $> 85\%$ .

%	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	(SO <sub>3</sub> )
Riolita La Bufo	72.8	14.1	2.6	2.6	0.6	2.5	4.2	0.06	0.23	0.12	0.01
toba Escolásticas	76.6	12	2	0.7	0.2	4	3.9	0.04	0.22	0.07	<0.02

Tabla 9. Elementos mayores en Riolita La Bufo y toba Escolásticas.



Con los resultados anteriores y con un diagrama de clasificación TAS (Figura 28) se puede clasificar a ambas muestras como riolitas.

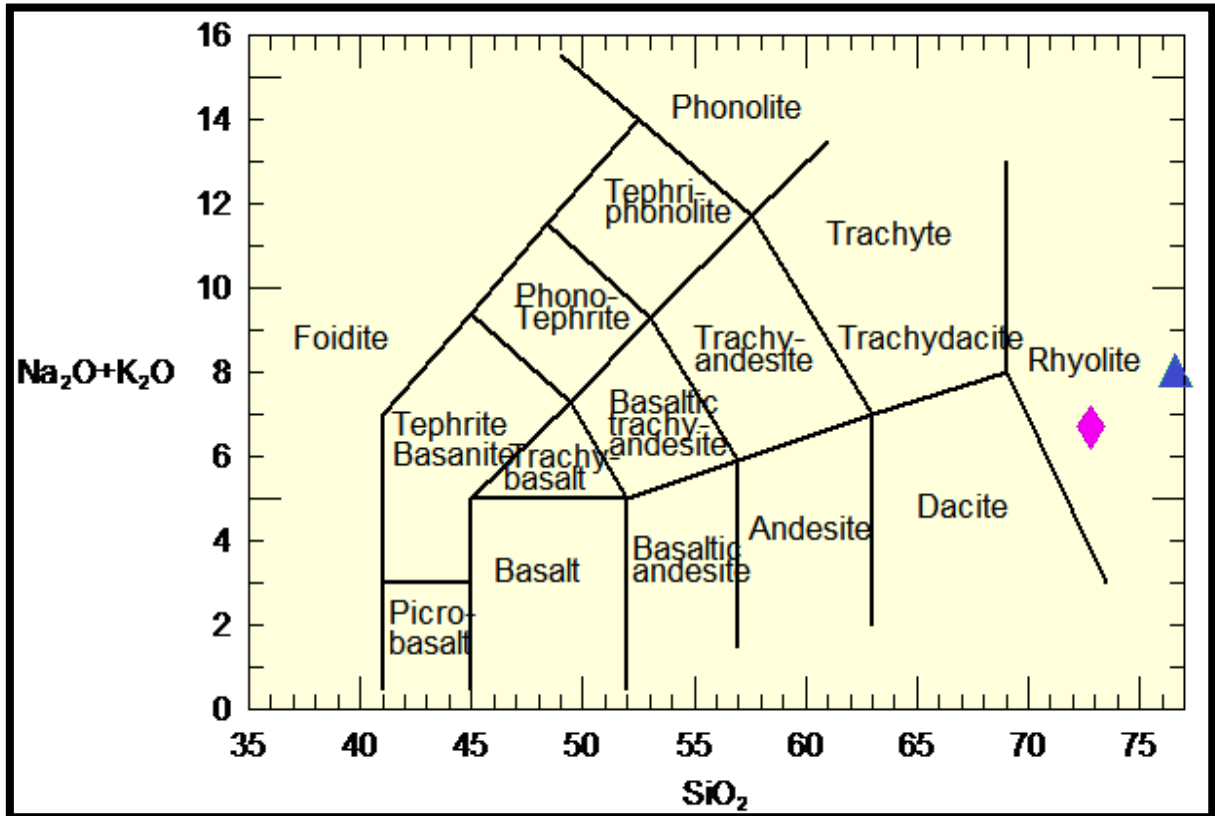


Figura 28. Diagrama de clasificación TAS para la Riolita la Bufa (rombo rosa) y la toba Escolásticas (triángulo azul).

#### IV. COMPARACIÓN DE LAS ROCAS ESTUDIADAS

Con los resultados obtenidos de los experimentos realizados para conocer las propiedades petrofísicas y petroquímicas de la Riolita La Bufa y la toba Escolástica se puede realizar la siguiente comparación:

En cuanto a la porosidad, que es sin duda una de las propiedades más importantes en relación con el deterioro debido a que puede condicionar el transporte del agua

y por lo tanto su durabilidad, se obtuvo que la muestra de la Riolita La Bufa tiene una porosidad de casi el 20 %, de esta porosidad el 70 % son microporos, y el 30 % restante corresponde a poros capilares (Figura 27), mientras que la toba Escolástica posee una porosidad cercana al 50 % de los cuales 20 % corresponde a microporos y 80 % son poros capilares (Figura 28) y que es prácticamente lo opuesto a la Riolita La Bufa.

El tamaño de los poros es un factor determinante en la durabilidad de las rocas debido a que va a condicionar la entrada y movilidad de los agentes contaminantes en su interior, además de que diferentes mecanismos relacionados con el deterioro de las rocas porosas dependen fuertemente del tamaño del poro, como la evaporación-condensación o presión de cristalización de las sales. Las rocas porosas que presentan una fracción de porosidad menor de 1  $\mu\text{m}$  son menos durables que las que tienen un tamaño mayor (Benavente,2003).

La microporosidad juega un papel importante porque una vez que alcanza su tamaño crítico el agua queda atrapada en los poros impidiendo que la roca pueda drenarla y ocasiona disolución de minerales y termina por afectar la disolución de la roca (Larsen y Cady, 1969). En general la toba Escolástica debido a su porosidad efectiva del 49.78% a comparación de la Riolita La Bufa que presenta una porosidad efectiva del 19.45% va a tener una mayor absorción de agua por tener más porosidad efectiva pero también va a tener un transporte de líquidos y gases más efectivo no únicamente por estos valores altos de porosidad sino también debido a que tiene poros de distintos tamaños (Tabla 5). Por lo tanto, la toba Escolástica va a tener una alta circulación y transporte de los líquidos y gases

mientras que la Riolita La Bufa va a presentar una circulación de líquidos y gases más baja que ocasiona que los gases y agua se queden retenidos su interior.

Recibir los rayos del sol de forma directa durante el día, el enfriamiento por las noches e incluso la lluvia pueden causar expansión o contracción permanente de las rocas lo que gradualmente las llevara a su degradación.

Las rocas que presentan poros conectados y porosidades superiores van a mostrar una expansión hídrica más rápida que las rocas con menor contenido de poros conectados y menor valor de porosidad (Wendler *et al.*, 1996), esto se puede ver en la Toba Escolástica (Figura 27).

Lo anterior puede influir en la expansión hídrica e higríca de la toba Escolásticas al encontrarse en contacto con agua y con la humedad del medio ambiente, pero a pesar de tener valores relativamente altos de porosidad la expansión hídrica que presenta la toba Escolásticas comparada con otras tobas estudiadas por Wedekind *et al*, (2012) es muy baja con un valor máximo de 0.045 mm/m que se presenta en su eje Z (Figura 25), es más bajo incluso que el valor de la Riolita La Bufa que presenta un valor máximo de 0.9 mm/m (Figura 24). En la expansión higríca la toba Escolásticas al principio de la prueba presentó una contracción en sus ejes, principalmente en el eje Y (Figura 25) y al seguir transcurriendo el tiempo presentaba también periodos de estabilización llegando a tener un valor máximo de 0.075 mm/m en su eje X (Figura 25) lo que indica que absorbe una pequeña cantidad de humedad del ambiente y que es una roca muy estable, y por lo tanto los cambios que sufre debido a las cantidades de agua que absorbe y humedad

son muy pequeños y no alteran de manera significativa a sus demás propiedades, pero no por esto dejan de tener un impacto en ella ya que tal vez en un largo periodo de tiempo esta pueda llegar a sufrir daños importantes en su superficie; mientras que la Riolita La Bufa presenta valores mucho más altos en el eje z con un valor de 0.9 mm/m en expansión hídrica (Figura 26) y un valor máximo de 0.34 mm/m en su eje z de expansión hídrica (Figura 24), y que al ser más altos estos valores nos indican que se pueden provocar cambios importantes en las dimensiones de la roca afectando de esta manera muchas otras de sus propiedades (mecánicas, color y aspecto) y por lo tanto no se puede considerar como un roca muy apta para la edificación ya que sufre daños en su estructura que pueden provocar desde pérdidas de partes en la edificación así como descamación y hasta cambios en su coloración. Con lo anterior se concluye que la expansión hídrica en la Riolita La Bufa es mayor debido a que tiene mayor cantidad de microporos. Debido a las características anteriores que presenta la Riolita La Bufa se podría ver afectada de mayor manera si se encuentra en contacto en una edificación con la toba Escolásticas debido a que esta última tiene un transporte de agua más efectivo y el agua que libera es absorbida por la Riolita La Bufa que tiene un transporte de agua y líquidos más deficiente por lo que con el paso del tiempo va a resultar mayormente afectada.

Con los resultados anteriores podemos hacer una relación con la cantidad de microporos y la expansión hídrica, mientras mayor sea la microporosidad mayor va a ser la expansión.

Los valores de densidad obtenidos para la toba Escolásticas en densidad aparente es de  $1.36 \text{ g/cm}^3$  mientras que la Riolita La Bufa tiene una densidad aparente de  $2.13 \text{ g/cm}^3$  que es afectada por el espacio de poro que se encuentra presente en la roca que al ser mayor en la toba Escolásticas va originar que tenga menores valores de densidad.

En cuanto a densidad de matriz la toba Escolásticas presenta un valor de  $2.53 \text{ g/cm}^3$  mientras que la Riolita La Bufa tiene una densidad de matriz de  $2.61 \text{ g/cm}^3$  que está ligada a la densidad de los cristales que forman las rocas.

Los valores de resistencia al esfuerzo aplicado sin ruptura a lo largo de su superficie de fractura van de  $59.59$  a  $72.05 \text{ N/mm}^2$  con un modelo de elasticidad de  $6.55$  a  $9.76 \text{ kN/mm}^2$  y que de acuerdo a la clasificación dada por De Quervain (1967) y Peschel (1974) puede ser colocada como una roca medianamente dura.

Los valores que presentó la Riolita La Bufa en cuanto a fuerza de tensión van de  $44.01$  a  $52.09 \text{ MPa}$  en muestra seca con una anisotropía del  $15.5\%$  y de  $28.1$  a  $35.3$  en muestra saturada en agua con el  $20.4\%$  de anisotropía y con una reducción a la fuerza de tensión del  $37\%$  (Tabla 8) con lo que se puede concluir que la roca es más estable cuando se encuentra seca y que en condiciones húmedas pierde resistencia aunque no en una cantidad muy grande por lo que se puede decir que La Riolita La Bufa es una roca medianamente resistente.

Con los análisis mineralógicos utilizando el método de difracción de Rayos X los difractogramas mostraron una significativa diferencia entre las rocas estudiadas (Figura 28).

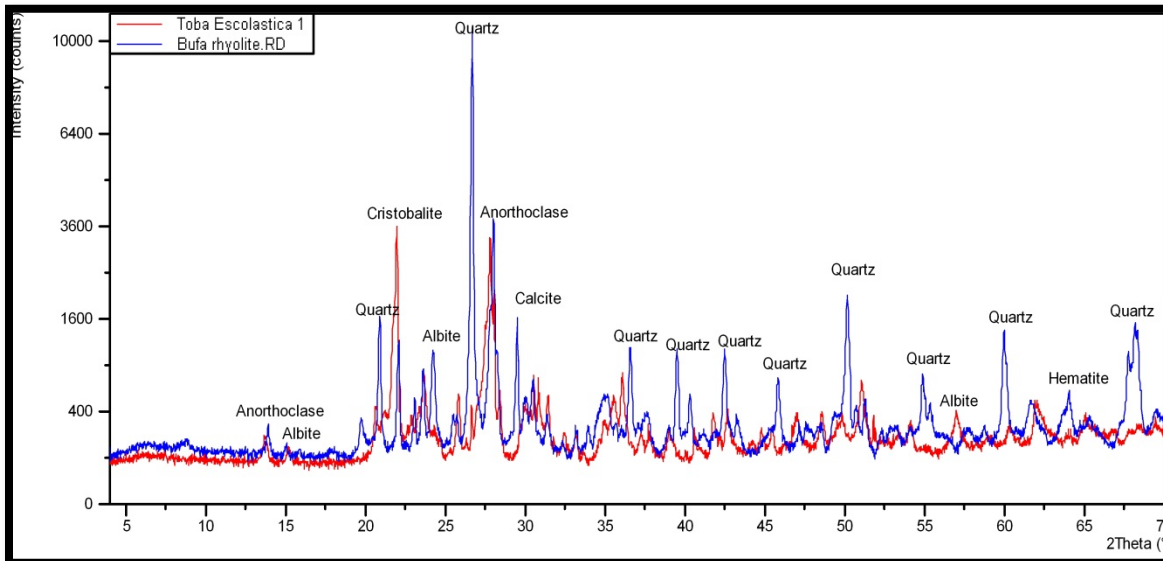


Figura 29. Difractogramas Riolita La Bufa y toba Escolástica.

En donde se puede observar que en la Riolita La Bufa está compuesta principalmente de cuarzo, sanidino, albita, muscovita y una matriz de grano fino compuesta principalmente de calcita, y hematita en donde estos últimos componentes marcan una diferencia importante ya que la hematita al ser compuesta principalmente de hierro y la calcita que presenta reacción a los ácidos al encontrarse expuestas a la intemperie y estar en contacto con el agua reaccionan de manera casi inmediata causando disolución, oxidación y la formación de productos de deterioro en esta roca.

Mientras que en la toba Escolásticas, se puede observar que tiene un gran contenido de cristobalita y que este es un polimorfo del cuarzo que ocurre en una fase tardía de cristalización en las rocas volcánicas, por lo general este mineral se asocia con tridimita, anortoclasa, y que junto con la albita se encuentran como los principales constituyentes de esta roca

La mineralogía de la roca también van a jugar un papel importante en la expansión o contracción del volumen de las rocas, en el caso de la Riolita La Bufa al estar compuesta por cuarzo y algunos minerales del manto superior que tienen un alto coeficiente de expansión generan que la roca se expanda mientras que la toba Escolásticas al estar compuesta de calcita, feldespatos y filosilicatos que tienen bajo coeficiente no cambiara mucho de volumen.

## **CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN**

En México se puede encontrar una gran cantidad de edificaciones como iglesias, fuentes, escalinatas etc. que han sido construidas con rocas que afloran en zonas cercanas a su ubicación y que generan un desarrollo económico para sus habitantes, sin embargo al momento de utilizarlas no se toman en cuenta las propiedades de las rocas, la exposición a la intemperie y el tipo de deterioro que estas tienen o puedan tener, lo que ocasiona una problemática como la que se presenta en este estudio, en donde se puede concluir que la porosidad, la cantidad de microporos y el espacio del poro, marcan la diferencia principal entre estas dos rocas ya que afectan de manera directa la cantidad de agua y humedad que transportan y por lo tanto su dilatación hídrica e hígrica que junto con su mineralogía, densidad, resistencia a la compresión y tensión son las propiedades con las cuales podemos interpretar el comportamiento que van a tener las rocas.

Debido a que el Templo de la Compañía de Jesús representa parte del patrimonio de la ciudad de Guanajuato, los esfuerzos realizados para su conservación y restauración, aunque hechos con las mejores intenciones, pueden tener con el tiempo resultados inesperados ya que no se utilizaron las rocas originales en su restauración, y las rocas reemplazantes difieren marcadamente de éstas. La aplicación de los estudios necesarios para encontrar la roca que mejor se ajustará a las necesidades de la edificación es por lo tanto indispensable. Debido a esto hoy se pueden encontrar diferentes rocas que la conforman. y por lo tanto, se podrían observar diferentes comportamientos de deterioro ya que las rocas usadas no únicamente son diferentes en apariencia sino también en su génesis, su



composición mineralógica, porosidad y propiedades petrofísicas que al final son las que determinan el comportamiento y deterioro que van a sufrir las rocas.

A partir de los datos obtenidos sobre sus propiedades se puede explicar el tipo de deterioro que sufren y en caso de tener que reemplazarlas con otra roca poder usar una roca que sea más compatible con la que se encuentre originalmente para poder tener un resultado más adecuado en la conservación de estos edificios y con mayor razón si estos son considerados patrimonio de la humanidad como es el caso del Templo de la Compañía de Jesús.

## BIBLIOGRAFIA

Aguirre-Díaz, G.J., Ferrari L., Nelson, S.A., Carrasco-Nuñez, G., López-Martínez, M., y Urrutia-Fucugauchi, J., 1998, El Cinturón Volcánico Mexicano: Un Proyecto Multidisciplinario: GEOS, vol 18, no. 1. P. 2-7.

Aguirres-Díaz, G., 2001, Recurrent magma mingling in successive ignimbrites from Amealco Caldera, Central Mexico: Buil Volcanol, 63, 238-251.

Benavente, D. 2003. Modelización y estimación de la durabilidad de materiales pétreos porosos frente a la cristalización de sales: Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes, <<http://www.cervantesvirtual.com/FichaObra.html?Ref=12011> >.

Benavente, D., Lock, P., García del Cura, M.A., Ordóñez, S. 2002. Predicting the capillary imbibition of porous rocks from microstructure. Transport in Porous Media, 49:59-76.

Buchanan, L.J., 1980, Ore-controls of a fossil geothermal system: The Las Torres Mine, Guanajuato, México, 138 p.

Da Silva, A. 2011. Curso de Propiedades de la Roca Yacimiento (Universidad Central de Venezuela). 2009. Disponible en internet:

<http://www.lacomunidadpetrolera.com/cursos/propiedades-de-la-roca-yacimiento/>. Consultado el 20 de Marzo de 2013.

Dávalos-Álvarez, O.G. 2003. Evolución de las fallas mayores del Neogeno-Cuaternario en la región de Huimilpan, Queretaro, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, Tesis Profesional, 93 p.

De Quervain, F., 1967, Technische Gesteinskunde. Lehrbücher und Monographien aus dem Gebiete der exakten Wissenschaften: Mineralogisch-geotechnische Reihe,, Bd. 1. Birkhäuser, Basel.

Dullien F.A.L. 1992. Porous Media Fluid Transport and Pore Structure: Academic Press, San Diego, 574 p.

Echegoyén-Sánchez, J, Romero-Martínez, S., Velázquez-Silva, S, 1970, Geología y yacimientos minerales de la parte central del Distrito Minero de Guanajuato: Consejo de recursos Naturales no Renovables (México), Boletín 75, 36p.

Edwards, J.D., 1956, Estudio sobre algunos de los Conglomerados Rojos del Terciario Inferior del centro de México: xx Congreso Geológico Internacional, México 1956, 75 p.

Ferrari, Luca, 2000, Avances en el Conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana Durante la Última Década: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, tomo LIII, no.1, p. 84-92.

Gauri, K.L., Bandyopahyay, J.K. 1999. Carbonate stone: chemical behavior, durability and conservation: New York, John Wiley & Sons, 284 p.

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. San Luis potosí, SLP, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, Tesis Profesional, 118 p.

Graue, B., Siegesmund, S., & Middendorf, B. 2011. Quality assessment of replacement stones for the Cologne Cathedral: mineralogical and petrophysical requirements. Environ Earth Sci, DOI: 10.1007/s12665-011-1077-x.

Gross, W. H., 1975, New ore discovery and source of silver-gold veins, Guanajuato, México: Economic Geology, v. 70, p.1175-1189.

Guiza, Jr., Reinaldo, 1949, Estudio geológico del Distrito Minero de Guanajuato, Gto. (Zona de la Veta Madre). Instituto Nacional para la investigación de Recursos Minerales. Boletín No. 22, 75 p.

Hall, C., Hoff, W.D. 2002. Water Transport in Brick, Stone and Concrete: Taylor and Francis, London, 318 p.

Larsen T.D, y Cady P.D ,1969, Identification of frost susceptible particles in concrete aggregates: National Cooperative Research Program, Report 66. Highway Research Board, Washington DC, 62p.

López – Doncel, R., Wedekind, W., Dohrmann, R. & Siegesmund, S. 2012: Historical Building stones of Guanajuato, Mexico: Weathering, properties and restoration.

López – Doncel, R., Wedekind, W., Dohrmann, R. & Siegesmund, S. 2012: Moisture expansion associated to secondary porosity. An example of the Loseros Tuff of Guanajuato, Mexico Moisture expansion associated to secondary porosity. An example of the Loseros Tuff of Guanajuato, Mexico. Environ Earth Sci. DOI: 10.1007/s12665-012-1781-1

Mendoza, J., 1998, “Introducción a la Física de Rocas”, Equinoccio, Sartenejas, Venezuela, pp.73-119.

Ortega-Gutiérrez, F., Mitre-Salazar, L.M., Roldán-Quintana, J., Aranda-Gómez., J. Morán-Zenteno, D., Alaniz-Álvarez, S.A y Nieto –Samaniego, A.F. 1992. Carta Geológica de la República Mexicana, Quinta Edición, Escala 1:2 000 000. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología; y Secretaría de

Energía, Minas e Industria Paraestatal, consejo de Recursos Minerales. I Mapa con Texto Explicativo. 74 p.

Pardo, M., y Suárez, G., 1995. Shape of the Subducted Rivera and Cocos Plates in the Southern Mexico: Seismic and Tectonic Implications: *Journal of Geophysical Research*, vol. 100, no. B7, p. 12,357-12,373.

Pasquaré, G., Vezzoli, L. y Zanchi, A., 1987, Morphological and Structural Model of MEXican Volcanic Belt: *Geofísica internacional*, vol. 26. No.2, p. 159-176.

Peschel, A., 1974, Zur Ermittlung und Bewertung von Festigkeitseigenschaften bei Natursteinen: *Z Angew Geol* 20:118-128

Ruedrich, J., Bartelsen, T., Dohrmann, R., & Siegesmund, S. 2011. Moisture expansion as a deterioration factor for sandstone used in buildings. *Environ Earth Sci*. DOI: 10.1007/s12665-010-0767-0.

Ruedrich, J., Seidel, M., Kirchner, D., & Siegesmund, S., 2005, Salzverwitterung, hygriische und thermische Dehnung als auslösende Schandensquantitäten: *Z dtsh geol Ges* 156/1:59-74.

Smith, B.J., Turkington, A.V., Warke, P.A., Basheer, P.A.M., McAlister, J.J., Meneely, J., Curran, J.M. 2002: Modelling the rapid retreat of building sandstones: a case study from a polluted maritime environment. in "Natural stone, weathering

phenomena, conservation strategies and case studies”, S. Siegesmund, T.N. Weiss, A. Vollbrecht, eds. Geological 684 D. Benavente, G. Cultrone, M. Gómez-Heras Society Special Publication, Geological Soc Publishing House, Bath, 347-362.

Verma, S.P., Sotelo-Rodríguez, Z.T., Torres-Alvarado, I.S., 2002. SINCLAS: Standard Igneous Norm and Volcanic Rock Classification System. *Computer & Geosciences* 28(5), 711-715.

Von Moos, A., & De Quervain, F., 1948, *Technische Gesteinskunde*. Birkhäuser, Basel.

Wandke, A., y Martínez, J., 1928, The Guanajuato mining district. Guanajuato, México: *Economic Geology*, v. 23, p.1-44.

Wedeking, W., López, R., Dohrmann, R., Kocher, M., & Siegesmund, S., 2012, Weathering of tuff rocks caused by moisture expansion. *Environmental Earth Science*. DOI 10.1007/s12665-012-2158-1.

Wedeking, W., López, R., Dohrmann, & Siegesmund, S., 2012, Hygric and hydric expansion of tuffs exclusively caused by clay minerals?.



Weiss, T., Siegesmund, S., Kirchner, D & Slippel, J., 2004. Insolation weathering and hygric dilatation: two competitive factors in stone degradation. *Environmental Geology* 46:402-413.

Wendler, E., Charola E.A., & Fitzner, B., 1996, Easter Island tuff: Laboratory studies for its consolidation. In Riederer J (ed) *Proceedings of 8<sup>th</sup> International Congress Deterioration and Conservation of Stone* Möller Druck und Verlag GmbH, Berlin

Winkler, E.M. 1997. *Stone in Architecture: Properties, Durability*: 3rd ed. Springer-Verlag, Berlin, 309 p