

# Arquitectura de una zona de falla cortical y su comportamiento geoeléctrico: ejemplo en los Andes del Sur

## Architecture of a cortical fault zone and its geo-electric behavior: an example in the Southern Andes

**Ronny Figueroa**<sup>1</sup>, alumno de magíster  
**Tomás Roquer**<sup>2</sup>, alumno de magíster  
**Gloria Arancibia**<sup>2</sup>, profesor asociado  
**Nicolás Pérez-Estay**<sup>2</sup>, alumno de magíster  
**Gonzalo Yañez**<sup>2</sup>, profesor asociado

<sup>1</sup>Major en Geociencias, College de Ciencias Naturales, Pontificia Universidad Católica de Chile

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile

\*Autor de correspondencia: garancibia@ing.puc.cl

**Ronny Figueroa**<sup>1</sup>, 4th year student  
**Tomás Roquer**<sup>2</sup>, master's student  
**Gloria Arancibia**<sup>2</sup>, associate professor  
**Nicolás Pérez-Estay**<sup>2</sup>, master's student  
**Gonzalo Yañez**<sup>2</sup>, associate professor

<sup>1</sup>Major in Geosciences, College of Natural Sciences, Pontificia Universidad Católica de Chile

<sup>2</sup>Department of Structural y Geotechnical Engineering, Engineering School, Pontificia Universidad Católica de Chile

\*Corresponding author: garancibia@ing.puc.cl

## RESUMEN

Las zonas de falla han sido caracterizadas por los geocientistas para evaluar su potencial geotérmico o explotación de un recurso mineral. Sin embargo, estas estructuras generalmente no son observables en superficie, por lo que su arquitectura es inferida a partir de diferentes metodologías. Este trabajo busca evaluar si la arquitectura de una zona de falla observable en superficie es reflejada en su respuesta en términos de sus propiedades eléctricas. Para esto, se realizó un levantamiento de datos estructurales y se aplicó un estudio geofísico de geoelectricidad en una zona de falla de escala métrica asociada al Sistema de Falla Liquiñe-Ofqui, en los Andes del Sur. Los resultados señalan que la zona que acumula la mayor deformación representa un conductor relativo, mientras que las zonas de daño a los costados de la anterior se comportan como un resistivo relativo. La resistividad medida estaría controlada por la estructura interna y mineralogía de cada dominio estructural. Esta metodología serviría para estimar la arquitectura de una zona de falla no expuesta en superficie.

*Palabras clave:* zona de falla, método geoeléctrico, levantamiento de datos estructurales, geología estructural, geofísica.

## ABSTRACT

Geoscientists have characterized the fault zones in order to assess the geothermal potential or exploitation of a mineral resource. However, these structures are generally not observed on the surface, so its architecture can be inferred from the different methods.

This work intends to evaluate if the architecture of an observable fault zone in the surface can be reflected in its response in terms of its electrical properties. So, a survey on structural data was carried out and a geophysical metrical-scale survey of geo-electricity in a fault zone associated to the Liquiñe-Ofqui Fault System was applied, in the Southern Andes. The results indicate that the zone accumulating the greatest deformation represents a relative conductor, whereas the adjacent zones of damage behave as a relative resistive. Measured resistivity would be controlled by the internal structure and mineralogy of each structural domain. This methodology would serve to consider the architecture of a non-exposed fault zone in the surface.

*Key words:* fault zone, geoelectrical method, structural data survey, structural geology, geophysics.

## 1. INTRODUCCIÓN

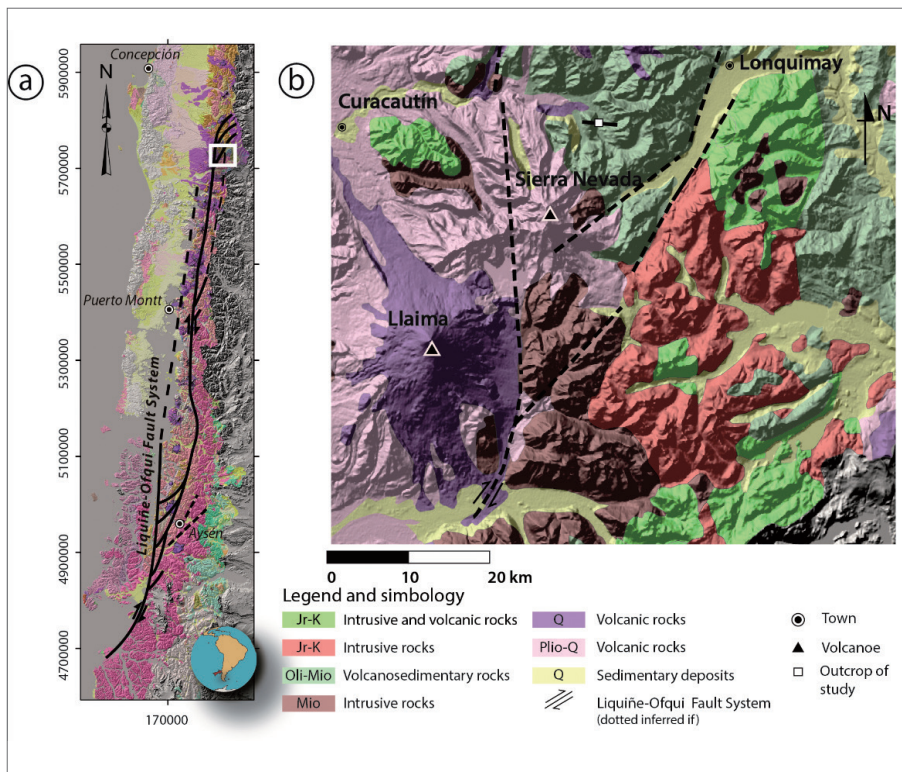
Las **zonas de falla** corresponden a discontinuidades de la corteza terrestre que acomodan la deformación producto de los esfuerzos tectónicos. Estas zonas de falla juegan un rol muy importante en la circulación y distribución de fluidos (magma y fluidos hidrotermales), a partir de los cuales pueden precipitar **minerales**, que pueden ser de interés económico (yacimientos minerales). Adicionalmente, el flujo de fluidos en la corteza es controlado por la actividad de las zonas de falla, lo que influye en la localización y comportamiento de los sistemas geotermales [1]. Desde el punto de vista de su arquitectura, una zona de falla está compuesta de un núcleo y una zona de daño que lo rodea [2]. El núcleo es la zona donde se acomoda la mayor parte de la deformación, mientras que la zona de daño se caracteriza por tener cierto grado de fracturamiento.

Los **métodos geofísicos** en zonas de falla han sido utilizados por diversos autores, desde escala métrica hasta kilométrica, con el objetivo de establecer la geometría (**rumbo, manteo, ancho, largo**) y la estructura interna de zona de falla (propiedades físicas del núcleo *versus* zona de daño) en profundidad (hasta unos 5 km, según el método utilizado [3]). En particular, las **propiedades geoeléctricas** dan cuenta de la resistividad de la roca frente a la circulación de corriente eléctrica, por lo que será distinta según la predominancia de fluidos, o bien, la naturaleza de relleno

## 1. INTRODUCTION

**The fault zones** represent crust discontinuities that accommodate to the deformation resulting from the tectonic efforts. These fault zones play a very important role in the circulation and distribution of fluids (magma and hydrothermal fluids), from which **minerals** can precipitate and may become of economic interest (mineral deposit). Additionally, the flow of fluids in the crust is controlled by the activity of the fault zones, which have an influence in the location and behavior of the geothermal systems [1]. From the point of view of its architecture, a fault zone is composed of a nucleus and a surrounding zone of damage [2]. The nucleus is the zone where most of the deformation is concentrated, while the zone of damage is characterized by having certain degree of fracturing.

**Geophysical methods** have been used in fault zones by diverse authors, with metric scales up to kilometeric scales, with the aim of establishing geometry (**course, dip, width, length**) and the internal structure of the fault zone (physical properties of the nucleus *versus* the zone of damage) in depth (until about 5 km, according to the method used [3]). In particular, the **geoelectric properties** provide information on the rock resistivity against the circulation of electrical current, reason why it will vary according to the predominance of fluids or to the landfill nature in more



**Figura 1.** Contexto geológico del área de estudio. (a) Sistema de Fallas de Liquiñe-Ofqui (Modificado de [10]). (b) Geología regional del área de estudio. El cuadro blanco indica la ubicación de la zona de estudio.

**Figure 1.** Geological context of the zone being studied (a) Liquiñe-Ofqui Faults System (Amended of [10]). (b) Regional Geology of the zone being studied. The white square image indicates the location of the zone being analyzed.

en zonas más fracturadas los cuales favorecen la circulación de corriente. Por ejemplo, este tipo de estudios **geofísicos** se han utilizado para inferir la geometría de zonas de falla y la estructura eléctrica en zonas de subducción [4 y 5] y la estructura interna de una zona de falla decamétrica, que no se mostraba en superficie [6]. Sin embargo, aunque se ha logrado interpretar la arquitectura de una zona de falla de acuerdo a modelos geoelectrónicos en diferentes escalas, las inferencias obtenidas de los modelos no han sido comparadas con la observación directa de un **afloramiento** de zona de falla, que exhiba claramente su núcleo y zona de daño a una escala métrica.

Este estudio, en el marco de tesis de Magíster de Tomás Roquer, tiene por objetivo evaluar cómo se relaciona el comportamiento geoelectrónico y la arquitectura en una zona de falla, considerando como caso de estudio un afloramiento expuesto de la traza norte del **Sistema de Falla Liquiñe-Ofqui (SFLO)**. En la zona de estudio se realizó un **levantamiento de datos estructurales** y un estudio geoelectrónico de corriente continua en la pared de la roca. El estudio fue diseñado con el propósito de obtener resultados a una escala métrica, permitiendo una mayor resolución de las **estructuras** presentes en la roca.

El SFLO es un conjunto de zonas de falla ubicado en el **arco magmático** de los Andes del Sur y tiene aproximadamente 1.200 km de longitud, extendiéndose entre el sector de Liquiñe y el istmo de Ofqui. Sus **trazas principales** tienen rumbo NS a NNE y sus **trazas subsidiarias** tienen rumbo NE a ENE [7 y 8] (**Figura 1a**). Este sistema de falla habría estado activo desde el Cenozoico (60 Ma. aprox.) hasta la actualidad.

fractured zones, which have an influence in electricity circulation. For example, this type of **geophysical** surveys has been used to infer the geometry of fault zones, the electrical structure in zones of subduction [4 and 5] and the internal structure of decametric fault zones that were not observed in the surface [6]. Nevertheless, although it has been possible to interpret the architecture of a fault zone according to geoelectric models at different scales, the implications from the models have not been compared through direct observation of a fault zone **outcrop** that clearly exhibits its nucleus and the zone of damage at a metric scale.

This survey, within the Master thesis framework by Tomás Roquer, is aimed to evaluate how the geo-electric behavior and the architecture in a fault zone are related between them, by taking an exposed outcrop of the Northern trace of the Liquiñe-Ofqui **Fault System (SFLO)** as a case study. In the zone being analyzed, a **structural data survey** and a geoelectric study of Direct Current (DC) in the wall of the rock was carried out. The investigation was conducted in order to obtain metric-scaled results, allowing a greater resolution of the **structures** on the rock.

The SFLO is a group of fault zones located in the **Magmatic Arc** in the Southern Andes having a length of about 1,200 km and extending between Liquiñe zone and Ofqui isthmus. The **main traces** have a course from NE to ENE and its secondary traces have a course from NE to ENE [7 and 8] (**Figure 1a**). This fault system would have been active as from the Cenozoic period (60 Myr. approx.) up to present time. The study case represents an outcrop of

El caso de estudio corresponde a un afloramiento de 100 m de longitud aproximadamente y está ubicado en el extremo norte del SFLO, cercano a la localidad de Lonquimay. En este lugar, la zona de falla corta a **rocas andesíticas** miocenas de la Formación Curamallín [9] (**Figura 1b**).

## 2. METODOLOGÍA

En este trabajo se utilizó la combinación de información geológica de campo y un estudio geoelectrico de resistividad de la roca. Para ello se realizó un levantamiento de datos estructurales y se midió la respuesta geoelectrica en dos dimensiones (2D) de las unidades litológicas a lo largo de un segmento ortogonal al núcleo de la zona de falla, en una transecta de 20 m de longitud.

El levantamiento de datos estructurales incluyó un trabajo en terreno de 20 días donde se definió la geometría del núcleo de la falla, la densidad y orientación de las **fracturas** y **vetas** de la zona de daño. Se realizó, además, una caracterización mineralógica de las vetas y de la roca a la cual afecta la zona de falla (denominada roca de caja), con el objetivo de establecer las potenciales diferencias en el comportamiento geoelectrico.

La medición geoelectrica tomó un total de 3 días de terreno y se llevó a cabo utilizando el equipo eléctrico TIGRE soportado por el software ImagerPro2006. El experimento en terreno consiste en la instalación de una serie de estacas, utilizadas como electrodos, ubicadas de forma colineal sobre la pared de la roca. Este perfil entrega un modelo de resistividad en planta de la roca. Cada línea eléctrica contó con dos tendidos de electrodos independientes entre sí, que se traslaparon estratégicamente cercanos al núcleo de la falla, con el propósito de conseguir una mayor resolución en la zona de interés. La distancia entre los electrodos fue de 0,5 m, cada tendido constó de 32 electrodos y el traslape fue de 23 estacas. Esto conforma una línea de 41 electrodos de una longitud de 20 m, la cual alcanza una penetración

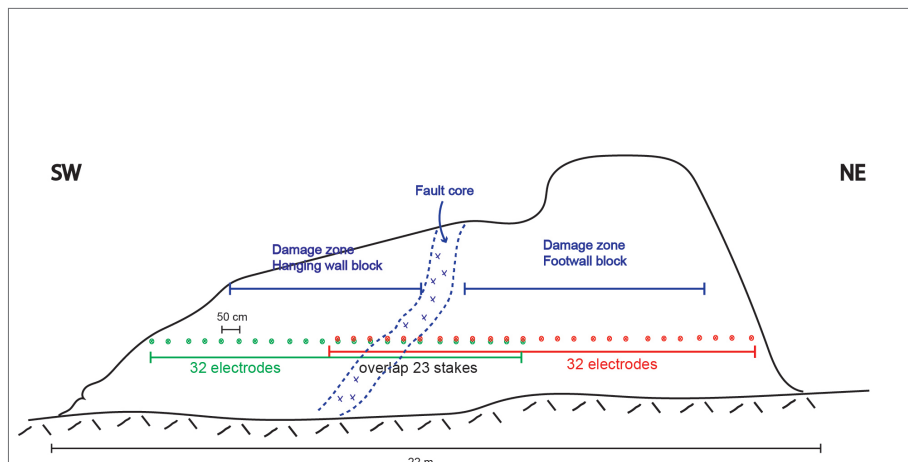
approximately 100 meters of length and is located in the North end of the SFLO, near the locality of Lonquimay. In this place, the zone of short fault cuts Miocene **andesitic rocks** in the Curamallín Formation [9] (**Figure 1b**).

## 2. METHODOLOGY

For this work, a combination of geological information of the field and a geoelectric study on the rock resistivity was used. For this purpose, a structural data survey was conducted and the geoelectric response in two dimensions (2D) of the lithological units was measured throughout a segment perpendicular to the fault zone nucleus, in a 20 m-long transect

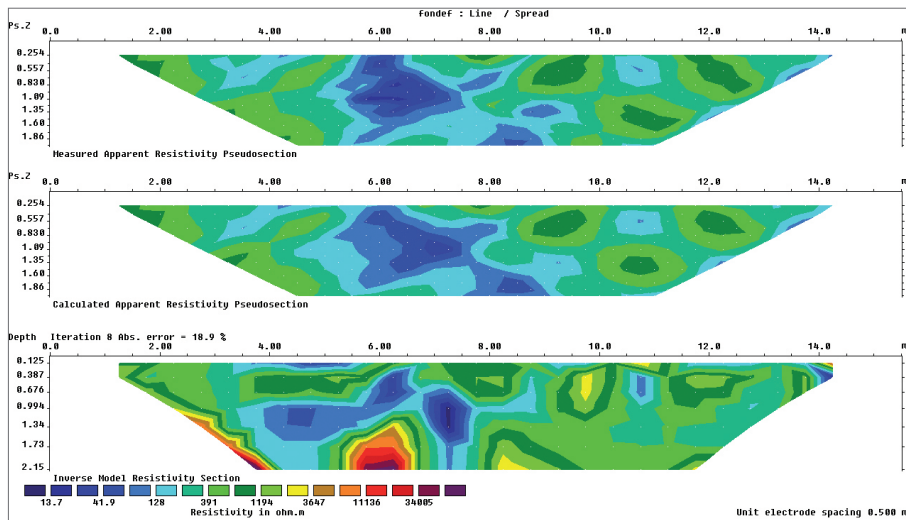
The structural data survey included a work in the field of 20 days, in which the nucleus geometry of the fault, and the density and direction of the **fractures** and **veins** of the zone of damage were defined. In addition, a mineralogical characterization of the veins and the rock which the fault zone has an effect on was done (denominated country rock), whose aim was to establishing the potential differences in the geoelectric behavior.

The geoelectric measurement took a total of 3 days of field work and it was done by utilizing the TIGER electrical equipment supported by ImagerPro2006 software. The field experiment consists of installing a series of stakes, used as electrodes that are positioned in a collinear way on the wall of the rock. This profile gives a model of rock resistivity in plan. Each electrical line counted an overhead of two independent electrodes that were overlapped near the nucleus of the fault, in order to ensure a greater resolution in the zone of interest. The distance between the electrodes was 0.5 m, and each line consisted of 32 electrodes and the overlap was 23 stakes. This conform a line of 41 electrodes of 20 m. long, which reaches an approximated penetration of 3 m (**Figure 2**). In order



**Figura 2.** Esquema del afloramiento de la zona de falla de estudio. Representación de la instalación espacial del experimento. Azul: núcleo, muro colgante y yacente; Rojo: cableado eléctrico 1; Verde: cableado eléctrico 2.

**Figure 2.** Outcrop Scheme in the fault zone under study. Design of the experiment space installation. Blue: nucleus, hanging wall y recumbent wall; Red electrical wiring 1; Green: electrical wiring 2.



**Figura 3.** Presentación del modelo de inversión. De arriba hacia abajo, pseudosección de resistividad medida en terreno, sección de resistividad calculada a partir del modelo y modelo de inversión de la sección.

**Figure 3.** Presentation of the inversion model. Downwards, resistivity pseudo-section measured in the field, resistivity section calculated from the model and section inversion model.

aproximada de 3 m (**Figura 2**). Con el propósito de obtener más datos para comparar, se realizaron dos tipos arreglos, Schlumberger y Dipolo-Dipolo. La diferencia entre estas dos metodologías son principalmente dos; la primera diferencia es la forma en que se realiza la integración para obtener las resistividades medidas en terreno: en el caso de Schlumberger [11-13] integra estructuras orientadas horizontalmente, resuelve mejor modelos de capas, mientras que el arreglo Dipolo-Dipolo integra estructuras verticales, soluciona modelos que tengan estructuras ortogonales al tendido y en el plano de la sección [12 y 13]. La segunda diferencia es el factor geométrico de cada arreglo, este factor corrige la distancia relativa entre los electrodos que inyectan corriente y los que miden la diferencia de potencial (ver Principio Científico).

La medición geoelectrica tiene como objetivo determinar la resistividad del medio al paso de la electricidad. Una vez obtenido el perfil de resistividades aparentes se realizó una inversión de datos, que consiste en construir un modelo que genere la señal geoelectrica medida en terreno, considerando la ubicación espacial y la resistividad obtenida. El software de inversión encuentra el modelo de resistividad que mejor se ajusta a las mediciones de campo (**Figura 3**). El software utilizado corresponde al DCInv2D proporcionado por el equipo, ImagerPro 2006. Finalmente, el software Oasis Montaj fue utilizado para la presentación de los resultados finales.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

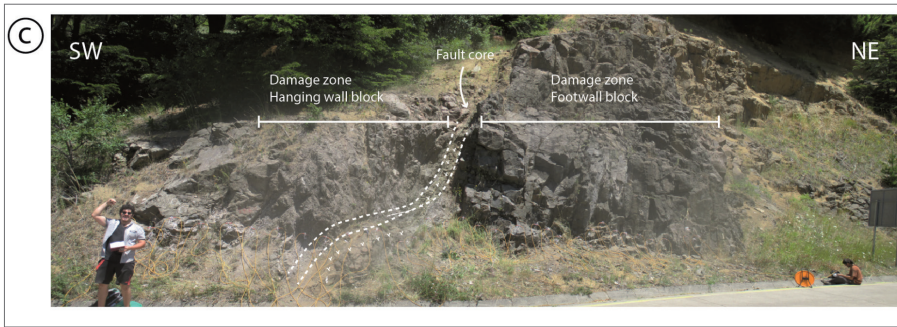
Del levantamiento de datos estructurales (**Figura 4**), se identificó una zona de falla que corta roca andesítica, con un núcleo simple de 0,5 m de espesor y una zona de daño asimétrica de 5 m potencia en el bloque colgante y 15 m en bloque yacente. El núcleo está compuesto de un **dique** microdiorítico con **salbanda** en los bordes, y tiene rumbo N83°W y manto 65°S. La zona de daño presenta

to collect more data for comparing, two types of arrays were realized; Schlumberger and Dipole-Dipole. The differences between them are mainly two: The first one is the form in which integration is accomplished to obtain in-field measured resistivity; in the case of Schlumberger it integrates horizontally-oriented structures [11-13], and also it allows a better array of the layer patterns; while the Dipole-Dipole array integrates vertical structures, and provides an array to models having structures perpendicular to the laying and in the section plan [12 and 13]. The second difference is the geometrical factor of each array, which corrects the relative distance between the electrodes injecting current and those that measure potential difference (refer to Scientific Principle).

The geoelectric measurement aim is determining the resistivity of the means for the passage of electricity. Once the profile of apparent resistivity is obtained, data inversion takes place, which consists of constructing a model for the geoelectric signal measured in the field. The inversion software finds the resistivity model that better adjusts to the measurements in the field (**Figure 3**). The software utilized corresponds to the DCInv2D provided by the Imager Pro 2006 equipment. Finally, Oasis Montaj software was used for the presentation of final results.

### 3. RESULTS AND DISCUSSIONS

From the structural data survey (**Figure 4**), a fault zone cutting the Andesitic rock was identified, which has a simple nucleus 0.5 m thick and a zone of asymmetric damage of 5 m in the hanging wall and 15m the recumbent wall were identified. The nucleus is composed of a micro diorite **dyke** with clays and **gouge** in the edges, whose course is N83°W and a 65°S dip. The zone of damage



**Figura 4.** Afloramiento de la zona de falla de estudio, se indica núcleo y zona de daño en el bloque yacente y en el bloque colgante. Fotografía mirando hacia el NW.

**Figure 4.** As to the fault zone outcrop under study, indication is made of the nucleus and damage zone in the recumbent wall and the hanging wall. Photograph is oriented to the NW.

discontinuidades centimétricas rellenas de **zeolitas**, orientadas NNE-ENE de manteo subvertical. Además, se observa mayor frecuencia de vetas distribuidas espacialmente en el bloque colgante que en el bloque yacente.

La sección geoelectrónica en planta muestra valores de resistividad que varían entre 30-1.400 ohm-m. En la **Figura 5**, se observan valores resistivos relativos (en rojo), conductores (en azul) y combinaciones intermedias. En la sección eléctrica se lograron distinguir 4 dominios, con metodología Dipolo-Dipolo (**Figura 5a**): (i) un dominio horizontal (dominio D-1) y resistivo de 1 m de espesor, con valores que varían entre 30-1.500 ohm-m; (ii) un dominio conductor penetrativo, de potencia cercana a 0,5 m, con valores que varían entre 20-200 ohm-m (dominio D-2); (iii) un dominio con resistividades que varían entre 60-1.200 ohm-m al SW del dominio anterior (dominio D-3); y (iv), un dominio con mayor predominancia de resistivos al NE del perfil, cuyos valores oscilan entre 20 y 2.000 ohm-m (dominio D-4). En el mismo afloramiento con la metodología Schlumberger (**Figura 5b**): (i) un dominio horizontal (dominio S-1), resistivo de 1.5 m de espesor, con resistividades que oscilan entre 100-2.000 ohm-m; (ii) un dominio de carácter conductor de 0,5 m aprox. de potencia, con un rango entre 110-180 ohm-m (dominio S-2); (iii) un dominio al costado sur del dominio anterior cuyo rango de resistividad oscila entre 200-700 ohm-m (dominio S-3); y (iv), un dominio de comportamiento resistivo al norte del dominio 2, con valores de resistividad entre 40-1.500 ohm-m (dominio S-4).

Los resultados estructurales y eléctricos permiten señalar que la arquitectura de la zona de falla se ve reflejada en el comportamiento geoelectrónico de ésta (**Figura 5 y 6, Tabla 1**), independientemente del modelo de integración.

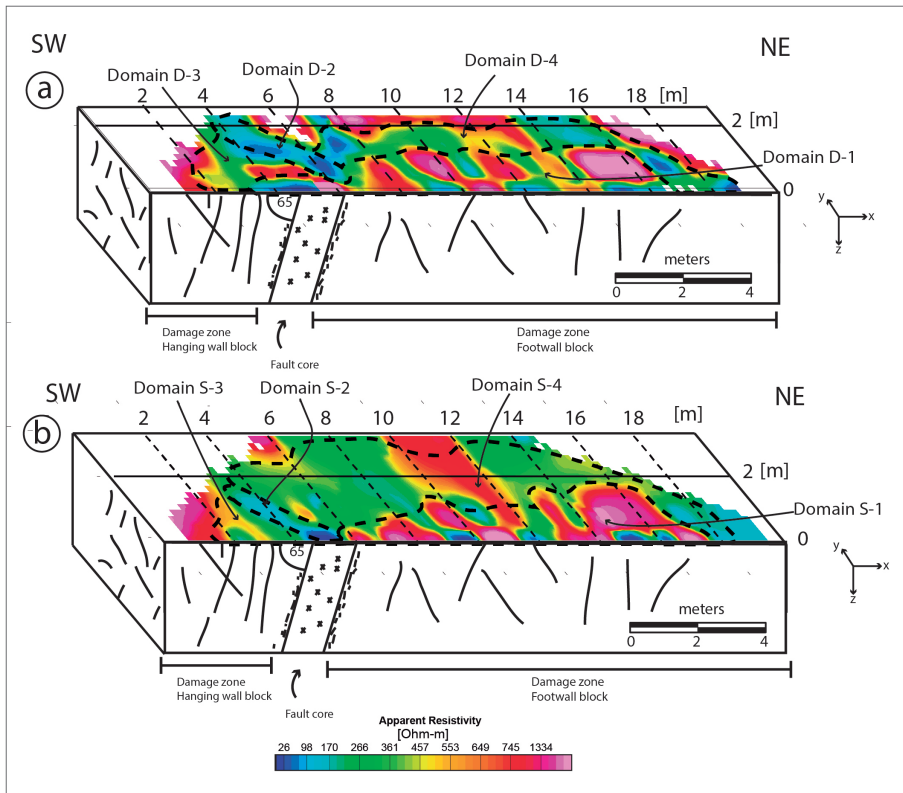
En los modelos señalados, los dominios D-1 y S-1 son bastante similares y corresponden a la roca expuesta, que suele estar sometida a constante **meteorización**, por lo que es característica a lo largo del tendido eléctrico en los dominios más someros del afloramiento. Esto genera que la señal eléctrica no tenga un patrón determinado, puesto que depende del tipo de meteorización a la que se ve afectada la roca (e.g. presencia de vegetación en ciertos segmentos).

presents centimetric discontinuities filled with **zeolites**, oriented NNE-ENE of sub vertical dip. In addition, greater veins frequency is observed in the hanging wall more than in the recumbent wall.

In **Figure 5**, the results of electrical inversion in plan are transformed. The section shows relative resistive values (in red), conductors (in blue) and intermediate combinations. In the electrical section four domains were observed, with Dipole-Dipole methodology (**Figure 5a**): (i) a horizontal domain (D-1 domain) and a resistive of 1m of thickness, with values that vary between 30-1,500 ohm-m; (ii) a penetrative conductive domain, of near 0.5m power with values that vary between 20-200 ohm-m (D-2 domain); (iii) a domain with resistivity that varies between 60-1,200 ohm-m to the SW of the previous domain (D-3 domains); and (iv) a domain of great dispersion of resistivity, whose values oscillate between 20-2,000 ohm-m (D-4 domain). In the same outcrop with the Schlumberger methodology (**Figure 5b**): (i) a horizontal domain (S-1 domain), resistive of 1.5m of thickness, with resistivity oscillating between 100-2,000 ohm-m; (ii) a domain of conductive character of 0.5 m power approx., with a rank between 110-180 ohm-m (S-2 domain); (iii) a domain to the South flank of the previous domains whose rank of resistivity oscillates between 200-700 ohm-m (S-3 domains); and (iv), a domain of mainly resistive behavior to the north of the domain 2, with resistivity values between 40-1,500 ohm-m (S-4 domain).

The structural and electrical results indicate that the architecture of the fault zone is reflected in the geoelectric behavior of the latter (**Figures 5 and 6, Table 1**), independent from the integration model.

In the indicated models, domains D-1 and S-1 are quite similar and correspond to the exposed rock that usually is put under constant **weathering**, so it is characteristic throughout the electrical wiring in the shallow domains of the outcrop. So the electrical signal does not have a determined pattern, since it depends on the type of weathering affecting the rock (e.g. presence of vegetation in certain segments).



**Figura 5.** Relación respuesta resistiva y geometría de la zona de falla. (a) Metodología Dipolo-Dipolo. (b) Metodología Schlumberger.

**Figure 5.** Ratio between resistive response and architecture of the fault zone. (a) Dipole-Dipole Methodology. (b) Schlumberger Methodology.

Los dominios D-2 y S-2 se asocian al núcleo de la zona de falla, correspondiente a un dique microdiorítico con salbanda, el cual presenta un comportamiento relativamente conductor. Esto podría deberse a la presencia de arcillas, minerales formados producto de la alteración hidrotermal del dique microdiorítico [3]. Sin embargo, la solución de D-2 es más evidente como una estructura continua y penetrativa en la roca. La solución S-2 solo señala la presencia de esta estructura más próxima a la superficie y es bastante acotada.

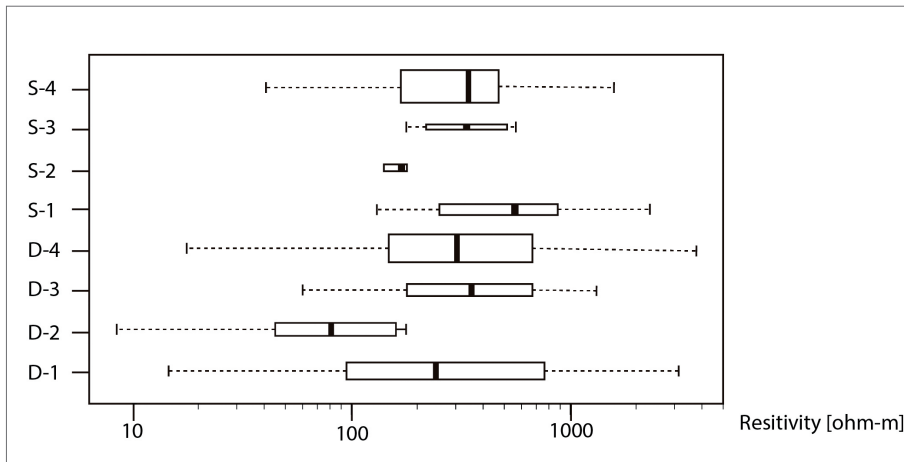
Los dominios D-3 y S-3 correspondientes al bloque colgante, D-4 y S-4 al bloque yacente del afloramiento, de acuerdo al modelo geoelectrico, presentan un amplio rango de valores. De acuerdo al levantamiento estructural, el bloque yacente presenta una zona de daño próxima (5 m) al núcleo de la falla, y concentra menor cantidad de fracturas y vetas. En comparación al bloque colgante, el bloque yacente corresponde a una zona de daño no fracturada (presenta menor cantidad de fracturas). En el caso S-4, las resistividades son más homogéneas, a excepción de un cuerpo resistivo central que también se observa en D-4.

Domains D-2 and S-2 are associated to the nucleus of the fault zone and correspond to a micro-diorite dyke with gouge and clays, which show a conductive behavior. This could be due to the clay presence that formed minerals resulting from the hydrothermal alteration of the micro-diorite dyke [3]. Nevertheless, more evidently the solution of D-2 is like a continuous and penetrative structure on the rock. The S-2 solution only indicates the presence of this structure next to the exposed surface.

Domains D-3 and S-3 correspond to the hanging wall, and D-4 and S-4, to the recumbent wall. These domains present a wide rank of resistivity values. For the S-4, resistivity values are more homogenous, with the exception of a central resistive body that also is observed in D-4. This is due to the Schlumberger method that generates horizontal bodies. For domains D-3 and S-3, a dispersion of resistivity values that are lower than the domains D-4 and S-4; nevertheless, it cannot be established a statistically significant comparison between the hanging wall and recumbent wall given the amount of

**Table 1.** Geological characterization and domains resistivity

Domain	Geologic Characterization	Dipole-Dipole Resistivity (ohm-m)	Schlumberger Resistivity (ohm-m)
1	Weathering rock	30 – 1,500	100 – 2,000
2	Fault nucleus	20 – 200	110 – 180
3	Fractured damage zone	60 – 1,200	200 – 700
4	Non fractured damage zone	20 – 3,000	40 – 1,500



**Figura 6.** Distribución de resistividad de los diferentes dominios.

**Figure 6.** Resistivity distribution of the different domains.

Esta discretización se debe a que el método Schlumberger genera cuerpos horizontales. Para los dominios D-3 y S-3, la cantidad de datos obtenidos no permiten un análisis que permita comparar en cuanto a comportamiento eléctrico el bloque colgante con el bloque yacente.

Si bien, a simple vista los métodos Dipolo-Dipolo y Schlumberger generan modelos con rango de resistividad similar, al comparar la geometría de cuerpos en cada dominio que genera la inversión, la metodología Schlumberger no se ajusta a la orientación espacial de las estructuras observadas en terreno. No obstante, el método Dipolo-Dipolo entrega una solución que se ajusta a las observaciones medidas en campo, debido a la resolución lateral para estructuras verticales [13].

Finalmente, de acuerdo a la **Figura 5**, es posible relacionar el rumbo del núcleo de falla con la geometría obtenida del dominio D-2 en el modelo de resistividad, dada la presencia de zeolitas en el núcleo de falla, las cuales favorecen la acumulación de cationes y fluidos en su estructura cristalina. El rumbo del núcleo de acuerdo al levantamiento estructural es N83°W, mientras que en el modelo de resistividad el rumbo del dominio D-2 calculado es de N90°W. Esto permite señalar que en una zona de falla con un único núcleo un modelo de resistividad 2D como el utilizado en este estudio, tiene la resolución suficiente para estimar el rumbo del núcleo y su continuidad en la parte que no aflora.

#### 4. CONCLUSIONES

Existe una buena correlación entre la arquitectura interna de una zona de falla y su respuesta al método geoelectrico. Por esta razón, este método puede ser utilizado para determinar propiedades internas de la roca en la parte no visible de ella, además de determinar la distribución y orientación espacial de las estructuras presentes a una escala de métrica.

La metodología de integración Dipolo-Dipolo es comparable en la zona de falla estudiada. Aun cuando, en

data of the domains D-3 and S-3.

Dipole-Dipole and Schlumberger methods create models with a similar rank of resistivity, although when comparing the geometry of bodies in each domain producing the inversion, the Schlumberger methodology does not adjust to the spatial orientation of the structures observed in the field. However, the Dipole-Dipole method provides a solution that adjusts to the observations measured in field, due to the lateral resolution for vertical structures [13].

Finally, according to **Figure 5**, it is possible to relate the course of the fault nucleus with the obtained geometry of D-2 domains in the model of resistivity, given the clay presence in the fault nucleus, which favors conductivity [3]. The course of the nucleus according to the structural survey is N83°W, whereas in the resistivity model the course of the calculated domain D-2 is N90°W. This allows to indicate that a 2D resistivity model, as the one used in this study, can be used to consider the course of the nucleus and its continuity in the part that does not emerge.

#### 4. CONCLUSIONS

There is a good correlation between the architecture of a fault zone and its electrical resistivity. Therefore, this method can be used to determine internal properties of the rock in the imperceptible part of it, besides determining the distribution and spatial orientation of the present structures on a metric scale.

The Dipole-Dipole integration methodology is applicable in the fault zone to be studied. Even though in both methodologies



ambas metodologías el núcleo de la falla se comporta como un conductor cuyos valores de resistividad varían entre 20-200 ohm-m, la metodología Schlumberger presenta limitaciones para ver estructuras más profundas.

El comportamiento eléctrico del bloque colgante, como del bloque yacente son mayoritariamente resistivas. Ambas zonas de daño presentan un amplio rango de resistividad que varían entre 20-3.000 ohm-m.

Si bien la litología del afloramiento en estudio, tanto del bloque colgante como el yacente es la misma, roca andesítica, no existe una cantidad suficiente de datos para establecer un comportamiento preferencial de resistividad del bloque colgante, para que pueda ser comparable con el bloque yacente.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA, Proyecto FONDAP CONICYT 15090013) y al proyecto FONDECYT 1130030. El equipo TIGRE fue aportado por el proyecto FONDEF D10I1027. A Tiaren García, alumna de doctorado por su colaboración en el procesamiento de datos y a Pablo Iturrieta, alumno de 6° año, por su apoyo en terreno, ambos del DIEG. A Geofísica TRV por facilitar la licencia del programa DCInv2D.

the nucleus of the fault behaves as a conductor, whose values of resistivity vary between 20-200 ohm-m, the Schlumberger methodology presents limitations to see deeper structures, because it characterizes horizontal units that are not representative of the outcrop. Whereas the dipole-dipole methodology generates a model that adjusts to what has been observed in field.

The electrical behavior of both the hanging wall and the recumbent wall is resistive in comparison to the nucleus. Both zones of damage present a wide resistivity rank that varies between 20-3,000 ohm-m. Although the lithology of the hanging wall as well as of the recumbent one is the same, an andesitic rock, it does not exist enough data to establish a preferential resistivity behavior.

## ACKNOWLEDGMENTS

Thanks to the Center of Excellence in Geothermic of the Andes (CEGA, Project FONDAP CONICYT 15090013) and to project FONDECYT 1130030. TIGER equipment was provided by FONDEF D10I1027 project. Thanks to Tiaren García, doctorate student, for her collaboration in the data processing and to Pablo Iturrieta, student of reemplazar por "6th year, for his support in the field, both from the DIEG. Thanks also to TRV Geophysics for providing the license of the DCInv2D program.

## GLOSARIO

**AFLORAMIENTO:** lugar en donde es posible observar en superficie una unidad litológica. La roca es expuesta en superficie producto de procesos de erosión y alzamiento.

**ARCO MAGMÁTICO:** franja de actividad volcánica, asociada a un ambiente de subducción.

**DIQUE:** roca ígnea con estructura tabular producto del enfriamiento de una magma en el interior de una fractura.

**ESTRUCTURAS (GEOLÓGICAS):** cuerpos geológicos que poseen cierta geometría y orientación espacial. Estos son utilizados para estudiar el desarrollo del relieve terrestre (e.g. diques, vetas, fracturas, zonas de falla, sistemas de falla, entre otros).

**ESTRUCTURA CRISTALINA:** estructura que forman los minerales en su fase sólida. Esta se caracteriza por tener un patrón ordenado de elementos químicos.

**FRACTURA:** discontinuidad presente en un cuerpo rocoso.

**GEOFÍSICA:** área de la geociencias que utiliza la física como herramienta para caracterizar y comprender procesos tanto en la corteza terrestre, como en el interior.

## GLOSSARY

**OUTCROP:** location where a lithological unit can be observed at the surface. The rock is exposed on the surface as the result of erosion and emerging processes.

**MAGMATIC ARC:** strip of volcanic activity associated to a subduction environment,

**DYKE:** igneous rock of tubular structure resulting from the magma chilling inside a fracture.

**STRUCTURES (GEOLOGICAL):** geological bodies with certain geometry and spatial orientation. They are used to study the development of terrestrial relief (e.g. dykes, veins, fractures, fault zones, fault systems, amongst others).

**CRYSTALLINE STRUCTURE:** structure that forms minerals in their solid phase. This is characterized to have an ordered pattern of chemical elements.

**FRACTURE:** it is a discontinuity in a rocky body.

**GEOPHYSICS:** field of geosciences used by physics as a tool to characterize and understand some processes, either in the crust or inside.

**STRUCTURAL DATA SURVEY:** geological technique used to determine nature and spatial orientation of the different structural domains in a zone.

**LEVANTAMIENTO DE DATOS ESTRUCTURALES:** Técnica geológica que permite determinar la naturaleza y orientación espacial de los distintos dominios estructurales de una zona.

**METEORIZACIÓN:** proceso de desintegración y/o descomposición de un roca que se encuentra en contacto por la superficie. Puede ser del tipo mecánico o químico.

**MÉTODOS GEOFÍSICOS:** metodologías que aprovechan diferentes propiedades físicas de las rocas, para extraer información de cuerpos que se encuentran en profundidad.

**MINERAL:** compuesto inorgánico natural ordenado, que presenta una estructura física y química dentro de un determinado rango.

**PROPIEDAD GEOELÉCTRICA:** propiedad característica de rocas o suelos, que mide la capacidad para transmitir la corriente. Se hace referencia a la resistividad que es medida en ohm-m.

**ROCA ANDESÍTICA:** roca ígnea de origen lávico, formada por el enfriamiento rápido de un magma en superficie. Se caracteriza por tener una textura particular (porfídica).

**RUMBO Y MANTEO UNA FALLA:** determinan la orientación espacial de un plano. El **rumbo** corresponde al ángulo que se forma entre el norte geográfico y la intersección del plano de interés con un plano horizontal. El **manteo** es el máximo ángulo de inclinación que se forma entre el plano de interés y un plano horizontal.

**TRAZA PRINCIPAL:** superficie de primer orden asociado a un sistema de falla. Falla dominante del sistema

**TRAZA SUBSIDIARIA:** superficie de ruptura generada a partir de una falla más grande.

**SALBANDA:** roca altamente fracturada, tamaño de grano muy fino (menor a 1 mm), se caracteriza por no estar consolidada. Se asocia principalmente a zonas de falla, precisamente a los bordes del núcleo de falla.

**SISTEMA DE FALLA:** numerosos segmentos de fallas distribuidos según un patrón geométrico en una determinada zona.

**VETA:** fracturas rellenas de un mineral precipitado a partir de un fluido hidrotermal.

**ZEOLITAS:** mineral del grupo de los tectosilicatos, grupo que se caracteriza por presentar estructuras cristalinas bastante complejas. Presenta cavidades y túneles en su estructura, lo que facilita la acumulación y transporte de fluidos.

**ZONA DE FALLA:** corresponde a un volumen de daño producto del desplazamiento relativo entre dos cuerpos rocosos. Este está compuesto por un núcleo, zona en la que se acomoda gran parte de la deformación, un bloque colgante, correspondiente a la porción del cuerpo rocoso que se encuentra sobre la superficie de deslizamiento, suele ser el cuerpo que presente mayor concentración de fracturas. Además un bloque yacente, correspondiente a la porción que se encuentra bajo la superficie de deslizamiento.

**WEATHERING:** mechanical or chemical disintegration and/ or decomposition of a rock when in contact with the surface.

**GEOPHYSICAL METHODS:** different methodologies that take advantage of the rocks physical properties in order to obtain information on bodies found in depth.

**Mineral:** inorganic naturally arranged compound presenting a physical and chemical structure within certain Rank.

**GEOELECTRIC PROPERTY:** typical property of rocks or soils that measures the capacity to transmit electric current. Reference is made to resistivity measured in ohm-m.

**ANDESITIC ROCK:** lava originated igneous rock which is formed when magma is quickly chilled on the surface. It is characterized by having a particular texture (porphyritic)

**COURSE AND DIP OF A FAULT:** they determine the spatial orientation of a plan. The **course** is the angle formed between the geographic North and the intersection of the plan in question and a horizontal plan. The dip is the maximum inclination angle formed between the plan in question and a horizontal one.

**MAIN TRACE:** first order surface that is associated to a fault system. Dominant fault of the system.

**SECONDARY TRACE:** failure surface coming from a bigger fault.

**GOUGE:** highly fractured rock, grain size is very fine (less than 1 mm) and it is characterized by its non-consolidation. It is mainly associated to fault zones, on the edges of the fault nucleus.

**FAULT SYSTEM:** various segments which are distributed according to a geometric pattern in a specific zone.

**VEIN:** cracks filled with precipitated mineral from a hydrothermal fluid.

**ZEOLITES:** mineral belonging to the group of tectosilicates which is characterized by presenting highly complex crystalline structures. It presents cavities and tunnels in the structure, so that facilitating fluid accumulation and transport.

**FAULT ZONE:** it is a damage volume caused by the relative displacement between two rocky bodies. The fault zone is composed of a nucleus, where a great part of the deformation is adapted; a hanging wall that is the part of the rocky body found on the sliding surface and that is usually the body with major concentration of cracks; and a recumbent wall that is the part located under the sliding surface.

## PRINCIPIO CIENTÍFICO

### Estudio Geoelectrico

Este método geofísico busca obtener un modelo de resistividades aparentes usando la ley de Ohm y las ecuaciones de Maxwell [3]. Para obtener la resistividad de un medio, se hace circular una corriente controlada  $I$ , midiendo el voltaje  $V$  que genera esta corriente (Figura 5). Dados estos parámetros, se obtiene la resistividad aparente  $\rho$  de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{V \cdot 2 \cdot \pi}{I \cdot G} \quad [1]$$

Arreglo Schlumberger.

## SCIENTIFIC PRINCIPLE

### Geoelectric Survey

This geophysical method intends to obtain a model of apparent resistivity by using the Ohm's law and Maxwell's equations [3]. In order to obtain the resistivity of a means, a controlled current is circulated  $I$ , measuring the voltage  $V$  generating this current (Figure 5). In view of these parameters, apparent resistivity is obtained  $\rho$  according to the following formula:

$$\rho = \frac{V \cdot 2 \cdot \pi}{I \cdot G} \quad [1]$$

Schlumberger Array

$$r_1 = r_4 = [L - l] \quad r_2 = r_3 = [L + l] \quad G_{Sch} = \frac{4 \cdot L}{L^2 - l^2}$$

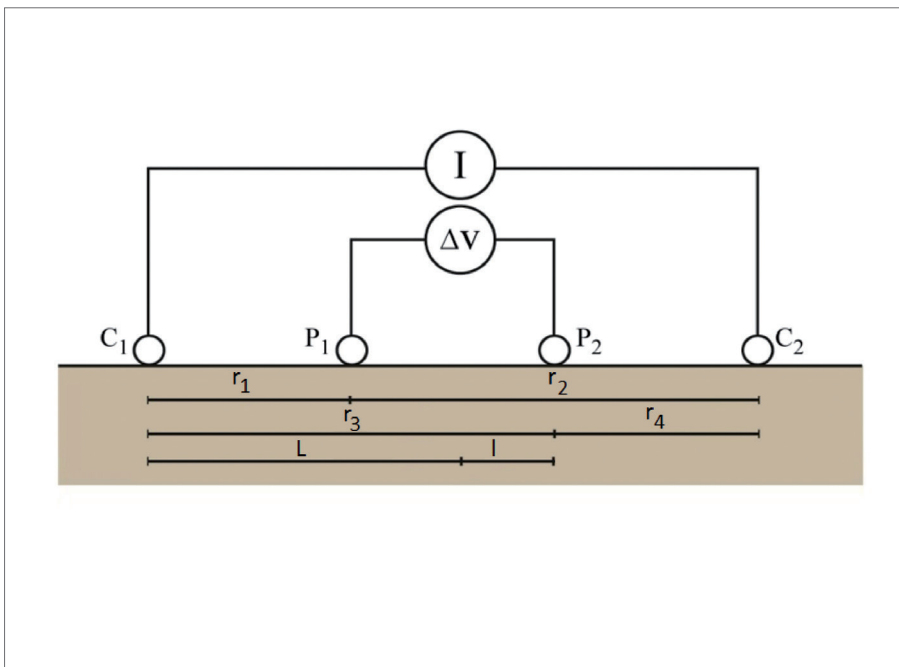
$$r_1 = r_4 = l \cdot (n + 1); r_2 = l \cdot n; r_3 = l \cdot (n + 2) \quad G_{Dip} = \frac{-2}{l \cdot n \cdot (n + 1) \cdot (n + 2)}$$

Arreglo Dipolo-Dipolo

Donde  $G$  se conoce como un factor geométrico, que corrige la distancia relativa entre puntos de inyección de corriente y medición del potencial eléctrico asociado (Figura 7). En la mayoría de las rocas superficiales la resistividad medida está determinada críticamente por la cantidad de agua, la concentración de iones disueltos y la mineralogía de las rocas [12; 14 y 15].

Dipolo-Dipolo Array

Where  $G$  is known as a geometric factor that corrects the relative distance between current injection points and measurement of the electric potential associated,  $L$  and  $l$  correspond to the distance between the electrodes and  $n$  is the  $n$ th electrode (Figure 7). In most of the superficial rocks, measured resistivity is critically determined for the amount of water, the dissolved ions concentration and the rocks mineralogy [12; 14 y 15].



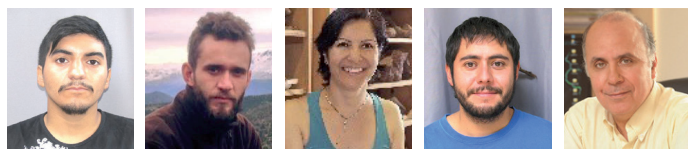
**Figura 7.** Esquema de la instalación de uno de los arreglos del estudio geoelectrico 2D.  $I$  representa la corriente inyectada en la roca;  $V$  la diferencia de potencial media. Los electrodos de corriente están representados por  $C1$  y  $C2$ ; mientras que los de potencial por  $P1$  y  $P2$ .

**Figure 7.** Diagram of the installation of one of the arrays in the 2D geo-electric survey.  $I$  represents the electric current injection in the rock;  $V$  is the difference of average potential. The current electrodes are represented by  $C1$  and  $C2$ ; while potential electrodes are represented by  $P1$  and  $P2$ .

## REFERENCES

1. SIBSON, R. "Crustal stress, faulting and fluid flow". *Geological Society, Special Publications*. 1994, n° 78, p. 69-84.
2. FAULKER, D., JACKSON, C., LUNN, R., SCHLISCHE, R., SHIPTON, Z., WIBBERLEY, C. and WITHJACK, M. "A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones". *Journal of Structural Geology*. 2010, vol32, n° 11, p. 1557-1575.
3. TELFORD, W., GELDART, L. and SHERIFF, R. *Applied Geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
4. INGHAM, M. "High resolution electrical imaging of fault zones". *Physics of the Earth and Planetary interiors*. 2005, vol150, n° 1, p. 93-105.
5. XIAO, Q., ZHANG, J., WANG, J., ZHAO, G. and TANG, J. "Electrical resistivity structures between the Northern Qilian Mountains and Beishan Wall, NW China, and tectonic implications". *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2012, vol200, p. 92-104.
6. BALL, L.B., GE, S., CAINE, J.S., REVIL, A. and JARDANI, A. "Constraining fault-zone hydrogeology through integrated hydrological and geoelectrical analysis". *Hydrogeology journal*. 2010, vol18, n° 5, p. 1057-1067.
7. MELNICK, D., FOLGUERA, A. and RAMOS, V.A. "Structural control on arc volcanism: the Caviahue-Copahue complex, Central to Patagonian Andes transition (38 S)". *Journal of South American Earth Sciences*. 2006, vol22, n° 1, p. 66-88.
8. CEMBRANO, J. and LARA, L. "The link between volcanism and tectonics in the Southern Volcanic Zone of the Chilean Andes: A review". *Tectonophysics*. 2009, vol471, n° 1, p. 96-113.
9. SUÁREZ, M. y EMPARÁN, C. *Hoja Curacautín: Regiones de la Araucanía y del BíoBío*. Santiago: National Service of Geology and Mining, 1997. National Service of Geology and Mining (Chile) Geological Map, n° 71.
10. SÁNCHEZ, P., PÉREZ-FLORES, P., ARANCIBIA, G., CEMBRANO J. and REICH, M. "Crustal deformation effects on the chemical evolution of geothermal systems: the intra-arc Liquiñe-Ofqui fault system, Southern Andes". *International Geology Review*. 2013, vol55, n° 11, p.1384-1400.
11. DÍAZ, D., MAKSYMOWICZ, A., VARGAS, G., VERA, E., CONTRERAS-REYES, E. and REBOLLEDO, S. "Exploring the shallow structure of the San Ramón thrust fault in Santiago, Chile (~33.5° S), using active seismic and electric methods". *Solid Earth*. 2014, vol 5, n° 2, p. 837-849.
12. GRANT, F.S. and WEST, G.F. *Interpretation theory in applied geophysics: Part 3, electrical conduction and electromagnetic induction methods*. New York: McGraw-Hill, 1965.
13. LOKE, M.H. "The inversion of two-dimensional resistivity data". PhD thesis. University of Birmingham, 1994.
14. ZOHDY, A.A., EATON, G.P. and MABEY, D.R. *Application of surface geophysics to ground-water investigations*. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 1974. Collection of environmental data, chapter D1.
15. REVIL, A., CATHLES, L.M., LOSH, S. and NUNN, J.A. "Electrical conductivity in shaly sands with geophysical applications". *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 1998, 103(B10), p.23925-23936.

## EQUIPO DE INVESTIGADORES / RESEARCH TEAM



Ronny  
Figueroa

Tomás  
Roquer

Gloria  
Arancibia

Nicolás  
Pérez-Estay

Gonzalo  
Yañez