

# Microestructura de rocas deformadas y su aplicación para el estudio de la evolución de las condiciones de temperatura en sistemas geotermiales

## Microstructure of deformed rocks and its application to the study of the evolution of temperature conditions in geothermal systems

**Camila Gilberto**<sup>1,2</sup>, alumna de 4º año.  
**Tomás Roquer**<sup>1,2</sup>, alumno de doctorado.  
**Gloria Arancibia**<sup>1,2</sup>, profesora asociada.

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile  
<sup>2</sup>Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), FONDAP - CONICYT

\*Autor para correspondencia: [garancibia@ing.puc.cl](mailto:garancibia@ing.puc.cl)

**Camila Gilberto**<sup>1,2</sup>, 4th year student.  
**Tomás Roquer**<sup>1,2</sup>, graduate student.  
**Gloria Arancibia**<sup>1,2</sup>, associate professor.

<sup>1</sup>Major in Geosciences, Department of Structural and Geotechnical Engineering, School of Engineering, Pontificia Universidad Católica de Chile.  
<sup>2</sup>Center of Excellence in Geothermal Energy of the Andes (CEGA), FONDAP - CONICYT.

\*Corresponding author: [garancibia@ing.puc.cl](mailto:garancibia@ing.puc.cl)

## RESUMEN

La naturaleza de un sistema geotermal fracturado es críticamente controlada por la ocurrencia y actividad de fallas geológicas. En dichos sistemas geotermiales, circulan fluidos a altas temperaturas que al llegar a la superficie se manifiestan como fuentes termales. Esta interacción provoca cambios texturales en las rocas por las que circula el fluido geotermal, que pueden ser estudiados para establecer las condiciones geológicas de la circulación de fluidos y/o la deformación. En el margen andino, bajo el dominio del Sistema de Falla Liquiñe-Ofqui y las Fallas Transversales de los Andes, se localiza el pueblo de Liquiñe, que concentra un gran número de manifestaciones geotermiales dentro de la Zona Volcánica Sur. En este estudio, se hizo una descripción petrográfica de dos muestras de roca del área de Liquiñe (gneiss milonítico y granodiorita), con el objetivo de establecer un rango de temperatura para las diferentes asociaciones minerales y las texturas asociadas a la deformación. Dichos rangos de temperatura se complementaron con datos geocronológicos publicados, para proponer una cronología a estas temperaturas en el área de estudio. Para el gneiss milonítico, la asociación mineral metamórfica es cuarzo-feldespato potásico-biotita-moscovita-plagioclasa. Esta asociación mineral y su deformación frágil-plástica intracrystalina, indican que la deformación dúctil milonítica ocurrió a 300-350°C. Para la granodiorita, la asociación mineral ígnea es: plagioclasa-cuarzo-feldespato potásico-biotita, lo que indica una temperatura de cristalización <750-800°C. La granodiorita presenta fracturas rellenas de epidotoclorita, que indican deformación frágil con temperatura <250-330°C. Los resultados son consistentes con los datos publicados, y sugieren que al menos localmente, la deformación dúctil milonítica del gneiss ocurrió entre el Cretácico Superior-Paleozoico (100-242 Ma); y que la deformación frágil de la granodiorita ocurrió post-Mioceno tardío (<5.7-8.1 Ma). A partir de estos se puede observar que la temperatura de la deformación no es estática, sino que ha evolucionado en el tiempo geológico. Además, en la zona de estudio se tiene evidencia de altas temperaturas desde hace millones de años que son propicias para la geotermia, convirtiendo a Liquiñe en un lugar óptimo para desarrollar la energía geotérmica.

*Palabras clave:* geotermia, rocas, microestructura, deformación.

## ABSTRACT

The nature of a fractured geothermal system is critically controlled by the occurrence and activity of geologic faults. In geothermal systems, fluids circulate at high temperatures and manifest themselves as thermal sources when they reach the surface. This interaction causes textural changes in the rocks where the geothermal fluid circulates, which can be studied to establish the geological conditions of fluid circulation and/or deformation. The town of Liquiñe is situated on the Andean margin, dominated by the Liquiñe-Ofqui Fault System and the Andean Transverse Faults, concentrating a large number of geothermal events within the Southern Volcanic Zone. In this study, a petrographic description of two rock samples (mylonite gneiss and granodiorite) from the Liquiñe area was conducted to establish a temperature range for the different mineral associations and textures related to the deformation. These temperature ranges were complemented with published geochronological data to propose a chronology for these temperatures in the study area. For the mylonite gneiss, the metamorphic mineral association is quartz-potassium feldspar-biotite-muscovite-plagioclase. This mineral association and its intracrystalline brittle-plastic deformation, indicate that the mylonitic ductile deformation occurred at 300-350°C. For granodiorite, the igneous mineral association is plagioclase-quartz-potassium feldspar-biotite, which indicates a crystallization temperature <750-800°C. The granodiorite presents fractures filled with epidote-chlorite, which indicate brittle deformation with temperature <250-330°C. These results are consistent with published data and suggest that, at least locally, the mylonite ductile deformation of gneiss occurred between the Upper Cretaceous-Paleozoic (100-242 Ma); and that the brittle deformation of granodiorite occurred post-Late Miocene (<5.7-8.1 Ma). Thus, it can be observed that the temperature of the deformation is not static but has evolved in geological time. Furthermore, in the study area there is evidence of high temperatures conducive to geothermal phenomena throughout millions of years, making Liquiñe an optimal place to develop geothermal energy.

*Key words:* geothermal energy, rocks, microstructure, deformation.



## 1. INTRODUCCIÓN

Un sistema geotermal es un volumen de la corteza terrestre que presenta rocas permeables por donde circulan fluidos a altas temperaturas (e.g. Stimac et al., 2015). La ocurrencia de rocas permeables en la corteza terrestre es controlada críticamente por la existencia y actividad de **FALLAS GEOLÓGICAS** (e.g. Faulkner et al., 2010).

De acuerdo a su nivel estructural, las fallas geológicas pueden presentarse de manera dúctil, frágil o frágil-dúctil (Scholz, 1988). En niveles estructurales profundos (ca. >20 km de profundidad), domina la falla dúctil, que se caracteriza por mantener la cohesión de la roca deformada. En cambio, en niveles estructurales someros (ca. <10 km de profundidad), domina la falla frágil, que implica la pérdida de cohesión de la roca deformada. En profundidades cercanas a la transición frágil-dúctil (ca. 10-20 km de profundidad) se puede dar un comportamiento dual, que implica falla con o sin pérdida de cohesión interna, dependiendo de la escala de observación.

Los procesos de deformación dúctil o frágil se evidencian a través de la **TEXTURA** de la roca deformada. Por ejemplo, la deformación dúctil se puede evidenciar en una textura **MILONÍTICA**; y la deformación frágil, a través de minerales que precipitan en fracturas rellenas o **VETILLAS**.

El objetivo de esta investigación es establecer las condiciones de temperatura en las cuales ocurrió la deformación dúctil y frágil mediante el estudio petrográfico de **ROCAS EXHUMADAS** en la zona de Liquiñe (sur de Chile, 39°S). Las condiciones de temperatura se correlacionaron a diferentes estudios estructurales y geocronológicos, con el objetivo de proponer una cronología de la deformación en el área de estudio.

### 1.1. Marco geológico

La tectónica del margen andino está controlada por la subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana, generando sismicidad y volcanismo activo. La tectónica de la Zona Volcánica Sur (33-46°S) está dominada por el Sistema de Falla Liquiñe Ofqui (SFLO) y las Fallas Transversales de Los Andes (FTA) (e.g. Cembrano y Lara, 2009) (Figura 1a).

El SFLO es un sistema de falla activo de 1200 km de longitud, y está compuesto de fallas maestras NNE y fallas secundarias NE-ESE que registran deformación frágil principalmente DEXTRAL post-Cretácico superior. El SFLO también registra cinemática SINISTRAL antigua, asociada a deformación dúctil pre-Cretácico superior y post-Paleozoico (e.g. Cembrano et al., 2000). Dado que estas fallas están favorablemente orientadas para la falla frágil en el régimen de deformación de largo plazo, estas fallas propenderían la circulación de fluidos geotermales

## 1. INTRODUCTION

A geothermal system is a volume of the Earth's crust with permeable rocks through which fluids circulate at high temperatures (e.g. Stimac et al., 2015). The occurrence of these permeable rocks is critically controlled by the existence and activity of **GEOLOGICAL FAULTS** (e.g. Faulkner et al., 2010).

According to their structural level, geological faults can be ductile, brittle or brittle-ductile (Scholz, 1988). At deep structural levels (ca. >20 km deep), the ductile fault dominates, characterized by maintaining the cohesion of the deformed rock. On the other hand, on shallow structural levels (ca. <10 km deep), the brittle fault dominates, which implies the loss of cohesion of the deformed rock. At depths close to the brittle-ductile transition (ca. 10-20 km deep) a dual behavior can occur, which implies a fault with or without loss of internal cohesion, depending on the scale of observation.

The processes of ductile or brittle deformation are made evident through the **TEXTURE** of the deformed rock. For example, ductile deformation can be seen as a **MYLONITIC** texture; and brittle deformation, through minerals that precipitate into filled fractures or **VEINS**.

The aim of this research is to establish the temperature conditions under which the ductile and brittle deformation occurred through the petrographic study of **EXHUMED ROCKS** in the Liquiñe area (southern Chile, 39°S). Temperature conditions were correlated with different structural and geochronological studies in order to propose a chronology of the deformation in the study area.

### 1.1. Geological framework

The tectonics of the Andean margin are controlled by the subduction of the Nazca plate under the South American plate, generating seismicity and active volcanism. The tectonics of the Southern Volcanic Zone (33-46°S) are dominated by the Liquiñe Ofqui Fault System (LOFS) and the Andean Transverse Faults (ATF) (e.g. Cembrano and Lara, 2009) (Figure 1a).

The LOFS is a 1,200 km long active fault system and is composed of NNE master faults and NE-ESE secondary faults that record brittle deformation, mainly DEXTRAL post-Upper Cretaceous. The LOFS also registers old SINISTRAL kinematics, associated with pre-Upper Cretaceous and post-Paleozoic ductile deformation (e.g. Cembrano et al., 2000). Since these faults are favorably oriented for brittle failure in the long-term deformation regime, they would favor the circulation of geothermal fluids (e.g. Perez-Flores et al., 2016).

The ATF include a group of NW-WNW faults, which have been interpreted as pre-Andean faults reactivated with

(e.g. Pérez-Flores et al., 2016).

Las FTA incluyen un grupo de fallas NW-WNW, que han sido interpretadas como fallas previas a la formación de Los Andes reactivadas como fallas de cinemática sinistral-inversa. Debido a que estas fallas no están óptimamente orientadas para favorecer la circulación de fluidos geotermales en el régimen de deformación de largo plazo, al contrario del SFLO, estas fallas promoverían la acumulación de fluidos geotermales (e.g. Pérez-Flores et al., 2016).

El área de estudio está ubicada en Liquiñe (39°S), donde interactúan espacialmente el SFLO y las FTA, y corresponde a una zona con una gran cantidad de manifestaciones termales naturales. En Liquiñe, afloran **ROCAS METAMÓRFICAS** del Paleozoico y **ROCAS ÍGNEAS** del Jurásico, Cretácico y Mioceno (Figura 1b).

## 2. METODOLOGÍA

La metodología consistió en un trabajo de campo de 11 días y el trabajo de laboratorio posterior. En el trabajo de campo, se tomaron muestras de las unidades geológicas principales, y de estas se seleccionaron dos muestras representativas: una orientada (LQ0202, roca metamórfica) y una no orientada (LQ0405Z, roca ígnea intrusiva) (Figura 1b). Estas dos muestras han sido seleccionadas para este estudio debido a que pertenecen a dos unidades de rocas distintas que se ponen en contacto en la traza principal de SFLO, y que por estudios previos en la zona se conoce sus

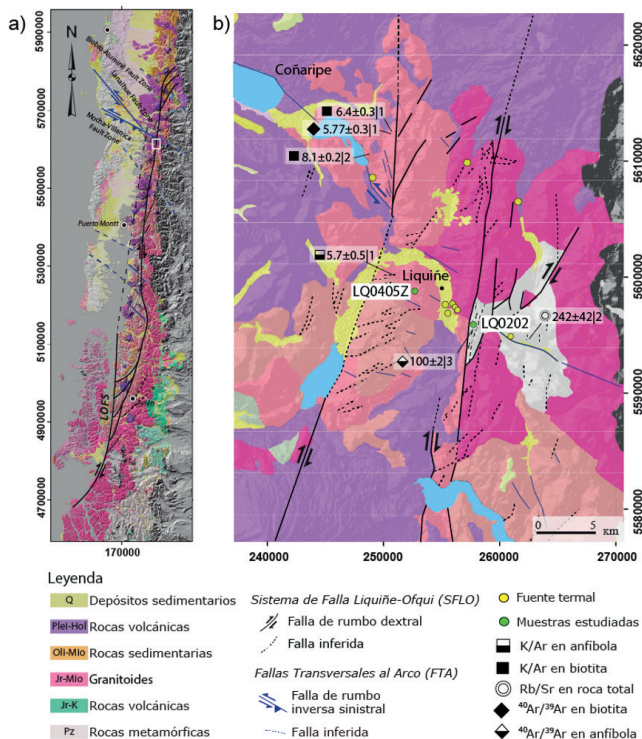
sinistral-reverse kinematics. Unlike LOFS, these faults are not optimally oriented to favor the circulation of geothermal fluids in the long-term deformation regime, therefore they would promote the accumulation of geothermal fluids (e.g. Perez-Flores et al., 2016).

The study area is located in Liquiñe (39°S), where LOFS and ATF interact spatially, and corresponds to an area with a large number of natural thermal manifestations. In Liquiñe, Palaeozoic **METAMORPHIC ROCKS** and Jurassic, Cretaceous and Miocene **IGNEOUS ROCKS** emerge (Figure 1b).

## 2. METHODOLOGY

The methodology consisted of 11 days of field work and subsequent laboratory work. During field work, samples were taken from the main geological units, and two representative samples were selected: one oriented (LQ0202, metamorphic rock) and one non-oriented (LQ0405Z, intrusive igneous rock) (Figure 1b). These two samples were selected because they belong to two different units of rocks that come into contact in the main LOFS trace, and because their respective ages are known from previous studies in the area (Munizaga et al., 1988).

The laboratory work consisted of a transparent cut petrographic description, in which the minerals within the samples were identified by their optical properties using a LEICA DM750P polarized optical transmitted light microscope at the Structural and Geotechnical Engineering



**Figura 1.** a) Contexto geológico SFLO y FTA. b) Fallas y rocas en la zona de Liquiñe, ubicación de muestras. Modificado de Sánchez et al., 2013. Edades radiométricas de: (1) Lara y Moreno, 2004. (2) Munizaga et al. 1988. (3) Cembrano et al. 2000.

**Figure 1.** a) Geological context of LOFS and ATF. b) Faults and rocks from the Liquiñe area and sampling location. Modified from Sánchez et al., 2013. Radiometric ages taken from (1) Lara y Moreno, 2004. (2) Munizaga et al. 1988. (3) Cembrano et al. 2000.

respectivas edades (Munizaga et al., 1988).

El trabajo de laboratorio consistió en una descripción petrográfica de corte transparente, en la que se reconocieron los minerales de las muestras gracias a sus propiedades ópticas. Esto se realizó con un microscopio óptico polarizado de luz transmitida LEICA DM750P, perteneciente al Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica.

Se realizó un fotomosaico de cada corte (150 fotos por muestra, con un objetivo de 2.5x y un ocular de 10x). El montaje del fotomosaico se realizó utilizando los programas Microsoft ICE y Photoshop®. Esta imagen se utilizó como referencia espacial de la descripción mineralógica y de las observaciones de microestructura. El análisis consistió en una descripción en la que se determinó: 1) las distintas asociaciones mineralógicas y 2) la textura diagnóstica de deformación intracristalina plástica y/o frágil. Para este trabajo, las abreviaciones minerales utilizadas en las figuras corresponden a las definidas por Whitney y Evans (2010).

### 3. RESULTADOS

Los minerales encontrados, sus características básicas y distintivas, además de otros datos relevantes para una interpretación de ambas muestras son los siguientes:

#### 3.1. Muestra orientada LQ0202: Gneiss Milonítico

Gneiss milonítico (Figura 2) de **TEXTURA GRANOLEPIDOBLÁSTICA** (Figura 2c, foto I). Esta muestra es clasificada como gneiss debido a su estructura bandeada, formada por la segregación de minerales en diferentes bandas (e.g. Bucher y Grapes, 2011). La textura milonítica se evidencia en 2 **FOLIACIONES** de orientación N02E, distinguidas de acuerdo con su mineralogía: (1) biotita + muscovita y (2) cuarzo + feldespato potásico + plagioclasa. La descripción de las bandas es la siguiente:

(1) Las bandas biotita + muscovita tienen un espesor que varía entre 1 y 4 mm. El eje largo de estos minerales está orientado con un **AZIMUTH** N04E. La relación de aspecto (eje largo/eje corto) de las micas varía entre 2 y 6. Además, estas bandas presentan localmente peces de mica del grupo 2 (Passchier y Trouw, 2005) con una relación de aspecto representativa de 5.2 (Figura 2c, foto V), indicando un sentido de movimiento sinistral.

(2) Las bandas de cuarzo + feldespato potásico + plagioclasa tienen un espesor que varía entre 2.5 - 6 mm. El eje largo de estos minerales está orientado con un azimuth N02E. La relación de aspecto de estos minerales varía entre 2 y 5. Los cristales de cuarzo presentan extinción ondulosa y fracturas internas. Asimismo, los cristales de plagioclasa presentan fracturas internas (Figura 2c, fotos II y III). Además, localmente existen ribbons de cuarzo que

Department.

A photomosaic was made of each cut including 150 photos per sample, with a 2.5X objective and a 10X eyepiece. The photomosaic assembly was achieved using Microsoft ICE and Adobe Photoshop® software. This image was used as a spatial reference for the mineralogical description and microstructure observations. The analysis consisted of a description that determined: 1) the different mineralogical associations, and 2) the diagnostic texture of plastic and/or brittle intracrystalline deformation. For this work, mineral abbreviations used in the figures correspond to those defined by Whitney and Evans (2010).

### 3. RESULTS

Below we report the minerals found, their basic and distinctive characteristics, as well as other relevant data for an interpretation of both samples.

#### 3.1. Oriented sample LQ0202: Mylonite Gneiss

Mylonite Gneiss (Figure 2) of **GRANO-LEPIDOBLASTIC TEXTURE** (Figure 2c, photo I). This sample is classified as gneiss due to its banded structure, formed by the segregation of minerals into different bands (e.g. Bucher and Grapes, 2011). The mylonite texture is evident in 2 N02E oriented **FOLIATIONS**, distinguished according to their mineralogy: (1) biotite + muscovite and (2) quartz + potassium feldspar + plagioclase. These bands were characterized as follows:

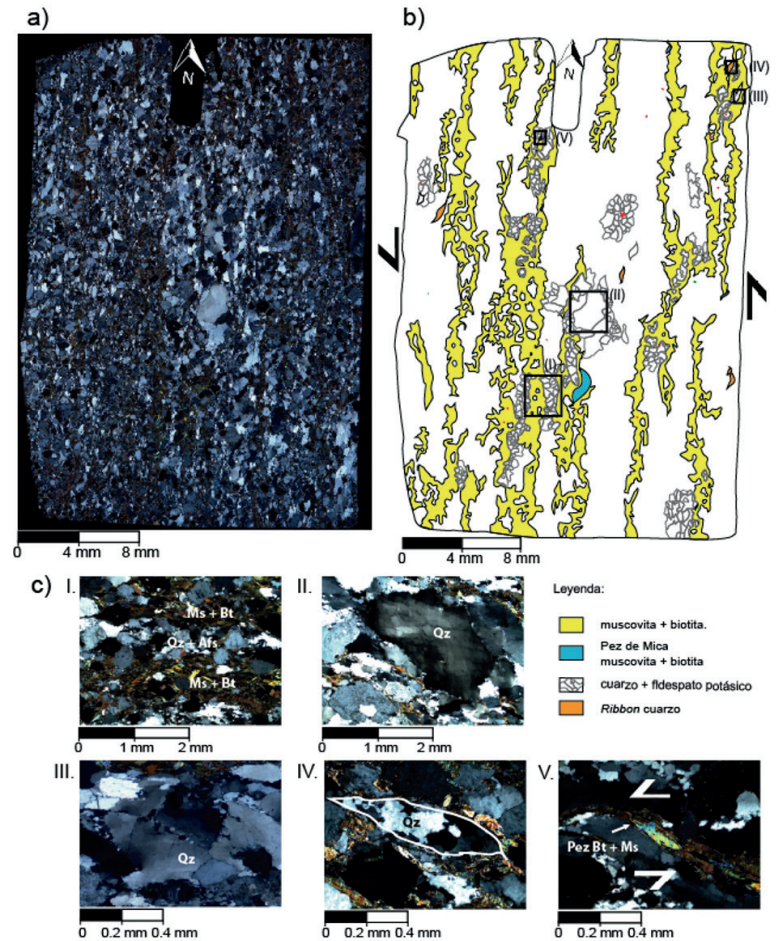
(1) The biotite + muscovite bands have a thickness that varies between 1 and 4 mm. The long axis of these minerals is oriented with a N04E **AZIMUTH**. The aspect ratio (long axis/short axis) of the mica varies between 2 and 6. Locally, these bands also present group 2 mica fish (Passchier and Trouw, 2005) with a representative aspect ratio of 5.2 (Figure 2c, photo V), indicating a sinistral movement direction.

(2) The quartz + potassium feldspar + plagioclase bands have a thickness varying from 2.5 to 6 mm. The long axis of these minerals is oriented with a N02E azimuth. The aspect ratio of these minerals varies between 2 and 5. Quartz crystals show wavy extinction and internal fractures. Plagioclase crystals also present internal fractures (Figure 2c, photos II and III). In addition, there are local quartz ribbons that correspond to elongated bodies composed of quartz sub-grains (Figure 2c, photo IV).

As an accessory, the sample contains crystals of zircon, apatite and a low percentage (<5%) of an unknown opaque mineral. As an alteration, the rock contains sericite, a mica aggregate that slightly alters the potassium feldspar and plagioclase crystals.



**Figura 2.** Muestra LQ0202. a) Foto mosaico del corte, observación a nícoles cruzados. b) Mapa microestructural digitalizado. c) Texturas y estructuras presentes, observación a nícoles cruzados. I) Textura granolepidoblástica. II) Qz con extinción ondulante. III) Qz con extinción ondulante y fracturado. IV) Ribbon de Qz V) Pez de mica Ms + Bt.



**Figure 2.** LQ0202 sample. a) Photomosaic of the cut observed under crossed nicols. b) Digitized microstructural map. c) Structures and textures of the sample observed under crossed nicols. I) Grano-lepidoblastic texture. II) Quartz with wavy extinction. III) Fractured quartz with wavy extinction. IV) Quartz ribbon V) Mica fish Ms + Bt.

corresponden a cuerpos alargados compuestos por sub-granos de cuarzo (Figura 2c, foto IV).

De manera accesoria, la muestra contiene cristales de circón, apatito y un mineral opaco desconocido en un bajo porcentaje (<5%). Como alteración, la roca presenta sericita, un agregado de micas que altera levemente los cristales de feldespato potásico y plagioclasa.

### 3.2. Muestra no orientada LQ0405Z: Granodiorita

Granodiorita (Figura 3a) con textura **HOLOCRISTALINA, FANERÍTICA**, inequigranular, de grano fino a medio. Esta muestra es clasificada como granodiorita según la clasificación Streckeisen para rocas ígneas intrusivas debido a su porcentaje modal de cristales de plagioclasa (45%), cuarzo (35%) y feldespato potásico (10%) (Streckeisen, 1976), junto a biotita (4.5%) y un mineral opaco (5.5%).

Además, esta muestra presenta vetillas sub-paralelas de epidota-clorita, que tienen un espesor que varía entre 0.03-0.66 mm (Figura 3b, foto I). Localmente entre las vetillas ocurren cristales de plagioclasa de menor tamaño, que posiblemente corresponden a un halo de alteración (Figura 3b, foto II).

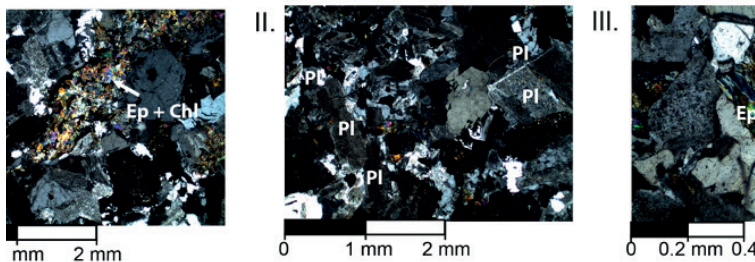
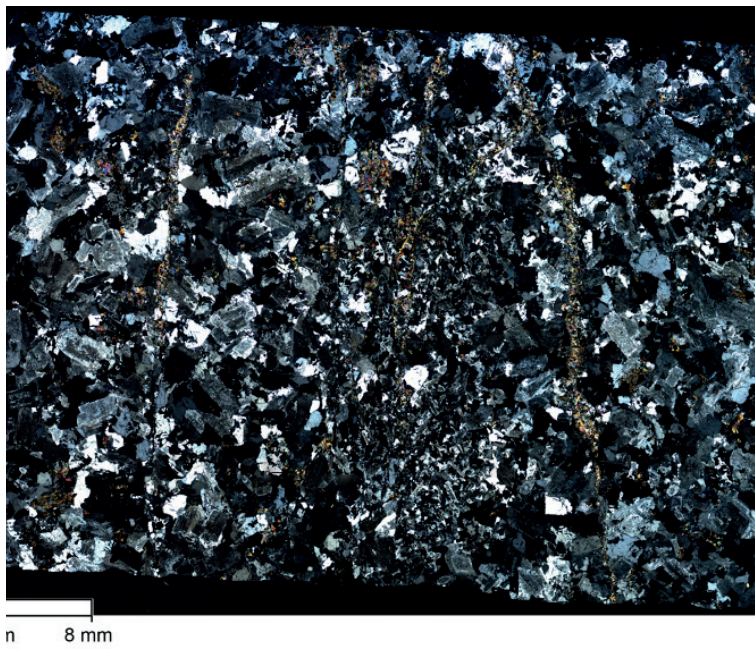
### 3.2. Non oriented sample LQ0405Z: Granodiorite

Granodiorite (Figure 3a) with **HOLOCRYSTALLINE, PHANERITIC**, uneven fine to medium granular texture. This sample is classified as granodiorite according to the Streckeisen classification for intrusive igneous rocks due to its modal percentage of crystals of plagioclase (45%), quartz (35%), and potassium feldspar (10%) (Streckeisen, 1976), together with biotite (4.5%) and an opaque mineral (5.5%).

In addition, this sample presents sub-parallel epidote-chlorite veins with a thickness that varies between 0.03 and 0.66 mm (Figure 3b, photo I). Between the veins there are local crystals of plagioclase of smaller size, possibly corresponding to an alteration halo (Figure 3b, photo II).

Thus, the igneous mineral association is plagioclase-quartz-potassium feldspar-biotite; and the secondary mineralogy is epidote-chlorite.

As an accessory, the rock contains crystals of zircon, apatite and Fe-Ti oxides. As an alteration, the sample contains chlorite-epidote replacing biotite crystals (Figure 3b, photo III) and sericite replacing potassium feldspar and plagioclase crystals.



**Figura 3.** Muestra LQ0405Z, observación a nícoles cruzados. a) Fotomosaico del corte. b) Texturas y estructuras presentes. I) Vetilla de Ep + Chl. II) Cambio en el tamaño de cristales de Plg. III) Cristal de biotita alterado y reemplazado a Chl + Ep.

**Figure 3.** LQ0405Z sample observed under crossed nicols. a) Photomosaic of the cut. b) Structures and textures of the sample. I) Ep + Chl vein. II) Change in size of Plg crystals. III) Altered biotite crystal replaced by Chl + Ep.

De este modo, la asociación mineral ígnea es plagioclasa-cuarzo-feldespato potásico-biotita; y la mineralogía secundaria es epidota-clorita.

De manera accesoria presenta cristales de circón, apatito y óxidos de Fe-Ti. Como alteración, la roca presenta clorita-epidota reemplazando cristales de biotita (Figura 3b, foto III) y sericita reemplazando cristales de feldespato potásico y plagioclasa.

#### 4. DISCUSIÓN

En esta discusión se tratarán las asociaciones minerales y las texturas de cada una de las muestras, infiriendo un rango de temperatura, además de discutir su significado a la luz de trabajos geocronológicos publicados anteriormente en el área de estudio.

Para el caso del gneiss milonítico, la mineralogía metamórfica está asociada a deformación dúctil milonítica y corresponde a cuarzo-feldespato potásico-biotita-muscovita-plagioclasa. Los cristales de cuarzo tienen extinción ondulosa y bordes serrados (Figura 2c, foto II), lo que es consistente con un proceso de deformación plástica (Passchier y Trouw, 2005). La muestra posee peces de mica que corresponden al grupo 2 (Figura

#### 4. DISCUSSION

In this study we determined mineral associations and textures of each sample under study to infer a temperature range, and here we will discuss the implications of our results in light of previously published geochronological work in the area of study.

With regard to the mylonite gneiss, the metamorphic mineralogy is associated with mylonitic ductile deformation and corresponds to quartz-potassium feldspar-biotite-muscovite-plagioclase. Quartz crystals have wavy extinction and serrated edges (Figure 2c, photo II), which is consistent with a plastic deformation process (Passchier and Trouw, 2005). The sample has mica fishes that correspond to group 2 (Figure 2c, photo V), indicating sinistral movement direction (Passchier and Trouw, 2005). This kinematics does not match the current movement of LOFS but would rather be related to the kinematic behavior of LOFS between the upper Cretaceous and Paleozoic (100-242 Ma) (Cembrano et al., 2000). Additionally, internal fractures in plagioclase crystals are evidence of brittle deformation for this mineral. These diagnostic microstructural characteristics indicate brittle-plastic intracrystalline deformation, suggesting a deformation temperature range between 300-350°C (Passchier and Trouw, 2005). This value is compatible with



2c, foto V) y que indican un sentido de movimiento sinistral (Passchier y Trouw, 2005). Esta cinemática no concuerda con el movimiento actual de SFLO, sino que se relacionaría al comportamiento cinemático del SFLO entre el Cretácico superior y el Paleozoico (100-242 Ma) (Cembrano et al., 2000). Por otra parte, fracturas internas en cristales de plagioclasa evidencian deformación frágil para este mineral. Estas características microestructurales diagnósticas indican deformación intracristalina frágil-plástica, que sugiere un rango de temperatura para la deformación entre 300-350°C (Passchier y Trouw, 2005). Este valor es compatible con la mineralogía metamórfica, de facies esquistos verde; y es consistente con observaciones microestructurales hechas por Cembrano et al. (2000) en el mismo afloramiento.

Por otro lado, edades Rb/Sr en roca total (temperatura de cierre ca. 650°C) indican edad Paleozoica ( $242 \pm 42$  Ma) para el gneiss del área de estudio (Munizaga et al., 1988) (Figura 1b). A su vez, una edad Ar/Ar en hornblenda (temperatura de cierre ca. 500°C) de un **DIQUE** no deformado, que corta los gneiss miloníticos, indica emplazamiento post-Cretácico superior ( $<100 \pm 2$  Ma) (Cembrano et al., 2000) (Figura 1b). En ese sentido, los resultados de este estudio son consistentes con lo mostrado en otros trabajos (e.g. Cembrano et al., 2000), es decir, la deformación dúctil habría ocurrido pre-Cretácico superior y post-Paleozoico (100-242 Ma).

Para el caso de la granodiorita, la mineralogía ígnea corresponde a plagioclasa-cuarzo-feldespato potásico-biotita, lo que indica cristalización a temperatura  $<750-800^\circ\text{C}$  (e.g. Tarbuck y Lutgens, 2005). La deformación frágil se evidencia en la asociación mineral secundaria, que ocurre en vetillas sub-paralelas de epidota-clorita (Figura 3b, fotos I y III). Dicha asociación mineral sugiere un rango de temperaturas de estabilidad  $<250-330^\circ\text{C}$  (Hezarkhani y Williams-Jones, 1998).

Estudios geocronológicos de K/Ar y Ar/Ar en biotita y anfíbol (temperatura de cierre ca.  $250-300^\circ\text{C}$  y  $500-550^\circ\text{C}$  respectivamente) entregan un rango de edad entre  $5.7 \pm 0.5$  y  $8.1 \pm 0.2$  Ma (e.g. Lara y Moreno, 2004; Ganguly y Tirone, 2009; Munizaga et al., 1988) (Figura 1b), lo que sugiere un emplazamiento post-Mioceno tardío ( $<5.7-8.1$  Ma.). Esta edad, sumado a la temperatura de estabilidad de la asociación epidota-clorita, es consistente con la idea de que la deformación frágil tiene una edad post-Mioceno tardío ( $<5.7-8.1$  Ma) (e.g. Cembrano et al., 2000).

#### 4. CONCLUSIONES

Las características texturales y asociaciones mineralógicas de este estudio, en conjunto con los datos geocronológicos publicados, permiten concluir lo siguiente:

1) El gneiss milonítico tiene la siguiente mineralogía

the metamorphic mineralogy of green schist facies and is consistent with microstructural observations made by Cembrano et al. (2000) in the same outcrop.

In the same study area, Rb/Sr dating of total rock (closure temperature ca.  $650^\circ\text{C}$ ) indicates Paleozoic age ( $242 \pm 42$  Ma) for the gneiss (Munizaga et al., 1988) (Figure 1b). Meanwhile, an Ar/Ar dating in hornblende (closing temperature ca.  $500^\circ\text{C}$ ) of an undeformed **DIKE** that cuts the mylonite gneiss, indicates superior post-Cretaceous location ( $<100 \pm 2$  Ma) (Cembrano et al., 2000) (Figure 1b). In that sense, the results of this study are consistent with previous reports (e.g. Cembrano et al., 2000), i.e., the ductile deformation would have occurred pre-Upper Cretaceous and post-Palaeozoic (100-242 Ma).

As for granodiorite, the igneous mineralogy corresponds to plagioclase-quartz-potassium feldspar-biotite, which indicates crystallization at temperatures  $<750-800^\circ\text{C}$  (e.g. Tarbuck and Lutgens, 2005). Brittle deformation is evident in the secondary mineral association, which occurs in epidote-chlorite sub-parallel veins (Figure 3b, photos I and III). This mineral association suggests a temperature range of stability  $<250-330^\circ\text{C}$  (Hezarkhani and Williams-Jones, 1998).

Geochronological studies of K/Ar and Ar/Ar in biotite and amphibole (closure temperature ca.  $250-300^\circ\text{C}$  and  $500-550^\circ\text{C}$ , respectively) report an age range between  $5.7 \pm 0.5$  and  $8.1 \pm 0.2$  Ma (Lara and Moreno, 2004; Ganguly and Tirone, 2009; Munizaga et al., 1988) (Figure 1b), suggesting a late post-Miocene site ( $<5.7-8.1$  Ma.). This age, together with the stability temperature of the epidote-chlorite association, is consistent with the notion that brittle deformation has a late post-Miocene age ( $<5.7-8.1$  Ma) (Cembrano et al., 2000).

#### CONCLUSIONS

The textural characteristics and mineralogical associations presented in this study, together with previous reports of geochronological data, allow us to conclude the following:

1) The mylonite gneiss has the following metamorphic mineralogy: quartz-potassium feldspar-biotite-muscovite-plagioclase. The mylonitic ductile deformation occurred in green schist facies at a temperature between  $300^\circ\text{C}$  and  $350^\circ\text{C}$ , with sinistral kinematics. The age of the ductile deformation with sinistral kinematics would be pre-Upper Cretaceous and post-Paleozoic (100-242 Ma).

2) Granodiorite has an igneous mineralogy consisting of plagioclase-quartz-potassium feldspar-biotite, which indicates a crystallization temperature  $<750-800^\circ\text{C}$ . The secondary fracture-filling mineralogy corresponds to epidote-chlorite, indicating that brittle deformation occurred at  $<250-330^\circ\text{C}$ . This brittle deformation would have occurred post-Late Miocene ( $<5.7-8.1$  Ma).



metamórfica: cuarzo-feldespato potásico-biotita-muscovita-plagioclasa. La deformación dúctil milonítica ocurrió en facies esquistos verdes a una temperatura entre 300-350°C, con cinemática sinistral. La edad de la deformación dúctil, de cinemática sinistral, habría sido pre-Cretácico Superior y post-Paleozoico (100-242 Ma).

2) La granodiorita tiene una mineralogía ígnea correspondiente a: plagioclasa-cuarzo-feldespato potásico-biotita, lo que indica una temperatura de cristalización <750-800°C. La mineralogía secundaria que rellena fracturas corresponde a epidota-clorita lo que indica que la deformación frágil ocurrió a <250-330°C. Esta deformación frágil habría ocurrido post-Mioceno tardío (<5.7-8.1 Ma).

3) De los datos obtenidos de temperatura se observa una variación importante en la temperatura bajo la que se deformaron las rocas estudiadas. Al correlacionar la temperatura con la edad de las rocas, los resultados sugieren que las temperaturas de equilibrio para las diferentes asociaciones minerales no han sido constantes a una escala geológica y existen evidencias que determinan que la zona de estudio tiene un gran potencial en el desarrollo de la geotermia desde hace millones de años.

### Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el proyecto FONDECYT 1180167, el Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (FONDAP-CONICYT 150900137) y el proyecto puente 2017 N°3514-107 de la Vicerrectoría de Investigación de la Pontificia Universidad Católica de Chile. TR agradece financiamiento de la Beca CONICYT de doctorado nacional 21171178.

3) A significant variation is observed in the temperature under which the examined rocks were deformed. By correlating these temperatures with the age of the rocks, the results suggest that equilibrium temperatures for the different mineral associations have not been constant at a geological scale and show evidence that this area has great potential in the development of geothermal energy since millions of years ago.

### Acknowledgements

This work was funded by FONDECYT 1180167 grant, the Center of Excellence in Andean Geothermal Energy (FONDAP-CONICYT 150900137), and the Proyecto Puente 2017 N°3514-107 from the Vice-Rectoría of Research at Pontificia Universidad Católica de Chile. TR is grateful for funding from the CONICYT Scholarship for National Doctorates 21171178.

### GLOSARIO

**AZIMUTH:** Ángulo que forma la proyección horizontal de un objeto lineal con respecto al norte.

**DEXTRAL:** Cinemática de una falla en el plano horizontal, que indica que un bloque de falla se mueve hacia la derecha respecto del otro bloque y del plano de falla.

**DIQUE:** Roca ígnea de forma tabular que corta una roca preexistente, y que se forma por el enfriamiento de magma en profundidad.

**FALLA GEOLÓGICA:** Discontinuidad en la corteza terrestre a través de la cual ocurre un deslizamiento de un bloque de roca con respecto a otro. Puede ser normal, inversa, sinistral o dextral.

**FOLIACIÓN:** Estructura planar producto del ordenamiento y/o estiramiento preferencial de minerales.

### GLOSSARY

**AZIMUTH:** Angle formed by the horizontal projection of a linear object with respect to the north.

**DEXTRAL:** Kinematics of a fault in the horizontal plane, which indicates that a fault block moves to the right with respect to the other block and the fault plane.

**DIKE:** A tabular shaped igneous rock that cuts through a pre-existing rock and is formed by the cooling of magma.

**GEOLOGICAL FAULT:** Discontinuity in the earth's crust through which a slide of one block of rock occurs with respect to another. It can be normal, inverse, sinistral or dextral.

**FOLIATION:** Planar structure resulting from the preferential arrangement and/or stretching of minerals.

**MILONÍTICO:** Se dice de la deformación de rocas concentrada en zonas de falla y que ocurre con un mecanismo de deformación dúctil.

**ROCA EXHUMADA:** Roca que se encuentra en la superficie terrestre debido a procesos geológicos de alzamiento y/o erosión.

**ROCA ÍGNEA:** Roca formada por el enfriamiento de un magma.

**ROCA METAMÓRFICA:** Roca formada por el cambio al estado sólido de la textura y/o mineralogía de una roca preexistente, producto de cambios de presión y temperatura sin que la roca se funda.

**SINISTRAL:** Cinemática de una falla en el plano horizontal, que indica que un bloque de falla se mueve hacia la izquierda respecto del otro bloque y del plano de falla.

**TEXTURA:** Descripción del arreglo espacial y de la relación entre los minerales de una roca. Incluye forma, tamaño, distribución, entre otros.

**TEXTURA FANERÍTICA:** Textura en la que los cristales son visibles a simple vista.

**TEXTURA GRANOLEPIDOBLÁSTICA:** Textura en que la roca presenta bandas de FILOSILICATOS (BT, MS) alternadas con bandas de agregados granulares de minerales.

**TEXTURA HOLOCRISTALINA:** Textura en la que solo hay cristales en la roca, y por lo tanto no existe presencia de vidrio.

**VETILLA:** Plano de fractura relleno de minerales que precipitan desde un fluido geotermal.

**MYLONITIC:** It is said of the deformation of rocks concentrated in fault zones that occurs through a ductile deformation mechanism.

**EXHUMED ROCK:** Rock found on the earth surface due to geological processes of uplift and/or erosion.

**IGNEOUS ROCK:** Rock formed by the cooling of magma.

**METAMORPHIC ROCK:** Rock formed by the change of the texture and/or mineralogy to the solid state of a pre-existing rock due to fluctuations in pressure and temperature without melting.

**SINISTRAL:** Kinematics of a fault in the horizontal plane, which indicates that a fault block moves to the left of the other block and the fault plane.

**TEXTURE:** Description of the spatial arrangement and relationship between the minerals in a rock. It includes shape, size, distribution, among other characteristics.

**PHANERITIC TEXTURE:** Texture in which crystals are visible to the naked eye.

**GRANO-LEPIDOBLASTIC TEXTURE:** Texture in which the rock presents bands of phyllosilicates (Bt, Ms) alternated with bands of granular mineral aggregates.

**HOLOCRYSTALLINE TEXTURE:** Texture in which there are only crystals in the rock, without the presence of glass.

**VEIN:** Fracture plane filled with minerals that precipitate from a geothermal fluid.

## REFERENCES

- Bucher, K. y Grapes, R. (2011). *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*. Springer, 8va Edición. 428 páginas.
- Cembrano, J. y Lara, L. (2009). The link between volcanism and tectonics in the southern volcanic zone of the Chilean Andes: A review. *Tectonophysics* 471, 96-113.
- Cembrano, J.; Schermer, E.; Lavenue, A. y Sanhueza, A. (2000). Contrasting nature of deformation along an intra-arc shear zone, the Liquiñe-Ofqui fault zone, southern Chilean Andes. *Tectonophysics* 319, 129-149.
- Faulkner, D. R., Jackson, C. A. L., Lunn, R. J., Schlische, R. W., Shipton, Z. K., Wibberley, C. A. J., y Withjack, M. O. (2010). A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. *Journal of Structural Geology* 32(11), 1557-1575.
- Ganguly J. y Tirone M. (2009). Closure Temperature, Cooling Age and High Temperature Thermochronology. En: *Physics and Chemistry of the Earth's Interior*. Springer. 88-99.
- Hezarkhani, A y Williams-Jones, A. (1998). Controls of Alteration and Mineralization in the Sungun Porphyry Copper Deposit, Iran: Evidence from Fluid Inclusions and Stable Isotopes. *Economic Geology* 93, 651-670.
- Lara, L. y Moreno, H. (2004). *Geología del Área Liquiñe-Neltume, Regiones de Los Lagos y de la Araucanía*. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No. 83, 23 p. Mapa escala 1: 100.000.
- Munizaga, F.; Hervé, F.; Drake, R.; Pankhurst, R.; Brook, M. y Snelling, N. (1988). Geochronology of the Lake Region of south-central Chile (39°-42°S): Preliminary results. *Journal of South American Earth Sciences* 1(3), 309-316.
- Passchier, C. y Trouw, R. (2005). *Microtectonics*. Springer, 2da Edición. 366 páginas.
- Pérez-Flores, P., Cembrano, J., Sánchez-Alfaro, P., Veloso, E., Arancibia, G., y Roquer, T. (2016). Tectonics, magmatism and paleo-fluid distribution in a strike-slip setting: Insights from the northern termination of the Liquiñe-Ofqui fault System, Chile. *Tectonophysics* 680, 192-210.
- Sánchez, P.; Pérez-Flores, P.; Arancibia, G.; Cembrano, J. y Reich, M. (2013). Crustal deformation effects on the chemical



- evolution of geothermal systems: the intra-arc Liquiñe–Ofqui fault system, Southern Andes. *International Geology Review* 55(11). 1384-1400.
- Scholz, CH. (1988). The brittle-plastic transition and the depth of seismic faulting. *Geologische Rundschau* 77, 31-328.
- Stimac, J., Goff, F. y Goff, C. (2015). Capítulo 46: Intrusion-Related Geothermal Systems. En: *The Encyclopedia of Volcanoes*. 2° Edición. 800-822.
- Streckeisen, A. (1976). To each plutonic rock its proper name. *Earth-Science Reviews* 12(1), 1-33.
- Tarback, E. y Lutgens, F. (2005). *Ciencias de la Tierra: Una introducción a la geología física*. 8° Edición. Pearson Prentice Hall. 686 páginas.
- Whitney, D. y Evans, B. (2010). Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95, 185-187.