



# Vinculación entre volcanismo y deformación tectónica en Los Andes del sur

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERÍA

**Diego Saide**<sup>1</sup>, Alumno de quinto año

**Rocío Núñez**<sup>1</sup>, Alumno de cuarto año

**Diego Carrasco**<sup>1</sup>, Alumno de quinto año

**Gloria Arancibia**<sup>2</sup>, Profesora Asociada

**José Cembrano**<sup>2</sup>, Profesor Asociado

**Pamela Pérez**<sup>2</sup>, Alumna de Doctorado

**Isabel Santibáñez**<sup>2</sup>, Alumna de Doctorado

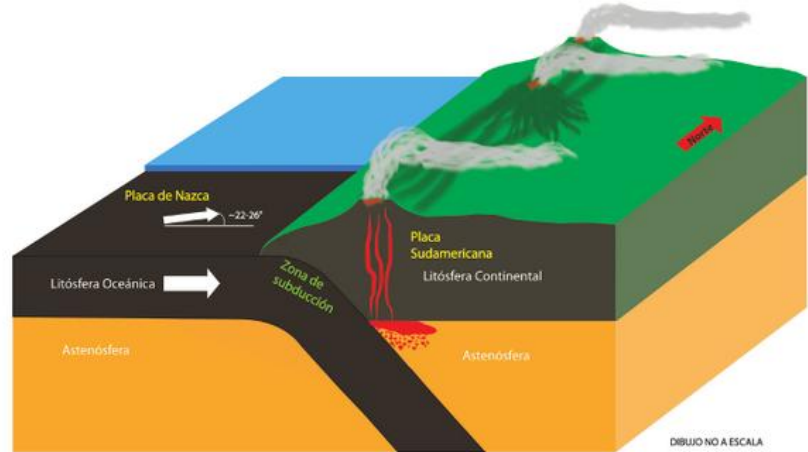
<sup>1</sup>DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINERÍA

<sup>2</sup>DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y GEOTÉCNICA

## INTRODUCCIÓN

**E**l volcanismo y la deformación tectónica son procesos geológicos fundamentales que han contribuido a la formación de Los Andes. Estos procesos ocurren a escalas de tiempo muy variables, desde unos pocos minutos (como ocurre con erupciones volcánicas, terremotos y aluviones) a millones de años (tales como la formación de cordilleras), por lo que entender su naturaleza es un gran desafío para el hombre. En muchos casos no hay suficientes antecedentes históricos sobre el comportamiento de los volcanes y su relación con las **fallas** geológicas. No obstante, estos procesos pueden tener un impacto muy significativo e influir, tanto en las personas, como en el medio ambiente (erupciones volcánicas, terremotos, energía geotérmica). En un país como Chile, ubicado en el llamado “Cinturón de Fuego del Pacífico”, estudiar estos procesos resulta crucial para mejorar su entendimiento y conocer la historia geológica del entorno.

Para estudiar la interacción entre tectónica y volcanismo, se visitó la zona donde se ubican los volcanes Lonquimay y Callaqui (ubicados en el límite entre las regiones de Bio-bío y de la Araucanía). Además de la evidencia geológica e histórica de volcanismo, existen registros de deformación tectónica marcados por el **sistema de falla** Liquiñe-Ofqui (SFLO). El SFLO, es un sistema de falla intra-**arco** de **rumbo dextral**, que ha estado activo, al menos, durante los últimos 25 millones de años (Ma). Se extiende por, aproximadamente, 1.200 km entre los 38° y 47°S, a través de numerosos segmentos discretos, y representa el sistema de falla activo más extenso de Chile [1,2]. El SFLO se ha formado, principalmente, por el efecto que produce la **subducción** de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana (ver Figura 1).



**Figura 1:** Esquema representativo del margen de subducción chileno. Se observa cómo la Placa de Nazca (que es parte de la Litósfera Oceánica) subduce a la Placa Sudamericana en una dirección no totalmente perpendicular al margen Sudamericano, sino que oblicuamente respecto de la fosa oceánica. La componente norte de la subducción tiende a empujar la Placa Sudamericana en dicha dirección, fracturándola a lo largo del arco volcánico y haciendo que el bloque occidental se deslice hacia el norte relativo al segmento oriental.

El sector visitado se encuentra, entonces, en el extremo norte del SFLO. Durante el trabajo en terreno, se pudieron analizar y constatar elementos de las últimas erupciones de los volcanes, así como evidencias de movimientos **tectónicos**.

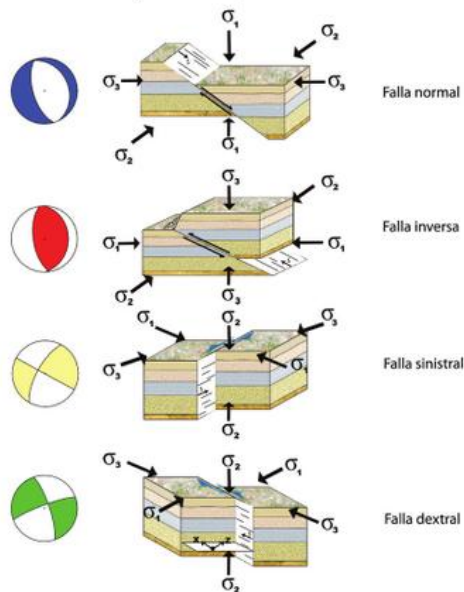
## METODOLOGÍA

Se realizó un reconocimiento geológico-estructural general de los volcanes y las fallas geológicas presentes, registrando la geometría, cinemática y edad relativa de las estructuras tectónicas y volcánicas encontradas. En algunos casos, las fallas mapeadas se presentan de manera tal que medirles su orientación espacial (**rumbo y manteo**) y su sentido de movimiento fue sencillo, ya que eran observables a simple vista y podían medirse con una brújula. Otras veces, fue necesario analizar la presencia de otros **indicadores cinemáticos** en las fallas mismas, elementos tales como **estrías** o brechas de falla, producto de la fricción que ocurre en ambos bloques limitados por las fallas (Figura 2). Estos elementos indican tanto la dirección de movimiento como su sentido relativo.



**Figura 2:** Ejemplos de indicadores cinemáticos en superficies de falla estriadas encontrados en terreno: Relleno mineral (izquierda) en un color blanco perlado, relleno de brecha de falla (derecha), con color naranja oscuro. Ambos son evidencia de la fricción ocurrida entre dos bloques limitados por una falla.

El análisis de los planos de falla y su cinemática se realiza teniendo en cuenta que existen cuatro tipos básicos, mostrados en la Figura 3. Cualquier plano de falla puede ser representado en un esquema de **mecanismo focal**, que representa dicho plano, y el campo de esfuerzos asociados. La zona coloreada representa el diedro de tensión, mientras que la blanca representa el de compresión. Los mecanismos focales son excelentes representaciones de los planos de falla, ya que son explicados ampliamente en una figura simple que puede ser, además, ubicada junto a otras en un mapa para representar datos de una zona muy extensa, como es el caso del sector estudiado.



**Figura 3:** Tipos principales de fallas y mecanismos focales representativos. La zona coloreada representa el diedro de tensión, en cuyo centro está  $\sigma_2$ , mientras que la blanca representa el de compresión, en cuyo centro yace  $\sigma_1$ , mientras que la blanca representa el de compresión, en cuyo centro yace  $\sigma_3$ . Los mecanismos focales son representaciones estereográficas de dos posibles planos nodales (planos de falla) y el campo de esfuerzos asociado a él. Estos 4 tipos de falla representan miembros extremos puesto que, en la práctica, es común encontrarse con combinaciones de estos, lo que produce mecanismos focales mixtos.

Se visitaron 8 sitios en terreno que, junto a los datos del proyecto FONDECYT 1060187 (The Fundamental Control of Intra-Arc Tectonics in the Nature of Volcanism at Convergent Margins: Selected Case Studies From the Central and Southern Andes), fueron organizados por ubicación y compatibilidad cinemática. Así, se trabajó finalmente con un total de 109 datos de estructuras medidas, agrupadas en 9 sitios diferentes. Con ayuda del software FAULTIKIN WIN [3] se obtuvo información sobre la naturaleza de la deformación y el sentido de movimiento para cada falla, en cada zona analizada. Se consideró, para este estudio, que los ejes principales de esfuerzo ( $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$ ) son coaxiales con los ejes principales de deformación finita ( $X > Y > Z$ ). Esto implica, por ejemplo, que eventuales **fracturas** rellenas de magma (**diques**) se abren de acuerdo a la dirección y magnitud de los esfuerzos que se ejerza en forma paralela a  $\sigma_1$  y ortogonal a  $\sigma_3$ . Posteriormente, se analizó la naturaleza de la relación entre las observaciones geológicas efectuadas en los distintos sitios estudiados y entre estos y las estructuras volcánicas presentes en la zona (por ejemplo, volcanes, **centros eruptivos menores** y diques, entre otros).

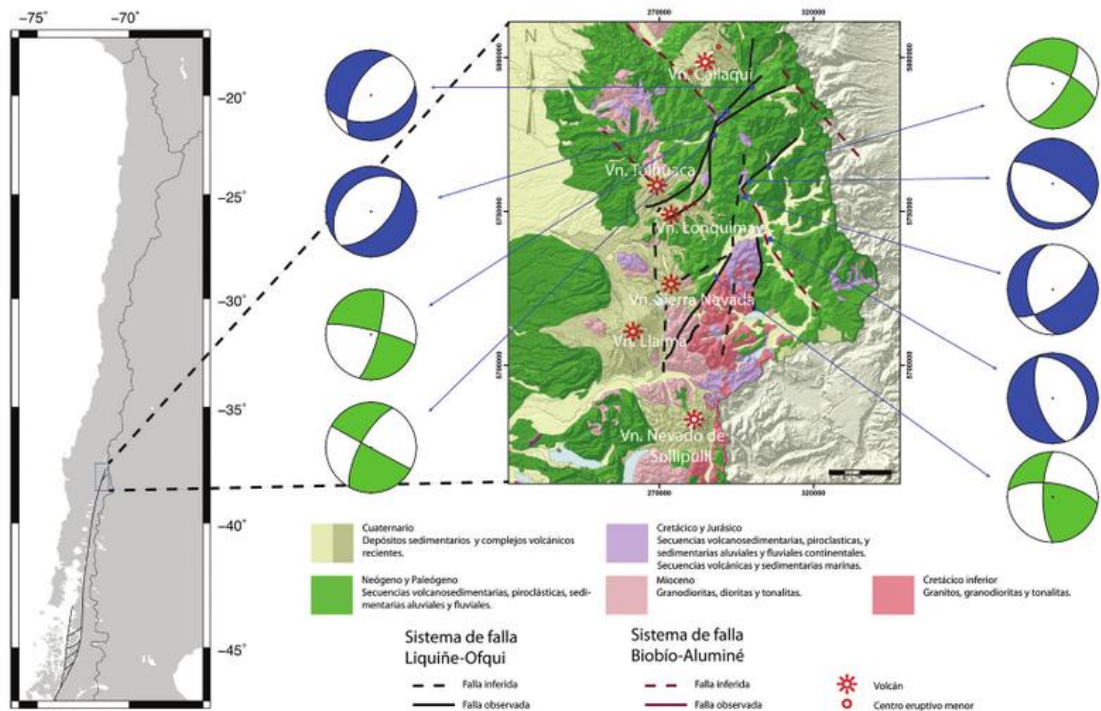
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El reconocimiento y mapeo de las estructuras volcánicas puso en evidencia algunos alineamientos muy bien definidos, tales como el alineamiento del cráter principal del volcán Lonquimay y sus centros eruptivos menores asociados (cráter Navidad y cordón fisural Oriental), que corre paralelo al valle del Lolco [4]. Otro alineamiento importante es el que presenta el volcán Callaqui, con sus numerosos centros eruptivos menores, orientados en una dirección noreste.

El mapeo de los nueve sitios principales de fallas evidencia los deslizamientos tectónicos ocurridos en las mismas. En la Figura 4 se muestra la geología simplificada de la zona, junto a los mecanismos focales representativos de esfuerzos en los sitios analizados. Se puede observar que predominan las fallas dextrales orientadas norte-sur (esto significa que el bloque oeste de la falla se desplaza hacia el norte tomando como referencia fija el bloque este de la falla). Esto es consistente con datos encontrados anteriormente por otros autores [5,6]. También se observan fallas normales de orientación noreste, lo que es cinemáticamente compatible con fallas dextrales de rumbo norte-sur. Así, en su extremo norte, el SFLO comienza a desviarse, gradualmente, desde un rumbo norte-sur a uno este-noreste. Esto produce

que las unidades de roca acomoden el campo general de esfuerzos al que están sometidos mediante extensión, fallas normales y abertura de grietas con orientación paralela a estas últimas.

La Figura 4, que presenta también las edades de las distintas litologías del sector, sugiere que la edad del movimiento del SFLO en esta zona estaría comprendida entre el Neógeno y el presente, debido a que existen litologías desde, al menos, esa edad que no han sido influenciadas por estas fallas, por lo tanto, esas zonas deben ser más antiguas que las litologías más antiguas no alteradas.



**Figura 4:** Mapa geológico esquemático y mecanismos focales obtenidos a partir de fallas observadas en los sitios estudiados. Predominan las fallas dextrales orientadas norte-sur y fallas normales orientadas noreste, pertenecientes al extremo norte del sistema de falla Liquiñe-Ofqui (SFLO). Se observa que el SFLO se desvía, gradualmente, en su extremo norte transformando su dirección (o rumbo) norte-sur a uno este-noreste.

Es importante destacar que a unos 50 km al norte se encuentra el volcán Callaqui, el cual tiene una elongación noreste. Este volcán presenta conos adventicios (centros eruptivos menores) orientados tanto en dirección noreste como noroeste, lo cual no puede ser explicado directamente mediante los procesos de deformación propuestos anteriormente. En este caso, una posible explicación es que los centros eruptivos noroeste estén conectados con diques alimentadores subyacentes de dirección noreste, que transportan magma hacia la superficie. Estos diques no emergen completamente más que en zonas de baja altura con respecto al volcán y, es por esto, que sólo llegan a la superficie a lo largo de un valle glaciar labrado en el mismo, formando así estos centros eruptivos menores. Por lo tanto, se observa que, si bien hay una concordancia global con los datos estudiados, a escalas locales los fenómenos pueden diferir y presentar anomalías explicadas por fallas preexistentes y las características particulares del terreno.

## CONCLUSIONES

La cinemática de la deformación de rumbo se ha mantenido constante desde hace, al menos, 25 Ma, ya que las evidencias de deformación datadas se presentan en rocas y terrenos desde esa edad hasta algunas mucho más recientes. De este modo, esta cinemática de deformación debe tener, al menos, la edad de las rocas más antiguas y terrenos analizados no alterados.

Los alineamientos noreste de volcanes y centros eruptivos son compatibles con el régimen cinemático de la zona, lo que está respaldado por el análisis de esfuerzos a partir de fallas. La formación de estos centros volcánicos de distinto tamaño proviene de la abertura de fracturas por las cuales migran los magmas hacia la superficie construyendo edificios volcánicos. Para unos esfuerzos como los descritos anteriormente (compresivos noreste y extensionales noroeste) se producen estas aberturas de acuerdo a lo planteado.

El alineamiento de conos difiere a escalas locales. Los conos adventicios de un volcán pueden, en algunos casos, presentar anomalías respecto a las alineaciones globales de gran escala. Esto, debido a fallas preexistentes a través de las cuales el magma también puede ascender a la superficie. Ese es el caso, por ejemplo, del alineamiento de los conos adventicios al volcán Callaqui.

## PRINCIPIO CIENTÍFICO UTILIZADO

Una estría está contenida en un plano de falla. Un plano auxiliar perpendicular al plano de falla que contiene la estría contendrá, también, al eje de acortamiento mayor y de alargamiento mayor asociados a los esfuerzos principales  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ , respectivamente. Por lo tanto, las fallas, sus estrías y su sentido de movimiento permiten obtener las direcciones principales de esfuerzo mediante un método de inversión.

Es importante, también, la relación entre los esfuerzos principales y la deformación que estos inducen. Por ejemplo, al aplicarse un esfuerzo compresivo  $\sigma_1$ , se produce un esfuerzo ortogonal extensional  $\sigma_3$ , que induce una fractura paralela a  $\sigma_1$  y que se abre en dirección de  $\sigma_3$ .

## GLOSARIO

**Arco Volcánico:** Cadena de volcanes de centenas de kilómetros de largo, por decenas de kilómetros de ancho, ubicada a unos 200 km tierra adentro desde la fosa. Se produce cuando la litósfera oceánica subduce por debajo de un bloque continental. La presión y altas temperaturas producen la deshidratación progresiva de la corteza oceánica lo que, a su vez, agrega fluidos acuosos al manto sobreyacente, gatillando la fusión parcial de las rocas (magma). El magma eventualmente ascenderá hasta alcanzar la corteza continental y erupcionará en superficie formando volcanes alineados subparalelamente a la fosa.

**Centro Eruptivo Menor:** Cráteres secundarios de un volcán que se abren durante una erupción -dejando salir lava y piroclastos-, formándose un cono.

**Dique:** Estructura tabular constituida por una roca ígnea producto del enfriamiento de magma dentro de una fractura abierta.

**Estratovolcán:** Tipo de volcán más común en Chile. Se caracteriza por estar formado por secuencias intercaladas de coladas de lava y flujos piroclásticos, con un conducto eruptivo central. Una de las características de estos volcanes es su carácter poligenético, es decir, se edifican a través de numerosas erupciones. Corresponden a los grandes volcanes, generalmente cónicos o tronco-cónicos y que alcanzan alturas de hasta 2.500 m sobre la base.

**Estría:** Surcos lineares formados por el movimiento de los bloques en el plano de la falla, que evidencian la dirección de dicho movimiento.

**Falla:** Superficie de fractura a lo largo de la cual cuerpos de roca se han movido relativamente uno del otro. Ocurren en la corteza terrestre en respuesta a los esfuerzos a los que es sometida. Pueden alcanzar cientos de kilómetros de largo.

**Falla de Rumbo:** Falla que posee un desplazamiento paralelo al rumbo de la falla. Las fallas de rumbo se clasifican según el sentido de movimiento de los bloques -referenciado a la posición de un observador situado sobre un bloque- como sinistral (cuando el bloque opuesto al que ocupa el observador se mueve a la izquierda) y dextral (cuando el bloque se mueve a la derecha).

**Fractura:** Término general para cualquier ruptura en una masa rocosa, tanto si causa o no desplazamiento.

**Indicador Cinemático:** Diversas estructuras y microestructuras presentes en las superficies de la falla, que se forman por el movimiento relativo de un bloque respecto del otro. Incluyen fracturas de extensión, venillas en echelon, cizallas de Riedel, escalones libres y escalones con minerales secundarios en la zona de sombra.

**Lineación:** Cualquier característica visible en una roca que ocurre en forma repetida o penetrativa. Puede deberse a un alineamiento de minerales o agregados minerales alargados, intersección de foliaciones y paralelismo de ejes de pliegues, entre otros.

**Lineamiento (Alineamiento):** Serie de elementos geológicos que se encuentran organizados espacialmente según una orientación preferencial. Puede ser una falla, las crestas de un cordón montañoso o una quebrada, entre otros.

**Mecanismo Focal:** Representación gráfica del mecanismo de movimiento en una falla geológica o en el foco de un sismo.

**Rumbo y Manteo:** Variables que determinan la orientación espacial de un plano. El rumbo es el ángulo respecto al norte geográfico de la intersección del plano geológico con el plano horizontal. El manteo corresponde al ángulo de inclinación de un plano en la dirección de máxima pendiente. Este ángulo se mide en el plano vertical, que es perpendicular a la dirección de rumbo.

**Sistema de Falla:** Numerosos segmentos de fallas individuales organizados según un patrón geométrico regular.

**Zona de Subducción:** Zona de contacto entre dos placas tectónicas en que una placa se introduce bajo otra, generando esfuerzos producto de que, en este deslizamiento, las placas se pegan cargando a la placa superior como un resorte. Los momentos de descarga de esta energía son los terremotos y, el acomodo de esta deformación, produce fallas.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los Proyectos FONDAP-CEGA 15090013 ("Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes"), FONDECYT 1060187 ("The Fundamental Control of Intra-Arc Tectonics in The Nature of Volcanism at Convergent Margins: Selected Case Studies From The Central And Southern Andes.") y FONDECYT 1100464 ("Nature and Significance of Fault Initiation and Propagation at Strike-Slip Fault Tips: A Case Study From The Atacama Fault System, Central Andes."). El software FaultKin Win fue gentilmente facilitado por el Prof. Rick Allmendinger, de la Universidad de Cornell, EEUU.

## REFERENCIAS

1. ARANCIBIA, G., CEMBRANO, J., LAVENU, A. Transpresión dextral y partición de la deformación en la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui, Aysén, Chile (44-45°S).. Revista Geológica de Chile, Vol. 26, 1, 1999.
2. CEMBRANO, J., LARA, L. The link between volcanism and tectonics in the southern volcanic zone of the Chilean Andes: A review. Tectonophysics 471, pp. 96-113, 2009.
3. MARRETT, R., ALLMENDINGER, R. W. Kinematic analysis of fault-slip data; Journal of Structural Geology, v., 12, pp. 973-986, 1990.
4. MORENO, H., GARDEWEG, M. La erupción reciente del Complejo Volcánico Lonquimay (Diciembre, 1988), Andes del Sur. Revista Geológica de Chile 16 (1), pp. 93-117, 1989.
5. MELNICK, D., FOLGUERA, A., RAMOS, V. Structural control on arc volcanism: The Cavihue-Copahue complex, Central to Patagonian Andes transition (38°S). Journal of South American Earth Science 22, pp. 66-88, 2006.
6. ROSENAU, M.R. Tectonics of the Southern Andean Intra-arc Zone (38°-42°S), PhD Thesis, Freie Universitat Berlin, 2004. [http://www.diss.fu-berlin.de/diss/receive/FUDISS\\_thesis\\_000000001381](http://www.diss.fu-berlin.de/diss/receive/FUDISS_thesis_000000001381)

## EQUIPO DE INVESTIGADORES

- 1 Diego Saide
- 2 Rocío Núñez
- 3 Diego Carrasco
- 4 Profesora Gloria Arancibia
- 5 Profesor José Cembrano
- 6 Pamela Pérez
- 7 Isabel Santibáñez



1



2



3



4



5



6



7