

Caracterización geológica y termofísica de obsidias riolíticas de la Laguna del Maule para posible aplicación como aislante térmico

F. Romero Neira¹, R. King St-Onge² y F. González Monsalve³

RESUMEN:

Debido a cambios en las normativas energéticas de construcción en Chile, en los próximos años será obligatoria una certificación de acondicionamiento térmico de las edificaciones, similar a un sistema de calificación y etiquetado. Dentro de las opciones de aislación, una de las más usadas y conocida hace referencia al poliestireno expandido (Plumavit) el cual es altamente inflamable, de baja resistencia y contaminante para el medio ambiente. Una alternativa es la "perlita", un geomaterial a base de vidrio volcánico riolítico con altas cantidades de agua (entre 2 a 5 % en peso) el cual al ser calentado rápidamente se expande hasta 20 veces su volumen dejando como resultado un material altamente poroso y versátil, de baja conductividad térmica, resistente al fuego y amigable con el medio ambiente. Uno de los pocos depósitos de perlita conocidos en Chile corresponde a las coladas de lavas riolíticas presentes alrededor de la Laguna del Maule, VII Región. En el presente trabajo se determina la factibilidad técnica de utilizar este material como aislante térmico, recolectando muestras de terreno y analizándolas bajo una serie de factores como lo son la geología, parámetros físicos y pruebas de expansión. Se concluye que principalmente debido a valores obtenidos de expansión de solo un 250% y densidad de 0.66 g/cm^3 , atribuidos a la baja cantidad de agua que posee la muestra expandida, no son satisfactorios de acuerdo a los requerimientos técnicos para catalogar el material como factible de utilizar como un producto de aislación térmica.

PALABRAS CLAVES: Perlita, Tratamiento térmico, Geomaterial.

ABSTRACT:

Due to changes in the energy regulations of construction in Chile, in the next few years a certification of thermal conditioning of the buildings will be obligatory, similar to a rating and labeling system. Among the options of insulation, one of the most used and known refers to expanded polystyrene (Plumavit) which is highly flammable, low resistance and polluting to the environment. An alternative is the "perlite", a geomaterial based on rhyolitic volcanic glass with high amounts of water (between 2 to 5% by weight) which when heated rapidly expands up to 20 times its volume leaving as a result a highly porous material and versatile, low thermal conductivity, fire resistant and environmentally friendly. One of the few deposits of perlite known in Chile corresponds to the lava flows of rhyolitic lavas present around the Laguna del Maule, VII Region. In the present work, the technical feasibility of using this material as a thermal insulator is determined, collecting rock samples and analyzing them under a series of factors such as geology, physical parameters and expansion tests. It is concluded that mainly due to values obtained of expansion of only 250% and density of 0.66 g/cm^3 , attributed to the low amount of water that has the expanded sample, they are not satisfactory according to the technical requirements for catalog the material as feasible to use as a thermal insulation product.

KEYWORDS: Perlite, Heat treatment, Geomaterial.

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, fromeron@ing.ucsc.cl

² Profesor guía, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, rking@ucsc.cl

³ Profesor informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, fgonzalez@ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

Con el fin de mejorar la calidad de vida de la población y disminuir el gasto energético de calefacción, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) en 1996 creó un programa a largo plazo sobre acondicionamiento térmico de viviendas (NCh 853. Of.91) que consta de tres etapas. La primera (año 2000) contemplaba la reglamentación de aislación de techumbres, una segunda etapa a contar del 2007 donde se agregan las demás componentes de una edificación, y por último en el 2013 MINVU implementa un sistema de calificación y etiquetado térmico para las viviendas, siendo solo de carácter voluntario. En la última fase se busca hacer obligatoria esta certificación térmica para viviendas la cual se espera sea dentro de los próximos años, siendo Chile el primer país de Latinoamérica en incorporar dichas normativas (CDT, 2008). Al analizar los sistemas de aislación térmica actuales, existen diferentes opciones para una vivienda; de manera interna, intermedia o externa. Una de las más usadas y conocidas es revestir la vivienda interiormente con planchas de poliestireno expandido (plumavit). Sin embargo podemos encontrar algunas deficiencias técnicas elementales como condensación de agua en las paredes y no se produce el fenómeno de inercia térmica, que consiste en aprovechar la capacidad térmica acumulada en el muro internamente. Esto ayuda a conservar la temperatura del interior y moderar temperaturas extremas de la vivienda (CDT, 2008). Además el tipo de material que se usa es plástico altamente inflamable y contaminante para el medio ambiente (Vaou y Panias, 2010).

En cambio aislando externamente, no ocurre condensación y el muro sí presenta inercia térmica. Un potencial geomaterial que cumple con las condiciones de ser aislante, amigable con el medio ambiente y tenga un origen natural con bajos costos de materia prima, es la **perlita** (Rashad, 2016; Celik y otros, 2013). En estudios anteriores se analizó la posibilidad de utilizar este material como aislante térmico el cual fue desarrollado de forma exitosa y con valores prometedores.

La perlita es un vidrio volcánico de composición riolítica que contiene 2 a 5 % de agua en peso. Cuando es calentada rápidamente en el rango de los 750 a 1000°C se expande de 5 a 20 veces su volumen original y queda como resultado un material espumoso de color blanco, perlita Expandida. Dicho material es versátil y exhibe baja conductividad térmica, alta absorción del sonido y resistencia al fuego, es usado principalmente en la industria de la construcción, agricultura, como filtrante, absorbente y para propósitos ambientales como derrames de petróleo (Rouliá y otros, 2006).

En Chile existen escasos depósitos de perlita estudiados y caracterizados. Casi la mayoría están ubicados en la regiones más septentrionales del país; dos depósitos en la XV Región y uno en la I Región (Gajardo, 2000). El único depósito conocido en la zona centro-sur se ubica en la orilla norte de la Laguna del Maule, VII Región (Gajardo, 2000), donde se han realizado estudios anteriores para su caracterización pero estos son demasiado acotados y antiguos (Comité de Sales Mixtas, 1986). El presente estudio busca determinar la factibilidad técnica de utilizar obsidianas riolíticas de la laguna del Maule como aislante térmico.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ¿Qué es la perlita?

Perlita es un término genérico utilizado para denominar lavas de obsidianas riolíticas con un contenido de entre un 2 a 5% de agua en peso (wt%). Químicamente compuesto de SiO_2 (75 wt%), Al_2O_3 (15 wt%), K_2O (5 wt%) entre otros elementos (Tabla 2.1). Análisis químicos sugieren que la perlita puede ser considerada como una red de aluminosilicatos negativamente cargada y balanceada con varios cationes metálicos (Rouliá y otros, 2006). Texturalmente presenta abundantes grietas, que se intersectan y están suavemente curvadas alrededor de núcleos de vidrio intacto (Rouliá y otros, 2006). Estos núcleos perlíticos ovalados o circulares en 2D típicamente tienen diámetros de entre 0.1 mm hasta un par de mm (Arifuzzaman y Sung, 2015). Usualmente ocurre en capas concéntricas que le otorgan una textura similar a capas de cebolla (Figura 2.1 (a)). El material crudo es explotado en minas a cielo abierto, triturado a partículas más pequeñas, secado, almacenado y exportado a plantas de expansión.

Tabla 2.1: Composición química de diversas perlitas junto con su porcentaje en peso (% w/w) de agua típicos. Extraído de Rouliá y otros (2006).

Composition	Raw perlite (% w/w)							
	Trachilas	Provatas	Tsigrado	Italy	China	Hungary	Turkey	typical
SiO_2	74.2	73.4	73.2	69.7	71.4	73.5	71.0	71-76
Al_2O_3	12.02	12.36	11.92	14.06	12.37	12.07	12.77	12-16
K_2O	4.30	2.76	2.61	4.65	4.39	3.69	4.44	4-5
Na_2O	3.20	4.20	4.16	3.27	3.95	3.56	3.18	3-5
Fe_2O_3	1.45	1.81	1.81	2.08	1.13	1.85	1.64	0.8-1.5
CaO	0.85	1.32	1.34	0.82	1.03	1.34	0.93	0.5-1.4
MgO	0.25	0.28	0.30	0.35	0.25	0.27	0.40	0.2-0.5
H_2O	3.11	2.18	2.58	3.75	5.00	3.50	4.75	3.0

El producto comercial comúnmente designado como perlita expandida es producido calentando el material en hornos entre los 750 y 1100°C. De este modo el agua y aire presente en su interior en pequeñas burbujas y microgrietas perlíticas crepita liberándose de forma abrupta, causando la expansión del material de 5 a 20 veces su volumen original y formando agregados livianos altamente porosos con una disminución de su densidad original y conductividad térmica (Celik y otros, 2013). Además manifiesta un cambio de color de verde gris hasta negro a un color blanco después de la expansión (Figura 2.1 (b) y (c) respectivamente). Dicho tratamiento térmico para expandir el material se ve afectado por diversos factores como la granulometría del material, tiempos de precalentamiento, tiempos de exposición y temperaturas máximas a la que se somete la roca (Gül, 2016). Valores representativos de densidad son de 2.2-2.4 (perlita natural) 0.9-1.1 (perlita molida) y 0.03-0.4 g/cm^3 (perlita expandida) (Rouliá y otros, 2006; Perlite Institute, 2011).



Figura 2.1: Material a distintas escalas donde: (a) Textura perlítica en “capas de cebolla” concéntricas y microgrietas (1,8 mm), (b) perlita en forma de roca y triturada y (c) perlita Expandida. Extraído de Perlite Institute (2009); Rotella y Simandl (2010).

2.1.1 Agua

Roullia y otros (2006) analizando el comportamiento de muestras de perlita de diversos lugares del mundo comprobaron que el porcentaje de expansión incrementa con el contenido total de agua. También concluye lo mismo Zähringer y otros (2001) mediante modelaciones numéricas. Existen dos orígenes del agua contenida en la perlita; uno primario o magmático que está relacionado con la formación del vidrio al momento de la erupción y un origen secundario que se atribuye a infiltración de aguas meteóricas a través de microgrietas del material, por lo que no estaría tan fuertemente unida a éste y a su vez puede ser de tipo molecular (H_2O) o como grupos hidroxilos (OH) (Roullia y otros, 2006). El agua en forma de grupos hidroxilos unida a átomos de sílice (en las uniones Si-OH), son introducidos a la red de silicatos bajo condiciones hidrotermales (Roullia y otros, 2006). Por lo tanto se considera que la pérdida de masa sobre los $550^{\circ}C$ es causada por la desgasificación de volátiles magmáticos fuertemente ligados y cualquier pérdida bajo los $550^{\circ}C$ es atribuida a agua meteórica que ha reaccionado con la estructura de los silicatos a través de reacciones de hidrolisis para formar grupos silanol (Si-O-H) (Denton y otros, 2012) o está presente dentro de los silicatos como agua molecular (Roullia y otros, 2006), también se incluye una categoría bajo los $250^{\circ}C$ donde la pérdida de masa está representada solo por agua molecular unida libremente a la superficie del vidrio (Figura 2.2).

Estudios de isotopos de oxígeno e hidrógeno muestran que las cantidades elevadas de agua contenidas en la perlita son el resultado de agua meteórica (origen secundario) introducida en el vidrio y no provenientes de un magma original rico en agua (Giachetti y otros, 2014). Roullia y otros, (2006) propusieron que se puede discriminar el origen de esta agua mediante un termograma.

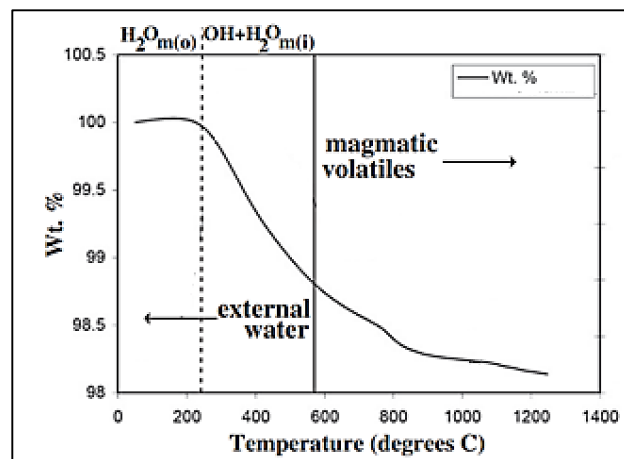


Figura 2.2: Termograma de una perlita típica donde m(o) representa el agua molecular externa, m(i) la interna y OH los hidroxilos. Modificada de Roullia y otros (2006).

Durante el proceso de expansión, el agua molecular unida libremente y presente de forma superficial o absorbida por poros, es liberada antes que cualquier cambio en la estructura del silicato ($0-250^{\circ}C$). A medida que la temperatura aumenta y el grano comienza a ablandarse, el agua molecular atrapada en los poros internos del material y grupos OH empiezan a evaporarse ($250-550^{\circ}C$). En esta etapa el vapor que es liberado crea rutas de escape fracturando el material hasta que finalmente explota o expande el grano. Una última categoría de agua es liberada sobre los $550^{\circ}C$ proveniente de los grupos Si-OH que son deshidrolizados, es decir convertidos en agua (Roullia y otros, 2006).

Se evidencia que el agua juega un rol más que importante en el proceso de la expansión no solo por la expansión misma del grano debido al vapor liberado sino que también reduciendo la viscosidad del grano ablandado (Roullia y otros, 2006).

2.1.2 Material

La transformación de una obsidiana riolítica a un geomaterial ocurre al momento de exponerlo a altas temperaturas de manera repentina. Al ser un vidrio posee una estructura química amorfa, es decir polímeros en los cuales sus cadenas están esparcidas en cualquier ordenamiento y a medida que se eleva la temperatura, presentan un cambio físico en su estructura. Los granos comienzan a ablandarse superficialmente cuando pasan

de un estado rígido a uno más blando. Este cambio abrupto representa la movilidad de los segmentos de cadenas poliméricas del material amorfo (Callister, 2003) y ocurre cuando abandonan su estructura fija y adquieren mucha más facilidad para moverse. La temperatura a la que se produce este cambio se define como temperatura de transición vítrea (T_g) (Domínguez, 2006). El fenómeno en sí se le llama transición vítrea y se manifiesta en materiales amorfos donde representa un intervalo de temperatura, que para nuestro material, está típicamente sobre los 800°C y debajo de la temperatura de sinterización cercano a los 1090°C (Zähringer y otros, 2001; Perlite Institute, 2011). Si este fuese un sólido cristalino, representaría la temperatura de fusión (Callister, 2003).

Resultados de difracción de Rayos X indican que la perlita es mayoritariamente amorfa con pequeñas cantidades de cristales de feldespato, cuarzo y biotita siendo la parte amorfa la que se expande y no la fracción cristalina. Pequeños cristales ubicados en dominios amorfos causan una división evitando la expansión del grano en su conjunto (Rouliá y otros, 2006). Además óxidos como el Na_2O , K_2O , Fe_2O_3 , TiO_2 , CaO y MgO reducen la viscosidad del fundido pero su influencia es mucho menor que el agua. El óxido de aluminio tiene el efecto inverso; este incrementa la viscosidad del fundido e inhibe la expansión de la perlita (Zähringer, 2001).

Este fenómeno descrito es esencial ya que existe una ventana de temperatura en la cual el material es lo suficientemente blando como para modificar su forma a causa de la abrupta salida del vapor de agua pero lo suficientemente resistente como para que mantenga las burbujas de aire que deja la desgasificación. El material una vez enfriado mantiene esta forma esponjosa y adquiere sus propiedades tan características.

2.1.3 Tratamiento térmico

Si el agua es liberada bajo la temperatura de transición vítrea o ablandamiento (T_g) produce fracturas de las partículas, por lo tanto un calentamiento rápido para alcanzar la temperatura de ablandamiento es muy importante para maximizar el proceso de expansión. Si las partículas son calentadas lentamente toda el agua es liberada antes que la partícula sea ablandada, por lo tanto la expansión es precaria (Aguilar-Garib y otros, 2013). Además de la cantidad de agua y temperatura de transición vítrea, estudios realizados por Gül (2016) indican que el tiempo de exposición y tamaño de las partículas son factores importantes y determinantes en la expansión del material. Esto condice con los análisis de Rouliá y otros, (2006), quienes indican que el tratamiento térmico óptimo del material sería una granulometría más bien gruesa (2.5 a 0.8 mm) (Tabla 2.2), y un cambio térmico brusco en un período corto de tiempo (Figura 2.4).

Tabla 2.2: Tasa de expansión a distintas temperaturas para diversas muestras a granulometría gruesa (2.5-0.8 mm), media (1.2-0.15 mm) y fina (0.6-0.15 mm). Extraído de Rouliá y otros (2006).

Sample	Grain size	Expansion Ratio				
		800 °C	900 °C	1,000 °C	1,100 °C	1,200 °C
Trachilas	Coarse	2.60	4.03	7.00	8.60	9.73
	Medium	2.40	3.93	6.00	7.20	7.87
	Fine	2.50	4.63	6.30	8.40	8.87
Provatas	Coarse	2.10	4.65	6.60	8.97	8.93
	Medium	2.10	4.51	6.33	7.60	7.33
	Fine	1.90	4.32	5.50	6.33	7.27
Tsigrado	Coarse	2.40	4.60	6.67	8.33	7.47
	Medium	2.30	4.15	6.03	7.13	7.40
	Fine	2.33	4.40	5.90	6.50	7.20
Italy	Fine	1.60	2.47	3.47	3.70	4.40
China	Fine	2.04	2.98	3.81	4.23	4.60
Hungary	Fine	3.10	4.28	5.83	6.80	6.40
Turkey	Fine	3.00	5.12	9.74	12.17	10.67

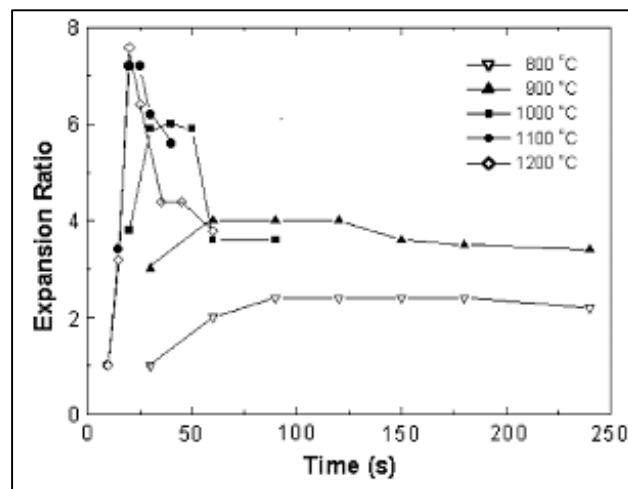


Figura 2.4: Efecto del tratamiento térmico en la tasa de expansión de la perlita. Extraído de Roulia y otros (2006).

Mediante la recopilación de información de Varuzhanyan y otros (2006) se indica que el grano puede calentarse gradualmente o de forma inmediata y esto afecta sustancialmente a la expansión de éste, siendo teóricamente la mejor forma de expandirlo con cambios abruptos de temperatura, además se indica que la expansión ocurre desde los 600°C generalmente.

2.2 Reconocimiento geológico

La ocurrencia de la perlita está restringida a las áreas de vulcanismo riolítico de edad entre el Cenozoico y el Cuaternario debido a que los vidrios riolíticos son inestables. Cualquier riolita vítrea de antes del Cenozoico ha sido desvitrificada y no tiene interés comercial. Muchos volcanes acídicos jóvenes no tienen el tiempo suficiente para hidratarse, por lo tanto, siguen siendo esencialmente obsidias no expandibles en el rango de temperatura de la perlita (Kennedy, 1990). Los mayores depósitos en América se encuentran en Estados Unidos, México y Argentina. Generalmente los depósitos se presentan como domos de varios cientos de metros de espesor y su explotación es mediante faenas a rajo abierto (Kennedy, 1990).

La perlita es reconocida en terreno por su apariencia característica de fractura concoidal y en algunos casos exfoliación concéntrica denominada comúnmente como “capas de cebolla”. Su color es gris pálido nacarado, aunque pueden encontrarse variedades pardas, verdosas y negras lo que depende de las impurezas (cristales de cuarzo, feldespatos, biotita y fragmentos líticos) (Gajardo, 2000).

Un modelo de emplazamiento para domos perlíticos propuesto por Whitson, (1982) en las montañas No Aqua, Nuevo México, sugieren que el material más externo será pumita, gradando hacia el centro a texturas más compactas hasta un núcleo interno félsico. Estas se pueden clasificar en tres tipos:

Pumita: Cerca de la superficie, esta es una perlita ligera y espumosa donde la presencia de vesículas está menos limitada por las presiones litostáticas e hidrostáticas. La perlita pumita o pómez suele ser de color gris claro, pero puede estar pulida (Kennedy, 1990).

Granular: Esta textura es encontrada adyacente y más profunda que la perlita pumita de forma más densa que las capas que están sobre ella, tiene una textura azucarada, o apariencia sacaroides y comercialmente presenta mejores valores de expansión. El color es usualmente gris a café. Se dispone en bandas de flujo (Kennedy, 1990).

Clásica: Este es el típico material perlítico gris con textura de capas de cebolla concéntricas, también puede ser gris oscuro a negro. Los anillos concéntricos alrededor de cada nódulo de obsidiana probablemente se formaron como resultado del aumento de volumen debido a la hidratación que avanzó solo hasta la interfaz perlita-obsidiana (Kennedy, 1990).

2.2.1 Área de estudio

El área de estudio se ubica en la alta cordillera en la orilla norte de la Laguna del Maule, VII Región. El afloramiento se encuentra a 150 km al sureste de Talca y 200 km al sur de Santiago (Figura 2.5). Las coordenadas UTM del área de estudio son 362340.03m E - 6012638.12m S. El afloramiento de perlita se encuentra al costado de la carretera que cruza por el norte de la laguna del Maule con dimensiones superiores a 100.000 m^3 (Gajardo y otros, 2003).

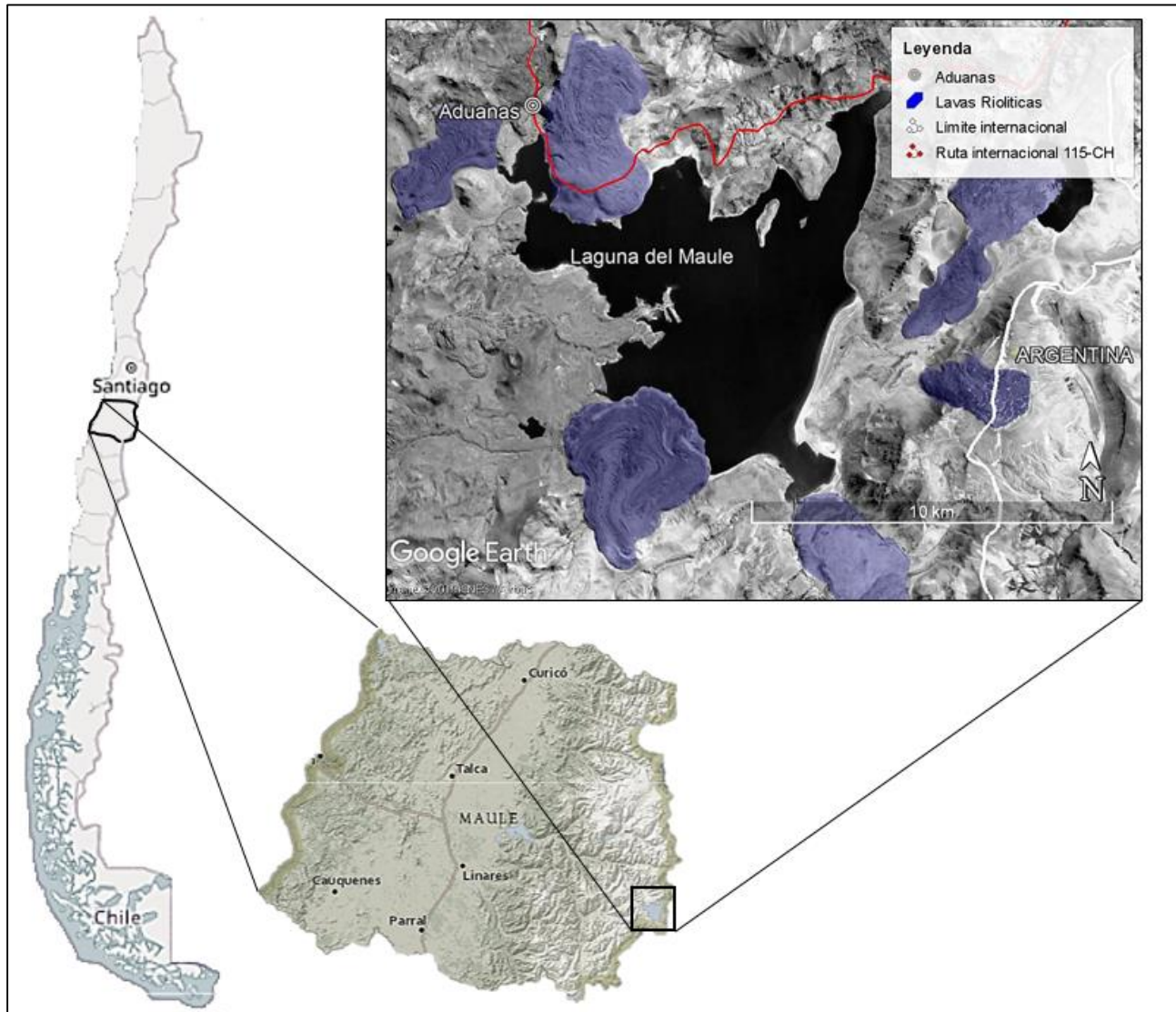


Figura 2.5: Ubicación y accesos al área de estudio. Modificado de Google Earth.

2.2.2 Geología de Laguna del Maule

El Complejo Volcánico Laguna del Maule es un área volcánica relativamente pequeña (300 km^2) cuya composición litológica varía entre basaltos y riolitas que se presentan como conos de lavas, conos de piroclásticos, coladas basálticas de valle, coladas vitrofíricas y cenizas volcánicas, todas de edades inferiores a 0,3 Ma. (López y Munizaga, 1983).

La morfología actual del sector es el resultado de procesos tectónicos, volcánicos y glaciares. Las unidades morfológicas principales corresponden a la depresión ocupada actualmente por la Laguna del Maule, centro de este complejo volcánico y originada aparentemente por procesos glaciares y tectónicos. Los relieves positivos presentan alturas entre 2500 y 3500 m.s.n.m. afectados en mayor o menor grado por la erosión glacial y representados por centros volcánicos, domos y coladas de lava vitrofíricas. Hacia el valle principal del Río

Maule, este se presenta erosionado en su curso superior y parcialmente obstruido por un domo volcánico, lo que ha generado su represamiento, originando la laguna (Comité de Sales Mixtas, 1986).

(López y Munizaga, 1983) distingue cuatro unidades de rocas volcánicas que han sido individualizados en el entorno de Laguna del Maule perteneciente a este complejo (Figura 2.6):

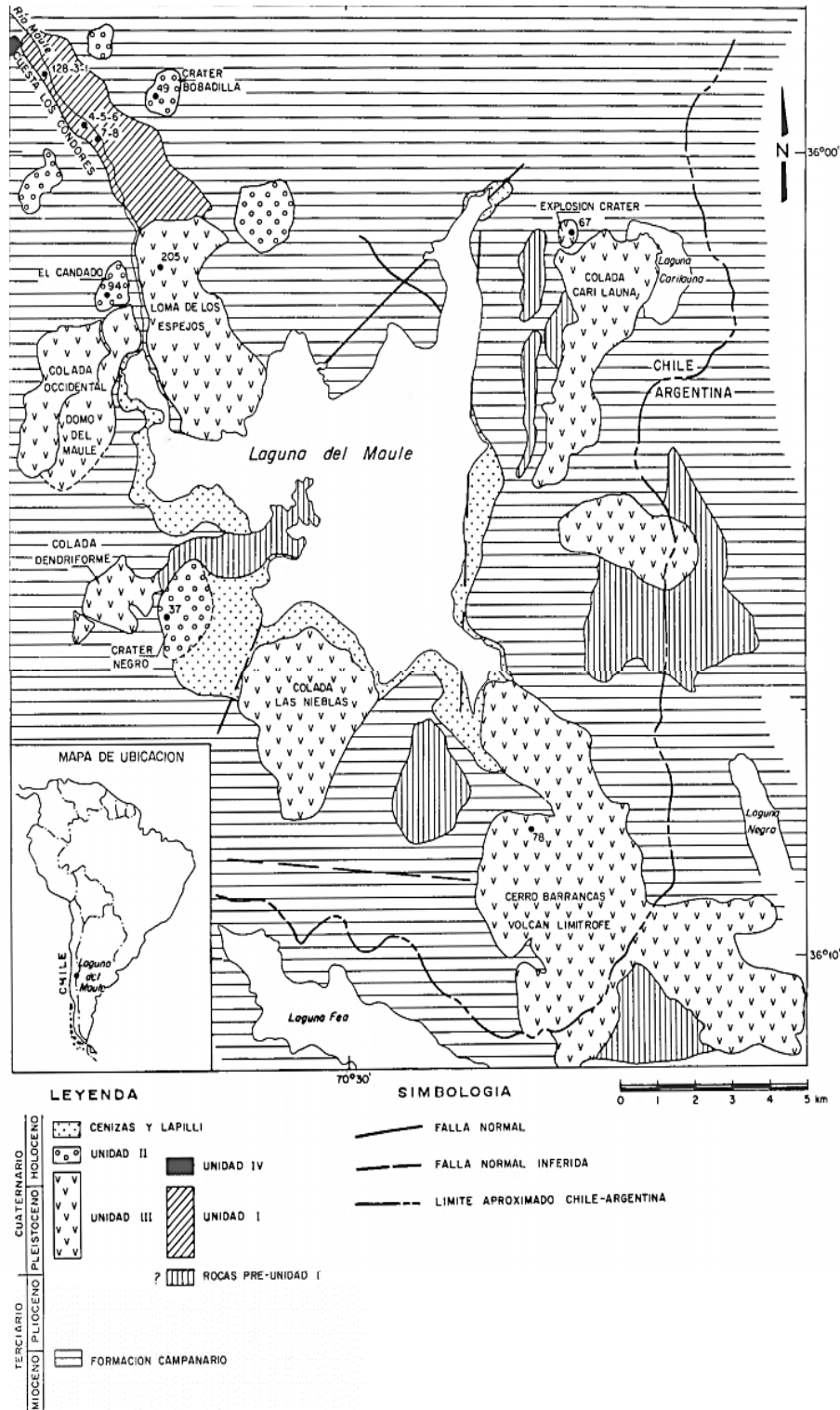


Figura 2.6: Esquema geológico simplificado de Complejo Volcánico Laguna del Maule. Extraído de López y Munizaga (1983).

Unidad I: Compuesta por lavas basálticas que rellenan el curso superior del Río Maule.

Unidad II: Representada por conos de piroclásticos y lavas basálticas distribuidos en el lado oriental de la laguna.

Unidad III: Incluye flujos de lavas vitrofíricas de bloque alrededor de la laguna compuestas por vidrio en un 90 a 95 %. Estos flujos son post glaciares.

Unidad IV: Cuellos volcánicos y una serie de diques.

La Unidad III es quien presenta mayor interés al momento de buscar la perlita ya que está compuesta por rocas vitrofíricas que contienen hasta un 90-95% de vidrio. El otro porcentaje está representado por microfenocristales de plagioclasa, biotita, anfíbola y granos opacos. En la Tabla 2.3 se muestran análisis geoquímicos para muestras de las coladas Loma de los Espejos y Cari Launa, respectivamente.

	Unidad III	
	Loma de los Espejos	Cari Launa
<i>SiO₂</i>	69.52	72.50
<i>TiO₂</i>	0.58	0.19
<i>Al₂O₃</i>	16.34	15.00
<i>Fe₂O₃</i>	1.70	1.20
<i>FeO</i>	0.83	0.66
<i>MnO</i>	0.07	0.06
<i>MgO</i>	0.90	0.26
<i>CaO</i>	3.14	0.85
<i>Na₂O</i>	3.97	5.12
<i>K₂O</i>	3.22	4.00
<i>P₂O₅</i>	0.12	0.02
<i>H₂O + CO₂</i>	0.07	0.14
Total	100.46	100.00

Tabla 2.3: Análisis geoquímicos en los sectores de Loma de los Espejos y Cari Launa, respectivamente. Modificado de López y Munizaga (1983).

El depósito que presenta las mejores características geológicas y geográficas se encuentra en la colada ubicada en el extremo norte de la laguna, la cual es cortada por la carretera principal, las dimensiones del depósito se estiman en $100.000\ m^3$. Es el único yacimiento explotado en el país y su perlita se utiliza como filtrante para la industria nacional de vinos y cervezas. No existe información oficial respecto a la producción de perlita pero se estima en unas 6000 t/año (Gajardo, 2000).

3. METODOLOGIA

La metodología que se presenta a continuación es usada para caracterizar las rocas de la zona de estudio desde un punto de vista geológico y termofísico, además de determinar las características físicas como densidad del material en distintos estados (muestra inalterada, molida y expandida), temperaturas de expansión y porcentaje de expansión.

3.1 Caracterización geológica

3.1.1 Campaña de terreno

Se realiza una salida a terreno (abril 2018) con el fin de reconocer las rocas que afloran en los flujos de lava. Se seleccionan las coladas de Loma de los Espejos y Cari Launa por representar de mejor manera a las rocas de la unidad III y además de ser las de más fácil acceso. Se realiza la extracción y etiquetado de 13 muestras de rocas, específicamente bloques lo suficientemente grandes (20x20x20 cm) con el fin de tener el material suficiente para poder realizar todas las pruebas necesarias. Además se elige una muestra representativa, la cual es extraída en grandes cantidades (20 kilos) en caso de realizar análisis a gran escala como la posible fabricación de una placa aislante. La Figura 3.1 detalla la ubicación de los puntos muestreados y en la Tabla 3.1 las muestras extraídas por punto con su código correspondiente. Para su almacenamiento se procura que no estén en contacto directo con el ambiente, en un lugar seco y fresco.

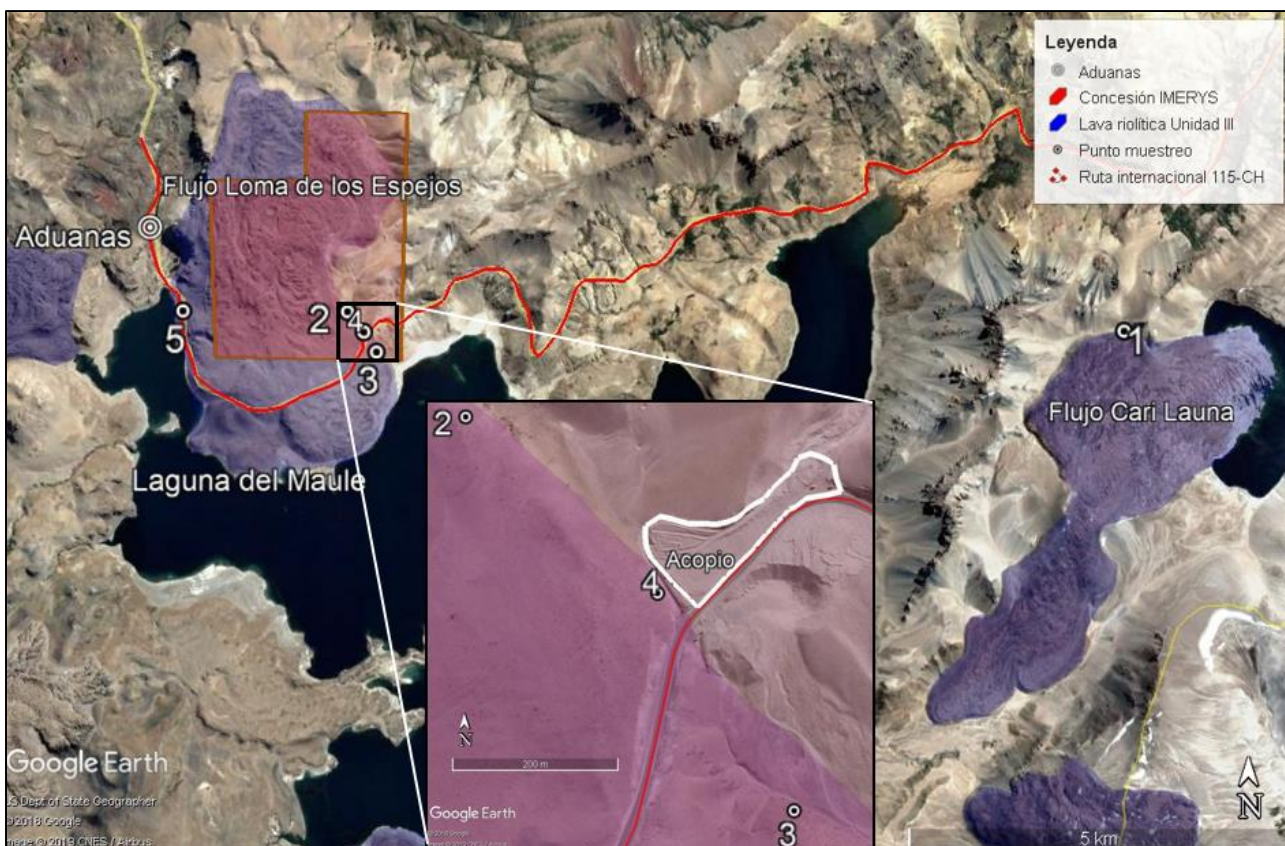


Figura 3.1: Puntos enumerados de extracción de muestras y área de concesión minera actual. Elaboración propia.

Tabla 3.1: Códigos de muestras extraídas en cada punto de muestreo.

Punto de muestreo	Coordenadas UTM	Código de muestra
1	372299.00 m E-6012871.00 m S	P1M1-P1M2-P1M3-P1M4
2	362108.00 m E-6012967.00 m S	P2M1-P2M2-P2M3-P2M4
3	362495.00 m E-6012452.00 m S	P4M1-P4M2
4	362326.00 m E-6012707.00 m S	P6M1
5	359948.00 m E-6012944.00 m S	P5M1-P5M2

3.2 Caracterización termofísica

Todas las pruebas termofísicas fueron realizadas en las dependencias del Departamento de Metalurgia (DIMET) de la Universidad de Concepción (UDEC) a excepción del tamizado para la granulometría que fue realizado en el Laboratorio de Geomateriales de la Universidad Católica de la Santísima Concepción (UCSC).

3.2.1 Granulometría

A modo de preparar el material para distintos tratamientos térmicos, las muestras son molidas de manera manual para separar las partículas en distintos diámetros mediante tamices indicados en la Tabla 3.2. Posteriormente se ingresan las muestras en un crisol cerámico, a un horno tipo mufla Nobertherm modelo N11/HR de 5 kW y temperatura máxima de 1280°C. Aproximadamente 10 g de cada muestra pulverizada y tamizada es dejada a 80°C durante 24 horas registrando su masa inicial y final con el fin de eliminar el agua molecular presente libremente en las partículas de roca que puede haber absorbido del ambiente.

Tabla 3.2: Diámetros de partículas de roca utilizados.

Tamiz	Diámetro (mm)
Fondo	Bajo 0.075
#200	0.075
#100	0.15
#60	0.25
#40	0.425
#16	1.18
#10	2
#8	2.18
#4	4.75

Posteriormente las muestras son calentadas a una velocidad aproximada de 15°C/min hasta los 1000°C donde permanecen por 10 minutos a esta temperatura. Se dejan enfriar hasta los 500°C dentro de la mufla y después continúan enfriando fuera de esta a temperatura ambiente. Una vez fría, se registra la masa final que permite conocer el porcentaje de volátiles perdidos (en su mayoría agua). En una primera instancia se ensaya una sola muestra para el contenido de agua (P1M3) para los tamices entre #10 y bajo #200, luego se aplica a las demás muestras pero solo en granulometrías gruesas (#60, #40, #16, #10) (Figura 3.2). Junto con el registro de la densidad inicial y final, se busca saber si la granulometría influye en el porcentaje que se expandirá la muestra, cuáles muestras sufren expansión y además saber cuál granulometría libera más agua. Es necesario aclarar que para fines de conocer estos parámetros, el tratamiento térmico no se varió.



Figura 3.2: Material tamizado a distintos diámetros de partícula, muestra P1M3. Elaboración propia.

3.2.2 Análisis Termogravimétrico

La termogravimetría se basa en analizar los cambios de masa como resultado de una variación de temperatura. Los cambios de masa identificados permiten determinar bajo qué condiciones los materiales se descomponen y los resultados se expresan gráficamente a través de termogramas (Rodríguez y Villegas, 2012). El análisis termogravimétrico se realiza en un pequeño horno en el cual se introduce una muestra que va conectada a una termobalanza, la cual registra la masa a medida que aumenta la temperatura. El controlador de temperatura y la termobalanza están conectadas a un ordenador el cual toma registro de los datos y permite generar una curva de pérdida de masa con respecto a la temperatura (Figura 3.3). Se realiza un análisis termogravimétrico a la muestra que presenta mayores cambios (partículas expandidas) con el fin de saber con más detalle a que temperatura presenta la mayor pérdida de masa y su respectivo porcentaje respecto a la masa total.

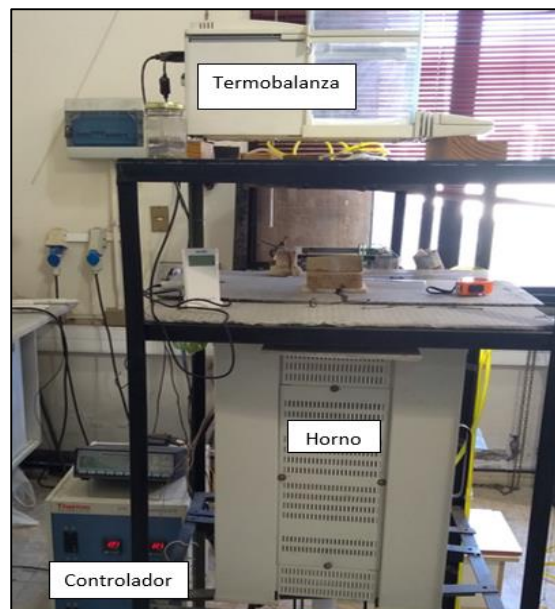


Figura 3.3: Equipo termogravimétrico con sus respectivas partes en las dependencias del DIMET.

La muestra ensayada corresponde a la muestra P4M2 donde 2 gramos con granulometría de tamiz #16 fue expuesta a un aumento de temperatura de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ hasta un máximo de 1000°C en presencia de un flujo de nitrógeno libre de oxígeno.

3.2.3 Tratamientos térmicos

Los diversos tratamientos térmicos fueron realizados en la mufla que se muestra en la Figura 3.4. Para la muestra que presenta mayores cambios físicos (expansión) en las pruebas de granulometría, se varían parámetros de interés con el fin de saber cuál es el tratamiento óptimo que logre el mayor porcentaje de expansión frente a tratamientos como temperatura máxima, tiempo de exposición dentro del horno y enfriado de las muestras (Tabla 3.3).



Figura 3.4: Horno tipo mufla utilizado para el tratamiento térmico ubicado en el DIMET.

Este tratamiento térmico consiste en ingresar la muestra a la mufla precalentada a 600°C y llevada a la temperatura máxima deseada a una velocidad de 17°C/min aproximadamente (límite de aumento de mufla), donde se mantiene por una cantidad de tiempo de permanencia a la temperatura máxima. Finalmente se apaga el equipo y deja enfriar las muestras dentro o fuera del horno para después registrar su densidad aparente. Se realiza la variación de las granulometrías gruesas (#16, #8 y #4) Con la finalidad de saber si es realmente significativa la diferencia de expansión. Al momento de estudiar específicamente la influencia de un parámetro, los demás se fijan a temperatura máxima de 1000°C por 30 minutos y enfriado fuera (1000x30 F).

Tabla 3.3: Parámetros variados durante las pruebas de tratamiento térmico.

Granulometría	Temperatura máxima (°C)	Tiempo de exposición (min)	Enfriado de la muestra
#16	800	10	Dentro de mufla (D)
#8	1000	30	Fuera de mufla (F)
#4	1100	60	
	1200		

Antes de ser ingresadas al horno y después de retiradas, a cada prueba se les mide la densidad aparente para tener un parámetro de comparación del rendimiento de cada prueba térmica.

3.2.4 Densidades

La densidad de las muestras es utilizada como un parámetro elemental de comparación entre las distintas pruebas térmicas realizadas. La razón entre la densidad aparente inicial y final indica el porcentaje de expansión de la muestra ensayada. Dos densidades fueron medidas:

- 1- Densidad natural: Corresponde a la densidad de la roca intacta propiamente tal y es medida mediante el método de inmersión en agua. (Figura 3.5 (a)).
- 2- Densidad molida: Corresponde a la densidad aparente del material triturado y separado en distintos tamices, dicho procedimiento es utilizado para controlar la densidad antes y después de ingresar las muestras al horno. Se realiza vaciando entre 10 a 25 gramos de muestra a una probeta milimetrada de vidrio (100 ml) y se registra el volumen que ocupa el material en ml junto con la masa correspondiente del material (Figura 3.5 (b)). Podemos obtener la densidad aparente como resultado de dividir la masa registrada sobre el volumen.

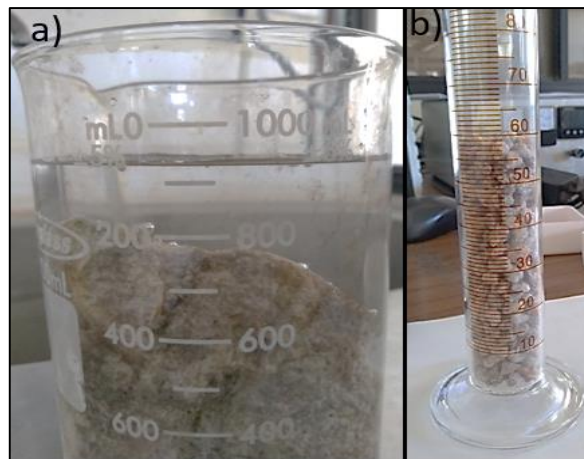


Figura 3.5: Métodos utilizados para medir las densidades donde: (a) Densidad sumergida y (b) Densidad aparente.

3.2.5 Microscopio de calentamiento (HMTA)

Para caracterizar de manera mucho más detallada el comportamiento térmico de las muestras estudiadas se utilizó un microscopio de calentamiento modelo EM-201-17 que permite estudiar materiales mediante la toma de imágenes que son analizadas por el equipo. Una probeta de 2,5 mm x 2,5 mm es sometida a distintas velocidades de calentamiento y a medida que aumenta la temperatura del horno, el equipo es capaz de medir diversos parámetros de la probeta como el ángulo de los bordes, ancho, alto, temperatura de la muestra y área, entre otros (Figura 3.6).

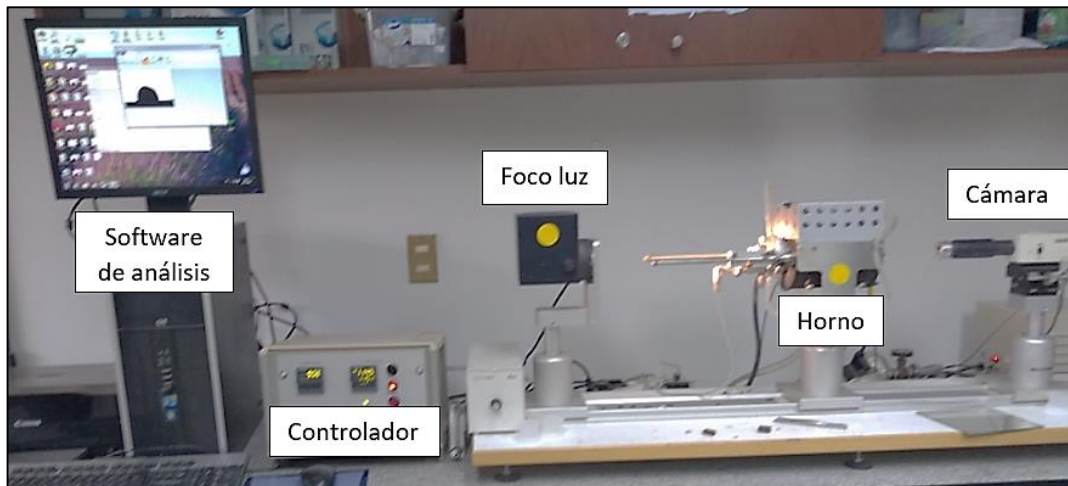


Figura 3.6: Microscopio de calentamiento en las dependencias del DIMET (UDEC).

El equipo posee diversos usos y aplicaciones, y para este caso se busca conocer la temperatura de transición vítrea y porcentaje de expansión del grano. Se le da énfasis a la velocidad de calentamiento, área del grano y temperatura a la cual alcanza la máxima expansión. Se ingresó un grano de la muestra que se expande (P4M2) de aproximadamente 2 mm x 2 mm donde una primera prueba se realiza a una velocidad de 100°C/min entre 0 y 850°C y 40°C/min entre 850 y 1250°C (este cambio en la razón de calentamiento es debido a limitaciones del equipo) y una segunda a la mitad de la velocidad en el segundo intervalo (20°C/min entre 850 y 1250°C).

4. ANALISIS DE RESULTADOS

4.1 Campaña de terreno

Colada Cari Launa (punto 1): Corresponde a un flujo de lava riolítica vítrea en bloque con bandas de obsidias negras opacas de aproximadamente un metro de espesor (Figura 4.1(a)). El flujo general mide aproximadamente 15 metros de alto y presenta heterogeneidad ya que se observan 3 tipos de material (Figura 4.1 (b)):

- 1) Alternancia de bandas de obsidias negras sin amígdalas de brillo opaco (espesor 1 cm) con vidrio color gris pardo de textura granular fina (P1M1). Representa aproximadamente el 10% del total de la colada (Figura 4.1 (c)).
- 2) Roca vítrea de textura granular color gris con pequeñas bandas de 5 mm de vidrio más compacto (P1M2) (Figura 4.1 (d)), dicho material también se presenta en forma densa por contener vidrio masivo (P1M3). Este material en conjunto representa el 90% de la composición total del afloramiento.
- 3) Obsidias negras masivas bien formadas de fractura concoide pero en pequeñas cantidades (1 a 5%) (P1M4).

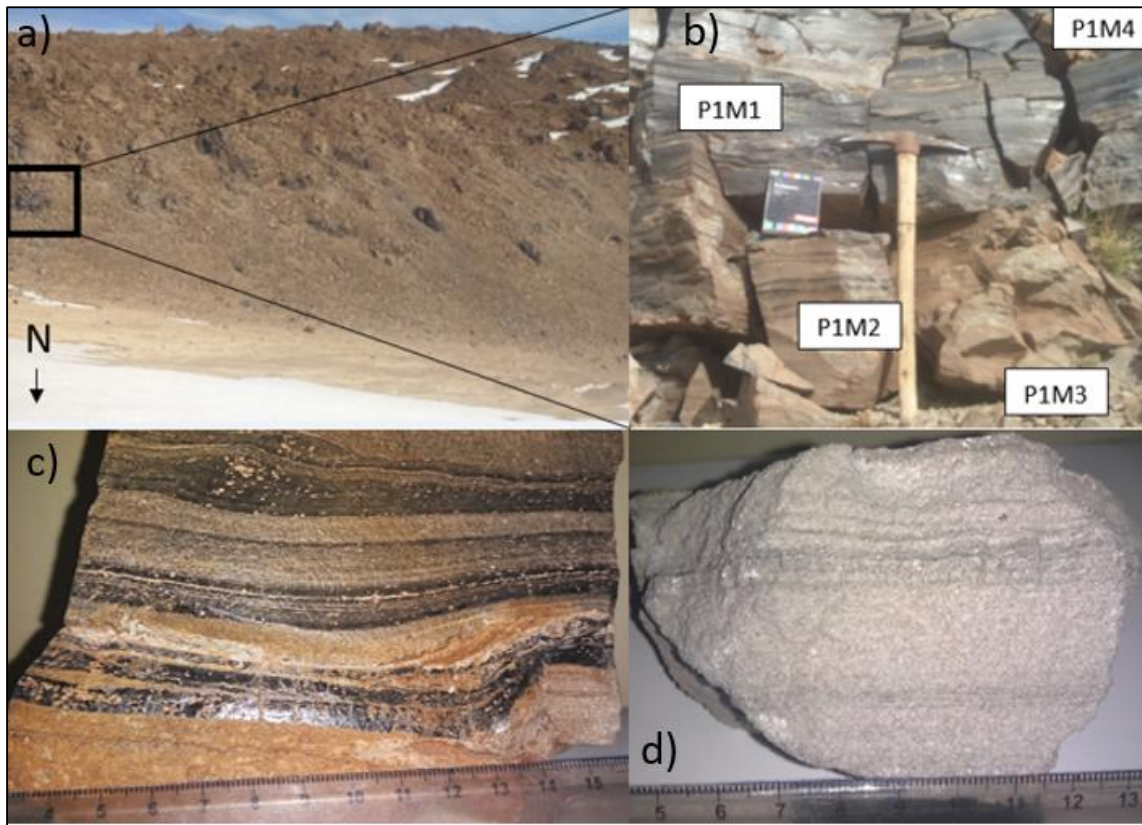


Figura 4.1: (a) Afloramiento Cari Launa desde una vista general, (b) flujos bandeados de obsidias con riolitas vítreas, (c) muestra P1M1 indicando en detalle el bandeamiento y (d) riolita vítrea con textura granular (c). Elaboración propia.

Colada Loma de los Espejos: Al igual que en la colada Cari Launa, consiste en un flujo de riolitas vítreas granulares con geometría en bloques, vidrios volcánicos compactos, de fractura concoidal y un color pardo oscuro a gris, en coladas (20 m de espesor). Existen algunas diferencias en el tipo de vidrio que presentan; las obsidias negras están en un mayor porcentaje (20%) y representan bloques masivos sin presencia de bandas de tono claro.

Solo algunas pequeñas porciones (5%) presentan amígdalas ovaladas con relleno blanco de hasta 8 mm de diámetro (P2M3) (Figura 4.2 (a)). Existe otro tipo de obsidiana mucho más clara, color gris verdoso traslucido con bandas de vidrio granular gris representada por las muestra P2M4 (Figura 4.2 (b)).



Figura 4.2: Algunos ejemplares obtenidos en el punto 2 donde (a) representa obsidias con amígdalas y (b) vidrio gris traslucido en bandas (P2M4).

Entre todos los puntos muestreados no existen diferencias significativas al pertenecer al mismo flujo volcánico, sin embargo el punto 5 presenta un vidrio bandeado mucho más poroso y liviano (P5M1) o disgregable y fácilmente reducible a polvo (P5M2). En ambas coladas el material más abundante correspondía a vidrio granular disgregable con cantidad variable de vidrio masivo color gris claro a translucido dispuesto en bandas. Se seleccionan las muestras que se perfilan con las características de la perlita industrial y se realizan pruebas termofísicas (P1M2, P1M3, P2M2, P4M1, P4M2, P5M1, P5M2 Y P6M1), además de extracción de material en grandes cantidades del punto 6.

4.1.1 Descripción muestra de mano y microscopio

Como representantes del afloramiento más prometedor correspondiente a la Colada Loma de los Espejos, se describe la muestra de mano P4M2 y realiza un corte transparente a la muestra P6M1, las cuales presentan las siguientes características:

Muestra de mano P4M2: Estructura heterogénea, compuesta de vidrio volcánico color gris claro en partes más oscuro, textura sacaroidea y fractura concoidea, fenocristales de hasta 1 mm de biotitas y bandas de 2 a 4 cm de vidrio gris translucido masivo. En otras partes se presenta como vidrio gris claro mucho más poroso similar a una pómez (Figura 4.3).



Figura 4.3: Muestra P4M2 donde los tonos oscuros corresponden a vidrio masivo gris.

Corte transparente P6M1: Bajo el microscopio se observa una predominancia de vidrio (color marrón) en el cual se encuentran cristales bien formados de biotita de aproximadamente 0,5 mm de largo (Figura 4.4 (a)), fragmentos de líticos y fenocristales de cuarzo de 1 mm presente en cantidades menores al 5% con respecto a la masa fundamental de vidrio (Figura 4.4 (b)).

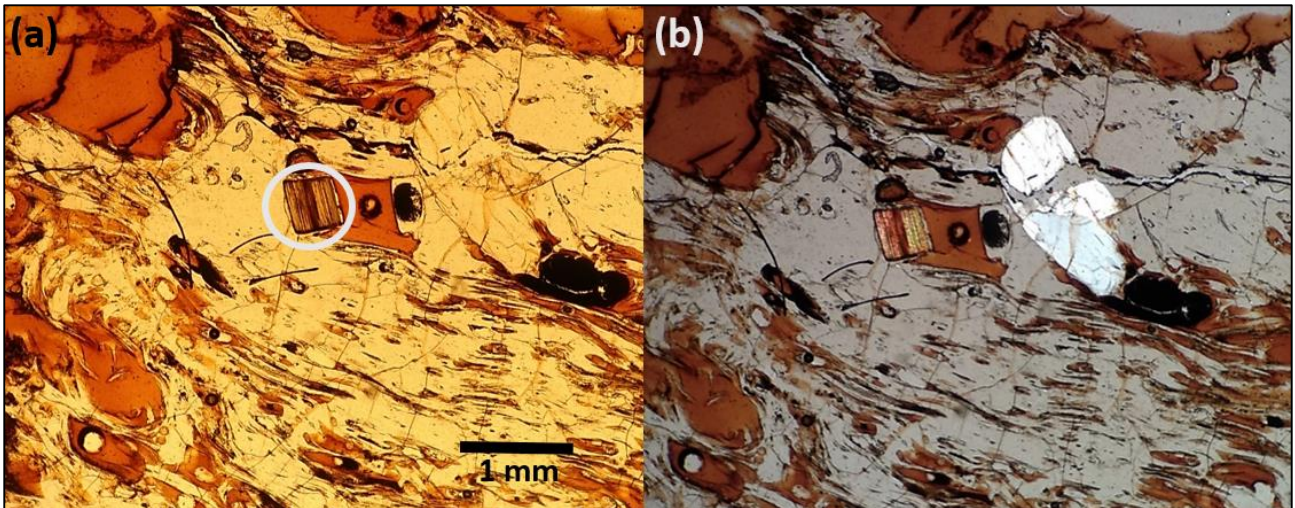


Figura 4.4: Vista en microscopio a luz reflejada y zoom 5x de corte transparente donde (a) cristal de biotita encerrado en blanco y (b) cristal de cuarzo que resalta de color blanco. Imágenes captadas en microscopio de Laboratorio Geología- UCSC.

En la Figura 4.5 el vidrio se encuentra dispuesto en bandas de flujo y existen leves grietas en la muestra pero estas están dispuestas de forma aleatoria y no en capas concéntricas como es de esperarse para una muestra típica de perlita industrial. Dicha ausencia de microgrietas concéntricas en grandes cantidades es desfavorable ya que la muestra no puede alojar una cantidad suficiente de agua secundaria que ayude a la expansión.

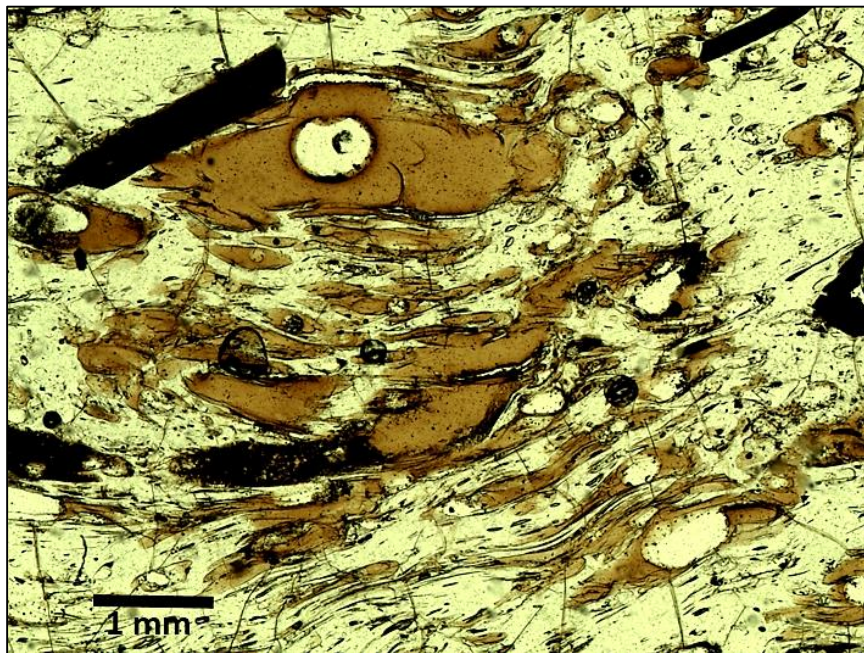


Figura 4.5: Corte transparente a luz reflejada y zoom 5x que exhibe textura en flujo.

4.2 Granulometría

En la izquierda de la Figura 4.6 se observa cómo afecta la granulometría en la cantidad de agua que liberará la muestra, indicando que en granulometrías finas (Bajo el tamiz #60) el contenido de agua es mayor a 1,8% mientras que a granulometrías gruesas (sobre tamiz #60) este porcentaje disminuye cercano al 0,8%. A la derecha de la misma figura se obtiene que los ejemplares P2M2 y P6M1 alcanzan los mayores valores (1.3% promedio). Para todas las muestras la cantidad de agua que liberan es deficiente, ya que teóricamente deberían tener valores sobre el 2%.

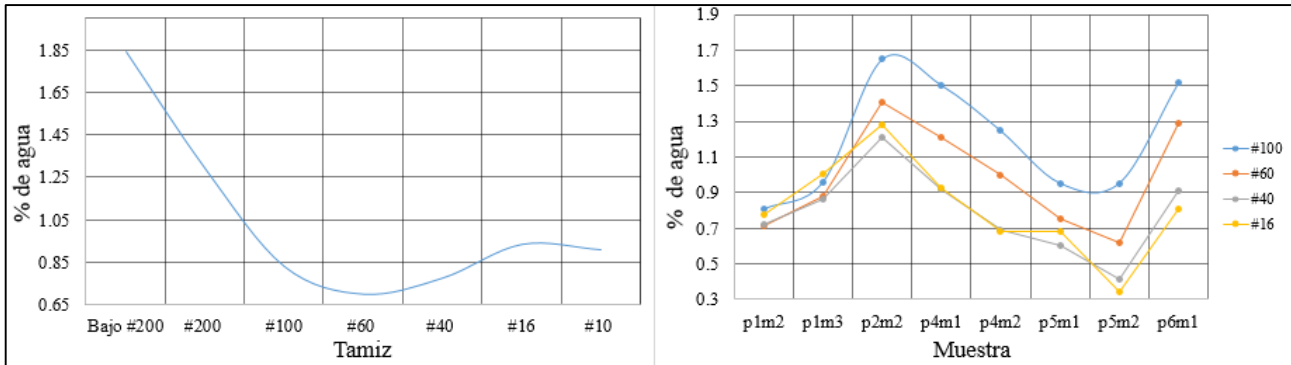


Figura 4.6: Variación del contenido de agua a distintas granulometrías (izquierda) y contenido de agua de todas las muestras analizadas (derecha). Elaboración propia.

En la Figura 4.7 se evidencia la expansión que sufren las muestras expuestas a un tratamiento térmico de 1000°C por 30 minutos, siendo la muestra P4M2 la única que presenta cambios físicos visibles. Estos cambios físicos son: hinchamiento de sus partículas, cambio de color a un tono blanco, reducción de su dureza y granos mucho más porosos que se conjugan en un porcentaje de expansión del 125% en promedio. Para fines de observar si al aumentar la granulometría sobre el tamiz #16 el porcentaje de expansión también aumenta, se realiza una prueba en los tamices #8 y #4, la cual arroja que efectivamente el porcentaje de expansión aumenta hasta aproximadamente un 130% del volumen inicial.

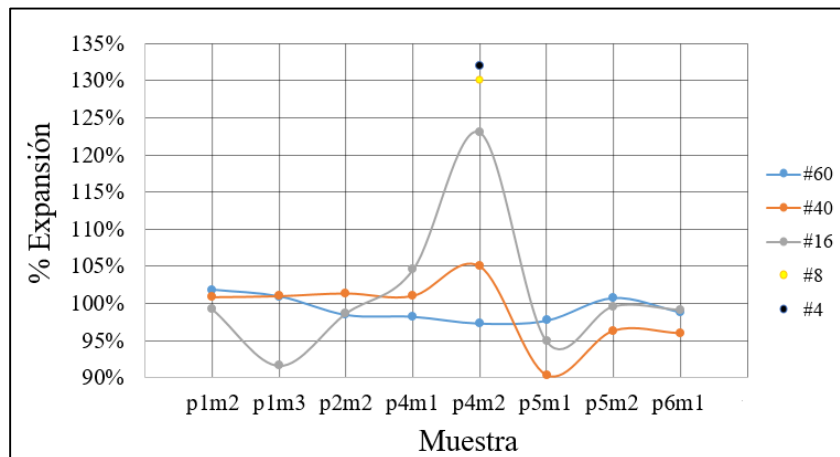


Figura 4.7: Porcentaje de expansión de cada muestra a diversas granulometrías. Elaboración propia.

El fundamento teórico indica que a medida que la muestra tenga mayor cantidad de agua, mayor será su expansión, por lo tanto según la Figura 4.6 las muestras que estén a granulometrías finas deberían expandirse más, sin embargo al contrastar esta información con la Figura 4.7 ocurre absolutamente lo contrario. Las muestras de granulometrías gruesas son quienes más se expanden, por lo tanto no se correlacionan. Esto podría deberse a que las partículas pequeñas absorben una cantidad más alta de humedad ambiental y crean un porcentaje de agua poco confiable. Además la posible causa de que el resto de las muestras no se hayan expandido está más relacionado al tipo de material que a la cantidad de agua propiamente tal.

Por especificaciones técnicas que indican que la granulometría de la perlita expandida no supera el tamiz #4 (Perlite Institute, 2011), la granulometría óptima estaría entre los rangos del tamiz #16 y #4.

4.3 Análisis termogravimétrico

En el termograma de la Figura 4.8 se observa que la muestra pierde un 0.7% de agua aproximadamente, lo que se correlaciona con lo mostrado en la Figura 4.6 para la muestra P4M2 en el tamiz #16. Este porcentaje de agua se pierde mayoritariamente entre los 250 y los 550°C (el 71% del total liberado) y el resto entre los 550 y 750°C (29% del total). Dichos rangos representados por Roulia y otros (2006) indican que la mayoría del agua es de origen secundario y contenida en los poros internos del material, la cual es justamente la que ayuda expandirlo. Sin embargo es un porcentaje demasiado bajo para las muestras típicas de perlita comercial. Una posible causa para la baja cantidad de agua secundaria es que el depósito es demasiado nuevo (0.3 Ma. según López y Munizaga (1983)) y por lo tanto no ha tenido el tiempo suficiente para hidratarse junto con desarrollar una red de microgrietas densa que permitan albergar agua.

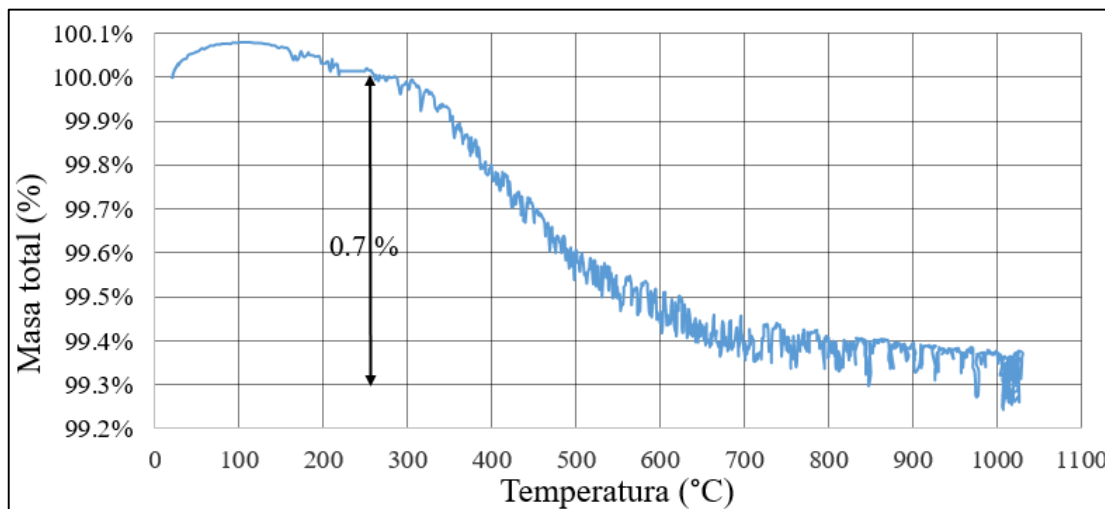


Figura 4.8: Termograma de pérdida de masa para la muestra P4M2 a una granulometría de #16.

4.4 Tratamiento Térmico

De los tratamientos térmicos a la que fue expuesta la muestra P4M1, se extraen una serie de gráficos (Figura 4.9) que ayudan a comprender cuál es el tratamiento óptimo para el material o al menos en qué dirección van. La temperatura óptima a la cual se alcanzan los máximos porcentajes de expansión del material ronda entre los 970 y 1050°C (Figura 4.9 (a)) y alcanza valores de 130%. Cuando se realizan pruebas superiores a los 1000°C, las partículas del material se unen (presentan sinterización), por lo que es necesario disgregarlo para medir su densidad aparente y bajo los 800°C no presenta evidencias de expansión. Esta sinterización puede considerarse favorable desde el punto de vista de fabricar una placa de aislación térmica pero desfavorable si se quiere utilizar el material en su forma disgregada. Si analizamos el tiempo de permanencia en el horno en la Figura 4.9 (b), notamos que a tiempos bajos de exposición al tratamiento térmico, el porcentaje de expansión aumenta. Esto se condice con Roulia y otros (2006) quienes indican que mientras más rápido y brusco sea el cambio térmico, se obtienen mejores valores de expansión.

La granulometría también juega un rol importante, ya se había observado en las pruebas de granulometría, y en la Figura 4.9 (c) se ratifica que la expansión aumenta a medida que aumentamos la granulometría, dicho fenómeno es transversal a cualquier tratamiento térmico. Finalmente del gráfico de la Figura 4.9 (d) se desprende que dejar enfriar las muestras fuera o dentro del horno no tiene mayor significancia. Todos estos resultados son consistentes con lo que han obtenido diversos autores (Gül, 2016; Roulia y otros, 2006; Varuzhanyan y otros, 2006; Arifuxxaman y Sung, 2015; Zähringer y otros, 2001; Aguilar-Garib y otros, 2013). Sin embargo, es necesario mencionar que los porcentajes de expansión obtenidos son extremadamente bajos comparados con otras investigaciones y parámetros industriales.

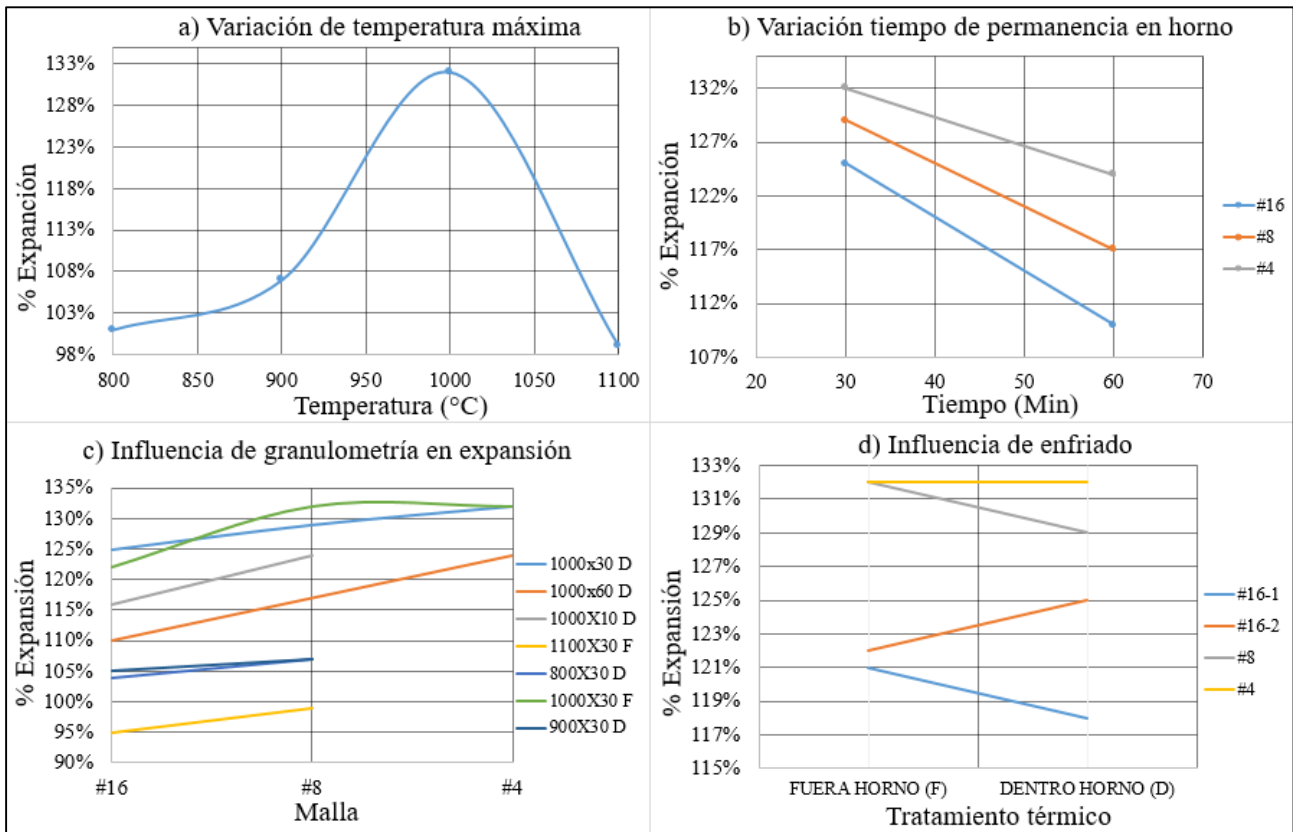


Figura 4.9: Resultados en función de la expansión para los diversos parámetros variados en el tratamiento térmico que indican una mejor expansión a temperaturas cercanas a 1000°C, periodos de exposición cortos y granulometrías gruesas (sobre tamiz #16).

Es necesario mencionar que no se expandió el 100% de los granos tratados de la muestra P4M2 sino que solo el 40% aproximadamente del total. Además se muestran las diferentes apariencias y presentaciones del material en la Figura 4.10 (a) junto con las densidades obtenidas para cada uno en la Tabla 4.1. Los valores de densidad obtenidos permiten dimensionar las grandes diferencias entre la muestra de terreno y su homólogo comercial, dichas densidades están casi 4 veces sobre lo esperado. Con el fin de saber a qué se debe la expansión fraccionada, un trozo de roca ingresado al horno muestra que son solo ciertas partes del material que expanden (Figura 4.10 (b)), correspondiente a la textura de carácter vítreo gris translucido, dejando en evidencia que presenta alta heterogeneidad.

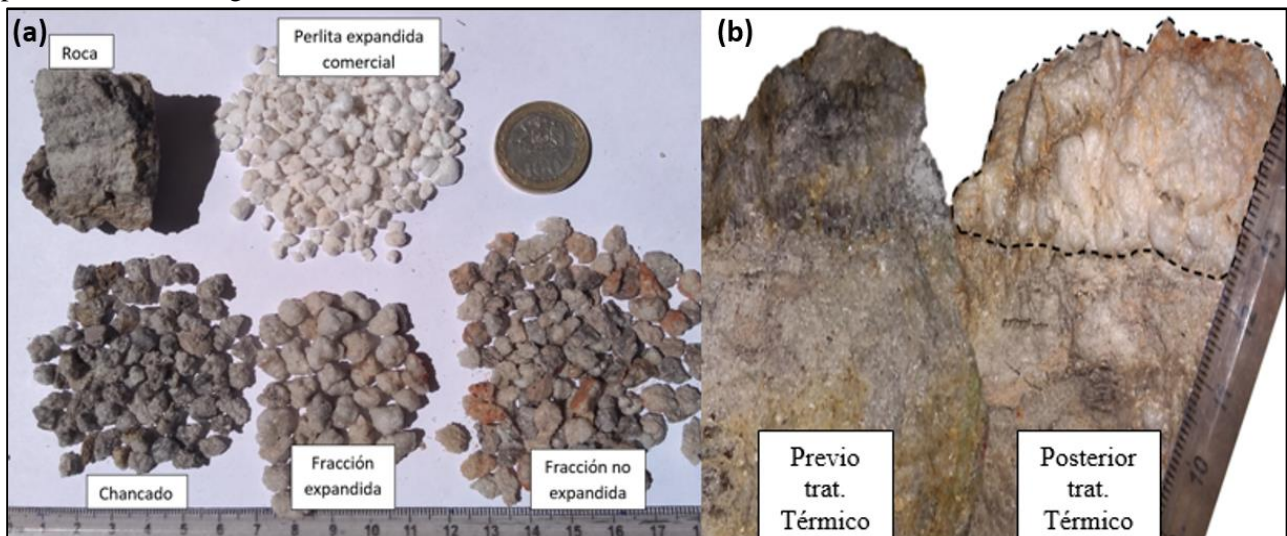


Figura 4.10: (a) distintos estados del material analizado y (b) delimitación en negro de zonas de la roca que sufren expansión.

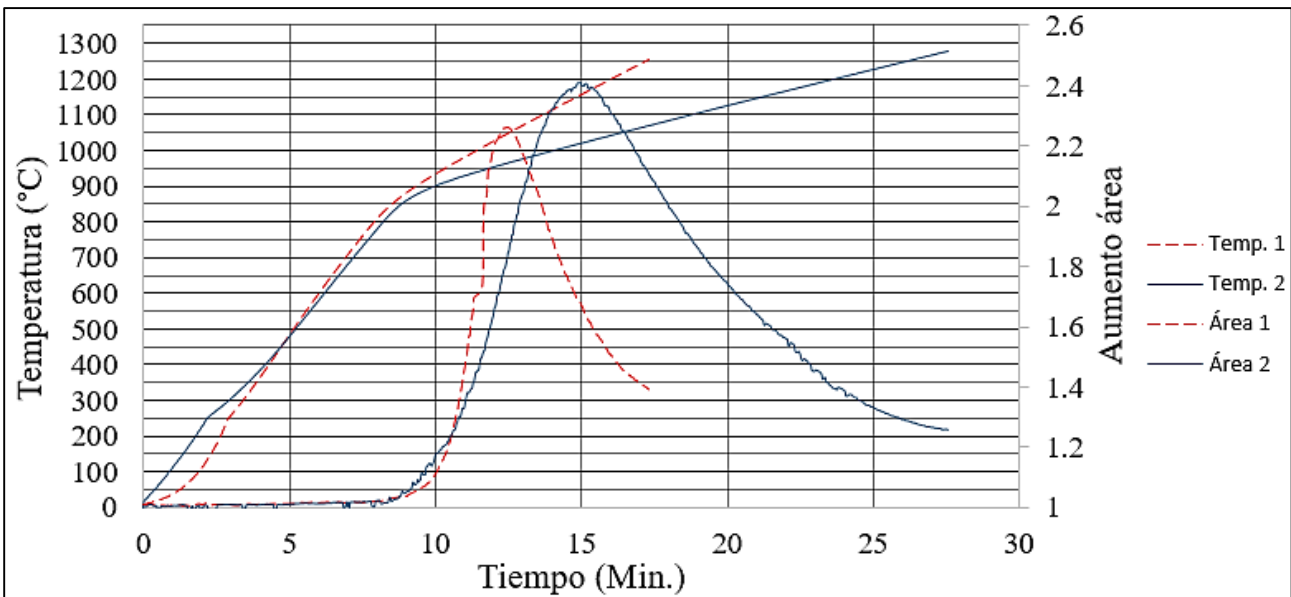
Tabla 4.1: Valores de densidades aparentes obtenidas en laboratorio.

DENSIDAD (g/cm^3)			
Roca	Molida	Expandida	Perlita exp. comercial
1.683	0.778	0.659	0.170

4.5 HMTA

En la Figura 4.11 se resumen los resultados de dos pruebas para la muestra P4M2 realizadas a distintas velocidades de calentamiento que representan el aumento del área del grano a medida que se aumenta la temperatura. Aproximadamente a los 800°C ocurre un aumento repentino del área en ambas muestras lo que se interpreta como la temperatura de transición vítrea (Mosner y otros, 2013) debido a que el material abandona su estado sólido y permite ser deformado por el vapor de agua contenido. Este aumento de área continua hasta un máximo de 2.5 veces el área inicial aproximadamente (250% expansión) a una temperatura de 1100°C en promedio. Después de este peak, el área decrece debido a que el material disminuye considerablemente su viscosidad y pierde su forma original, fundiéndose. No existen diferencias significativas en la razón de aumento del área al calentar los granos a una velocidad lenta (20°C/min) y rápida (40°C/min) desde los 800°C en adelante.

El aumento de 250% en el área representaría el verdadero porcentaje de expansión del material ya que como se indicó anteriormente, la roca es heterogénea con bandas de vidrio con poros, vidrio sólido y vidrio granular poroso, siendo este último el que se expande.


Figura 4.11: Variación del área para la muestra P4M2 en un microscopio de calentamiento. Elaboración propia.

5. CONCLUSIONES

En el presente proyecto de investigación se llevó a cabo la caracterización de 8 muestras de lava riolítica de un total de 13 extraídas de la Laguna del Maule. Las muestras fueron sometidas a diversos análisis físicos y tratamientos térmicos con el fin de cuantificar su expansión a la vez de determinar si efectivamente estas rocas tienen el potencial de ser denominadas perlitas y en consecuencia, utilizarlas como un material de aislación térmica.

En terreno se constata que las rocas que afloran coinciden con las características geológicas requeridas indicadas por Kennedy (1990) además de sus características texturales en muestras de mano. Las rocas de la colada Loma de los Espejos son quienes poseen las mejores características geológicas y geográficas respecto a su ubicación con los otros depósitos.

Si bien el material tamizado en diámetros finos (entre tamiz #200 y #60) presenta mayor cantidad de agua que su fracción gruesa (entre #40 y #4) y consecuentemente, tener mayor potencial de expandirse según Roulia y otros (2006), las pruebas de expansión realizadas determinan que la granulometría que presenta mejor comportamiento expansivo se encuentra entre el tamiz #16 y #4. Además la manera óptima de procesar el material sería a temperaturas cercanas a los 1000°C con un aumento abrupto de la temperatura y tiempos bajos de exposición, por lo tanto la técnica recomendada es concordante con lo expuesto por diversos autores (Gül, 2016; Roulia y otros, 2006; Varuzhanyan y otros, 2006; Arifuxxaman y Sung, 2015; Zähringer y otros, 2001; Aguilar-Garib y otros, 2013)).

Independiente de indicar el tratamiento térmico óptimo para la expansión del material, resulta evidente que los porcentajes obtenidos en laboratorio (250% máximo) son totalmente deficientes en comparación con los valores de densidades a nivel comercial (sobre un 500% como mínimo) junto con valores de densidad casi 4 veces más alto de lo esperado para el material expandido (valor obtenido 0.66 g/cm^3 vs 0.17 g/cm^3 comercial). Por lo tanto, el material de la única muestra que se expandió (P4M2) es perlita pero en una calidad extremadamente baja. Esto posiblemente debido a que la roca no contiene la cantidad suficiente de agua (0.7% H_2O en peso), es altamente heterogénea y no ha desarrollado una red de microfracturas concéntricas como evidencia el corte transparente. El motivo probable, en base a lo indicado por Kennedy (1990), podría ser que el depósito es demasiado joven (300.000 años) y no ha estado expuesto el tiempo suficiente a la intemperización para que las obsidianas sufran microfracturamiento e hidratación hasta los niveles necesarios para expandirse de manera adecuada. Por lo tanto se concluye que el depósito estudiado no cumple las condiciones técnicas necesarias para ser utilizado como aislante térmico.

Como opciones para ampliar la investigación a futuro, se recomienda un mapeo y muestreo mucho más exhaustivo de los afloramientos de obsidianas riolíticas vítreas de la Laguna del Maule, inclusive en profundidad. Como indica el modelo de emplazamiento para domos perlíticos de Whitson (1982), existen diversos rangos de “Perlita” dentro de un mismo flujo volcánico y tal vez en profundidad sí alcance los niveles de hidratación necesarios para expandirse a los estándares requeridos. Junto con esto se puede ampliar el rango de búsqueda a otros afloramientos en el Sur de Chile que cumplan con las características técnicas presentadas en esta investigación.

6. REFERENCIAS

- Aguilar-Garib, J., García-Onofre, V., Ortiz, U., Valdez-Nava, Z.** (2013). "Microwave Energy for Expanding Perlite Ore". *Journal of Applied Research and Technology*, Vol. 11, p. 823-811.
- Arifuzzaman, Md., Sung, Ho.** (2015). "Novel mechanical behavior of perlite/sodium silicate composites". *Construction and Building Materials*, 93: 230-240.
- Callister, Jr.** (2003). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Editorial Reverté S.A.
- Celik, A., Kilic, A., Cakal, G.** (2013). "Expanded perlite aggregate Characterization for use as a lightweight construction raw material". *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 49(2): 689-700.
- Comité de sales mixtas.** (1986). "Posibilidades económicas de la perlita nacional informe final", Servicio Nacional de Geología y Minería, 15314-1, Santiago.
- Corporación de Desarrollo Tecnológico de la Cámara Chilena de la Construcción (CDT).** (2008). "Aislación Térmica Exterior". *Manual de diseño para soluciones en edificaciones*, 1° edición, 139 p. Santiago.
- Denton, J., Tuffen, H., Gilbert, J.** (2012). "Variations in hydration with perlitised rhyolitic lavas- evidence from Torfajökull, Iceland". *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 223-224, p. 64-73. Lancaster.
- Domínguez, J.** (2006). "Modelización de la cinética de solidificación de polímeros". Memoria técnica de Ingeniería técnica industrial química. Universitat de Girona. Departamento de física: 313 pp., Girona.
- Gajardo, A.** (2000). "Rocas y minerales industriales de Chile". *Servicio Nacional de Geología y Minería*, Boletín N° 58, 181 p. Santiago.
- Gajardo, A., Carrasco, R., Mendoza, J.** (2003). "Yacimientos de perlita, Zeolita, Bentonita y Granate para aplicación medioambiental de las regiones VII y VIII, Chile Central-Sur". Congreso Geológico Chileno N° 10, Concepción.
- Giachetti, T., Gonnermann, H., Gardner, J., Shea, T., Gouldstone, A.** (2014). "Discriminating secondary from magmatic water in rhyolitic matrix-glass of volcanic pyroclasts using thermogravimetric analysis". *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 148: 457-476.
- Gül, D.** (2016). "characterization and expansion behaviour of perlite", a thesis for the degree of master of science in materials science an engineering, Izmir Institute of Technology: 81 pp., Izmir.
- Kennedy, B.** (1990). *Surface Mining 2nd Edition*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Jakarta, Indonesia.
- Kotwica, L., Pichór, W., Nocun-Wezelik, W.** (2016). "Study of pozzolanic action of ground waste expanded perlite by means of thermal methods". *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 123, 607-613.
- Lopez, L., Munizaga, F.** (1983). Características Geoquímicas y petrogénesis del complejo volcánico Laguna del Maule, Andes del Sur, 30° L.S. *Rev. Geológica de Chile*, N°19-20, p. 3-24.
- Mosner, P., Vorokhta, M., Koudelka, L.** (2013). "Application of heating microscopy to the study of thermal behavior of ZnO-P2O5-WO3 glasses". *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, N° 112: pp. 659-664. Budapest.
- Perlite Institute, Inc.** (2009). "Why Perlite Works". www.perlite.org.
- Perlite Institute, Inc.** (2011). "Características Físicas de la Perlita". www.perlite.org.

- Rashad, A.** (2016). "A synopsis about perlite as building material- A best practice guide for civil Engineer". *Construction and Building Materials*, Vol. 121: 338-353. Cairo.
- Rodríguez, E., Villegas, E.** (2012). "Caracterización de polímeros aplicando el método termogravimétrico". *Métodos y materiales*, Vol. 2, Noviembre 2012.
- Rotella, M., Simandl, G.** (2010). "Marilla perlite- Volcanic glass occurrence, British Columbia, Canada". *Industrial Minerals with emphasis on Western North America*. P. 263-272.
- Roulia, M., Chassapis, K., Kapoutsis, J., Kamitsos, E., & Savvidis, T.** (2006). "Influence of Thermal Treatment on the Water Release and the Glassy Structure of Perlite". *Journal Materials Science*, 41, 5870-5881.
- Vaou, V., Panias, D.** (2010). "Thermal insulating foamy geopolymers from perlite". *Minerals Engineering*, Vol. 23: 1146-1151. Atenas.
- Varuzhanyan Av., Varuzhanyan, Ar., Varuzhanyan, H.** (2006). "A Mechanism of Perlite Expansion". *Inorganic Materials*, Vol.42, N°9, pp. 1039-1045.
- whitson, D.** (1982). "Geology of the perlite deposit at No Aqua peaks, New Mexico". *Industrial rocks and minerals of the south west*, circular 182, New Mexico bureau of mines and mineral resources, pp. 89-95.
- Zähringer, K., Martin, P., Petit.** (2001). "Numerical Simulation of bubble growth in expanding perlite". *Journal of Materials Science*, 2691-2705. Paris.