

**Universidad Nacional de Rosario**  
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura



Tesis Doctoral

**Modelo de Distribución Resistivo del Subsuelo y sus  
Aplicaciones en Ingeniería Geológica, Cuenca del Arroyo  
Palmar, Entre Ríos.**

**Mario Rafael Hernán Chury**

**Director:**

Dr. Adrián Silva Busso  
UBA-INA

**Co-Director:**

Dr. Gerardo A. Riccardi  
FCEIA-UNR

**Tribunal evaluador:**

Dr. Erik Zimmermann (FCEIA-UNR)  
Dr. Javier Heredia (IGME-CESIC, España)  
Dr. Héctor Oстера (UBA-CONICET)

*Tesis presentada en la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y  
Agrimensura, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al título de*

***Doctor en Ingeniería***

20 de Marzo de 2023

Certifico que el trabajo incluido en esta tesis es el resultado de tareas de investigación originales y que no ha sido presentado para optar a un título de postgrado en ninguna otra Universidad o Institución.

A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'M. R. Chury', with a long horizontal flourish extending to the right.

Ing. Mario Rafael Hernán Chury

## RESUMEN

Esta tesis aborda una investigación metodológica con el objeto de estimar parámetros geomecánicos del subsuelo. Esto agrupa un conjunto de parámetros como ser el contenido de finos, contenido de arcilla, ángulo interno de fricción, cohesión y el contenido de agua, por medio de mediciones efectuadas en la superficie, de la distribución en profundidad de su resistividad eléctrica. Esta técnica es muy utilizada en la prospección de agua subterránea, pero en la bibliografía existen escasos trabajos y con resultados con diferentes posibilidades interpretativas que intentan correlacionar la resistividad eléctrica del subsuelo con sus parámetros geomecánicos, lo que constituye el aporte original de este estudio.

Debido a que la resistividad eléctrica del suelo es una función compleja, de la resistividad de la matriz sólida, del fluido que rellena sus poros, de su grado de saturación y temperatura, se realizaron una serie de determinaciones de laboratorio con suelos seleccionados, variando su contenido de agua, carga salina y temperatura, para comprender mejor la interacción y el rango de variación entre las variables mencionadas. Esto permite separar la respuesta resistiva de estos factores ya conocidos de la respuesta de la matriz sólida del suelo aún no debidamente estudiada.

Para lograr el objetivo se realizaron en campo sondeos eléctricos verticales paramétricos sobre puntos en los que se extrajeron muestras del subsuelo y se les realizaron ensayos geomecánicos en laboratorio. Los resultados obtenidos han demostrado que la resistividad eléctrica del subsuelo es un buen predictor indirecto de las diversas propiedades geomecánicas del mismo.

Con estos resultados fue posible formular una metodología, que permite a los profesionales que trabajan en estudios de suelos, complementar espacialmente el conocimiento de las propiedades del subsuelo, en puntos donde no se realizaron ensayos mecánicos, de una manera rápida y con un costo mucho menor.

*Palabras clave:* resistividad, suelo, parámetros geomecánicos, Formación Ubajay, Entre Ríos

## **ABSTRACT**

This thesis addresses a methodologic al research in order to estimate geomechanical parameters of the subsoil. This groups a set of parameters such as fine content, clay content, internal angle of friction, cohesion and water content, by means of measurements made at the surface, of the depth distribution of its electrical resistivity. This technique is widely used in the prospection of groundwater, but in the literature there are few works and with results with different interpretative possibilities that try to correlate the electrical resistivity of the subsoil with its geomechanical parameters, which constitutes the original contribution of this study. Because the electrical resistivity of the soil is a complex function, of the resistivity of the fluid that fills its pores, of its degree of saturation and temperature, a series of laboratory determinations were made with selected soils, varying their water content, saline load and temperature, to better understand the interaction and the range of variation between the mentioned variables. This makes it possible to separate the resistive response of these already known factors from the response of the solid matrix of the soil not yet properly studied. To achieve the objective, parametric vertical electrical soundings were carried out in the field on points where samples were extracted from the subsoil and geomechanical tests were carried out in the laboratory. The results obtained have shown that the electrical resistivity of the subsoil is a good indirect predictor of its various geomechanical properties. With these results it was possible to formulate a methodology, which allows professionals working in soil studies, to spatially complement the knowledge of the properties of the subsoil, at points where mechanical tests were not performed, in a fast way and with a much lower cost.

*Keywords:* resistivity, soil, geomechanical parameters, Ubajay Formation, Entre Ríos

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas que me apoyaron durante mi investigación y que hicieron posible la finalización de esta tesis doctoral. En primer lugar, quiero agradecer a mi director, el Dr. Adrián Silva Busso, por su orientación y apoyo en todo el proceso. Su experiencia y conocimiento fueron fundamentales para el éxito de este trabajo.

A mi co-director, el Dr. Gerardo Riccardi, por las sugerencias y apoyo brindado.

También agradezco a los miembros del tribunal evaluador, el Dr. Erik Zimmermann, el Dr. Javier Heredia y el Dr. Héctor Ostera, por sus comentarios y sugerencias valiosas.

A la Universidad Tecnológica Nacional Regional Concordia, por haber confiado en mí, para realizar esta carrera de postgrado, en especial a su decano Ing. Jorge Penco, al secretario académico Ing. Fabián Avid, a la secretaria de CyT Dr. Natalia Tesón y a la Ing. Marisa Jauregui. Además, agradecer la labor del personal administrativo.

No puedo dejar de mencionar al Ing. Oscar Rico, por su valiosa información y sus consejos. A la Ing. Emilia Medina, por su generosa colaboración en este proyecto en la realización de los ensayos geotécnicos junto a sus becarios, que fueron esenciales para lograr los resultados que presento en esta tesis.

A los docentes investigadores del Grupo de Investigación Geoambiental (GIGAM), la Ing. Viviana Venturino, y especialmente al Agrim. Patricio Machado, por todas sus enseñanzas y consejos que me dejó antes de partir a la eternidad.

A Carlos Giacossa, Rubén Garín y Guido Adente, por la colaboración en el desarrollo de las tareas de campo.

Agradezco especialmente al Dr. David Asiain Ansorena docente de la Escuela Universitaria de la Almunia (EUPLA) por su importante aporte técnico en la orientación para el desarrollo del tomógrafo eléctrico resistivo.

A la Universidad Nacional de Rosario, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura por la posibilidad de realizar esta carrera de Posgrado en su prestigiosa casa de estudios, especialmente a la comisión Doctoral y al personal administrativo.

Al Dr. Ernesto Kofman, por todo su apoyo, sus enseñanzas y consejos que sin ellos no lo hubiera logrado.

Además, quiero expresar mi agradecimiento a mi madre y a mi padre quien falleció antes de que pudiera ver el resultado final de este proyecto y que nunca dejaron de creer en mí.

Finalmente, un agradecimiento muy especial a mi amada esposa Gabriela, mi mejor amiga, que ha sido mi fuerza cuando he estado cansado o desalentado, a mis hijos Vladimir y Benicio por llenar mi vida de alegría y motivación. Espero que este trabajo los inspire a perseguir sus propios sueños y a hacer lo mejor que puedan en todo lo que hagan. Gracias por su paciencia, comprensión y por el amor que me han brindado.

## ÍNDICE

<b>1. FORMULACIÓN GENERAL DE LA HIPÓTESIS</b> .....	1
1.1. Problemática .....	1
1.2. Enunciado hipotético .....	1
1.3. Objetivos .....	1
1.4. Antecedentes .....	2
1.5. Alcances .....	7
1.6. Estructura de la tesis .....	7
<b>2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b> .....	9
2.1. Prospección geoelectrica .....	9
2.1.1. Métodos de resistividad eléctrica .....	9
2.1.2. Conceptos y dispositivos fundamentales en la prospección eléctrica por corriente continua .....	10
2.1.2.1. Resistividad eléctrica .....	10
2.1.2.2. Resistividad Aparente .....	12
2.1.2.3. Dispositivos electródicos lineales .....	15
2.1.2.4. Dispositivos electródicos dipolares .....	17
2.1.3. Técnicas de prospección .....	19
2.1.4. Interpretación del Sondeo eléctrico vertical (SEV) .....	21
2.1.5. Factores que influyen en la resistividad eléctrica de los suelos .....	23
2.2. Mecánica de suelos .....	30
2.2.1. Características del suelo .....	30
2.2.2. Relaciones volumétricas y gravimétricas .....	31
2.2.2.1. Relaciones volumétricas .....	32
2.2.2.2. Relaciones gravimétricas .....	33
2.2.3. Clasificación de suelos .....	33
2.2.3.1. Distribución granulométrica .....	34
<b>3. CARACTERÍSTICAS DEL AREA DE ESTUDIO</b> .....	35
3.1. Área de estudio regional .....	35
3.2. Antecedentes geológicos regionales .....	35
3.3. Zona de estudio en detalle (ZED) .....	40
3.4. Antecedentes geológicos de la ZED .....	41
<b>4. METODOLOGIA</b> .....	44
4.1. Estudios de campo exploratorio .....	44
4.2. Ensayos de laboratorio .....	46

4.2.1. Ensayos de la variación de la resistividad eléctrica con la temperatura.....	49
4.2.2. Ensayo de variación de resistividad eléctrica con el contenido de agua.....	51
4.3. Estudio de campo paramétrico.....	53
4.4. Levantamiento de mapa geoelectrico.....	56
4.5. Levantamiento mapa geomecánico.....	58
4.6. Validación de los resultados de los mapas geomecánicos.....	58
4.7. Instrumentación de la cuenca.....	59
4.7.1. Estación de monitoreo continuo de humedad y temperatura de suelo.....	60
4.7.2. Estación de monitoreo de nivel freático.....	63
<b>5. ESTUDIO DE LA RESPUESTA RESISTIVAS DE LOS SUELOS.....</b>	<b>65</b>
5.1. Datos obtenidos por las estaciones de mediciones hidrogeológicas en la ZED	65
5.2. Estudio de la variación de la resistividad eléctrica con la temperatura.....	67
5.3. Variación de la resistividad eléctrica en suelos granulares con el contenido de agua y salinidad.....	76
5.4. Análisis a partir de muestras de laboratorio de la validez de la ley de Archie para valores bajos de resistividad eléctrica del agua contenida en los poros.....	81
5.5. Análisis del estudio exploratorio.....	85
5.6. Análisis del estudio paramétrico de las resistividades eléctricas en el ZED.....	88
<b>6. MODELO CONCEPTUAL GEOMECAÁNICO RESISTIVO.....</b>	<b>95</b>
6.1. Mapas geoelectricos.....	95
6.2. Mapas geomecánicos.....	97
6.2.1. Contenido de finos.....	98
6.2.2. Contenido de arcilla.....	100
6.2.3. Ángulo interno de fricción.....	102
6.2.4. Cohesión.....	104
6.2.5. Contenido de agua.....	106
6.3. Validación del modelo.....	108
6.4. Procedimiento metodológico de análisis resistivo.....	109
<b>7. CONCLUSIONES.....</b>	<b>111</b>
<b>8. PUBLICACIONES DESARROLLADAS DURANTE EL DESARROLLO DE LA TESIS.....</b>	<b>113</b>
8.1. Congresos y jornadas.....	113
8.2. Publicaciones en revistas.....	114
8.3. Cursos de posgrado dictados.....	114
8.4. Disertaciones.....	114

<b>9. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	115
<b>ANEXO A. Desarrollo de instrumentación geoelectrica</b> .....	123
<b>A.1. Tomógrafo eléctrico resistivo</b> .....	124
<b>A.1.1. Descripción general del Tomógrafo Eléctrico Resistivo.</b> .....	124
<b>A.1.2. Unidad de control</b> .....	125
<b>A.1.3. Placas de red</b> .....	126
<b>A.1.4. Unidad de alimentación</b> .....	128
<b>A.1.5. Unidad de Medición</b> .....	128
<b>A.1.6. Electrodo de medición</b> .....	129
<b>A.2. Resistivímetro de laboratorio</b> .....	130
<b>A.2.1. Descripción general del Resistivímetro de laboratorio.</b> .....	132
<b>A.2.2. Unidad de control</b> .....	133
<b>A.2.3. Unidad de alimentación</b> .....	133
<b>A.2.4. Unidad de medición</b> .....	133
<b>A.3. Resistivímetro 1D y polarización Inducida</b> .....	134
<b>A.3.1. Descripción general del equipo</b> .....	135
<b>A.3.2. Unidad de control</b> .....	135
<b>A.3.3. Unidad de alimentación</b> .....	135
<b>A.3.4. Unidad de medición</b> .....	136
<b>A.3.5. Sistema de impresión</b> .....	136
<b>A.3.6. Diagrama electrónico del resistivímetro de laboratorio</b> .....	138
<b>ANEXO B. Datos geomecánicos de estudio exploratorio</b> .....	139
<b>ANEXO C. Curvas de campo e interpretación geoelectrica de estudio exploratorio</b> .....	150
<b>ANEXO D. Mediciones en laboratorio de resistividad eléctrica de muestras seleccionadas</b> .....	156
<b>Correlaciones entre resistividad eléctrica y contenido de agua, en muestra de arena</b> 156	
<b>Correlaciones entre resistividad eléctrica vs contenido de agua, en muestra de grava</b> 161	
<b>Correlaciones resistividad eléctrica vs contenido de agua, en muestra de arena con arcillas</b> .....	166
<b>ANEXO E. Datos geomecánicos en estudio paramétrico</b> .....	168
<b>ANEXO F. Curvas de campo e interpretación geoelectrica del estudio paramétrico</b> .....	184
<b>ANEXO G. Curvas de campo e interpretación geoelectrica para construcción de mapas geomecánicos</b> .....	186

<b>ANEXO H. Datos geomecánicos de muestra para validación en estudio paramétrico.....</b>	<b>192</b>
---	------------

# 1. FORMULACIÓN GENERAL DE LA HIPÓTESIS

## 1.1. Problemática

La realización de importantes obras de estructuras en ingeniería civil, requieren esencialmente la determinación precisa de las propiedades mecánicas del suelo para su correcta fundación. Por ello los ingenieros civiles deben estudiar las propiedades del suelo, tales como su origen geológico, distribución granulométrica, capacidad para drenar agua, compresibilidad, resistencia cortante, capacidad de carga y otras. Estos estudios requieren que se lleven a cabo ensayos tanto in situ como en laboratorio a través de muestras extraídas del lugar.

Debido a que las propiedades del suelo están sujetas a una variación espacial y temporal; por medio de los métodos convencionales, la cantidad de puntos evaluados están limitados. Estos métodos además son invasivos, costosos y consumen un tiempo considerable.

Por ello la idea de esta investigación es determinar la relación entre una propiedad indirecta del subsuelo y relacionarla con el dato que se necesita conocer. La medición sobre el subsuelo de su resistividad eléctrica es un método accesible para ser empleado con el fin de obtener algunos de sus parámetros geomecánicos.

## 1.2. Enunciado hipotético

**Hipótesis:** *Por medio de la medición de la resistividad eléctrica del subsuelo es posible establecer un modelo de correlación con los parámetros geomecánicos.*

## 1.3. Objetivos

El objetivo principal es desarrollar un modelo de distribución resistiva del subsuelo correlacionable con diversos aspectos geológicos, hidrogeológicos y geo-ingenieriles. Para lograrlo se utilizarán métodos geoeléctricos 1D en forma regional y en procesos locales con la finalidad de alcanzar más detalles en la modelización de las resistividades. Posteriormente se busca relacionar los valores de resistividad con parámetros físicos más específicos en los sedimentos, por ejemplo, considerando rangos acotados de salinidad (como presenta la cuenca) lograr modelos de distribución de permeabilidades a partir

de los modelos resistivos, modelos de distribución de la temperatura de las aguas de los acuíferos y/o la posibilidad de distribución de la cohesión en zona no saturada. Esto último constituyen posibilidades de análisis y es en parte el objeto de esta tesis.

Se trabajará como unidad fisiográfica de terreno la Cuenca del Arroyo Palmar. Esta última posee la suficiente información de base y estudios previos relacionados que permiten abordar aspectos conclusivos en este estudio. Siendo específicos en los objetivos, se pretende:

- Desarrollar y adoptar una metodología propia que involucre desde el desarrollo del instrumental hasta la puesta a punto de sus capacidades de empleo.
- Implementar técnicas de estudio geoelectrico 1D analizando las diferentes posibilidades de empleo en función de los diferentes aspectos geológicos que interesa modelar.
- Definir un modelo de correlación entre las magnitudes geoelectricas obtenidas y aquellos parámetros geológicos e hidrogeológicos que revistan importancia en la geología aplicada a la ingeniería.

#### **1.4. Antecedentes**

La bibliografía aporta muy pocos trabajos, que correlacionen la resistividad eléctrica del suelo con sus parámetros geomecánicos.

Uno de los primeros trabajos realizados tratando de relacionar propiedades mecánicas del suelo con su resistividad eléctrica, fue llevado a cabo por Cosenza et al. (2006). Este estudio se llevó a cabo en un lugar con una geología bien conocida en donde se realizaron ensayos geotécnicos como el del cono dinámico de penetración (DCPT) y el dispositivo de corte in situ, además de mediciones geofísicas utilizando un tomógrafo eléctrico resistivo (TER) y un radar de penetración de suelo (RPS).

Dejando de lado el estudio que realizaron con el (RPS), que no es relevante para resolver la hipótesis que se pretende realizar, con el TER pudieron identificar cualitativamente la existencia de tres capas geológicas tanto por

medio de las mediciones de resistividad eléctrica como por los ensayos geotécnicos.

Con respecto a las correlaciones cuantitativas no dieron una buena correspondencia entre la resistividad eléctrica del suelo y la resistencia mecánica obtenida con el cono de penetración dinámica. En cambio, si se obtuvo una buena correlación entre la resistividad eléctrica del suelo y su contenido de agua (como era previsible).

Otro intento por encontrar una relación entre la resistividad eléctrica y la resistencia mecánica del suelo fue llevado a cabo por Sudha et al. (2009). En este trabajo se utilizaron dos zonas con una geología diferente y en cada una de ellas se realizaron los ensayos geotécnicos de penetración estándar (SPT) y del cono dinámico de penetración (DCPT), además de la realización de tomografías eléctricas resistivas (TER), en cada una de las zonas.

El análisis de los datos obtenidos arrojó una buena correlación entre la resistividad eléctrica y la resistencia mecánica del suelo. Observándose un aumento en la pendiente de la curva resistividad- resistencia con el aumento del contenido de arcilla. Este es el primer estudio que muestra una correlación positiva entre métodos geoelectricos y aspectos geomecánicos.

En el trabajo de Ozcep et al. (2009) realizaron un estudio para correlacionar la resistividad eléctrica con el contenido de agua en el suelo. Para ello realizaron 210 sondeos eléctricos verticales y tomaron muestras de suelo haciéndole determinaciones en laboratorio del contenido de agua. Todas las muestras estaban formadas por arenas. Como conclusión de su trabajo encontraron una buena correlación entre la resistividad eléctrica y el contenido de agua en el suelo.

También Adli et al. (2010), estudiaron la relación entre la resistividad eléctrica del subsuelo, midiendo sus valores tanto en campo como en laboratorio. Para ello realizaron en campo una tomografía eléctrica resistiva 2D y a lo largo de ese corte geoelectrico del subsuelo se extrajeron 6 muestras del material a una misma profundidad, que fueron luego llevadas a laboratorio para medir su resistividad mediante el método de los dos electrodos. La conclusión obtenida en este trabajo indica que la resistividad medida en laboratorio es mayor que la resistividad medida en campo.

En el trabajo de Peinado et al. (2010), se estudió la relación entre la resistividad eléctrica y el contenido de finos del subsuelo (limo – arcilla). Para ello se realizaron 6 perforaciones y de ellas se sacaron 18 muestras de suelo. Estas muestras fueron llevadas a laboratorio y se realizaron las determinaciones de su textura y resistividad eléctrica por medio del método de dos electrodos. Además, se hicieron in situ en los lugares donde se encuentran las perforaciones las tomografías geoeléctricas. Llegaron a la conclusión de que por medio de las mediciones de resistividad eléctrica del subsuelo obtenidas por tomografía geoeléctrica y la resistividad del agua de formación, constituye un medio útil y práctico para caracterizar los materiales del subsuelo en lugares del área de estudio donde no hay información de pozos.

Otro trabajo llevado a cabo esta vez por Siddiqui y Osman (2012a) tenía como objetivo encontrar alguna relación entre la resistividad eléctrica del suelo y algunas de sus propiedades como ser contenido de agua, peso específico, ángulo interno de fricción y cohesión. Para ello realizaron una perforación de 3 metros y sacaron un total de 5 muestras a diferentes profundidades. Además, realizaron Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) en dichos puntos para así poder determinar la resistividad eléctrica a las profundidades de las muestras (Sondeo paramétrico). Las muestras se enviaron al laboratorio, donde se las sometió a ensayos geotécnicos para determinar su contenido de humedad, peso específico, corte directo y la medición de su resistividad eléctrica.

Este estudio mostró una buena correlación cuantitativa entre la resistividad del suelo y su contenido de humedad y lo mismo sucedió entre la resistividad del suelo y su ángulo interno de fricción; pero se obtuvo una pobre correlación entre la resistividad del suelo y su peso específico; y lo mismo ocurrió entre la resistividad del suelo y su cohesión.

En una segunda publicación relacionada, nuevamente Siddiqui y Osman (2012b) utilizaron esta vez, un total de doce muestras, obtenidas de dos pozos de tres metros de profundidad y distantes treinta metros entre sí. Al igual que en su trabajo anterior, se sometió a estas muestras a las mismas mediciones eléctricas y ensayos geotécnicos en laboratorio.

En esta oportunidad volvieron a encontrar una buena correlación entre la resistividad del suelo y su contenido de humedad y también con su ángulo interno

de fricción. Pero, nuevamente una pobre correlación entre la resistividad del suelo y su peso específico y la cohesión.

En el trabajo de Arias et al. (2012), se realizaron sondeos eléctricos verticales (SEV) acoplados a sondeos mecánicos con registro de resistencia a la penetración estándar (SPT) y recuperación de muestras para ensayos de caracterización y propiedades geomecánicas. Las conclusiones a las que arribaron indican que los registros de resistividad eléctrica permiten discriminar con razonable seguridad los tipos de geomateriales que se encuentran en el subsuelo, aunque no es posible correlacionarlos directamente con sus características y propiedades geomecánicas. En clara contraposición con los resultados de Siddiqui y Osman (2012a, b).

En el estudio de la correlación entre la resistividad eléctrica y el contenido de agua sobre muestras de arena preparadas en laboratorio realizado por Sudhir y Pradeep (2014), demostraron que existe una buena correlación entre la resistividad eléctrica del suelo y su contenido de humedad.

Kowalczyk et al. (2014) investigaron la relación entre la resistividad eléctrica en suelos no cohesivos y su grado de compactación. Para ello colocaron muestras de suelos no cohesivos en cuatro cajas que simulaban, a pequeña escala, la mezcla de áridos usados en terraplenes e hicieron mediciones de resistividad eléctrica, densidad de partículas sólidas, contenido óptimo de humedad y densidad seca máxima. Las mediciones se realizaron en un ambiente de laboratorio.

La conclusión a la cual llegaron después de analizar los datos obtenidos es que los métodos de resistividad eléctrica son efectivos en la localización de suelos cohesivos, no cohesivos, zona de aireación y zona saturada. Pero distinguir suelo compactado del suelo poco consolidado no resulta simple.

En el trabajo de Zhou et al. (2015), estudiaron en laboratorio la dependencia de la resistividad eléctrica de diferentes tipos de suelos con la variación de su contenido de humedad, porosidad y temperatura. Con esto pudieron determinar que incrementando el nivel de saturación del suelo resulta en un decrecimiento de su resistividad eléctrica según una función potencial. Además, pudieron observar la presencia de nivel de saturación crítico del suelo que por debajo de

éste la resistividad aumenta rápidamente, concluyen también que los suelos con texturas finas tienen resistividades más bajas que los de texturas gruesas.

En la investigación de Filho et al. (2016) que estudiaron las relaciones entre la resistividad eléctrica y características físicas del suelo como ser, contenido de humedad, granulometría y compactación, las conclusiones a las que arribaron indican que la resistividad eléctrica decrece con el incremento del contenido de humedad y también con el aumento en el contenido de arcilla del suelo. Además, la compactación influye en los valores de resistividad medidos, especialmente para muestras con mayor contenido de arcilla, pero en menor grado que el contenido de humedad. Además, mencionan que es posible por medio de una superficie de correlación identificar la granulometría del suelo a partir de mediciones de humedad y compactación.

En el trabajo de Kazmi et al. (2016), estudiaron la relación entre la resistividad eléctrica y contenido de agua del subsuelo. Para ello realizaron diez sondeos eléctricos verticales en lugares donde por medio de perforaciones tomaron muestras de suelo hasta los tres metros. A dichas muestras las sometieron a mediciones de resistividad en laboratorio y determinación de contenido de agua. Las conclusiones a las que arribaron, muestran una fuerte correlación entre la resistividad tanto en campo como en laboratorio con el contenido de agua, pero solo para el caso de un suelo arenoso. En cambio, con muestras de suelo limo-arenoso esta correlación fue pobre.

Matsui et al. (2016), tomaron muestras cilíndricas de granito y de rocas sedimentarias y realizaron en laboratorio estudios de las relaciones entre su resistividad, porosidad y grado de saturación de sus poros. Ellos encontraron que la resistividad de las rocas tiende a disminuir con el incremento de la porosidad. Pero la resistividad no siempre corresponde a la porosidad, incluso en el mismo tipo de masa de roca, debido a las diferentes composiciones minerales y la geometría de los poros para cada material. Por otro lado, la resistividad de la roca decrece con el incremento de la saturación del agua hasta cierto punto, más allá del cual el grado de esta caída se vuelve insignificante.

Además, la resistividad de las rocas cuando alcanzan un 20% o menos de saturación de agua aumenta exponencialmente al disminuir la saturación de agua.

En la investigación de Jusoh y Osman (2017), se estudió la correlación entre la resistividad de muestras obtenidas en perforaciones y propiedades geomecánicas como ser, contenido de humedad, cohesión, ángulo interno de fricción e índice de plasticidad. Los resultados obtenidos permitieron encontrar una fuerte correlación entre la resistividad eléctrica (medida en laboratorio) y el contenido de humedad y la cohesión. En cambio, expresan la necesidad de un estudio más extenso para poder entender las relaciones entre la resistividad eléctrica y el ángulo interno de fricción y el índice de plasticidad.

En el trabajo de Hazreek et al. (2018), se estudió la relación del contenido de humedad del suelo por medio de mediciones de resistividad eléctrica realizadas in situ y en laboratorio, sobre muestras alteradas tomadas del lugar. Las conclusiones a las que arribaron revelan que con mediciones de resistividad tanto en campo como en laboratorio se puede determinar el contenido de humedad por medio de la introducción de un factor de corrección.

## **1.5. Alcances**

Esta investigación pretende ser potencialmente útil como método de estimación de parámetros geotécnicos de forma no invasiva, de rápida obtención de resultados y de bajo costo, en comparación con los métodos convencionales. Además, por lo citado anteriormente permitiría un aumento en la densidad de las mediciones y con la tecnología adecuada un monitoreo en tiempo real de la variación de las propiedades (in situ) de los suelos.

## **1.6. Estructura de la tesis**

En el capítulo uno, se plantea la motivación que despierta interés por el tema de investigación, se describe el problema en estudio y se proponen los objetivos a lograr con la investigación. Se fundamenta el tema en base de antecedentes bibliográficos y se muestran las principales contribuciones realizadas. Por último, se presenta la disposición de los contenidos de la tesis para organizar la comprensión de su lectura.

En el capítulo dos, se definen los conceptos fundamentales y las leyes que sustentan el método de resistividades eléctricas, como así también las diferentes

modalidades de su ejecución. Además, se brindan algunos conceptos básicos sobre mecánica de suelos.

En el capítulo tres se ubican geográficamente, las distintas áreas en donde se realizaron los estudios, sus características y los motivos que impulsaron la elección.

En el capítulo cuatro, se describen las características de los instrumentos de medición de variables hidrogeológicas que se encuentran ubicados en la cuenca de estudio.

En el capítulo cinco, se describen los ensayos de laboratorio y de campo realizados.

En el capítulo seis, se presentan y analizan los resultados obtenidos de las mediciones realizadas en campo y en laboratorio. A partir de estos resultados, se explicitan las correlaciones encontradas.

En el capítulo siete, se presentan los modelos obtenidos de los parámetros geomecánicos a diferentes profundidades que son consecuencia de las correlaciones encontradas anteriormente.

En el capítulo ocho, se presenta una breve síntesis junto con las principales conclusiones derivadas de este trabajo de investigación. Además, se proponen futuras líneas de investigación.

En el capítulo nueve, se presentan las principales contribuciones realizadas durante el desarrollo de esta investigación.

En el capítulo diez, se encuentra todo el material consultado.

## **2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

### **2.1. Prospección geoelectrica**

Los métodos eléctricos de prospección, también denominados geoelectricos estudian por medio de mediciones efectuadas en la superficie del suelo, la distribución en profundidad de alguna magnitud electromagnética.

Existen tres magnitudes electromagnéticas principales que se utilizan para identificar los cuerpos situados en el subsuelo. Estas magnitudes son la permeabilidad magnética  $\mu$ , la constante dieléctrica o permitividad  $\epsilon$  y la resistividad  $\rho$ .

Son técnicas no destructivas y de investigación extensiva o con gran cobertura, complementaria de los ensayos in situ y técnicas de investigación directa, como los sondeos mecánicos o las calicatas (González de Vallejos et al., 2004).

Estas técnicas geofísicas, no proporcionan información geológica o características mecánicas del suelo de manera directa, pero los parámetros físicos obtenidos pueden ser correlacionados, lo cual permite la calibración de los modelos con los métodos de muestreo directo como las perforaciones (Cuñez Uvidia, 2015).

#### **2.1.1. Métodos de resistividad eléctrica**

Dentro del gran universo de los métodos geoelectricos, se encuentra un método denominado de resistividades, que tiene un gran número de posibles variantes de implementación y que sin duda es el más importante de los métodos eléctricos utilizados en la actualidad.

Desde el punto de vista económico, la principal ventaja de los métodos eléctricos es el reducido coste, no solo en lo que a aparatos se refiere, sino también en el trabajo de campo (Figuerola, 1974).

Esta aparente simplicidad ha llevado a que se lleven a cabo prospecciones por personal no capacitado, a menudo con muy malos resultados (McDowell et al., 2002).

La interpretación debe basarse en un modelo que es consistente con la geología conocida y usa todos los contenidos disponibles tales como información de perforaciones y afloramientos geológicos (Mc Dowell et al., 2002).

## 2.1.2. Conceptos y dispositivos fundamentales en la prospección eléctrica por corriente continua

Para llegar a comprender el fundamento del método de resistividad eléctrica, es necesario primeramente definir algunos conceptos elementales y las leyes que lo sustentan.

### 2.1.2.1. Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica puede considerarse como la capacidad que tiene un material para resistirse al paso de la corriente eléctrica. Para poder definirla matemáticamente, se hace uso de un circuito como el mostrado en la (Figura 2.1), que consiste en un trozo de un material de sección transversal  $S$  y longitud  $l$ , al cual se le aplica una diferencia de potencial  $V$  entre sus caras opuestas, produciendo una circulación de la corriente eléctrica  $i$ .

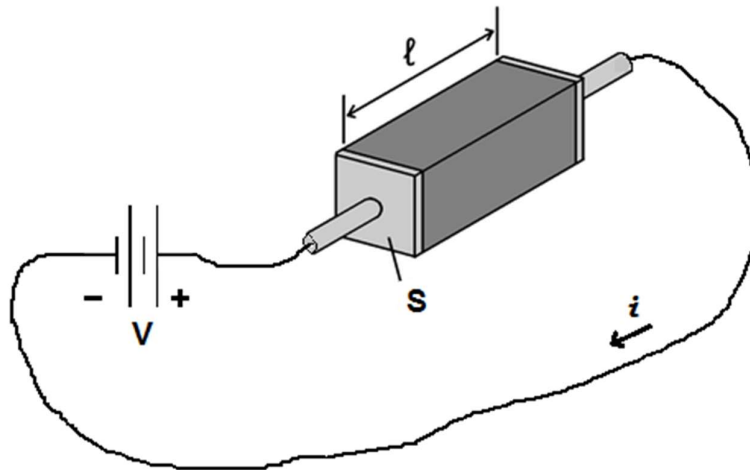


Figura 2.1. Concepto de resistividad eléctrica de un material.

Entonces la resistividad eléctrica  $\rho$  (característica propia del material) se define como:

$$\rho = \frac{E}{j} \quad (2.1)$$

donde,

$$E = \frac{V}{l} \quad (2.2)$$

es el campo eléctrico dado en *volts/metro* ( $V/m$ ), y

$$j = \frac{i}{S} \quad (2.3)$$

es la densidad de la corriente eléctrica en *amper/metro<sup>2</sup>* ( $A/m^2$ ).

Sustituyendo las ecuaciones (2.2) y (2.3) en (2.1), se obtiene:

$$\rho = \frac{V S}{l i} \quad (2.4)$$

Además,

$$R = \frac{V}{i} \quad (2.5)$$

es la resistencia eléctrica en *ohms* ( $\Omega$ ), cuya formulación es conocida como la *Ley de Ohm*.

Reemplazando la ecuación (2.5) en (2.4), se llega a la siguiente expresión que define la resistividad eléctrica de un cuerpo

$$\rho = R \frac{S}{l} \quad (2.6)$$

Como puede observarse en la ecuación (2.4), la resistividad eléctrica de un cuerpo, puede ser obtenida midiendo los valores tanto de  $V$  como de  $i$  y además conociendo sus dimensiones físicas.

Contrario a la resistividad eléctrica, se tiene la conductividad eléctrica que es una medida que representa la facilidad que tiene un material para permitir el paso de la corriente eléctrica a través de él. Se define numéricamente como el inverso de su resistividad eléctrica, siendo sus unidades, el *Siemens/metro* ( $Sm/m$ ).

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.7)$$

Es importante hacer notar que en la prospección geoelectrica, la corriente eléctrica que se inyecta en el subsuelo no recorre conductores lineales, sino que se mueve en un medio tridimensional y con características muy variables.

Para hacer el problema más fácilmente abordable desde el punto de vista matemático, se simplifican las condiciones reales, suponiendo que el subsuelo se compone de varias zonas isotropas y homogéneas, separadas entre sí por superficies límites perfectamente planas. A pesar de esta simplificación, el problema es matemáticamente muy difícil y solo ha sido resuelto en casos relativamente sencillos (Orellana, 1982).

### 2.1.2.2. Resistividad Aparente

Para definir el concepto de resistividad aparente en primer lugar se considera un subsuelo homogéneo de resistividad eléctrica  $\rho$ , en el que se colocan enterrados en el plano de la superficie del terreno un conjunto de electrodos metálicos  $A$ ,  $B$ ,  $M$  y  $N$ , en forma arbitraria.

A través de los electrodos  $A$  y  $B$  se conecta un generador de corriente continua y el campo eléctrico que producen, se estudia por medio de la medición de la diferencia de potencial entre los electrodos  $M$  y  $N$ , utilizando para ello un milivoltímetro. Además, se mide la corriente eléctrica inyectada en el subsuelo, por medio de la utilización de un miliamperímetro (Figura 2.2).

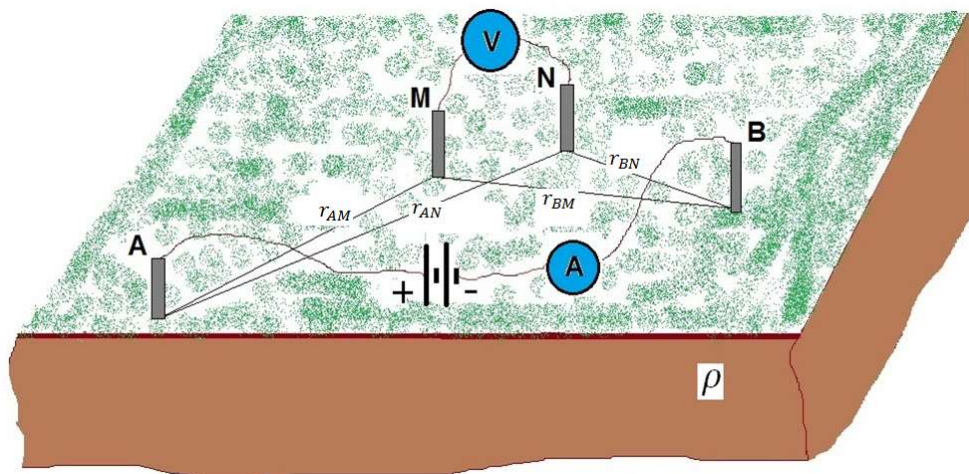


Figura 2.2. Resistividad aparente de un medio homogéneo.

La diferencia de potencial entre los puntos  $M$  y  $N$  será según (Orellana, 1982),

$$\Delta U = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}} \right) \quad (2.8)$$

De esta última ecuación se obtiene la expresión para la resistividad  $\rho$  en un medio homogéneo, en cuya superficie se encuentra un dispositivo de cuatro electrodos dispuesto de manera arbitraria.

$$\rho = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}}} \frac{\Delta U}{I} \quad (2.9)$$

o, en forma resumida se puede reescribir la ecuación anterior como

$$\rho = K \frac{\Delta U}{I} \quad (2.10)$$

siendo

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}}} \quad (2.11)$$

El factor  $K$  se conoce como **coeficiente del dispositivo** o **coeficiente geométrico** y solo depende de la ubicación física de los electrodos en el terreno.

Ahora si se considera que el subsuelo que se encuentra debajo del dispositivo eléctrico utilizado en la suposición anterior, es como el representado en la (Figura 2.3), y si se realizan nuevamente las mediciones de intensidad de la corriente eléctrica y diferencia de potencial de la misma manera, resultará en una resistividad ficticia  $\rho_a$  que será producto de complejas relaciones entre las resistividades eléctricas verdaderas  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  y  $\rho_3$  de los diversos materiales y de sus respectivos espesores.

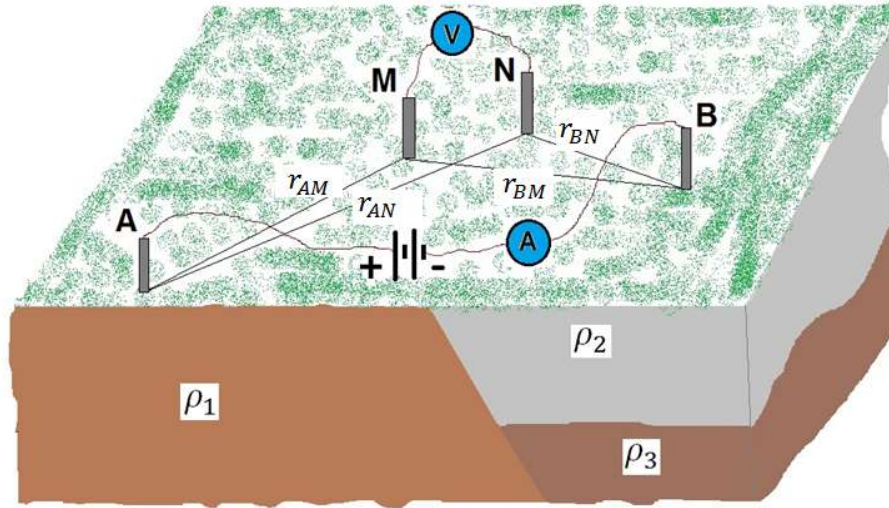


Figura 2.3. Resistividad aparente de un medio heterogéneo.

Esto se debe a que se utilizó para un medio heterogéneo una ecuación correspondiente a un medio homogéneo. A esta resistividad eléctrica ficticia  $\rho_a$  es la que se denomina **resistividad eléctrica aparente** y es la que se usa como variable experimental de los resultados de las mediciones llevadas a cabo con el dispositivo electródico y la que se toma como base para la interpretación.

$$\rho_a = K \frac{\Delta U}{I} \quad (2.12)$$

La resistividad eléctrica aparente  $\rho_a$  se define a veces como la resistividad verdadera de un terreno imaginario, homogéneo e isótropo equivalente al terreno real heterogéneo (Astier, 1982).

Observando la Ecuación (2.12) se deduce que  $\rho_a$  no depende de la intensidad de la corriente eléctrica  $I$  que se inyecta en el terreno, ya que la variación de la citada intensidad origina otra variación proporcional de la diferencia de potencial  $\Delta U$ .

### 2.1.2.3. Dispositivos electródicos lineales

Se denominan así a los arreglos tetraelectródicos  $AMNB$ , que se encuentran colocados sobre una misma línea recta. Si, además, los cuatro electrodos se disponen simétricamente respecto de un centro común  $O$ , se denomina **dispositivo lineal simétrico**.

Dentro de los dispositivos electródicos lineales, los más conocidos son los que se detallan a continuación:

#### Dispositivo Wenner

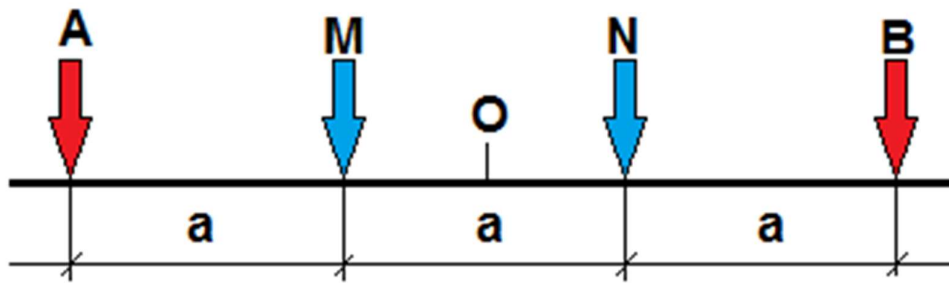


Figura 2.4. Dispositivo Wenner.

Este es un dispositivo simétrico (Figura 2.4), en el cual las distancias entre los electrodos contiguos son iguales, o sea

$$r_{AM} = r_{MN} = r_{NB} = a$$

Sustituyendo estos valores característicos en la ecuación (2.11), se obtiene el coeficiente geométrico para este dispositivo

$$K_{Wenner} = 2\pi a \quad (2.13)$$

Entonces la resistividad aparente para esta configuración electródica, se puede calcular mediante la ecuación (2.12), obteniéndose

$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (2.14)$$

## Dispositivo Schlumberger

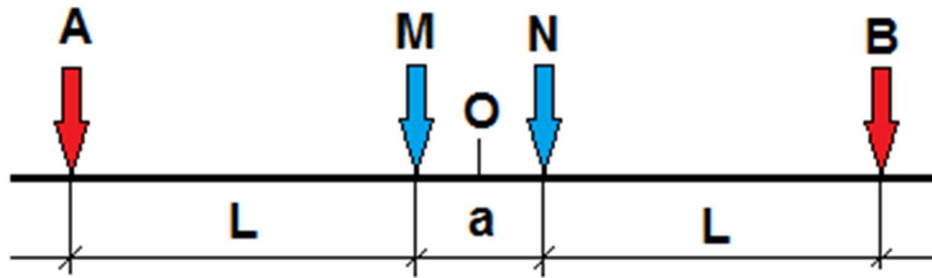


Figura 2.5. Dispositivo Schlumberger

La idea de este dispositivo es hacer que la distancia  $a$  que separa los electrodos de medición  $M$  y  $N$  tienda a cero, cosa irrealizable en la práctica. Pero, si la distancia entre las tomas de recepción  $r_{MN}$  es menor que un quinto de la distancia entre las tomas de tierra de emisión  $r_{AB}$ , con esta condición la relación  $\Delta V/r_{MN}$  puede, con suficiente exactitud, considerarse igual a la intensidad del campo eléctrico en el centro del dispositivo, es decir, considerarlo como un dispositivo límite. Esto facilita la comparación de los resultados de las observaciones de campo con los cálculos teóricos dados, de la intensidad de campo (Iakubovskii, 1980).

Según se observa en la figura 2.5, las relaciones espaciales de los electrodos para este dispositivo son las siguientes

$$r_{AM} = r_{BN} \text{ y } r_{AN} = r_{BM}$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación (2.11) se obtiene el coeficiente geométrico para este dispositivo

$$K_{Schlumberger} = \frac{2\pi}{\frac{2}{r_{AM}} - \frac{2}{r_{AN}}}$$

La expresión anterior puede escribirse de forma alternativa como

$$K_{Schlumberger} = \pi \frac{r_{AM} r_{AN}}{r_{MN}} \quad (2.15)$$

La resistividad aparente según la ecuación (2.12), para esta configuración eléctrica es

$$\rho_a = \pi \frac{r_{AM} r_{AN}}{r_{MN}} \frac{\Delta V}{I} \quad (2.16)$$

Es importante comentar que este dispositivo es el más utilizado para trabajar con el método de resistividades.

#### 2.1.2.4. Dispositivos electródicos dipolares

En estos dispositivos la distancia entre los pares de electrodos AB y MN es pequeña en comparación con la distancia que los separan, en consecuencia, pueden ser considerados como dipolos eléctricos. Entonces existen dos dipolos, el AB de emisión y el MN de recepción, cuya posición mutua puede ser en principio cualquiera.

Existe una nomenclatura especial, introducida por L. M. Alpin, que se deriva de la magnitud del ángulo  $\gamma$  entre el eje del dipolo de medición y el radio vector  $r$  que va desde el centro del dipolo de emisión al centro del dipolo de recepción, y también por la magnitud del ángulo  $\theta$  entre el eje del dipolo de emisión y este radio vector (Figura 2.6).

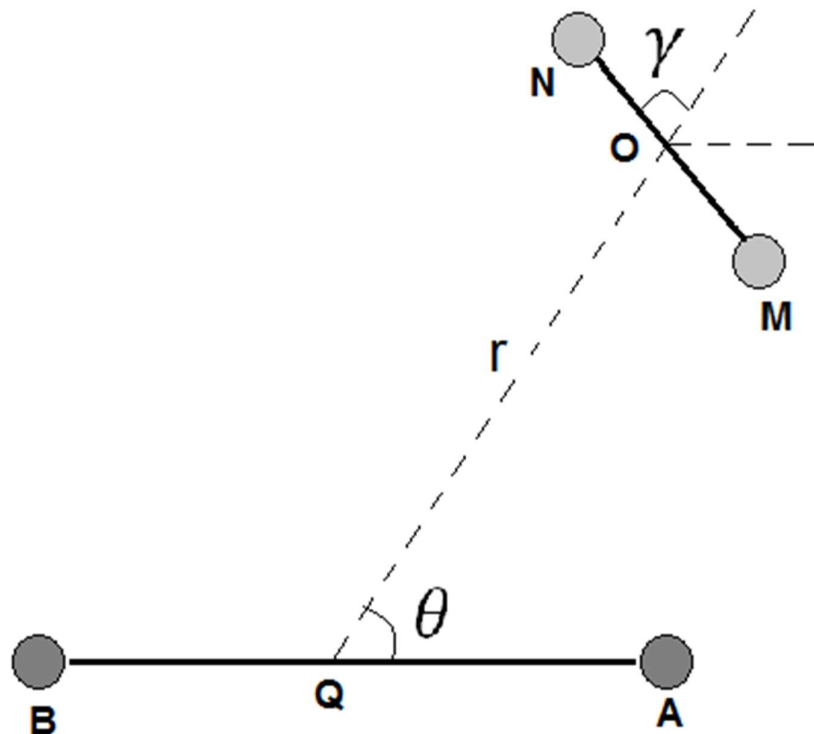


Figura 2.6. Dispositivo dipolar genérico.

En función del ángulo  $\gamma$  se distinguen los siguientes dispositivos más usuales:

- 1) Dispositivo paralelo: los ejes de ambos dipolos son paralelos ( $\gamma = 2\pi - \theta$ ).
- 2) Dispositivo perpendicular: el eje del dipolo de medición es perpendicular al eje del dipolo de emisión ( $\gamma = \pi/2 - \theta$ ).
- 3) Dispositivo radial: el eje del dipolo de medición coincide con la dirección del radio vector  $r$  ( $\gamma = 0$ ).
- 4) Dispositivo acimutal: el eje del dipolo de medición es perpendicular al radio vector  $r$ , que va del centro del dipolo de emisión al punto de observación ( $\gamma = \pi/2$ ).
- 5) Dispositivo ecuatorial: ambos dipolos son paralelos entre sí y perpendiculares al eje que pasa por sus centros ( $\gamma = \theta = \pi/2$ ).
- 6) Dispositivo axial: los cuatro electrodos están en la misma recta. Este dispositivo es a la vez paralelo y radial. Se lo conoce como *dispositivo Eltran o dipolo-dipolo*.

Los dispositivos mencionados, pueden observarse en la figura 2.7.

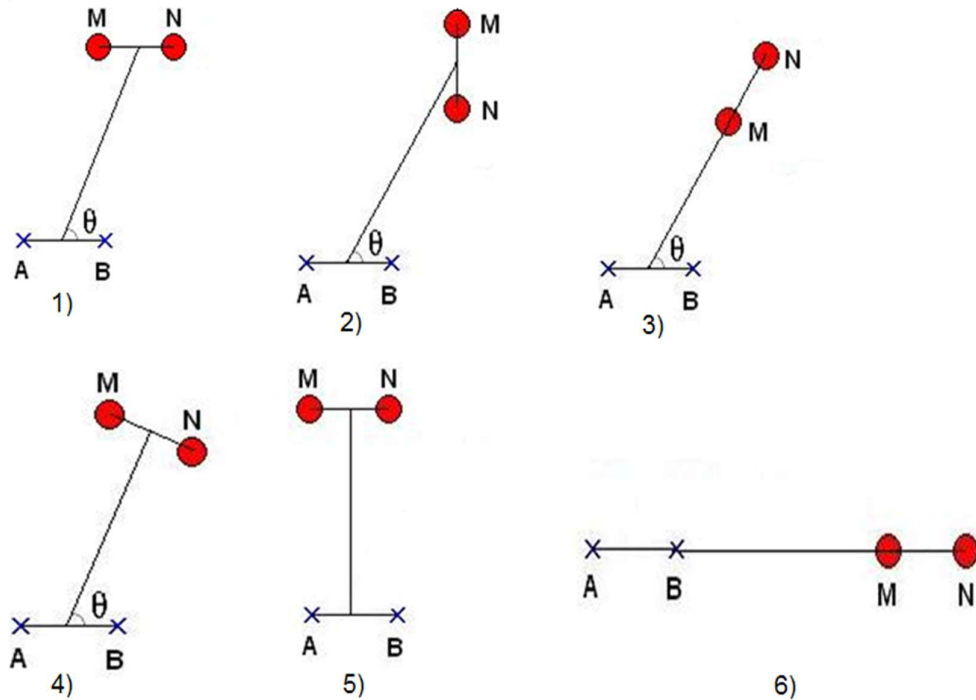


Figura 2.7. Dispositivos dipolares más usuales.

Para la determinación de la resistividad aparente  $\rho_a$ , utilizando algunos de estos arreglos electródicos dipolares, se hace uso de la ecuación (2.12), donde el coeficiente  $K$  del dispositivo utilizado, se obtiene de la Tabla 2.1.

Dispositivo	Relación de ángulos	Coeficiente de dispositivo
Dispositivo paralelo	$\gamma = 2\pi - \theta$	$K = \frac{2\pi R^3}{AB \cdot MN} (2\cos^2\theta - \text{sen}^2\theta)^{-1}$
Dispositivo perpendicular	$\gamma = \frac{\pi}{2} - \theta$	$K = \frac{\pi R^3}{AB \cdot MN} \frac{4}{3\text{sen}(2\theta)}$
Dispositivo radial	$\gamma = 0$	$K = \frac{\pi R^3}{AB \cdot MN} \frac{1}{\cos(\theta)}$
Dispositivo azimuthal	$\gamma = \frac{\pi}{2}$	$K = \frac{2\pi R^3}{AB \cdot MN} \frac{1}{\text{sen}(\theta)}$
Dispositivo ecuatorial	$\gamma = \theta = \frac{\pi}{2}$	$K = \frac{2\pi R^3}{AB \cdot MN}$
Dispositivo axial	$\gamma = \theta = 0$	$K = \frac{\pi R^3}{AB \cdot MN}$

Tabla 2.1. Constantes geométricas en los dispositivos dipolares más usuales.

### 2.1.3. Técnicas de prospección

Se pueden distinguir tres tipos de técnicas básicas de prospección eléctrica, que varían en su forma de ejecución según la finalidad del estudio requerido, es decir según si se investigan variaciones de resistividades en profundidad, laterales o ambas, haciendo uso de los dispositivos electródicos visto anteriormente.

#### Calicata eléctrica

La finalidad de las Calicatas Eléctricas (CE) es obtener un perfil de las variaciones laterales de la resistividad eléctrica del subsuelo a una profundidad fija de investigación (Investigación horizontal). Esto lo hace adecuado para la detección de contactos geológicos verticales, cuerpos o estructuras que se presentan como heterogeneidades laterales de la resistividad eléctrica.

Para su realización, las posiciones relativas de las tomas de tierra de alimentación y medición permanecen invariables, al tiempo que todo el dispositivo electródico se desplaza de una medición a la otra en una dirección determinada, denominada **perfil eléctrico** (Figura 2.8).

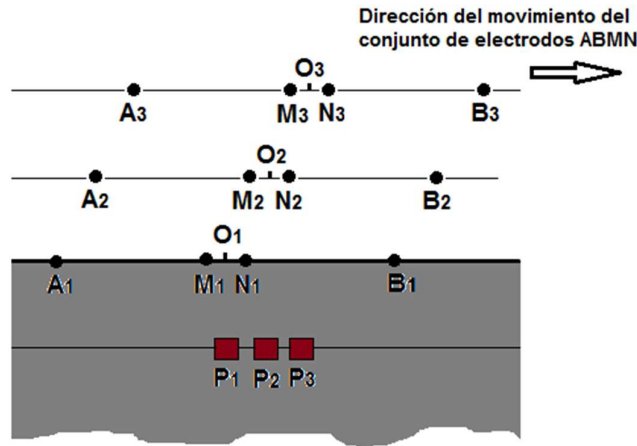


Figura 2.8. Técnica de ejecución de calicata eléctrica.

### Sondeo eléctrico vertical

La finalidad del Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) es determinar la distribución de las resistividades aparentes en profundidad bajo el punto de sondeo, a partir de medidas de la diferencia de potencial en la superficie (Investigación vertical). Se utiliza principalmente para detectar y establecer los límites de capas horizontales de suelo estratificado o para precisar la profundidad a la que se encuentra el nivel freático, siempre en situaciones que exista un fuerte contraste resistivo.

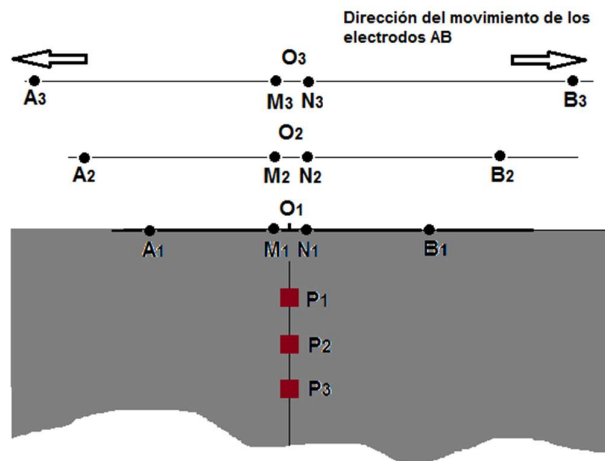


Figura 2.9. Técnica de ejecución del sondeo eléctrico vertical

## Imágenes eléctricas

Esta técnica se conoce también como Sondeo Eléctrico Vertical Continuo (SEVC) o Tomografía Eléctrica Resistiva (TER), y es una combinación del sondeo eléctrico vertical y de la calicata eléctrica, pudiéndose obtener un seudo-perfil en dos dimensiones de la distribución de las resistividades eléctricas aparentes del subsuelo, esto significa que permite investigar las variaciones de la resistividad del subsuelo tanto en profundidad como lateralmente.

Esta técnica se caracteriza por utilizar un gran número de electrodos y por lo tanto la adquisición de los datos se realiza de una forma totalmente automatizada.

El arreglo geométrico utilizado depende del objetivo bajo estudio, como sucede con las otras técnicas de prospección eléctrica anteriormente nombradas.

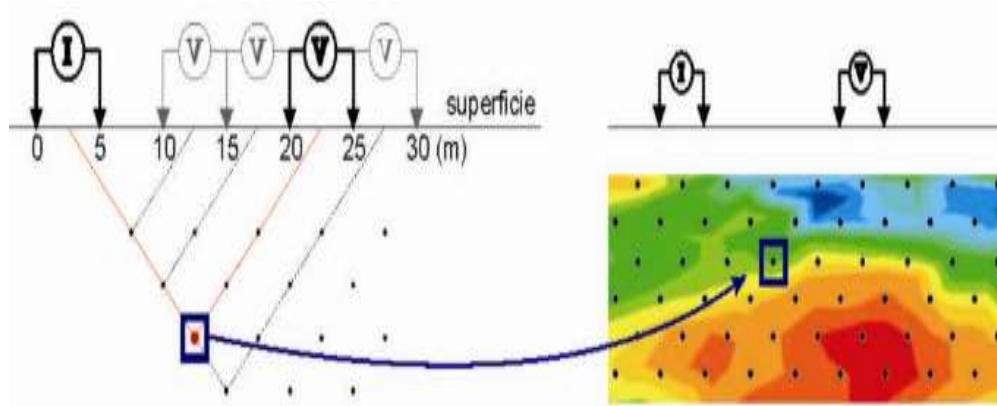


Figura 2.10. Representación simplificada de la técnica de Imágenes Eléctricas para un arreglo dipolo-dipolo

### 2.1.4. Interpretación del Sondeo eléctrico vertical (SEV)

#### Planilla de campo

En el trabajo de campo, los valores medidos en cada estación se representan en una tabla similar a la mostrada en la figura 2.11, denominada **planilla de campo**.

Los datos de resistividad aparente  $\rho_a$  obtenidos en cada posición se representan en la ordenada de en un gráfico logarítmico y en abscisas la distancia  $AB/2$ . La curva que se forma, se denomina **curva de campo** o de

**resistividad aparente.** Esta curva guarda relación con el comportamiento geoelectrico del subsuelo inmediatamente debajo del punto medio del tendido.

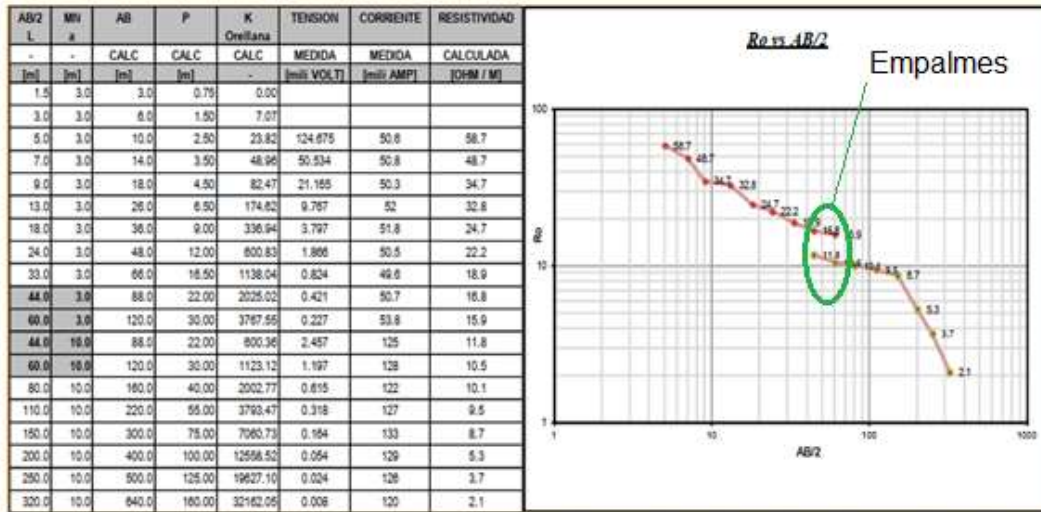


Figura 2.11. Planilla de campo.

Como los valores de  $\Delta V$  disminuyen de estación a estación, se necesita que se efectúen “empalmes”, es decir aumentos de la distancia entre  $M$  y  $N$ . Este procedimiento provoca “saltos” en los valores de resistividad eléctrica aparente, que deben ser corregidos, a fin de conseguir una curva continua.

## Interpretación

El proceso de interpretación tiene por objetivo la determinación de la estructura del subsuelo valiéndose de los datos obtenidos en el sondeo eléctrico vertical y el conocimiento geológico de la zona.

Este proceso se realiza en dos etapas. En primer lugar, se trata de obtener el **corte geoelectrico** del subsuelo, formado por espesores y resistividades eléctricas verdaderas, basándose en leyes físico-matemáticas. Este proceso puede realizarse manualmente mediante ábacos (obsoleto) o con la utilización de un software específico.

Luego, se busca el significado geológico de tales resistividades pasando de un corte geoelectrico a un corte geológico. Esta etapa depende de las correlaciones entre los datos físicos y geológicos (Figura 2.12).

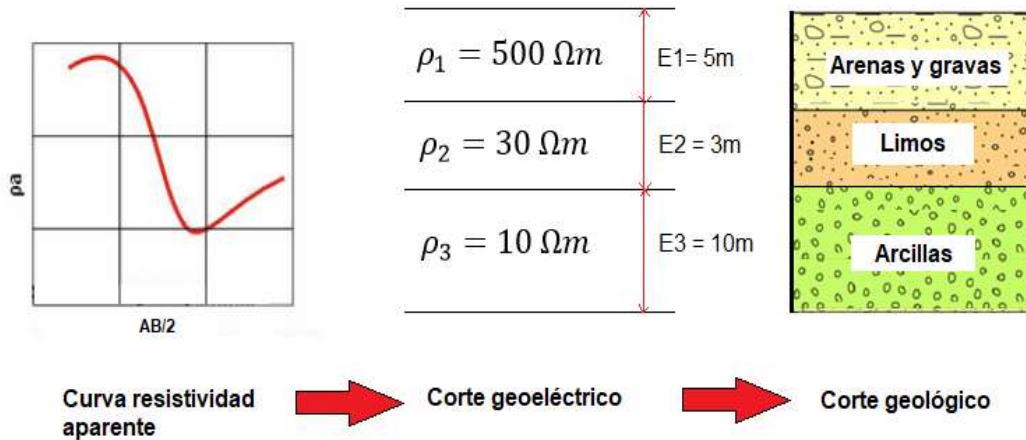


Figura 2.12. Fases interpretación del sondeo eléctrico vertical.

### 2.1.5. Factores que influyen en la resistividad eléctrica de los suelos

Si la resistividad eléctrica de las rocas dependiese únicamente de los minerales constituyentes, habrían de considerarse como aislante en la mayoría de los casos, puesto que el cuarzo, los silicatos, la calcita, las sales, etc., los son prácticamente. Solo en el caso de que la roca contuviese minerales semiconductores en cantidades apreciables, podrían considerarse como conductoras, es decir, solo lo serían las menas de minerales con sulfuros metálicos.

Afortunadamente, todas las rocas tienen poros en proporción mayor o menor, los cuales suelen estar ocupados total o parcialmente por electrolitos, de lo que resulta que, en conjunto, las rocas se comportan como conductores iónicos, de resistividad eléctrica muy variable según los casos (Orellana, 1982).

En la figura 2.13 puede apreciarse el amplio rango de variación de la resistividad eléctrica que pueden encontrarse para rocas y aguas naturales.

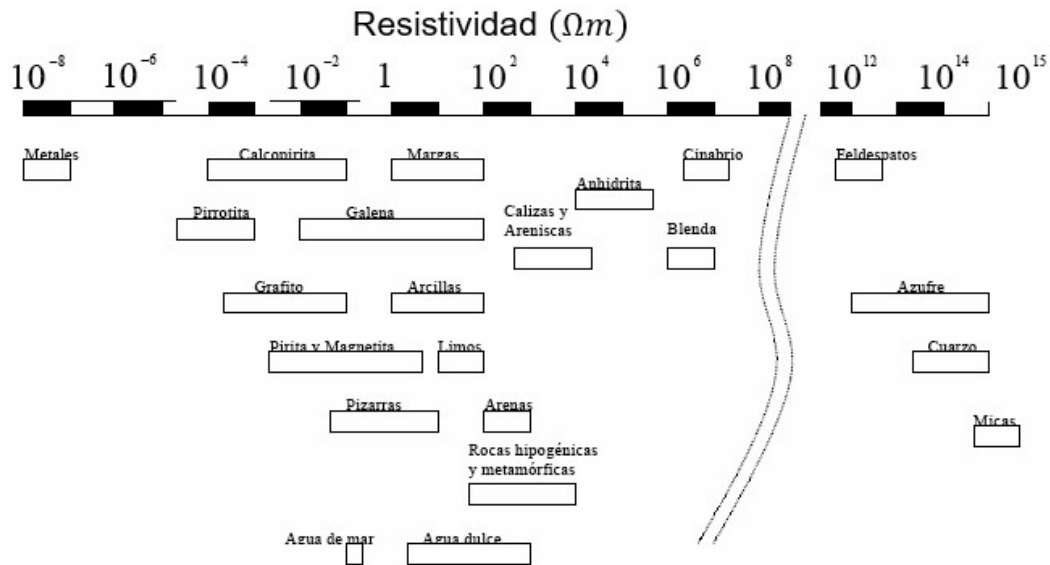


Figura 2.13. Márgenes de variación de la resistividad eléctrica de las rocas y aguas naturales (Orellana, 1982).

Dentro de los factores que tienen importancia en la variación de la resistividad eléctrica de las rocas, se pueden nombrar los siguientes:

### 1. Concentración de sales en el agua contenida en los poros

La resistividad eléctrica de los fluidos que saturan las rocas, como pudo observarse en la figura 2.13 pueden variar en un amplio rango. En la mayoría de los casos estos líquidos son soluciones acuosas de diversas sales minerales, entre las cuales juega un papel importante el cloruro de sodio.

La resistividad eléctrica del agua que rellena los poros de las rocas está en relación inversa a la concentración de la sal en disolución. (Iakubovskii, 1980).

En la figura 2.14, está representada en escala bilogarítmica, la curva de dependencia de la resistividad eléctrica de la solución de NaCl con su concentración en el agua.

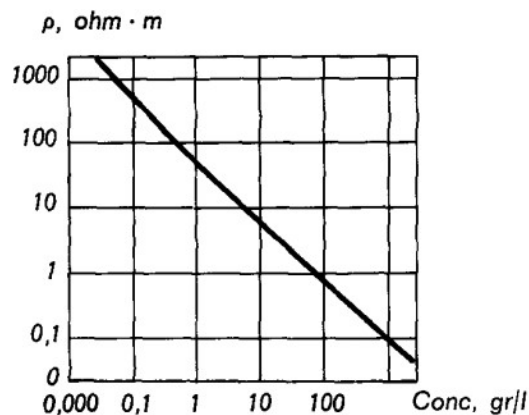


Figura 2.14. Relación entre la resistividad eléctrica de una solución de NaCl y su concentración en el agua (Iakubovskii, 1980).

## 2. Temperatura del suelo

La variación de la resistividad eléctrica de las rocas con la temperatura, se debe principalmente al efecto que provoca el movimiento de los iones de la solución acuosa contenida en sus poros.

El aumento o disminución de la movilidad de los iones, provoca un aumento o disminución de la conductividad eléctrica y por lo tanto una disminución o aumento de la resistividad eléctrica respectivamente.

Cuando la temperatura desciende en las proximidades de 0°C, se produce un aumento rápido de la resistividad eléctrica, seguido por un crecimiento más suave a temperaturas aún más bajas (Figura 2.15). El aumento producido a la temperatura aproximada del punto de congelación es más fuerte cuando la roca es de grano grueso (curva a) que cuando es de grano fino (curva b).

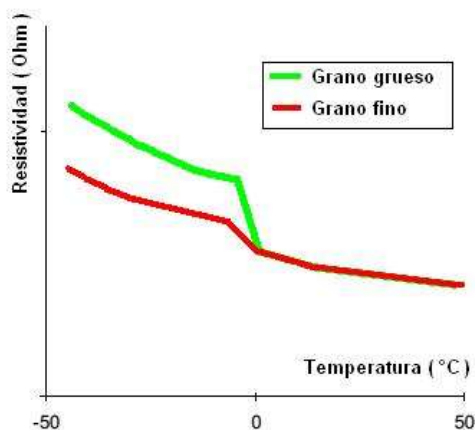


Figura 2.15. Curvas esquemáticas de la resistividad eléctrica de las rocas en función de la temperatura. a) Roca grano grueso, b) Roca grano fino. (Orellana, 1982).

Para las temperaturas sobre cero, la resistividad eléctrica de las rocas decrece con el aumento de la temperatura (Orellana, 1982). En la figura 2.16, puede observarse el comportamiento de la variación de la resistividad eléctrica con temperaturas sobre cero.

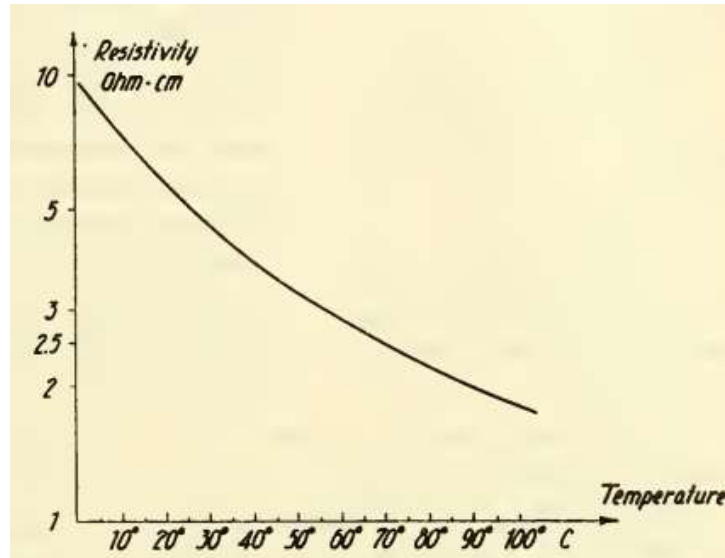


Figura 2.16. Decrecimiento de la resistividad eléctrica de una solución de NaCl con la temperatura. (Heiland, 1946)

La dependencia de la resistividad eléctrica de una solución con la temperatura se puede expresar por alguna de las siguientes relaciones empíricas:

$$\rho_{w(t_2)} = \rho_{w(t_1)} \frac{t_1 + 21.5}{t_2 + 21.5} \quad (\text{Arp, 1953}) \quad (2.18)$$

Donde:

$\rho_{w(t_2)}$  = resistividad a la temperatura  $t_2$ ,  $\Omega m$

$\rho_{w(t_1)}$  = resistividad a la temperatura  $t_1$ ,  $\Omega m$

$t_1$  = temperatura  $t_1$ , °C

$t_2$  = temperatura  $t_2$ , °C

$$\rho_{w(t)} = \frac{\rho_0}{1 + \alpha(t - t_0)} \quad (\text{Orellana, 1982}) \quad (2.19)$$

Donde:

$\rho_{w(t)}$  = resistividad a la temperatura  $t$ ,  $\Omega m$

$\rho_0$  = resistividad a la temperatura de referencia  $t_0$ ,  $\Omega m$

$t_0$  = temperatura de referencia,  $^{\circ}C$

$\alpha_t$  = coeficiente de temperatura,  $\approx 0.022$

$$\rho_{w15.5} = \rho_t \left( \frac{24.5 + t}{40} \right) \quad (\text{ASTM G57-06, 2012}) \quad (2.20)$$

Donde:

$\rho_{w(15.5)}$  = resistividad a la temperatura de  $15.5^{\circ}C$

$\rho_t$  = resistividad a la temperatura  $t$ ,  $\Omega m$

$t$  = temperatura del suelo,  $^{\circ}C$

Hay que tener en cuenta que estas expresiones son dadas para el caso de electrolitos puros y en el caso de las rocas su dependencia es más compleja (Iakubovskii, 1980).

### 3. Porosidad

En su publicación histórica de 1941, Archie propuso la siguiente ecuación para la estimación de la resistividad eléctrica del conjunto agua-roca en estado de saturación, en función de su calidad, es decir de su contenido de sales.

$$\rho_0 = F \rho_w \quad (2.21)$$

Donde:

$\rho_0$  = Resistividad del conjunto agua – roca

$\rho_w$  = Resistividad del fluido que rellena los poros (salmuera)

$F$  = Factor de formación de resistividad

Esta expresión es conocida como *Ley de Archie* y fue validada en arenas limpias con porosidades del 10% al 40% y los rangos de salinidad de los electrolitos que rellenan los poros de 20 a 100g/l de NaCl.

El factor de formación de resistividad expresa la magnificación relativa con respecto al conductor iónico (salmuera) mediante la siguiente expresión:

$$F = \frac{\rho_0}{\rho_w} \quad (2.22)$$

Archie encontró una relación entre el factor de formación y la porosidad efectiva.

$$F = \frac{1}{\phi^m} \quad (2.23)$$

Donde:

$\phi$  = Porosidad conectada o específica

$m$  = exponente de cementación

Con estas nuevas expresiones, la ecuación de Archie, se puede reescribir de la siguiente manera:

$$\rho_0 = \frac{1}{\phi^m} \rho_w \quad (2.24)$$

En la figura 2.17 se puede apreciar esquemáticamente la relación encontrada por Archie entre el factor de formación y la porosidad específica.

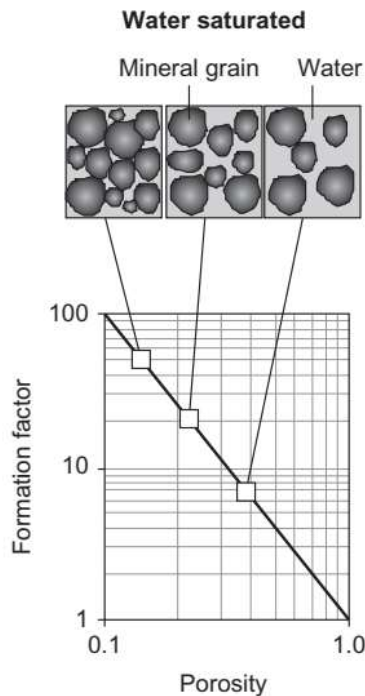


Figura 2.17. Imagen esquemática de la ley de Archie (Schon, 2015).

La ecuación de Archie, ha sido modificada por Winsauer, con la introducción de un parámetro adicional  $a$  para un mejor ajuste de los datos experimentales y poder aplicarse a otros tipos de rocas.

$$\rho_0 = a \frac{1}{\phi^m} \rho_w \quad (2.25)$$

El exponente  $m$  y el parámetro  $a$  expresan empíricamente la complicada geometría de los canales porales con respecto al flujo de corriente eléctrica y es por lo tanto una clase de propiedad textural de los poros (Schon, 2015).

#### 4. Contenido de humedad

De lo expuesto anteriormente la roca estaba completamente llena de agua, y en tal estado de saturación el contenido de agua en la roca dependía completamente de su porosidad.

Si en una roca porosa, la saturación con agua decrece, entonces parte del agua conductiva en los poros es remplazada por un fluido no conductivo (gas, aire, petróleo) y la resistividad de esa roca aumenta.

Para cuantificar el efecto de la saturación, Archie normalizó la resistividad eléctrica, medida en cualquier grado de saturación  $\rho_r$  con la resistividad eléctrica total de la roca saturada en agua  $\rho_0$  introduciendo el **índice de resistividad** ( $I$ ), que es la relación entre la resistividad de la roca con el grado de saturación considerado y con sus poros totalmente lleno de agua.

$$I = \frac{\rho_r}{\rho_0} \quad (2.26)$$

Entonces, la resistividad eléctrica de la roca para un grado de saturación determinado  $\rho_r$ , vendrá dada por

$$\rho_r = IF\rho_w \quad (2.27)$$

El índice de resistividad puede expresarse de la siguiente forma alternativa

$$I = S^{-n} \quad (2.28)$$

Donde  $S$  es el **grado de saturación**, es decir la fracción ocupada por el agua respecto al volumen total de poros y el exponente  $n$  frecuentemente toma el valor de 2.

Combinando la ecuación (2.28) con la (2.26) y utilizando el valor 2 en el exponente se obtiene

$$S = \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_r}} \quad (2.29)$$

Esta ecuación resulta muy útil para calcular el grado de saturación a partir de una medida  $\rho_r$  conociendo previamente la resistividad bajo condición de saturación de agua  $\rho_0$ .

La expresión (2.27) puede reescribirse a partir de las ecuaciones (2.23) y (2.28) como

$$\rho_r = S^{-n} \phi^{-m} \rho_w \quad (2.30)$$

Como puede observarse en esta última ecuación la resistividad de una roca en función de su contenido de humedad depende de varias variables y parámetros.

## 5. Contenido de finos

En condiciones naturales, las rocas finamente dispersas (en particular, las arcillas) normalmente conducen mejor la corriente eléctrica que las rocas de grano grueso (Iakubovskii, 1980).

## 2.2. Mecánica de suelos

### 2.2.1. Características del suelo

En ingeniería el suelo se define como un agregado de minerales unidos por fuerzas débiles de contacto, separables por medios mecánicos de poca energía o por agitación en agua (González de Vallejos et al., 2004).

Los suelos naturales constituyen un sistema trifásico formado por una fase sólida que constituye el esqueleto de la composición del suelo, una fase líquida (generalmente agua) y una fase gaseosa (generalmente aire) que ocupan los intersticios entre los sólidos (Figura 2.18).

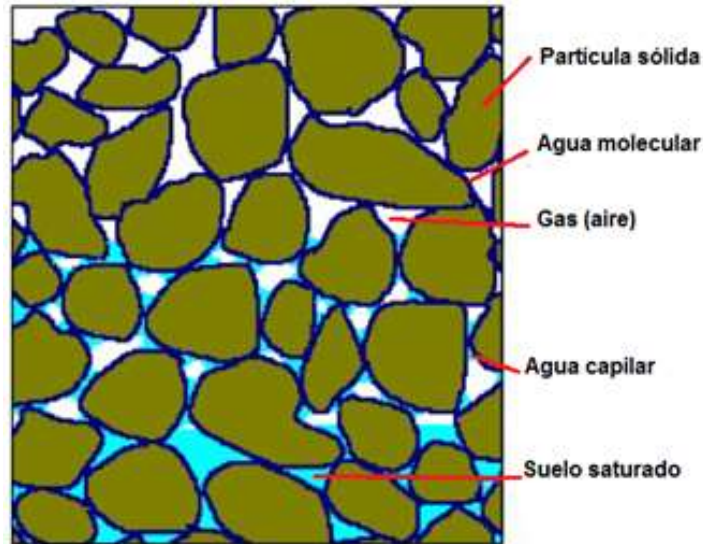


Figura 2.18. Estructura del suelo.

### 2.2.2. Relaciones volumétricas y gravimétricas

Para poder definir las principales relaciones volumétricas y gravimétricas de un suelo, se realiza una representación diagramática del mismo. Esta representación se obtiene separando el volumen total  $V$  del elemento de suelo natural (Figura 2.18), en dos partes esenciales, el volumen de materia sólida  $V_s$  y el volumen de vacíos  $V_v$ . A su vez el volumen de vacíos es subdividido en un volumen de agua  $V_w$  y un volumen de gas  $V_a$  (Figura 2.19).

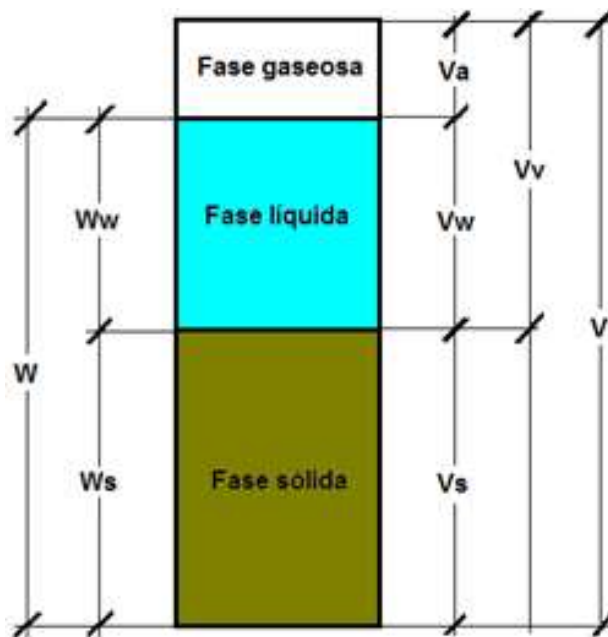


Figura 2.19. Representación diagramática del suelo.

El volumen total de una muestra de suelo se expresa como:

$$V = V_s + V_v = V_s + V_w + V_a$$

donde:

$V_s$  = volumen de sólidos

$V_v$  = volumen de vacíos

$V_w$  = volumen de agua en los vacíos

$V_a$  = volumen de aire en los vacíos

Considerando que el peso del aire contenido en los vacíos es insignificante, el peso total de la muestra de suelo es

$$W = W_s + W_w$$

donde:

$W_s$  = peso de sólidos del suelo

$W_w$  = peso del agua

### 2.2.2.1. Relaciones volumétricas

Las relaciones volumétricas comúnmente usadas que relacionan las tres fases de un elemento de suelo son, la *relación de vacíos*, la *porosidad* y el *grado de saturación*.

#### Relación de vacíos

Es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen de sólidos de la porción de suelo considerado

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

#### Porosidad

Es otra relación muy importante y se define como la razón del volumen de vacíos al volumen total

$$\phi = \frac{V_v}{V}$$

## Grado de saturación

Es la relación que existe entre el volumen de agua y el volumen de vacíos

$$S(\%) = \frac{V_w}{V_v} \cdot 100$$

### 2.2.2.2. Relaciones gravimétricas

Las relaciones gravimétricas o relaciones de peso empleadas comúnmente son, el *contenido de humedad*, y el *peso específico*.

#### Contenido de humedad

El *contenido de humedad* o también llamado *contenido de agua* es la relación entre el peso del agua contenida en los poros y el peso de los sólidos en un volumen dado

$$w = \frac{W_w}{W_s}$$

#### Peso específico

Se denomina *peso específico* ( $\gamma$ ) o *peso unitario* al peso del suelo por unidad de volumen

$$\gamma = \frac{w}{V}$$

Como esta relación contempla el peso del agua, se la conoce comúnmente como *peso específico húmedo*.

Existen ocasiones en que es deseable obtener el peso por unidad de volumen sin incluir el agua, relación que se conoce como *peso específico seco*.

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V}$$

### 2.2.3. Clasificación de suelos

Debido a que el suelo está compuesto por diferentes tamaños de partículas y composiciones químicas, es necesario definir metodologías y sistemas de evaluación de sus propiedades para que constituya un lenguaje.

Se han clasificado los suelos en cuatro grandes grupos en función de su granulometría (Tabla 2.3).

<b>Denominación</b>	<b>Tamaño de grano</b>
Grava	Mayor a 2mm.
Arena	Entre 2 y 0.06mm.
Limo	Entre 0.06 y 0.002mm.
Arcilla	Menor a 0.002mm.

Tabla 2.3. Clasificación de suelos según su granulometría.

### **2.2.3.1. Distribución granulométrica**

No es suficiente conocer si un suelo está compuesto de grava, arena, limo o arcilla, sino que es necesario conocer la proporción de cada uno de estos elementos. Para ello se realiza una caracterización granulométrica, que consiste en separar y clasificar por tamaños los granos o partículas que lo componen. Esta separación se realiza generalmente utilizando dos métodos, uno por vía seca (tamizado) para partículas de tamaño superiores a 0.0075 mm. y otro por vía húmeda (sedimentación) para tamaños de partículas inferiores a dicho valor. Dichos procedimientos se encuentran descritos en la norma ASTM 422D (2002).

### 3. CARACTERISTICAS DEL AREA DE ESTUDIO

#### 3.1. Área de estudio regional

Este estudio se llevó a cabo en una región ubicada en la zona oriental de la provincia de Entre Ríos, de norte a sur entre las localidades de Ayuí-Concordia-Puerto Yerúa y de este a oeste entre el margen occidental del río Uruguay y la ruta Nacional 14, en el Departamento de Concordia, Provincia de Entre Ríos, Argentina (Figura 3.1).

La zona se encuentra en un área de transición entre el clima subtropical y templado sin estación seca durante el año. Las temperaturas medias son de 26°C en verano y 13°C en periodo de invierno, siendo la temperatura media anual de 20-21°C. Las precipitaciones son de 1000-1400 mm.

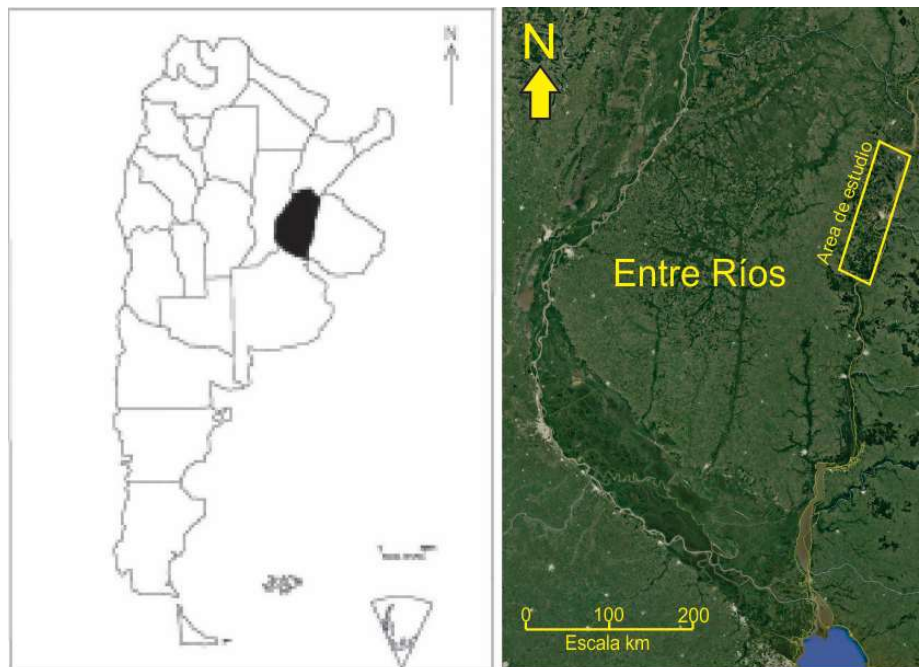


Figura 3.1. Localización del área de estudio.

#### 3.2. Antecedentes geológicos regionales

La geología del subsuelo de la provincia, fue en principio descrita por Chebli et al., (1979) interpretando que se alcanzan en profundidad niveles atribuibles a edades pérmicas, aunque con dudas, constituye el registro más profundo de la región. Posteriormente, y en particular sobre las Formaciones Serra Geral, Botucatú y Piramboiá, (Triásico medio - Cretácico superior) se estableció su correlato en la República Oriental del Uruguay y se definieron

aspectos hidrogeológicos en los trabajos de Silva Busso (1999) y Silva Busso y Fernández Garrasino (2004). También se pueden incluir algunos aportes relacionados con detalles de la litología de las secciones Interbasáltica e infrabasáltica en Marsico (2013) que no modifican sustantivamente la estratigrafía propuesta. En Silva Busso et al. (2011) se realiza una síntesis del subsuelo suprabasáltico y su posible control estructural. El cretácico sedimentario está representado por la Formación Puerto Yerúa (De Alba y Serra, 1959) describen areniscas y brechas que afloran en la costa del río Uruguay, dichos autores son los primeros en describirla y Tófalo, (1986) determina una serie de Facies que le permiten entender los procesos sedimentarios y ambiente deposicional de la Formación Puerto Yerúa. La F. Ascensio se describe en la zona de Colón en García (1954). El Neógeno fue estudiado por Aceñolaza (2000 y 2007) y también por Marengo (2002). Según Iriondo, (1987) la región posee bien representada la geología del terciario superior y cuaternario. Esto comprende a la Formación Salto Chico (Gentile y Rimoldi, 1979) que se define como una sucesión de arenas cuarzosas, estratificadas de granulometría media a gruesa de color ocre rojizo y amarillento, fueron interpretados también como depósitos fluviales del río Uruguay, pero de edad Plio-pleistoceno. La misma ingresa desde el norte entre Mocoetá y Monte Casero (Silva Busso y Amato, 2017) describe un arco que converge sobre el Río Uruguay a la actual altura de Colón (Iriondo, 1987). La otra unidad coetánea es la F. Ituzaingó (De Alba, 1953) compuesta esencialmente de dos ciclos psamíticos granodecipientes claramente separados que se considera un cambio lateral de facies hacia el poniente entrerriano con respecto a la mencionada F. Salto Chico. Con más detalle la relación estratigráfica de los sedimentos del plio-pleistoceno fluvial han sido estudiados recientemente por Silva Busso y Amato (2017). La Formación Hernandarias (Reig, 1956) constituye la cubierta cuaternaria (pleistocena) que se extiende sobre la mayor parte de la provincia, aunque en la zona casi no está representada, es importante mencionarla como límite occidental del área de estudio. Está constituida por arcillas, limos arcillosos y arcillas limosas con proporción variable de limos y excepcionalmente arenas muy finas. Suele ser de color gris plomizo, verde claro y castaño rojizo pudiendo contener concreciones calcáreas y niveles de yeso.

La Formación Ubajay, (Holocena), definida por Gentili y Rimoldi (1979)

originalmente sobre la margen derecha del Río Uruguay en cercanías del arroyo El Palmar, se compone de pefitas gruesas, arenas y limos moderadamente seleccionadas con arcillas interporales. Al igual que su litología su espesor es variable según la zona de afloramiento y suele tener espesores entre 2 - 15m. La misma fue interpretada por Iriondo (1980) como de origen fluvial siguiendo la migración predominante hacia el este del río Uruguay y niveles de base más altos que los actuales, definiéndola como la terraza alta del río Uruguay (Iriondo, 1987). Un estudio de más detalle sobre el ambiente de sedimentación lo presentan Silva Busso y Amato (2013). Estos autores caracterizan esta unidad por portar sedimentos del tipo arenoso o gravo-arenoso hacia la base y arenoso fino hacia el techo, al igual que muchas secuencias de origen tractivo-fluvial. El arreglo externo o arquitectura sedimentaria de sus depósitos tiene tendencia granodecreciente hacia arriba o lineal no definida, y puede ser clasificada como de Arquitectura Tipo Fluvial Múltiple (Ar f-M) y en algunos sectores de Arquitectura Tipo Fluvial Unitaria (Ar F-U). Si bien existen afloramientos de esta unidad en la costa del Río Uruguay y en diversos arroyos afluentes (Rossi, 2012) los principales sitios de observación, por su potencia de exposición, son las canteras de la región. Lógicamente, también se la identifica en los pozos, pero el problema es que su litología es similar a las Formaciones Ituzaingó y Salto Chico. Según Silva Busso y Amato (2017) el hecho de que suele superponerse a las mencionadas unidades puede provocar confusiones o la imposibilidad de establecer con precisión el pase formacional entre estas, lo que conducen en muchos casos a la falta de reconocimiento de la F. Ubajay en las interpretaciones estratigráficas.

La F. Ubajay y su relación con la F. Hernandarias tampoco se halla muy clara aún; pero la aparición e incremento de los espesores de esta última unidad al alejarnos del cauce del río Uruguay actual, hace pensar en un contacto erosivo entre los depósitos infrayacentes de la Formación Hernandarias (Silva Busso et al., 2011 y Silva Busso y Amato, 2017). Los depósitos de la F. Hernandarias pudieron haber sido totalmente erosionados hacia la costa del río Uruguay por la migración del antiguo cauce del Río Uruguay (como se menciona en Iriondo 1987), para luego dar paso a la depositación de aquellos sedimentos gravo-arenosos con abundantes finos más típicos de la Formación Ubajay. Para el área de la costa argentina del río Uruguay la F. Ubajay se extiende de norte a sur

desde la desembocadura del río Mocoretá hasta Punta Caballos en el Dpto. de Gualeguaychú (Silva Busso y Amato, 2017), aunque estos límites aún son imprecisos y requieren de confirmación a la luz de nuevos datos. En términos generales, toda la secuencia plio-pleistocena - actual apoya en discordancia sobre los sedimentos continentales cretácicos y marinos miocenos y continentales eocenos.

Desde el aspecto aplicado la F. Ubajay presenta posibilidades acuíferas, mineras (áridos) y ventajas para las fundaciones y cimentaciones de las obras civiles. En Silva Busso y Amato (2013) se realiza una primera aproximación a sus ventajas acuíferas que, aunque poco considerada como acuífero, resulta importante desde el punto de vista de su uso actual y potencial. Las estimaciones realizadas sobre demandas, reservas y recargas determinan que la explotación del Acuífero Ubajay oscilaría entre el 3.6% de sus Reservas Reguladoras y el 15,7% de las Reservas Efectivas siendo hoy estas reservas suficientes para satisfacer ampliamente la demanda del recurso. La demanda de agua sobre el acuífero Ubajay es en un 15,07% la forestal, un 46.55% consumo humano y un 53.44% la ganadería (Silva Busso y Amato, 2013).

Según Muñoz, et al., (2010) existen importantes reservas de gravas y arena en la región. La construcción de la autovía de la ruta 14, impulsó la apertura de nuevas canteras, así como la reactivación de algunas abandonadas. No obstante, dichos autores determinan que son variables las condiciones de explotación, como por ejemplo el destape, así como el porcentaje de grava de cada yacimiento, que oscila entre un 30 y 70% en volumen determinando el porcentaje de finos. También el contraste litológico entre las dos unidades aflorantes la F. Ubajay y F. Hernandarias determina que la primera resulte más conveniente al definir la traza vial. La F. Hernandarias es bien conocida por su elevada proporción de arcillas expansivas por lo que se prefiere, como el caso de la ruta 14, a la F. Ubajay como sustrato. De aquí se deduce que este factor geológico condiciona las obras civiles viales en la región de estudio.

Con el fin de proporcionar una referencia visual clara de la ubicación geográfica y la disposición de las formaciones geológicas mencionadas, en la figura 3.2, se observa un mapa detallado que sirve como guía visual para comprender su distribución en la región.



### 3.3. Zona de estudio en detalle (ZED)

La ZED está ubicada en la zona sur del Parque Nacional El Palmar (Figura 3.2), más precisamente en la seccional La Capilla (Figura 3.3).



Figura 3.2. Ubicación del Parque Nacional El Palmar y Zona de Estudio en Detalle (ZED).



Figura 3.3. Zona de estudio en detalle (ZED).

Este lugar cuenta con estaciones de monitoreo continuo de humedad y temperatura del suelo y medición del nivel freático (Capítulo 4, apartado 7).

### **3.4. Antecedentes geológicos de la ZED**

En la figura 3.4 se muestra la descripción que se obtuvo durante la construcción del piezómetro situado en la ZED. Esta caracterización es importante porque se trata de la unidad formacional en la que se realiza el estudio y es de donde provienen los datos de las mediciones y ensayos realizados. Su profundidad total es de 40 metros, desde allí hasta los 30 m.b.b.p. (metros bajo boca de pozo) atravesó parcialmente la F. Puerto Yerúa representada aquí por un paquete de arenas finas y limos de color blanquecino (2,5Y 8/2) moderadamente silicificados que desarrolla un acuífero fisurado de baja permeabilidad.

Entre los 18 - 30 m.b.b.p. se observa un paquete fundamentalmente de gravas de color castaño-amarillento (10YR 8/8) con individuos de composición silíceo-calcedonia, clasto-sostén, poco consolidado atribuible a la F. Salto Chico que constituye el acuífero regional más importante. Finalmente, entre los 0 -18 m.b.b.p. se observa la unidad más somera la F. Ubajay que constituye un complejo y poco seleccionado depósito cuya sección basal es una arcilla verde clara (5Y 8/3) seguida por arenas gravas, gravas matriz-sostén (con elevado contenido de finos) rematando la secuencia con limos arenosos de colores ocres (5YR 8/8). Esta unidad es litológicamente muy variable en la cuenca del Arroyo Palmar predominando sedimentos psamíticos. La misma presenta moderada a baja permeabilidad con acuíferos que tienden a ser libres (a veces semi-libres), con las salinidades bajas (menores a 300 mg/l) y en ocasiones con una tendencia a comportarse como acuitardo (Silva Busso y Amato, 2017). El nivel estático medido en el momento de la construcción del piezómetro e instalación de los registradores fue de 2,4 m.b.b.p.

Los suelos desarrollados a partir de esta unidad lo hacen sobre arenas re-transportadas y depositadas de origen fluvial, son mal drenados y con capa freática poco profunda. El perfil edáfico se realizó a partir de una calicata de 2 metros de profundidad.

El primer horizonte (I) de suelo se desarrolla entre los 0 – 0,3 m.b.b.p. de color 7YR 2/2 (castaño grisáceo) *in situ* en húmedo; texturalmente franco

arenoso (Arena: 60%; Limo: 30%; Arcilla: 10%) y de estructura granular sin consolidar. Se observan niveles ferruginosos con cierto bandeado y transición inferior difusa o gradual.

El segundo horizonte (II) está ubicado entre los 0,3 – 0,6 m.b.b.p. presenta color 5YR 8/4 (castaño rojizo claro) *in situ* en húmedo y se caracteriza por su textura arcillo-limosa (Arena: 12%; Limo: 48%; Arcilla: 40%). Se observa una estructura masiva, sin consolidar y plástica con manchas ferruginosas y de transición inferior neta.

El tercer horizonte (III) está entre los 0,6 – 1,2 m.b.b.p., presenta color 5YR 8/8 (castaño rojizo u ocre) *in situ* en húmedo y se caracteriza por su textura Franco arcillo-arenosa (Arena: 52%; Limo: 27%; Arcilla: 21%). Nuevamente, este horizonte es de estructura granular, sin consolidar y transición inferior difusa con el cuarto horizonte (IV) que constituye la formación parental. Se ha medido *in situ* la conductividad hidráulica empleando la propia calicata y aplicando el método de Reynolds y Elrick (1985) que mantiene una carga hidráulica constante arrojando un resultado de 0,94 m/d, dato que puede considerarse representativo de todo el perfil edáfico (Figura 3.4).

Según la carta de suelos escala 1:50.000 del departamento de Colón (INTA, 2002), se trata de un suelo comparable a los de la Serie Yuquerí perteneciente a la familia "no ácida, térmica" de los *Cuarzisamentes óxicos ácuicos* (suelo aluvial reciente, arenoso).

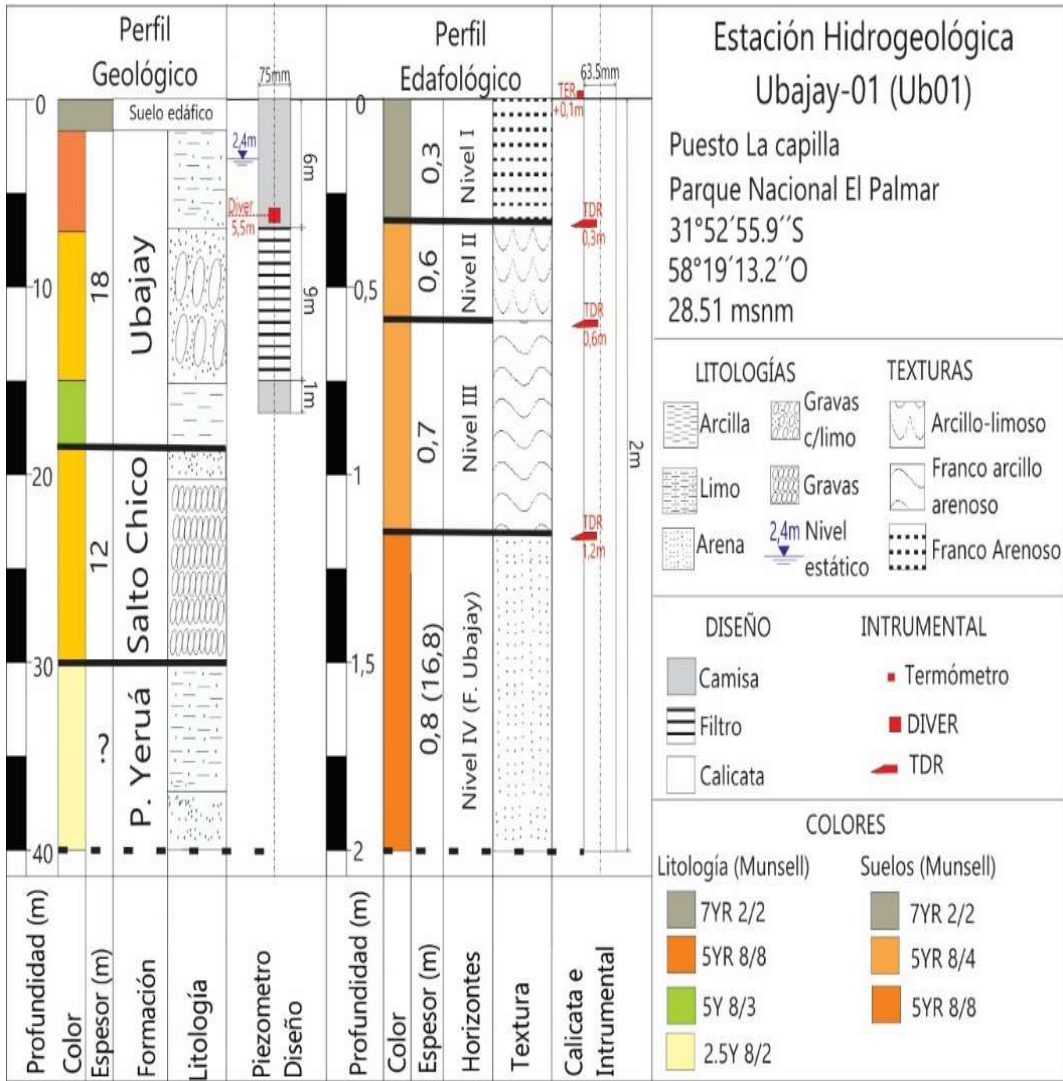


Figura 3.4. Caracterización de la estación hidrogeológica Ubajay-01.

## **4. METODOLOGIA**

Para estudiar las posibles relaciones entre las propiedades mecánicas del suelo, por medio de mediciones indirectas, como es el caso de su resistividad eléctrica, se realizó una amplia revisión bibliográfica del tema y se llevaron a cabo trabajos de campo y de laboratorio.

### **4.1. Estudios de campo exploratorio**

Con la intención de reproducir el trabajo realizado por los diferentes autores citados previamente (op. cit), los cuales mostraban resultados con diferentes posibilidades interpretativas, se realizaron en primer lugar sondeos eléctricos verticales paramétricos en puntos en los que se tenían datos regionales de estudios de mecánica de suelo (Anexo B).

La información brindada por estos estudios de mecánica de suelo, obtenidos mediante ensayos SPT, han sido el contenido de humedad, índice de plasticidad, contenido de finos y su clasificación SUCS.

La elección de qué puntos utilizar en esta etapa, no fue arbitraria, sino que se seleccionaron solo aquellos ubicados exclusivamente sobre la Formación Ubajay, en parte por sus características litológicas y en parte porque suele ser el sustrato fundacional de las obras civiles en el área de estudio.

De un total de 32 puntos disponibles, se buscó la mejor distribución posible en el área de estudio y solamente se utilizó la información de 12 de ellos para realizar sobre dichos puntos los sondeos eléctricos verticales paramétricos.

Las ubicaciones de los mismos se observan en el mapa de la figura 4.1. Debido a que algunos de ellos se encuentran muy cercanos entre sí y no es posible representarlos en la escala del mapa, han sido ampliados a su izquierda. En la tabla 4.1 se muestran las coordenadas de cada uno de ellos en la zona de estudio.

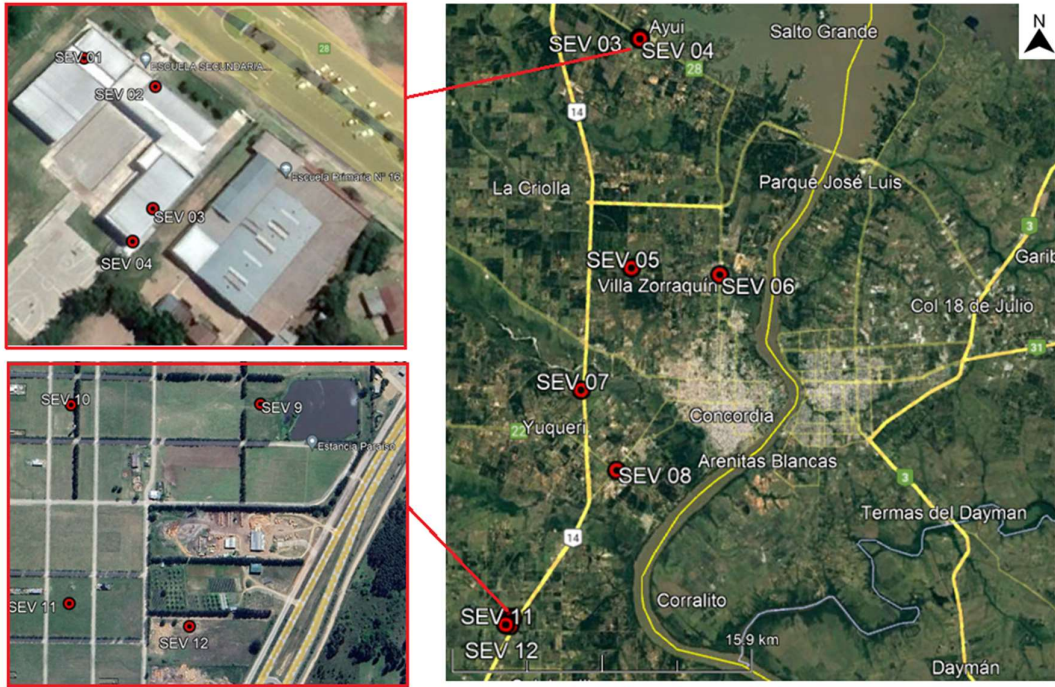


Figura 4.1. Puntos paramétricos SPT y SEV.

Latitud	Longitud	SPT y SEV	Zona
-31 12 18.7	-58 2 6.8	1	Ayuí
-31 12 19.0	-58 2 6.0	2	Ayuí
-31 12 20.2	-58 2 6.0	3	Ayuí
-31 12 20.5	-58 2 6.2	4	Ayuí
-31 18 48.8	-58 3 33.7	5	Magnasco
-31 19 24.6	-58 0 40	6	Zorraquin
-31 22 2.3	-58 5 51.9	7	INTA
-31 24 28.2	-58 5 5.8	8	Villa Adela
-31 28 8.3	-58 9 18.3	9	Ea. El Paraíso
-31 28 6.5	-58 9 31.9	10	Ea. El Paraíso
-31 28 18.6	-58 9 34.3	11	Ea. El Paraíso
-31 28 21.2	-58 9 26.0	12	Ea. El Paraíso

Tabla 4.1. Ubicación de los puntos paramétricos SPT y SEV.

Los sondeos eléctricos verticales se realizaron mediante la utilización del resistímetro 1D desarrollado (Ver Anexo A, apartado 3).

La configuración electrónica utilizada para realizar las mediciones de resistividad eléctrica aparente, fue la Schlumberger, con un largo del tendido AB que va de 3 a 27 metros, lo que acota la profundidad de medición a 13 metros aproximadamente (Figura 4.2).



Figura 4.2. Realización del sondeo eléctrico vertical (SEV).

Para la interpretación de los datos de resistividad aparente obtenidos, es decir la determinación de los espesores y resistividades verdaderas (Capítulo 2, apartado 1.4), se utilizó el software E-Lander.

En este estudio preliminar solo se utilizó los datos de los números de golpes de los ensayos de SPT, para correlacionarlos con las mediciones de resistividad eléctrica en el mismo punto. Los ensayos SPT son las fuentes de información más común de los estudios de suelos, aunque no la más fiable (González de Vallejo et al., 2004).

## 4.2. Ensayos de laboratorio

Debido a que la resistividad eléctrica del suelo es una función compleja, de la resistividad del fluido que rellena sus poros, de su grado de saturación y temperatura, se realizaron una serie de determinaciones de laboratorio con suelos seleccionados, variando su contenido de agua, carga salina y temperatura, para comprender mejor la interacción y el rango de variación entre las variables mencionadas. Para medir la resistividad eléctrica en condiciones de laboratorio de las diferentes muestras de suelo utilizadas, se hizo uso del resistímetro de laboratorio desarrollado (Ver Anexo A, apartado 2). El resistímetro fue conectado a una caja de suelos de iguales dimensiones que la

caja estándar de “Miller” utilizada en estudios de corrosión en metales (ASTM G57, 2002) (Figura 4.3).



Figura 4.3. Configuración utilizada para la medición de resistividad en laboratorio.

Se realizaron diferentes tipos de ensayos sobre dos tipos de suelos con diferencias granulométricas bien marcadas (arena y grava) que fueron seleccionadas en laboratorio (Figura 4.4).



Figura 4.4. Preparación de las muestras en laboratorio.

Las curvas granulométricas obtenidas de estos dos materiales se observan en las figuras 4.5 y 4.6.

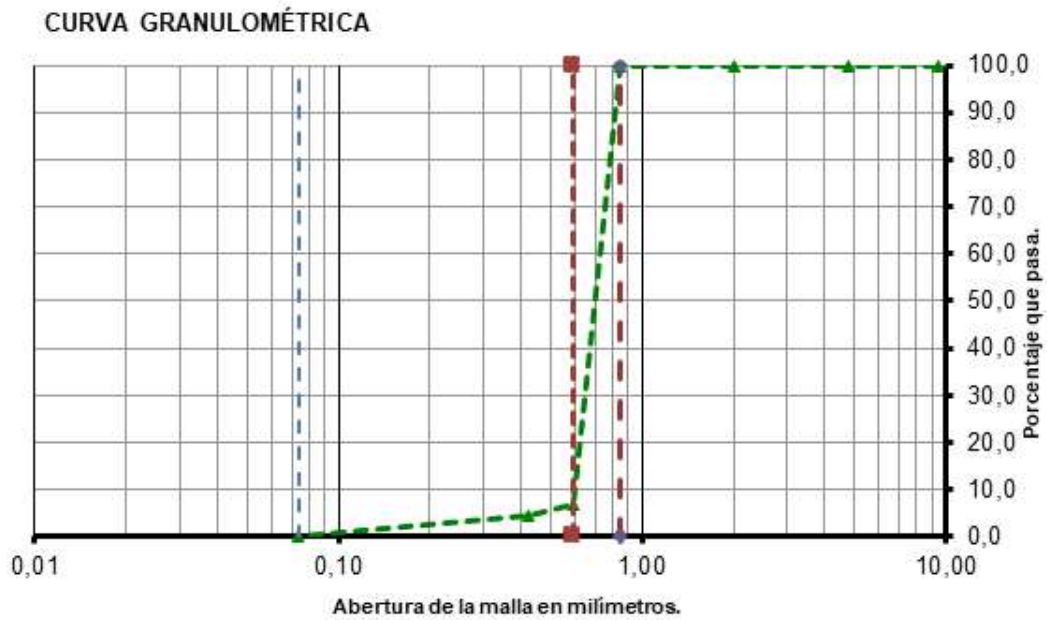


Figura 4.5. Curva granulométrica de la arena.

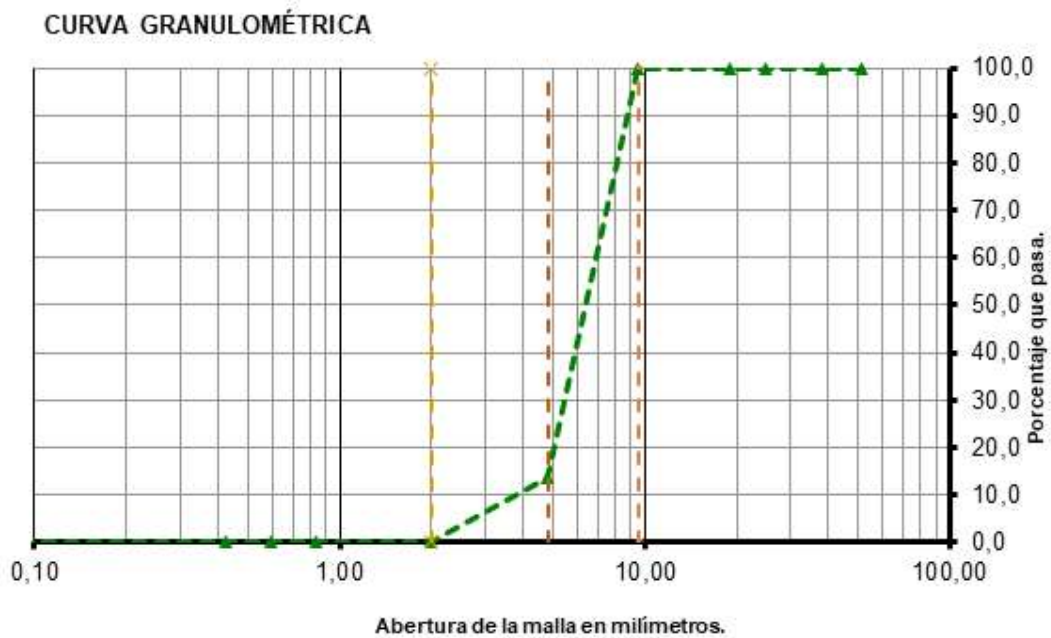


Figura 4.6 Curva granulométrica de la grava.

La principal característica de cada una puede observarse en la (Tabla 4.2)

Tabla características de los dos materiales		
Características	Arena	Grava
Denominación	Arena monogranular	Canto rodado triturado
Granulometría	Pasante tamiz N°20 y retenido N°30	Pasante tamiz N°3/8" y retenido N°4

Tabla 4.2. Características de los suelos seleccionados.

Además, se realizaron ensayos sobre muestras de arena con contenidos variables de arcilla.

Para los ensayos se utilizó agua destilada y se le incorporo cloruro de sodio hasta obtener una concentración salina de 14 *g/l* (Muestra N° 1). Luego con esta solución se prepararon diferentes disoluciones agregando la cantidad suficiente de agua destilada (Muestras N°2 a N°7). Además, se utilizó agua natural del acuífero extraída del ZED (Muestra N°8).

El rango de salinidades del agua elegido se encuentra por debajo de las concentraciones utilizadas por Archie, (1941). La ley de Archie fue definida para rangos de concentración salina muy elevados, que son relativamente típicos en aguas de formación de pozos petroleros. Estos valores de salinidad resultan atípicos en estudios hidrogeológicos y geotécnicos, dado que raramente un uso del recurso hídrico involucre salinidades elevadas. Por otro, existen, en la bibliografía disponible diversos trabajos (Peinado et al., 2010) (Matsui et al., 2016) que intentan realizar una validación de la ley de Archie para aguas dulces y salobres, con resultados controversiales, razón por la cual este aspecto ha sido uno de los objetivos de este estudio.

Las características principales de los tipos de aguas utilizadas en cada determinación, se pueden observar en la Tabla 4.3.

<b>Muestra</b>	<b>Origen del agua</b>	<b>Concentración NaCl</b>	<b>PH</b>	<b>Temperatura</b>
1	Laboratorio	14000 mg/l	7.4	21.7
2	Laboratorio	7000 mg/l	7.4	14.4
3	Laboratorio	3000 mg/l	7.5	14.7
4	Laboratorio	1550 mg/l	7.3	14.6
5	Laboratorio	730 mg/l	7.8	14.6
6	Laboratorio	410 mg/l	7.7	14.6
7	Laboratorio	250 mg/l	7.5	14.7
8	Acuífero	180 mg/l	8.2	11.5

Tabla 4.3. Características de las aguas utilizadas.

#### **4.2.1. Ensayos de la variación de la resistividad eléctrica con la temperatura.**

Para determinar la dependencia de la resistividad eléctrica con la temperatura, se realizó un primer ensayo con la muestra de arena seleccionada. Para ello se colocó la arena en un horno a una temperatura de 110°C, para

realizar su secado, hasta la obtención de un peso constante (ASTM D-2216, 2019).

Posteriormente se pesó la caja de suelos vacía y se cubrió completamente su volumen con la arena salida del horno. Se pesó el conjunto para determinar el peso seco de la muestra.

Se procedió a incorporar la muestra de agua del acuífero, previamente calentada hasta una temperatura cercana a los 80°C, hasta saturar la muestra. Nuevamente se pesó el conjunto para poder determinar su contenido de agua.

La caja de suelos, con la muestra de arena saturada con el agua del acuífero se conectó al resistivímetro electrónico y estos elementos fueron llevados a un equipo de frío para hacer descender su temperatura y poder observar la variación de su resistividad eléctrica (Figura 4.7).



Figura 4.7. Medición de resistividad eléctrica en función de la temperatura.

Se programó el resistivímetro para que realice las mediciones y almacenamiento en forma automática cada 10 segundos, tanto de la resistividad eléctrica de la muestra, como también de su temperatura. Este ensayo duró aproximadamente una hora.

Aplicando los mismos procedimientos mencionados anteriormente, se realizaron dos ensayos adicionales, uno de ellos utilizando la muestra de grava seleccionada en laboratorio y otro utilizando una muestra de suelo extraída del ZED a una profundidad de 50 centímetros.

Además, se realizó una cuarta determinación en donde se registró la variación de la resistividad eléctrica con el descenso de la temperatura, utilizando solamente el agua del acuífero. En la tabla 4.4 se presenta un resumen de estos experimentos realizados.

La elección de no utilizar agua destilada en estos ensayos se basa en su elevada resistividad, que dificultaría la lectura con los instrumentos disponibles. Además, dado que no representa una condición presente en el entorno natural en el que se aplicarán los resultados obtenidos, se optó por utilizar muestras de agua del acuífero para garantizar la relevancia y aplicabilidad de los datos recopilados.

<b>Ensayo</b>	<b>Tipo de suelo</b>	<b>Agua</b>
1	Arena	Muestra 8
2	Grava	Muestra 8
3	Suelo ZED	Muestra 8
4	-----	Muestra 8

Tabla 4.4. Resumen de experimentos con variación de temperatura.

#### **4.2.2. Ensayo de variación de resistividad eléctrica con el contenido de agua**

Las primeras experimentaciones para estudiar la variación de la resistividad eléctrica con el contenido de agua, se realizaron utilizando la arena seleccionada en laboratorio.

Para ello se colocó la arena en un horno a una temperatura de 110°C, para realizar su secado, hasta la obtención de un peso constante (ASTM D-2216, 2019).

Posteriormente se pesó la caja de suelos vacía y se cubrió completamente su volumen con la arena salida del horno. Se pesó el conjunto para determinar el peso seco de la muestra.

A continuación, se mezcló esta arena con agua de la muestra N°1 y se la depositó en la caja de suelos. Se pesó nuevamente el conjunto para determinar el contenido de agua que tenía la muestra.

Se conectó la caja de suelos al resistivímetro y se realizó la medición de su resistividad eléctrica (Se tomó la mediana de 15 mediciones).

Se extrajo la muestra de suelo de la caja y se le agrego más agua de la muestra N°1 y se repitió el procedimiento anterior. Todos estos pasos se reiteraron hasta que la muestra quedó totalmente saturada en agua.

Luego se realizó la misma metodología con las 7 muestras de agua restantes sobre nuevas muestras de arena.

Posteriormente se efectuaron las mediciones siguiendo el mismo procedimiento, sobre las muestras de grava seleccionada en laboratorio y también, sobre muestras de arena-arcilla seleccionadas, pero para éstas últimas solamente utilizando el agua del acuífero.

Con los datos obtenidos de estos ensayos se pudo obtener familias de curvas de variación de la resistividad eléctrica con el contenido de agua y con diferentes salinidades para cada tipo de suelos. En la tabla 4.5 se presenta un resumen de estos experimentos realizados.

Experimento	Tipo de suelo	Agua	Experimento	Tipo de suelo	Agua
1	Arena	Muestra 1	14	Grava	Muestra 6
2	Arena	Muestra 2	15	Grava	Muestra 7
3	Arena	Muestra 3	16	Grava	Muestra 8
4	Arena	Muestra 4	17	Arena- arcilla (5%)	Muestra 8
5	Arena	Muestra 5	18	Arena- arcilla (16%)	Muestra 8
6	Arena	Muestra 6	19	Arena- arcilla (40%)	Muestra 8
7	Arena	Muestra 7			
8	Arena	Muestra 8			
9	Grava	Muestra 1			
10	Grava	Muestra 2			
11	Grava	Muestra 3			
12	Grava	Muestra 4			
13	Grava	Muestra 5			

Tabla 4.5. Resumen de experimentos con variación de contenido de agua.

### 4.3. Estudio de campo paramétrico

Este estudio, se llevó a cabo en el ZED, donde sobre un perfil se eligieron cuatro puntos del terreno (Figura 4.8)



Figura 4.8. Ubicación del perfil elegido en el ZED.

En la figura 4.9 se puede apreciar el esquema de distribución de los SEV paramétricos.



Figura 4.9. Esquema de distribución de los puntos de estudios paramétricos.

Sobre estos puntos se realizaron sondeos eléctricos verticales (SEV) con la configuración electródica Schlumberger y con aperturas del tendido geoelectrico  $AB$  de 12 metros, consiguiendo de esta manera lecturas de la resistividad eléctrica aparente hasta los 3 metros de profundidad aproximadamente (Figura 4.10).



Figura 4.10. Realización del sondeo eléctrico vertical (SEV) paramétrico.

Una vez finalizado los SEV, se perforó el suelo (Figura 4.11) y se extrajeron seis muestras mediante tubos delgados (Figura 4.12). Las herramientas para perforación y extracción de muestras fueron diseñadas y construidas para esta tarea.



Figura 4.11. Perforación del suelo hasta la profundidad de toma de muestras.



Figura 4.12. Extracción de las muestras en tubos delgados.

Las muestras contenidas en los tubos delgados, fueron preparadas para su posterior desmolde en el laboratorio de geotecnia (Figura 4.13).



Figura 4.13. Preparación de la muestra para su desmolde en laboratorio.

Sobre las muestras extraídas del ZED, en el laboratorio de geotecnia “Carlos Micucci” de la Universidad Tecnológica Nacional, Regional Concordia,

se realizaron los ensayos de caracterización, contenidos de arcilla y triaxiales no consolidados y no drenados (Figura 4.14).



Figura 4.14. Realización de los ensayos triaxiales sobre las muestras extraídas.

Con los resultados obtenidos en el laboratorio de geotecnia, sobre las muestras extraídas en el estudio paramétrico, se realizaron correlaciones con sus respectivas mediciones de resistividad eléctrica. Esto permitió obtener relaciones de entre las distintas variables mecánicas del suelo con su medición de su resistividad eléctrica en el punto.

#### **4.4. Levantamiento de mapa geoelectrico**

Algunas semanas más tarde de realizado el estudio de campo paramétrico, se realizó en el ZED, las mediciones para el levantamiento del mapa geoelectrico en un área delimitada de 9 x 6 metros, tomando como un lado el perfil donde se realizaron los SEV paramétricos (Figura 4.15).

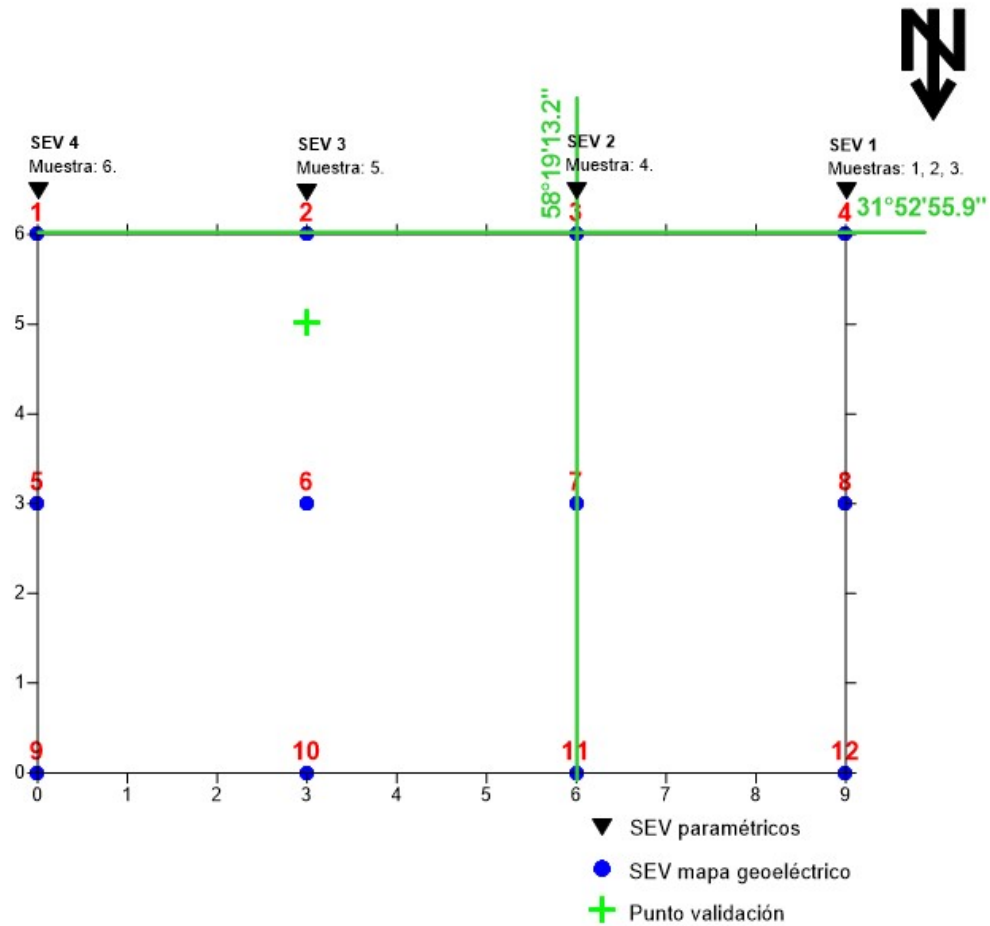


Figura 4.15. Mapa de distribución de los puntos de medición.

En esta área se realizaron 12 sondeos eléctricos verticales con aperturas del tendido *AB* de 12 metros y cuya distribución se rige por una grilla de 3 filas por 4 columnas (Figura 4.16).

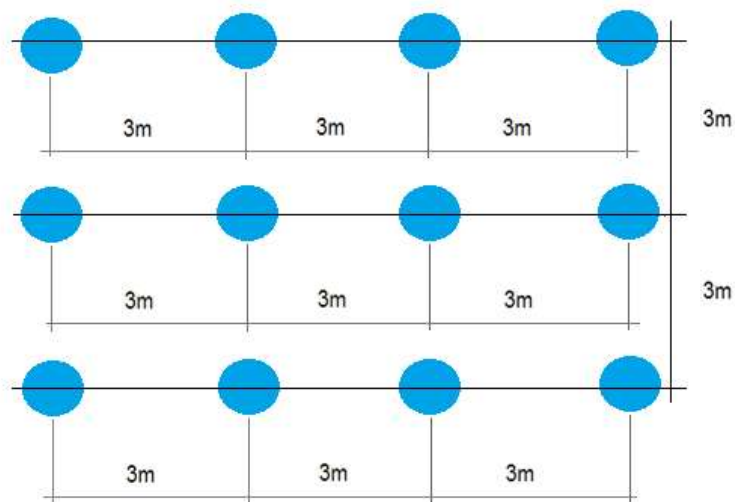


Figura 4.16. Grilla de sondeos eléctricos verticales en el ZED.

Posteriormente, con la interpretación de estos sondeos, o sea la obtención de las resistividades eléctricas reales y espesores de cada capa (ver Capítulo 2, apartado 1.4), se realizaron mapas geoelectricos 2D del subsuelo (cortes horizontales) para 0.5, 1 y 1.5 metros de profundidad. Estas profundidades dependen de la apertura del tendido ( $AB/2$ ) y en menor grado de la respuesta resistiva del terreno. En el método Schlumberger se estima empíricamente que la profundidad alcanzada equivale al  $AB/4$  pero el ajuste final se hace mediante la interpretación geoelectrica.

Con estos mapas se puede observar la distribución espacial de la resistividad eléctrica del subsuelo a las profundidades citadas.

Figura mapa de distribución de puntos paramétricos y grilla de SEV

#### **4.5. Levantamiento mapa geomecánico**

Con las funciones de correlación encontradas en el estudio de campo paramétrico en el ZED y aplicándolas a los datos obtenidos del mapa geoelectrico, se construyeron mapas geomecánicos del subsuelo para los diferentes parámetros mecánicos de suelo estudiados (contenido de finos, contenido de arcilla, ángulo interno de fricción, cohesión y contenido de humedad) a las profundidades en estudio.

#### **4.6. Validación de los resultados de los mapas geomecánicos**

Con la disponibilidad de los mapas geomecánicos, se eligió un punto al azar del área de estudio en el ZED, donde se extrajo una muestra y se envió a laboratorio para realizar las determinaciones pertinentes (Figura 4.17).



Figura 4.17. Extracción de muestra para validación del mapa geomecánico.

Luego teniendo los resultados de las distintas variables geomecánicas de interés obtenidas de la muestra, se comparó con los valores estimados presentados en los mapas geomecánicos.

#### **4.7. Instrumentación de la cuenca**

Las estaciones de monitoreo de variables hidrogeológicas, se encuentran ubicadas en la cuenca del Arroyo Palmar, más precisamente en la ZED (Figura 4.18).

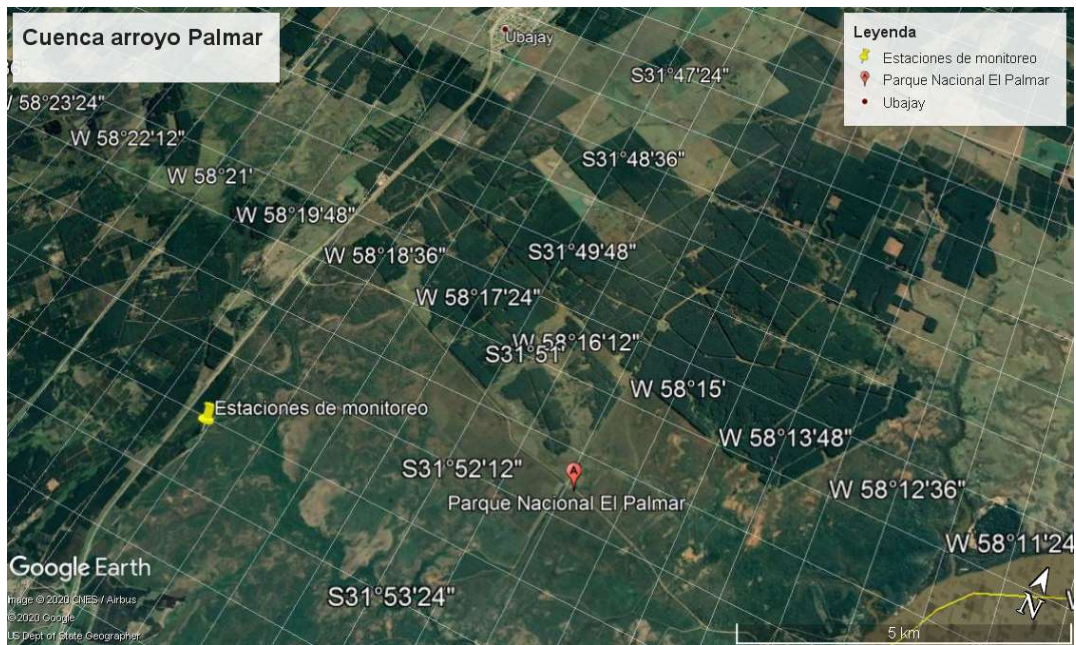


Figura 4.18. Ubicación de las estaciones de monitoreo hidrogeológico.

#### 4.7.1. Estación de monitoreo continuo de humedad y temperatura de suelo

Esta estación de medición está compuesta por tres sensores modelo 5TM de la empresa Decagon Devices, que miden la temperatura y el contenido volumétrico de agua en el suelo.

Estos sensores determinan el contenido volumétrico de agua (VWC) en forma precisa midiendo la constante dieléctrica del suelo, utilizando para ello una técnica denominada *time domain reflectometry (TDR)* y lo hacen con una resolución de 0.08% y una exactitud de  $\pm 2\%$ .

Con respecto a la medición de temperatura, lo realizan por medio de un termistor incluido en su interior, con una resolución de 0.1°C y una exactitud de  $\pm 1^\circ\text{C}$  (Figura 4.19).

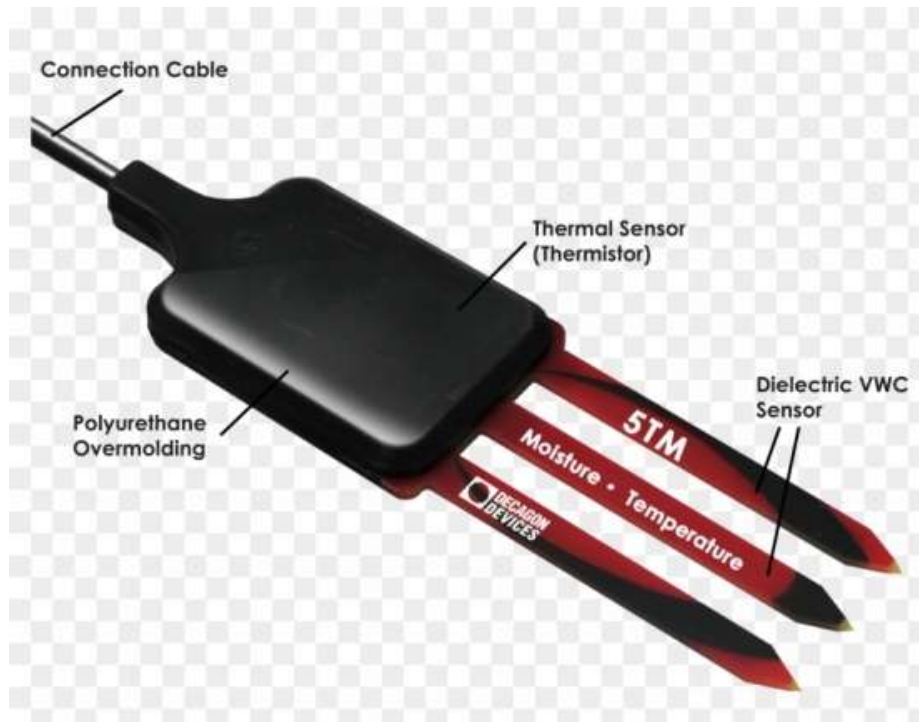


Figura 4.19. Sensor 5TM.

Estos sensores se encuentran instalados en las superficies de contacto entre los horizontes edáficos A, B y C a una profundidad de 0.3m, 0.6m y 1.2m respectivamente (Figura 4.20).



Figura 4.20. Instalación de los sensores 5TM.

Además, ésta estación de medición cuenta con un cuarto sensor, el modelo RT-1, también de la empresa Decagon Devices, que registra la temperatura ambiente a 0.1 m sobre el nivel del suelo y lo hace con una resolución de 0.1 °C y una exactitud de  $\pm 1^\circ\text{C}$  (Figura 4.21).



Figura 4.21. Sensor RT-1.

Para llevar a cabo las mediciones y almacenamiento, estos sensores se conectan a un datalogger modelo EM50 de la misma empresa. Este equipo posee 5 canales de medición con una capacidad de registro de 36000 datos y una autonomía entre 8 y 12 meses dependiendo del intervalo de medición ajustado (Figura 4.22).



Figura 4.22. Datalogger EM50.

La estación de monitoreo de temperatura y humedad de suelo, instalada en la cuenca del arroyo Palmar, se puede observar en la figura 4.23.



Figura 4.23. Estación de monitoreo continuo de temperatura y humedad de suelo instalada en la cuenca del arroyo Palmar.

#### 4.7.2. Estación de monitoreo de nivel freático

Para la medición del nivel estático del acuífero, se utiliza un medidor y registrador modelo Hobo U20L-01 de la empresa Onset. Este dispositivo mide el nivel de carga hidráulica que existe sobre él, con una resolución de 0.21cm y un error  $\pm 1$ cm. Además, mide y registra la temperatura del agua con una resolución de 0.1°C y una exactitud de  $\pm 0.44$ °C .

Posee la capacidad de almacenar 27000 datos de presión y temperatura con una autonomía de 5 años realizando una lectura por minuto (Figura 4.24).



Figura 4.24. Sensor de nivel Hobo U20L-01.

La estación de monitoreo de nivel freático puede apreciarse en la figura 4.25.



Figura 4.25. Estación de monitoreo de nivel freático.

Es importante indicar que ambas estaciones de monitoreo, realizan las mediciones y su almacenamiento cada una hora, y teniendo a la fecha aproximadamente 7 años de datos continuos.

## 5. ESTUDIO DE LA RESPUESTA RESISTIVAS DE LOS SUELOS

### 5.1. Datos obtenidos por las estaciones de mediciones hidrogeológicas en la ZED

A continuación, se presentan los datos obtenidos por las estaciones de monitoreo continuo (Capítulo 4, apartado 7), en el período comprendido entre el 9/11/2014 y el 29/11/2015, en el que dichas estaciones han funcionado de forma ininterrumpida e incluye un ciclo hidrológico completo.

En primer lugar, se presentan los datos de la variación del contenido de humedad del suelo a las tres profundidades a las que se encuentran colocados los sensores (Figura 5.1).

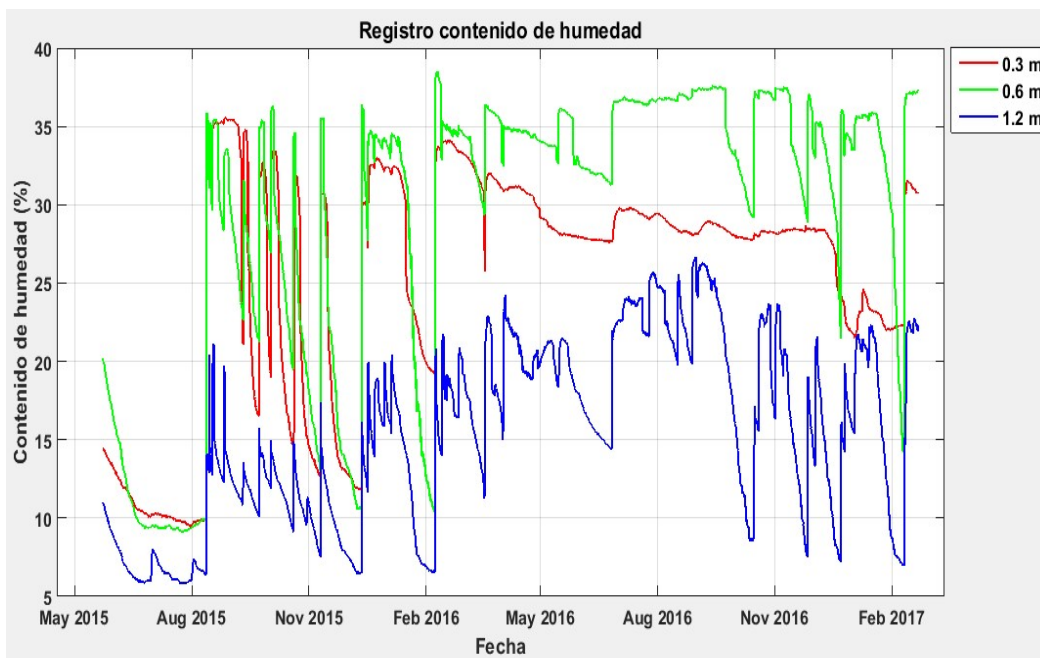


Figura 5.1 Registro de contenido de humedad del suelo.

De este registro de datos se muestra en la tabla 5.1 algunos valores estadísticos característicos.

Contenido de humedad			
Profundidad	120cm	60cm	30cm
Mínimo	6%	9%	10%
Máximo	27%	38%	36%
Promedio	15%	33%	28%
Rango	21%	29%	26%

Tabla 5.1. Valores estadísticos característicos del contenido de humedad.

Si bien no es parte del análisis de este apartado, la migración del agua en la zona no saturada aparece bien explicada en Silva Busso et al. (2021).

Además, como fue expresado en el capítulo 4, estos sensores de medición de contenido de agua, registran también la temperatura del medio circundante.

En la figura 5.2, puede apreciarse, parte de la evolución temporal de la temperatura, para las tres profundidades medidas.

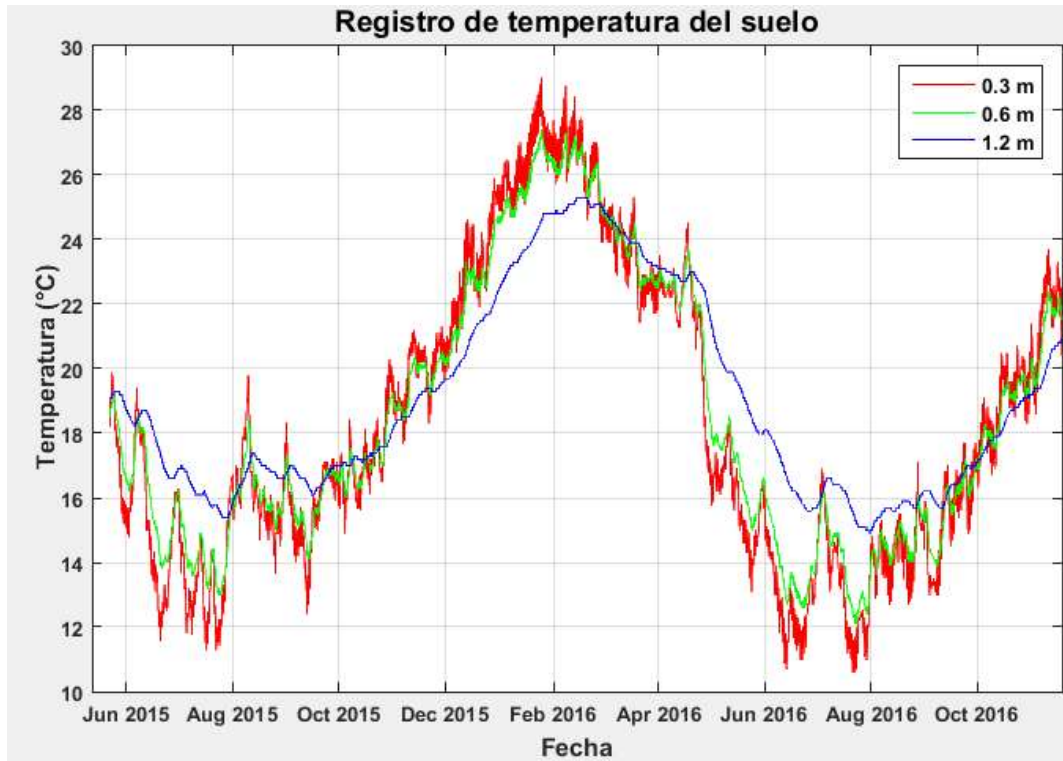


Figura 5.2. Evolución de la temperatura del suelo.

En la tabla 5.2, se describen sus valores estadísticos característicos.

Temperaturas del suelo			
Profundidad	120cm	60cm	30cm
Mínimo	14.9°C	12.1°C	10.6°C
Máximo	25.3°C	27.4°C	29.0°C
Promedio	19.0°C	18.5°C	18.3°C
Rango	10.4°C	15.3°C	18.4°C

Tabla 5.2. Valores estadísticos característicos de la temperatura del suelo.

Otra variable que se registra, es la temperatura del acuífero. Su evolución temporal se representa en la figura 5.3.

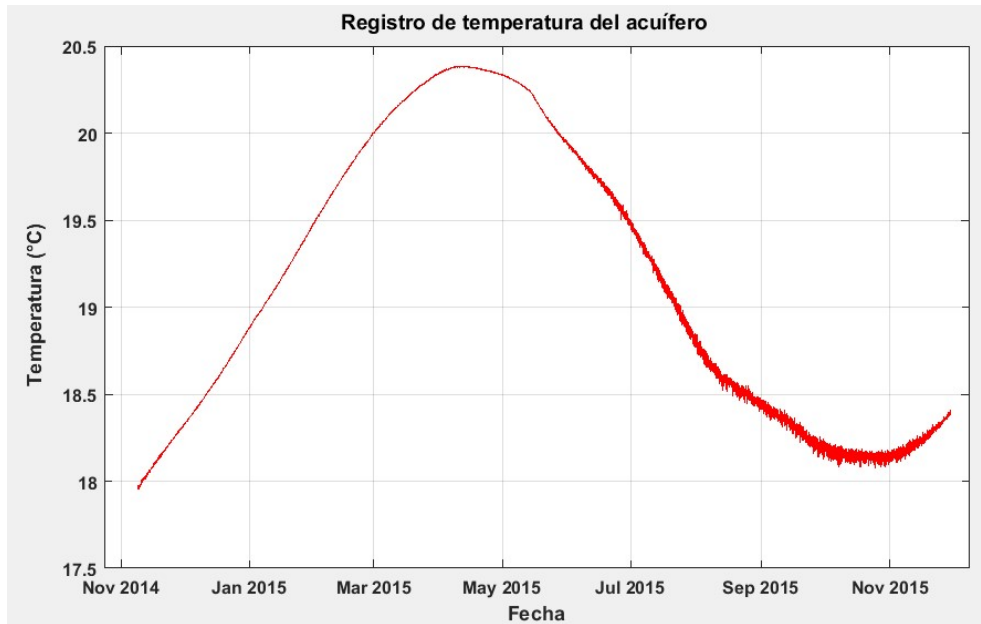


Figura 5.3. Evolución de la temperatura del acuífero.

En la tabla 5.3 se describen sus valores característicos.

Valor	Temperatura
Mínimo	18.0°C
Máximo	20.4°C
Promedio	19.0°C
Rango	2.4°C

Tabla 5.3. Valores estadísticos característicos de la temperatura del acuífero.

## 5.2. Estudio de la variación de la resistividad eléctrica con la temperatura

El efecto de la variación de la resistividad eléctrica con la temperatura, sobre las cuatro muestras ensayadas, esto es, la de agua del acuífero, arena-agua acuífero, grava-agua acuífero y suelo-agua acuífero (éstas tres últimas saturadas), se muestra en la figura 5.4. Los puntos representan el conjunto de mediciones realizadas.

Para la obtención de estas cuatro curvas se realizaron aproximadamente un total de 1700 mediciones con un intervalo de 10 segundos entre cada una de ellas.

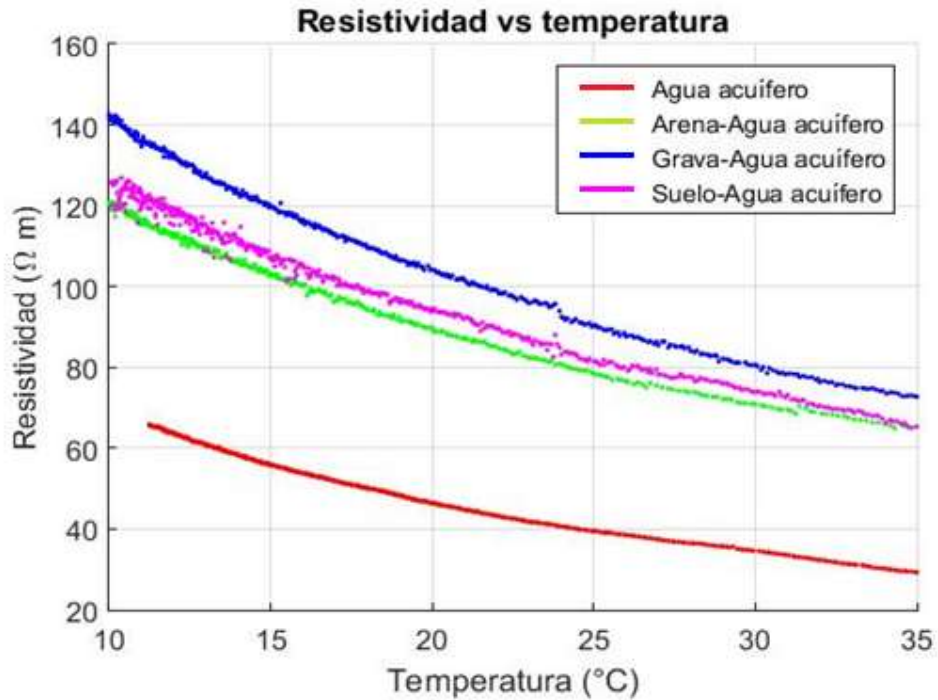


Figura 5.4. Variación de la resistividad eléctrica con la temperatura en las cuatro muestras ensayadas.

A partir de los datos experimentales obtenidos, se pudo escribir funciones de ajustes lineales para cada tipo de curva (Agua acuífero, arena-agua acuífero, grava-agua acuífero y suelo-agua acuífero) (Tabla 5.4).

Muestra	Ecuación de ajuste	Coefficiente de Pearson
Agua acuífero	$y = 360.1x^{-0.68}$	$R^2 = 0.99$
Arena - agua acuífero	$y = 384.6x^{-0.49}$	$R^2 = 0.99$
Grava-agua acuífero	$y = 496.3x^{-0.53}$	$R^2 = 0.99$
Suelo-agua acuífero	$y = 410.8x^{-0.50}$	$R^2 = 0.98$

Tabla 5.4. Funciones de ajustes lineales de los datos experimentales.

En las figuras 5.5, 5.6, 5.7 y 5.8, se pueden observar en forma individual cada uno de los ensayos mostrados en la figura 5.4, junto con su respectiva curva de ajuste lineal.

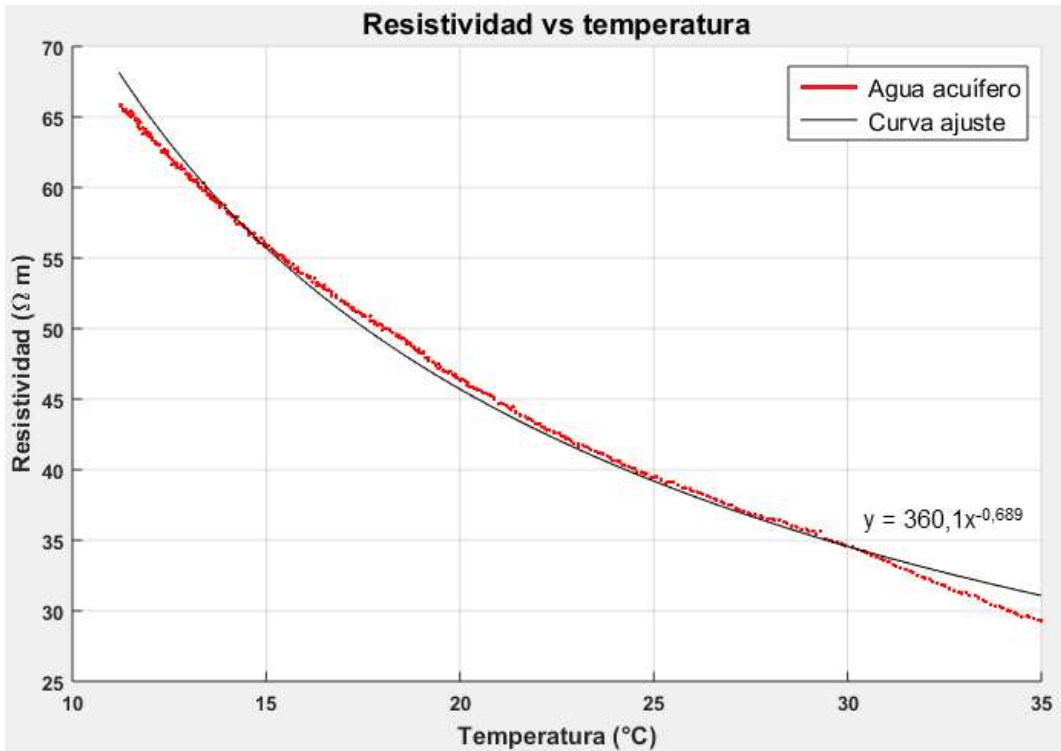


Figura 5.5. Variación de la resistividad eléctrica con la temperatura en muestra de agua del acuífero.

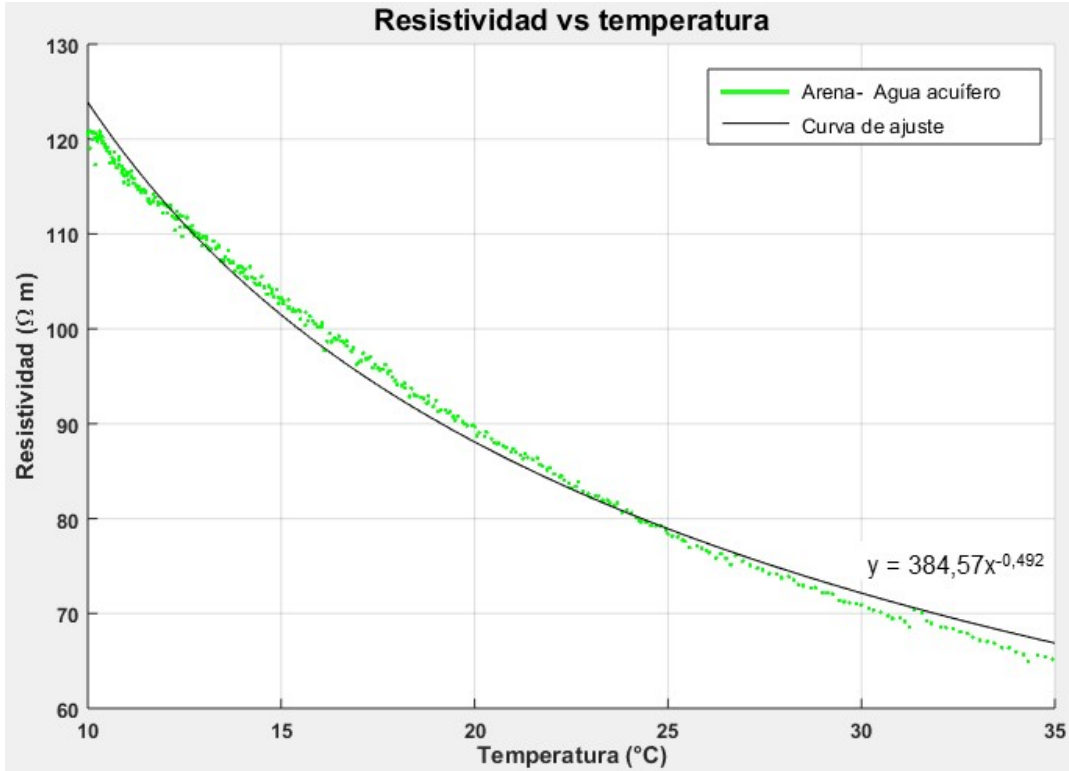


Figura 5.6. Variación de la resistividad eléctrica con la temperatura en muestra de arena saturada en agua del acuífero.

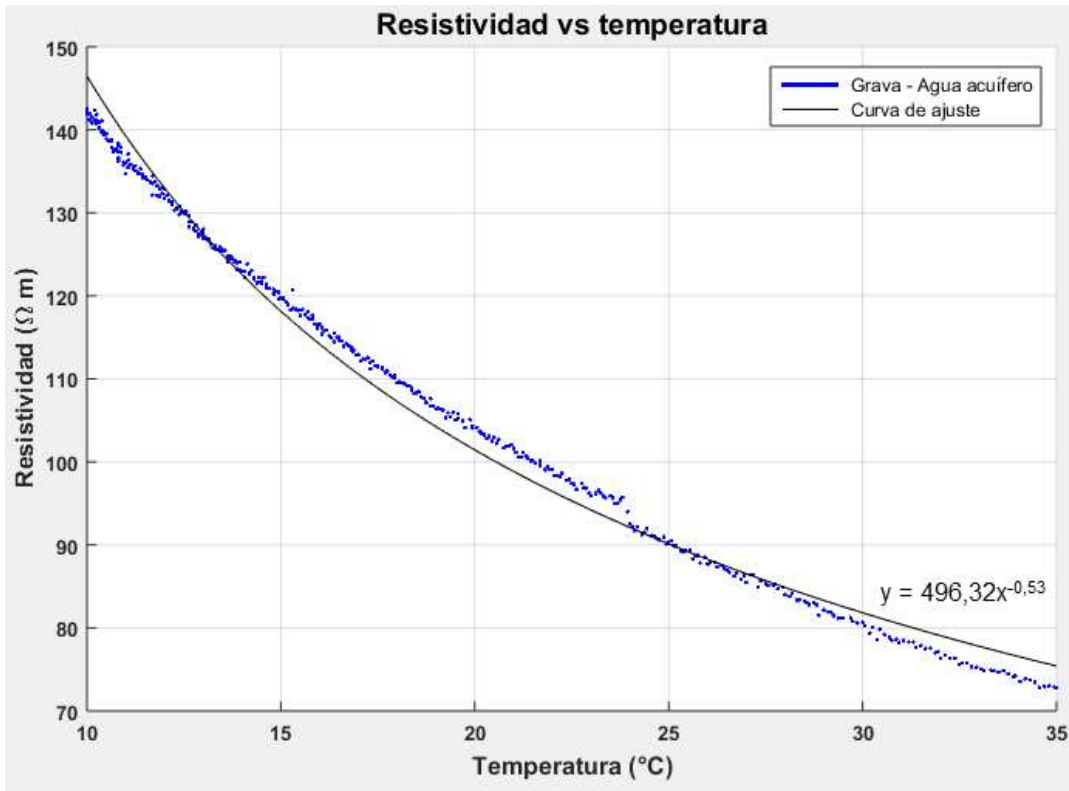


Figura 5.7. Variación de la resistividad eléctrica con la temperatura en muestra de grava saturada en agua del acuífero.

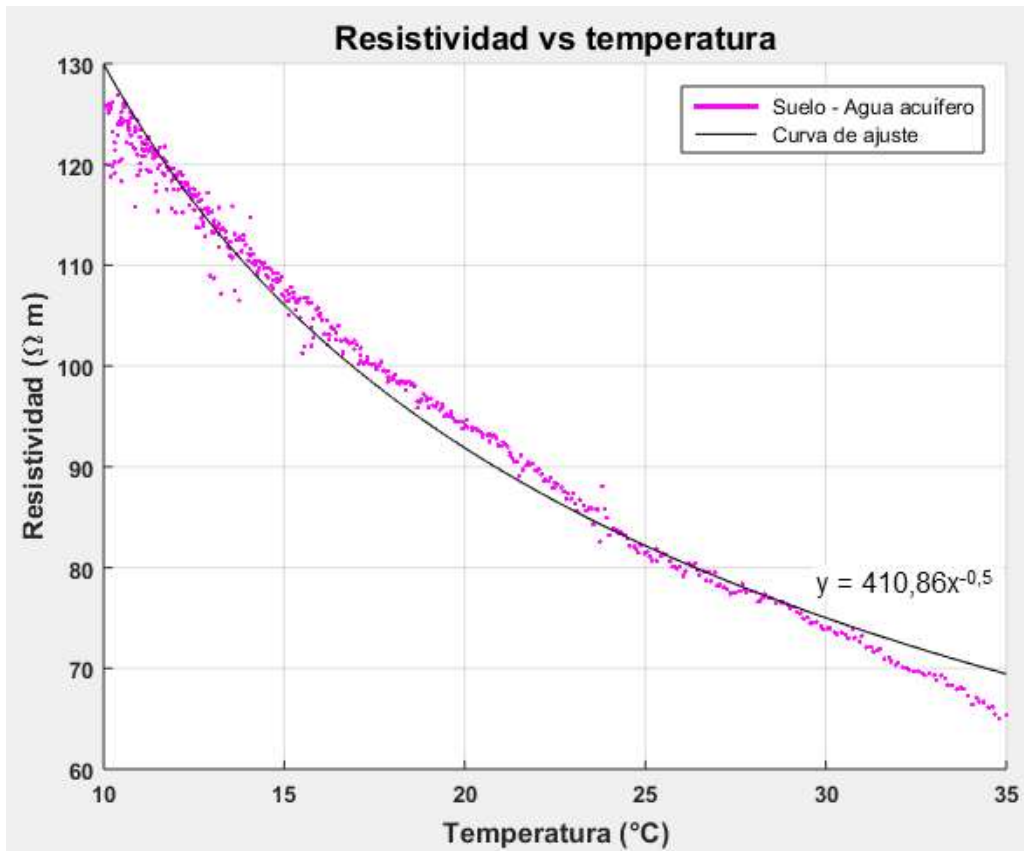


Figura 5.8. Variación de la resistividad eléctrica con la temperatura en muestra de suelo saturado en agua del acuífero.

De la observación de las curvas precedentes, se pudo notar que, al aumentar la temperatura de las muestras de suelo, su resistividad eléctrica disminuye. Dicha observación concuerda con lo expresado por otros autores (Zhou et al., 2015) (Kouchaki, 2017).

Además, por medio del análisis de los datos, surge que una disminución de la temperatura de 25 ° C a 10 ° C, puede aumentar la resistividad eléctrica en aproximadamente un 50%. Esto también fue expresado en el trabajo de Kouchaki (2017). No obstante, como en este trabajo se encuentra un ajuste con funciones potenciales, tal vez sería más correcto pensar una disminución de temperaturas “altas” producirá un incremento pequeño de la resistividad, por el contrario, una disminución de temperaturas (bajas) producirá incrementos grandes. Esto es porque se trata de una función de correlación potencial negativa.

Estas diferencias en las amplitudes térmicas, pueden encontrarse en los niveles no saturados del subsuelo, según los datos observados en la figura 5.2 y expresados en la tabla 5.2.

También estas diferencias aparecen inevitablemente al realizar mediciones tanto in situ como en laboratorio. Por ello es muy importante tenerlas en cuenta, refiriendo los valores de resistividades eléctricas medidas, a una temperatura en común al momento de interpretar las mediciones de campo utilizando los datos de laboratorio.

Con las determinaciones o ensayos realizados, se comparó, además, el ajuste de dos de las tres ecuaciones empíricas citadas en el capítulo 2, apartado 2.1.5 y que son sugeridas en la bibliografía, para la corrección de la resistividad eléctrica con la variación de la temperatura.

Este estudio se realizó con una muestra de suelo tomada a una profundidad de 50 centímetros en la ZED. Para ello se ajustó nuevamente los datos de la curva experimental con un polinomio, con la intención de que se adapte bien a la dinámica de los datos experimentales. Aunque podría emplearse una aproximación potencial, como el caso del laboratorio, se optó mejor por un

polinomio de grado cuatro porque lograba un mejor ajuste significativo de los datos experimentales. (Figura 5.9) y se trata de un patrón de comparación (para no compara aproximaciones entre sí).

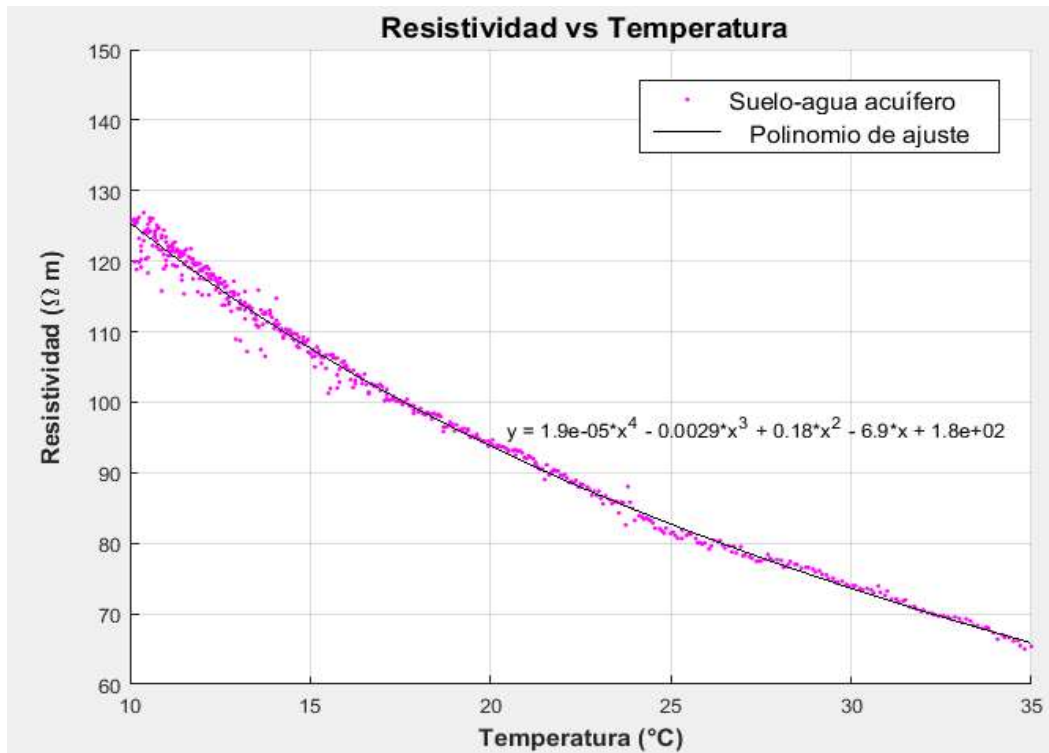


Figura 5.9. Polinomio de ajuste de los datos experimentales en muestra de suelo.

Luego se comparó el polinomio obtenido con las dos expresiones empíricas dadas por (Orellana, 1982) y (Arp, 1953). Estas ecuaciones de estimación citadas, permiten corregir entre cualquier par de temperaturas, a diferencia de la expresada en la norma ASTM 57 (2002), que solo puede llevar la corrección a 15.5°C, por este motivo no ha sido tomada en cuenta en este análisis.

Se tomó como temperatura de referencia  $t_0 = 19^\circ\text{C}$  para ambas ecuaciones, que es la temperatura media del acuífero Ubajay, según datos representados en la tabla 5.3.

En la curva representada en la figura 5.3, se puede ver el comportamiento clásico de poca variación en las amplitudes térmicas, debido a que el nivel estático del acuífero se encuentra a una profundidad aproximada a los 3 metros, por lo tanto, solo presenta variaciones estacionales y no diarias como tiene el subsuelo cercano a la superficie (Figura 5.2).

Continuando con el estudio de las ecuaciones de predicción de la resistividad eléctrica en función de las temperaturas, para el coeficiente térmico de variación de resistividad eléctrica se utilizó el valor  $\alpha = -0.022 \text{ 1/}^\circ\text{C}$  según (Orellana, 1982).

El resultado de esta comparación se puede observar en la figura 5.10.

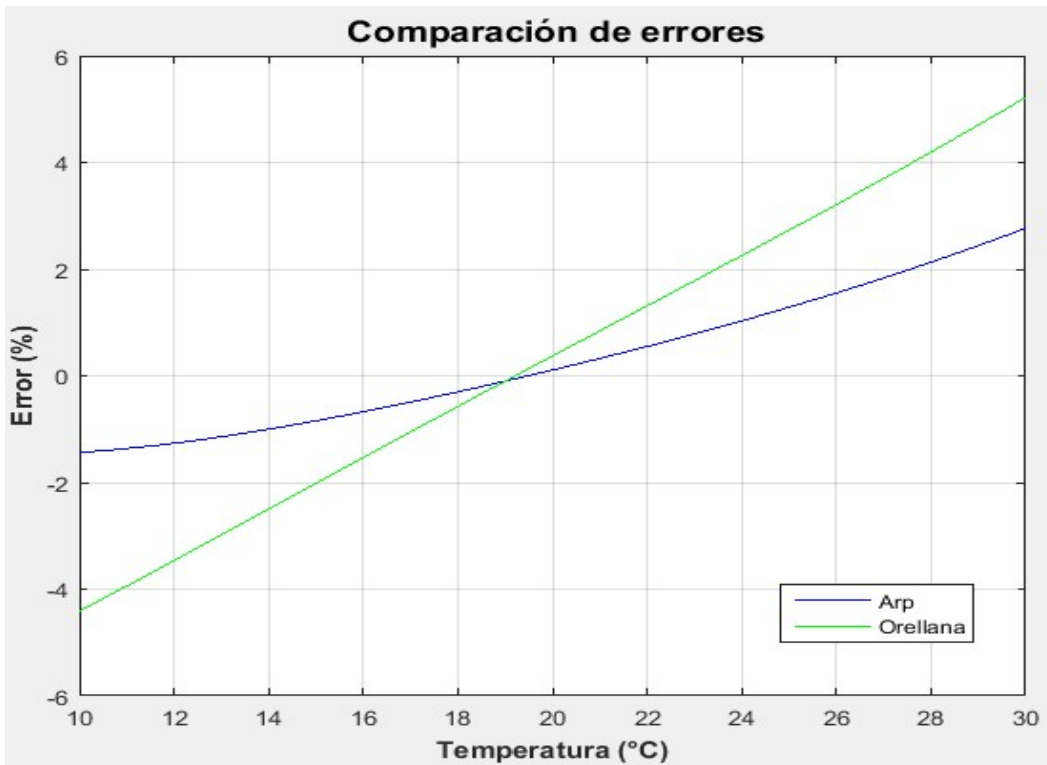


Figura 5.10. Comparación de errores de las dos expresiones de estimación.

Como puede apreciarse en la figura, la estimación de Arp (1953) resultó ser más precisa que la de Orellana (1982).

Posteriormente se procedió a determinar el coeficiente térmico de variación de la resistividad  $\alpha$ , utilizando para ello los valores obtenidos en la experimentación con la muestra de suelo (Figura 5.8).

Este coeficiente se define matemáticamente de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{1}{\rho_0} \frac{\Delta \rho}{\Delta t} \quad (5.1)$$

Como

$$\frac{\Delta\rho}{\Delta t} = -2.3\Omega m/^{\circ}C \quad (5.2)$$

y

$$\rho_0 = 96.2\Omega m$$

Entonces el coeficiente térmico de variación de la resistividad es:

$$\alpha = -0.024 \text{ } 1/^{\circ}C$$

La realización de una nueva comparación, pero esta vez utilizando el valor de  $\alpha$  obtenido, puede ser examinado en la figura 5.11.

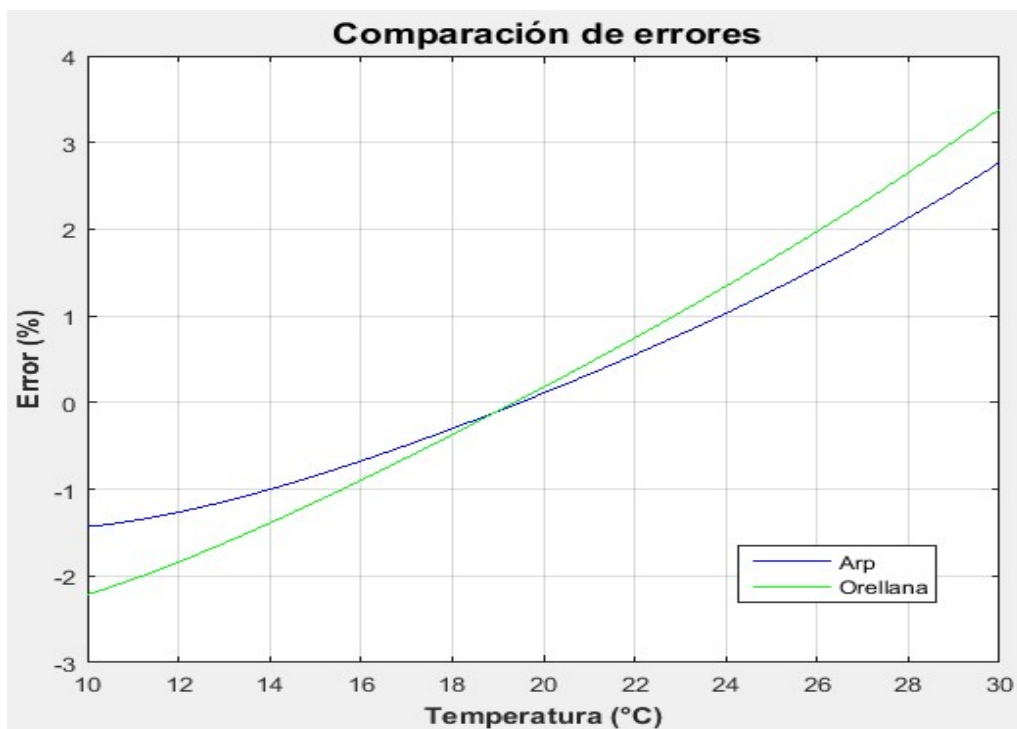


Figura 5.11. Comparación de errores de las dos expresiones de estimación.

Como puede apreciarse, en este caso, al tomar el valor real del coeficiente de variación de resistividad con la temperatura, la expresión de Orellana (1982) mejoró notablemente con respecto al caso anterior, pero se mantuvo con un error mayor que la aproximación de Arp (1953).

Se realizó además dos comparaciones extras, para comprender el comportamiento de estas ecuaciones, en el caso que la temperatura de referencia adoptada sea mayor o menor a la del caso anterior. Para ello se tomaron las siguientes temperaturas de referencia  $t_0 = 11^{\circ}C$  y  $\rho_0 = 25^{\circ}C$  y que

son los valores extremos de la temperatura en la zona no saturada de la ZED (Tabla 5.2).

Los resultados de estas comparaciones se pueden observar en las figuras 5.12 y 5.13 respectivamente.

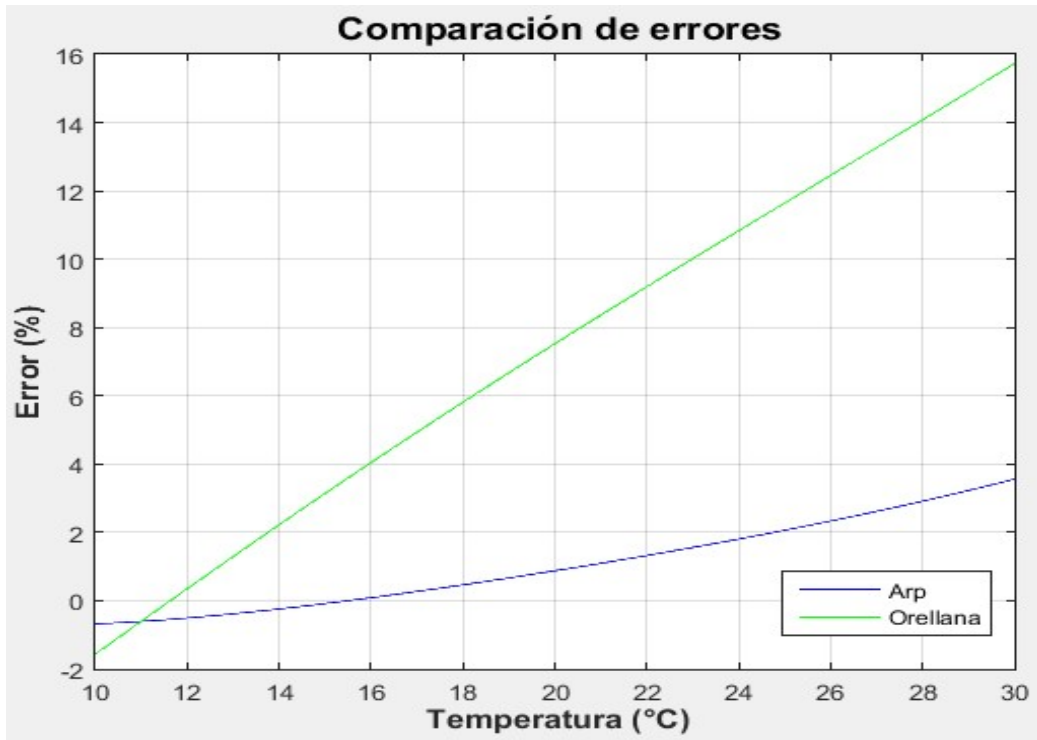


Figura 5.12. Comparación de errores de las dos expresiones de estimación con  $\rho_0 = 11^\circ\text{C}$ .

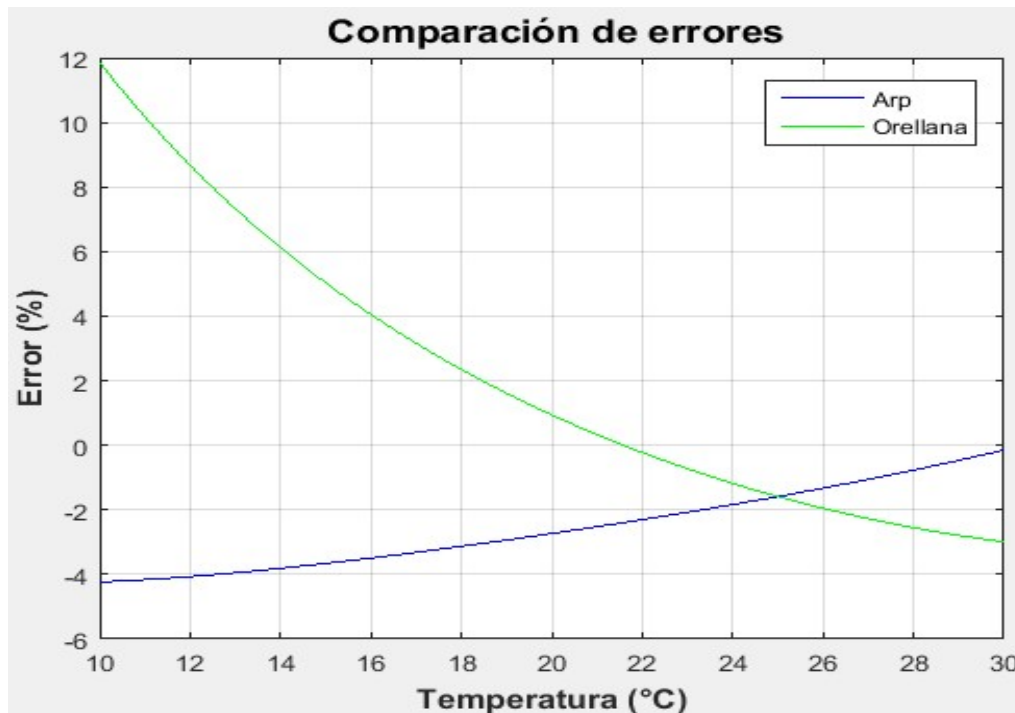


Figura 5.13. Comparación de errores de las dos expresiones de estimación con  $\rho_0 = 25^\circ\text{C}$ .

Como puede observarse, en todos los casos la expresión de Arp (1953) fue la que mantuvo el menor error, es por eso que esta expresión es la que se adoptó en este trabajo, para corregir los efectos de la temperatura sobre el valor de la resistividad eléctrica de las muestras.

Todos los valores de resistividad eléctrica en este trabajo, fueron referidos a una temperatura de  $19^\circ\text{C}$  que es la temperatura media del Acuífero Ubajay.

De lo visto anteriormente, para realizar la corrección de la resistividad por temperatura, tanto de muestras de laboratorio como de campo, **se sugiere utilizar la ecuación (2.18)**.

### 5.3. Variación de la resistividad eléctrica en suelos granulares con el contenido de agua y salinidad

Los resultados experimentales obtenidos para determinar el comportamiento en la variación de la resistividad eléctrica con el contenido de agua y su carga salina, para los tres tipos de muestras de suelos utilizadas (Arena, grava y arena con arcilla), se pueden observar en las figuras 5.14, 5.15, 5.16 y 5.17.

En la figura 5.14 se puede apreciar la familia de curvas obtenidas, con la experimentación sobre la muestra de arena, con contenidos crecientes de agua y diferentes cargas salinas (Capítulo 4, Tabla 4.3).

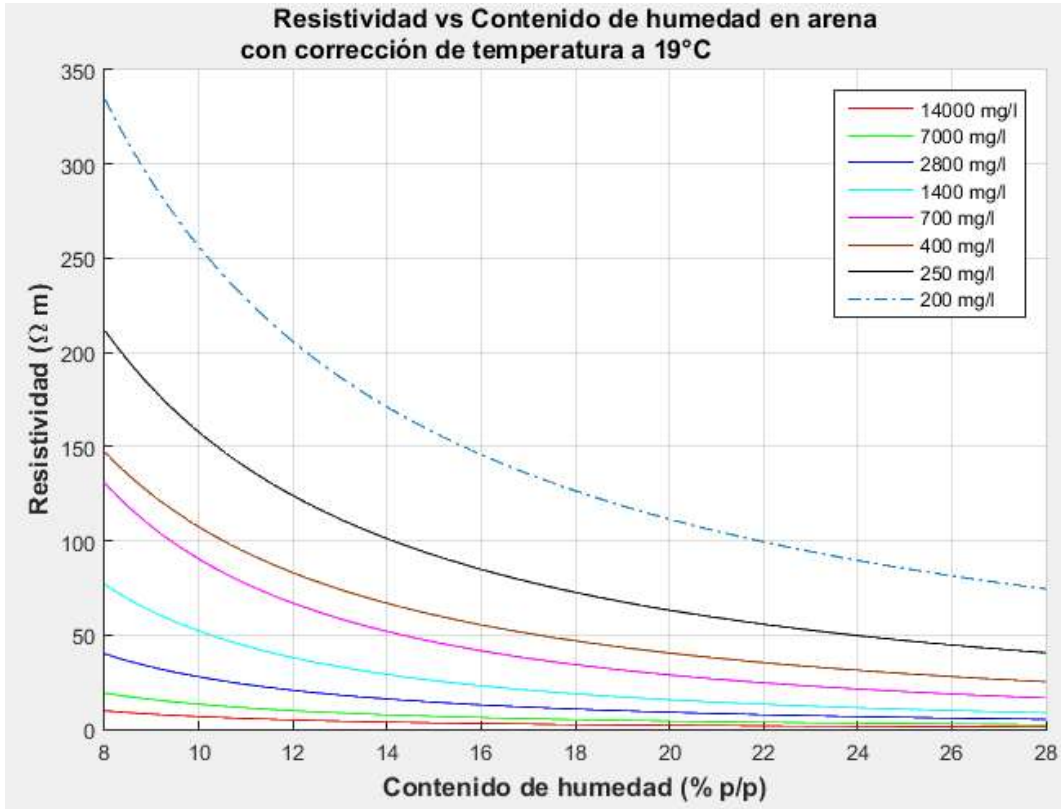


Figura 5.14. Variación de la resistividad eléctrica con el contenido de agua para muestras de arena (expresado en mg. de NaCl).

Estas curvas representadas son el resultado del ajuste de los datos experimentales obtenidos (Anexo D). Sus ecuaciones de ajustes se detallan en la tabla 5.5.

Experimento	Concentración NaCl	Ecuación de ajuste	Coefficiente de determinación
Muestra 1	14000 mg/l	$y = 342.2x^{-1.71}$	$R^2 = 0.99$
Muestra 2	7000 mg/l	$y = 578.8x^{-1.64}$	$R^2 = 0.99$
Muestra 3	3000 mg/l	$y = 1185x^{-1.63}$	$R^2 = 0.99$
Muestra 4	1550 mg/l	$y = 2866x^{-1.74}$	$R^2 = 0.98$
Muestra 5	730 mg/l	$y = 4037x^{-1.65}$	$R^2 = 0.99$
Muestra 6	410 mg/l	$y = 2761x^{-1.41}$	$R^2 = 0.98$
Muestra 7	250 mg/l	$y = 3296x^{-1.32}$	$R^2 = 0.99$
Muestra 8	180 mg/l	$y = 4060x^{-1.20}$	$R^2 = 0.99$

Tabla 5.5. Funciones de ajustes en los experimentos con muestras de arena.

En el caso de la experimentación con la muestra de grava, los resultados se pueden observar en la Figura 5.15.

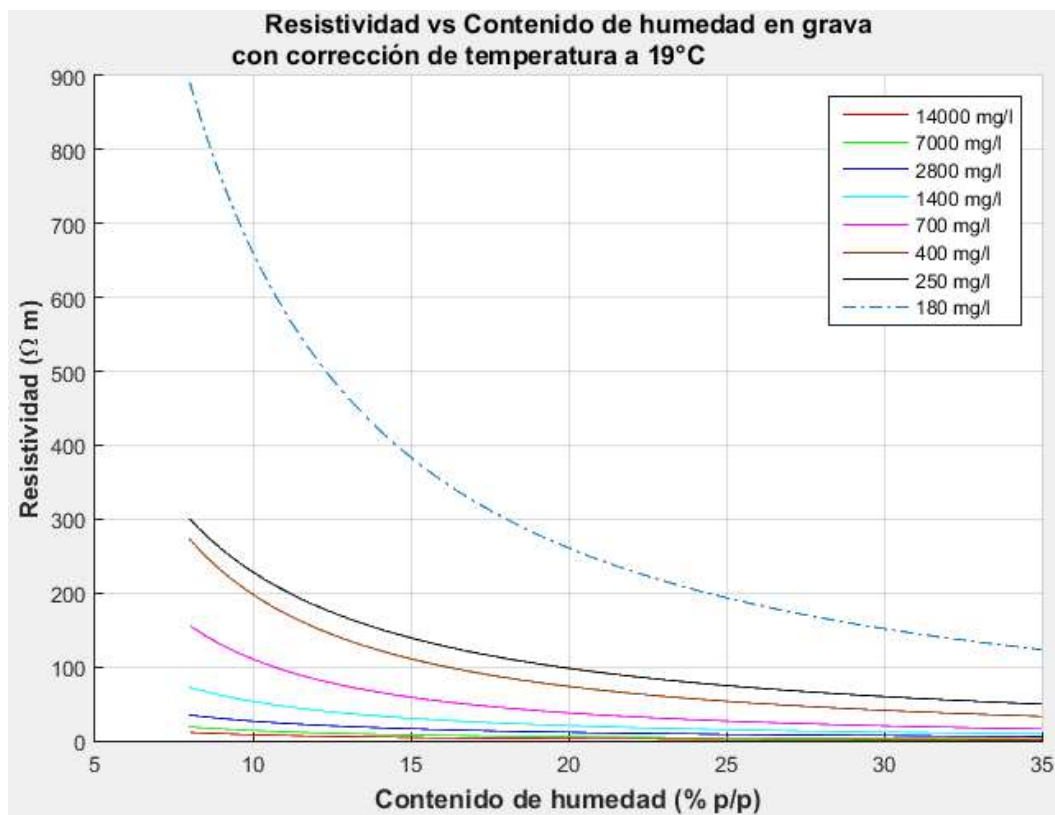


Figura 5.15. Variación de la resistividad eléctrica con el contenido de agua para muestras de grava (expresado en mg. de NaCl).

En este caso las ecuaciones de ajustes de los datos experimentales obtenidos (Anexo D), se muestran en tabla 5.6.

Experimento	Concentración NaCl	Ecuación de ajuste	Coefficiente de determinación
Muestra 1	14000 mg/l	$y = 251.7x^{-1.49}$	$R^2 = 0.97$
Muestra 2	7000 mg/l	$y = 338.9x^{-1.39}$	$R^2 = 0.99$
Muestra 3	3000 mg/l	$y = 439.5x^{-1.22}$	$R^2 = 0.96$
Muestra 4	1550 mg/l	$y = 1275x^{-1.38}$	$R^2 = 0.95$
Muestra 5	730 mg/l	$y = 3919x^{-1.55}$	$R^2 = 0.92$
Muestra 6	410 mg/l	$y = 5334x^{-1.43}$	$R^2 = 0.99$
Muestra 7	250 mg/l	$y = 3791x^{-1.22}$	$R^2 = 0.97$
Muestra 8	180 mg/l	$y = 14460x^{-1.34}$	$R^2 = 0.99$

Tabla 5.6. Funciones de ajustes en los experimentos con muestras de grava.

Como en la figura anterior, las cuatro curvas inferiores se encuentran prácticamente comprimidas, dificultando su visualización, se las representa nuevamente en la Figura 5.16.

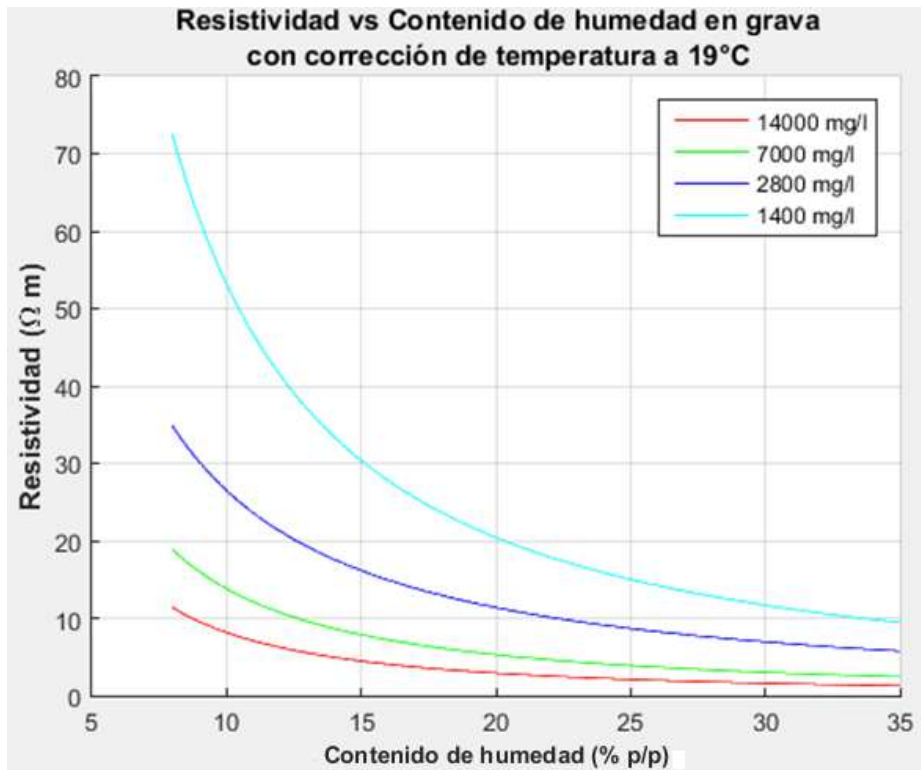


Figura 5.16. Variación de la resistividad eléctrica con el contenido de agua para muestras de grava.

Con respecto a los resultados obtenidos para el caso de las mezclas de arena con diferentes contenidos de arcilla, pueden apreciarse en la figura 5.17.

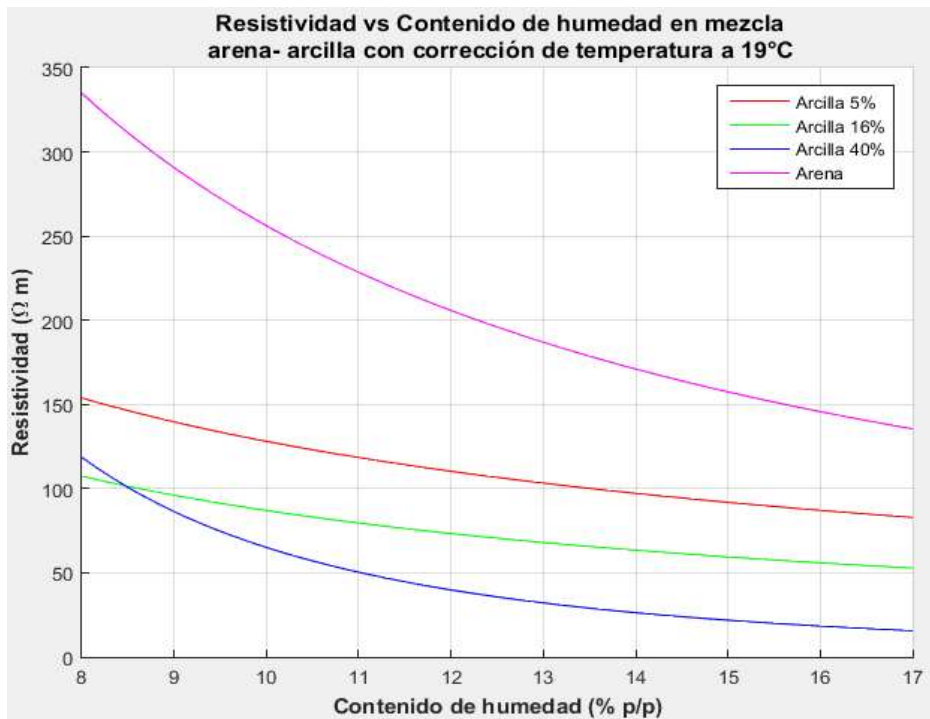


Figura 5.17. Variación de la resistividad eléctrica con el contenido de agua del acuífero para muestras de arena-arcilla.

En este caso, las ecuaciones de ajustes obtenidas (Anexo D), se encuentran explicitadas en la tabla 5.7.

Experimento	Porcentaje de arcilla en arena	Ecuación de ajuste	Coefficiente de determinación
Muestra 1	Arcilla 5%	$y = 846.3x^{-0.82}$	$R^2 = 0.99$
Muestra 2	Arcilla 16%	$y = 758x^{-0.94}$	$R^2 = 0.98$
Muestra 3	Arcilla 40%	$y = 31873x^{-2.69}$	$R^2 = 0.99$

Tabla 5.7. Funciones de ajustes en los experimentos con muestras de arena-arcilla.

De la observación de todas estas curvas, lo primero que se puede demostrar, es que un aumento en el contenido de agua del suelo resulta en una disminución en su resistividad eléctrica y además existe una buena correlación entre ellas. Estas conclusiones también fueron expresadas por (Sudhir y Pradeep, 2014).

Otra aclaración interesante, es que todas las curvas se muestran a partir de un contenido de agua aproximado del 8%, ya que, por debajo de estos valores, la medición de la resistividad eléctrica resulta ser muy variable. Algunos autores, llaman a este punto, *humedad crítica*, y se lo atribuyen a la cantidad mínima de agua necesaria para mantener una película de agua continua que rodee a las partículas sólidas (Parkomenko, 2014) (Zhou et al., 2015).

Además, de estas curvas, se desprende que la resistividad eléctrica de los suelos disminuye con la disminución de su porosidad. Afirmación también expresada en (Zhou et al., 2015). Una manera de verificar esto sería con arenas cribadas de distinto diámetro, ya que la mezcla con material fino (arcillas) para reducir la porosidad podría afectar las mediciones dada que la cohesión de las partículas se basa en parte en un desequilibrio eléctrico (ley de Russell).

Como la disminución de la porosidad del suelo se debe a un aumento de material fino, se puede también expresar el párrafo anterior diciendo que los suelos con una textura fina tienen una resistividad eléctrica más baja que aquellos con textura más gruesa (Zhou, et al., 2015) (Kazmi et al., 2016).

Para el caso específico de los experimentos con muestras de arena, con diferentes porcentajes de arcilla (Figura 5.17) se puede observar que existe un comportamiento diferente de la curva de 40% de contenido de arcilla, con

respecto a las demás. Esta curva genera un cruzamiento con la de 16% de contenido de arcilla que puede explicarse por el procedimiento de mezcla. Para este contenido de arcilla y con bajo contenido de agua menor al 9%, es muy difícil lograr humedecer de manera homogénea toda la muestra, ya que se generan grumos en todo su volumen. Al aumentar el contenido de agua por encima de este valor la muestra se vuelve homogénea y la tendencia de su variación acompaña a las demás curvas.

#### 5.4. Análisis a partir de muestras de laboratorio de la validez de la ley de Archie para valores bajos de resistividad eléctrica del agua contenida en los poros

Como fue expuesto en el capítulo 2, apartado 1.5, la ley de Archie fue definida para muestras de arenas limpias, con porosidades del 10 al 40% y rangos de salinidad de los electrolitos que rellenan sus poros de 20 a 100 g/l de ClNa.

Con los datos experimentales obtenidos en apartado anterior y tomando solamente los valores sobre las muestras de arena y grava en condiciones de saturación, se obtienen las tablas 5.8 y 5.9.

Muestra	Concentración NaCl (mg/l)	Resistividad agua ( $\Omega.m$ )	Resistividad agua-roca ( $\Omega.m$ )
1	14000	0.5	2
2	7000	0.9	4.3
3	3000	2.4	10.8
4	1550	4.6	18
5	730	9.1	28.5
6	410	16.1	47.6
7	250	28.2	68.4
8	180	46.5	93.2

Tabla 5.8. Resumen de datos experimentación en arena.

Muestra	Concentración NaCl (mg/l)	Resistividad agua ( $\Omega.m$ )	Resistividad agua-roca ( $\Omega.m$ )
1	14000	0.5	2
2	7000	0.9	3.3
3	3000	2.4	8.3
4	1550	4.6	14.5
5	730	9.1	21.3
6	410	16.1	40.4
7	250	28	66.7
8	180	46.5	121.7

Tabla 5.9. Resumen de datos experimentación en grava.

Además, se realizó una experimentación adicional, con una muestra de suelo extraída del ZED, en condiciones de saturación con las diferentes muestras de agua (Tabla 5.10).

Muestra	Concentración NaCl (g/l)	Resistividad agua ( $\Omega.m$ )	Resistividad agua-roca ( $\Omega.m$ )
1	14000	0.5	2.1
2	7000	1	4.1
3	3000	1.9	9.3
4	1550	4	15.2
5	730	8.1	27.7
6	410	12.3	46.7
7	250	23.7	60
8	180	42.2	116.8

Tabla 5.10. Resumen de datos experimentación en suelo del ZED.

Con estos datos presentados, se realizaron curvas que relacionan la resistividad eléctrica del agua que rellena los poros en condición de saturación y la resistividad eléctrica del conjunto (Figuras 5.18, 5.19 y 5.20).

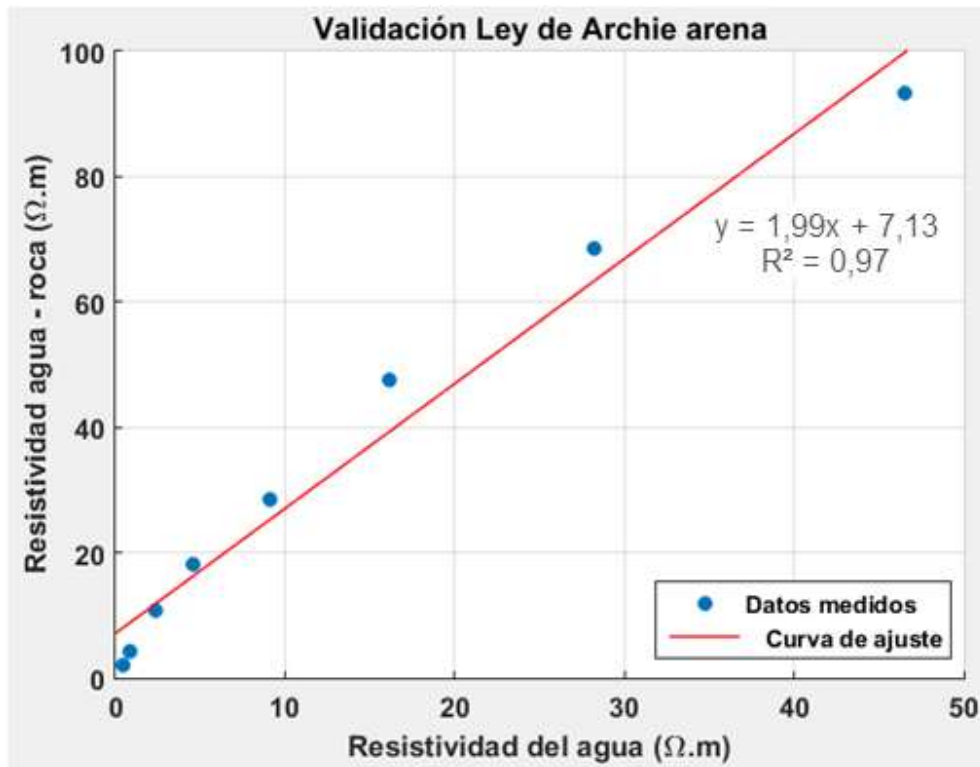


Figura 5.18. Validación Ley de Archie arena.

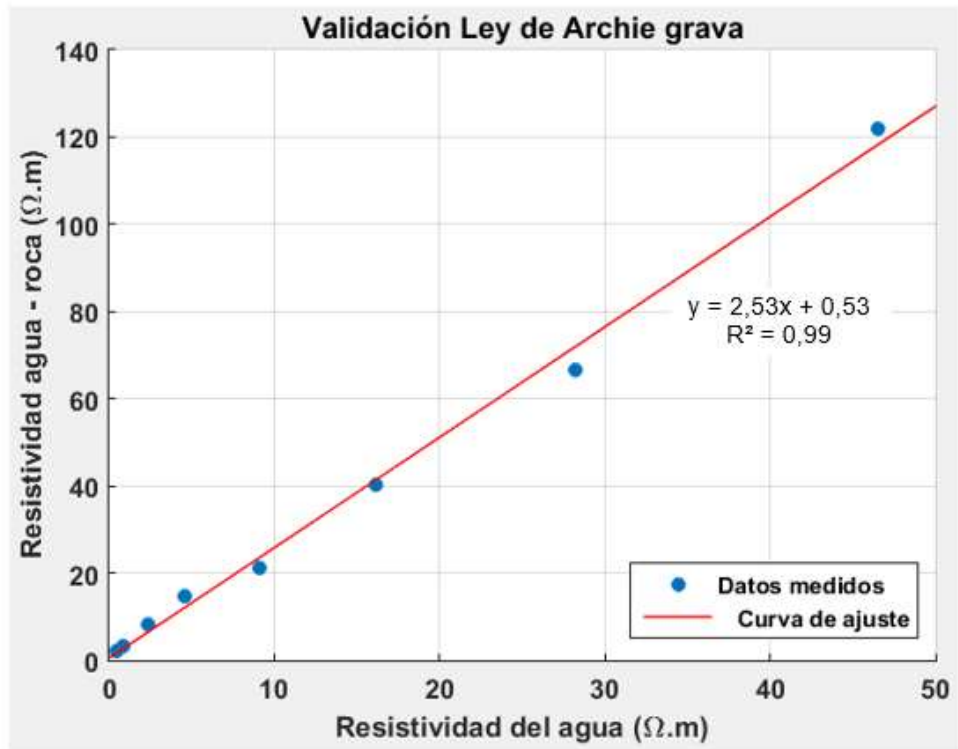


Figura 5.19. Validación Ley de Archie grava.

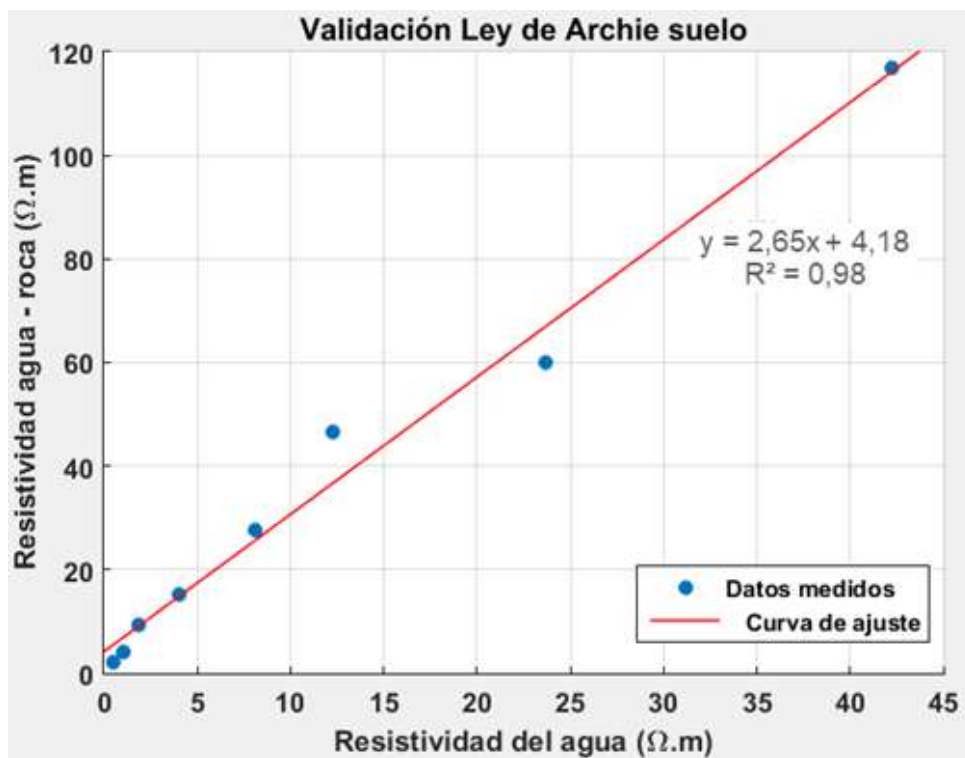


Figura 5.20. Validación Ley de Archie suelo.

El comportamiento de las figuras 5.18, 5.19 y 5.20, ha sido estudiado por Kirsch (2009) que propone dos limitantes para el dominio de la aplicación de la

ley de Archie. El primero se relaciona con la idea conceptual de que aguas de salinidades muy bajas presentan resistividades muy elevadas cercanas a las resistividades de la matriz rocosa, desviando de esta manera el comportamiento lineal de la ley de Archie. Este aspecto es conceptualmente correcto, pero raramente en el medio natural las aguas en los sedimentos poseen salinidades tan bajas como para que este efecto sea significativo de la forma que lo es en laboratorio. Aun, aunque este efecto se manifieste en el medio natural los valores de correlación de una interpolación lineal y potencial serían muy elevados y similares.

En el estudio de Matsui et al. (2016), se intenta determinar experimentalmente estas limitaciones en laboratorio. Este autor utiliza una muestra de roca granítica (usa la matriz rocosa, no hace referencia a un macizo rocoso). Esta muestra posee muy baja porosidad, por lo que el planteo que propone analizar este sistema como un modelo de resistencias paralelas, una parte de la resistividad atribuida a la matriz rocosa y otra debida al contenido de agua pierde relevancia, porque esta última es un componente resistivo tan pequeño que puede considerarse despreciable. De forma tal que prácticamente toda la respuesta resistiva se debe a la matriz rocosa del granito, una roca que puede contener entre un 5% y un 40% de cuarzo, un mineral muy conocido por sus propiedades piezoeléctricas (sin desmedros de otros minerales). Este aspecto que no es analizado por Matsui et al. (2016) debería tenerse en cuenta para explicar el comportamiento resistivo del granito. Otro aspecto no menor se relaciona con el sistema empleado para medir la resistividad de la muestra que emplea dos electrodos, este método posee elevada resistencia de contacto cuyo aspecto no ha sido evaluado por Matsui et al. (2016). Por lo que, en resumen, este estudio resulta ser un caso muy particular y condicionado.

En las figuras 5.18, 5.19 y 5.20 se puede observar que una relación lineal como propone Archie (1941), resulta en una aproximación suficientemente válida y representativa de este comportamiento. Por lo tanto, a los fines de este trabajo consideramos a la ley de Archie como válida dentro de nuestro dominio de datos.

## 5.5. Análisis del estudio exploratorio

Como fue mencionado en la metodología (Capítulo 4, apartado 1), para este estudio exploratorio se eligieron 12 puntos de acuerdo a su litología, de los 32 disponibles sobre la formación Ubajay, de muestreos de suelos realizados con SPT, donde en las respectivas posiciones se realizaron 12 SEV paramétricos. Los tendidos de los SEV paramétricos han sido configurado para coincidir con las profundidades del muestreo de los SPT.

En la tabla 5.11. se muestran los datos experimentales obtenidos de los ensayos de mecánica de suelos (Anexo B), en donde en este caso solo se utilizó la información dada por el número de golpes del ensayo SPT, y también las interpretaciones de resistividad eléctrica realizadas mediante el software “E-Lander” (Anexo C).

SPT-SEV	Profundidad	SUCS	N° Golpes	Resistividad	SPT-SEV	Profundidad	SUCS	N° Golpes	Resistividad
1	0.75	SC	11	761	7	0.75	SC	7	32.5
	1.75	SC	17	277		1.75	SC	9	15.5
	2.75	SP-SM	20	161		2.75	SC	15	17.5
	3.75	SP-SM	12	140		3.75	SM-SC	34	22.1
	4.75	SM	18	138		0.75	SM	7	102.1
2	0.75	SC	9	32	8	1.75	SC	6	80.9
	1.75	SM-SC	14	32		2.75	SC	12	66.9
	2.75	SP-SM	12	41		3.75	SP-SM	13	58.7
	3.75	SP	12	53.1		4.75	SC	34	57
	4.75	SP	12	65.3		0.75	SP-SC	2	254
3	0.75	SC	11	54.6	9	1.75	SP-SM	11	155
	1.75	SC	12	27		2.75	SP-SM	9	140
	2.75	SP-SM	22	28.6		3.75	SP-SM	13	150
	3.75	SP-SM	18	36.3		4.75	SP-SM	15	167
	4.75	SP	14	44.6		0.75	SC	15	17.8
4	0.75	SC	9	47.6	10	1.75	SC	21	26.5
	1.75	SC	9	17.9		2.75	SP-SM	13	37.3
	2.75	SM-SC	19	22		3.75	SP	16	48.9
	3.75	SP	22	28.2		4.75	SP	20	60.3
	4.75	SP	16	35		0.75	SC	11	89.3
5	0.75	CH	10	30.9	11	1.75	SC	8	12.1
	1.75	CH	9	16		2.75	SC	8	14.1
	2.75	SC	16	13.6		3.75	SP-SM	11	17.7
	3.75	SM	22	15.5		4.75	SP	10	21.6
	0.75	SC	16	15		12	0.75	SP-SM	3
1.75	SC	17	24	1.75	SP-SM		8	7848	
2.75	SC	11	26.8	2.75	SP-SM		12	5363	
3.75	SM	10	27.6	3.75	SP		14	3291	
4.75	SP-SM	10	28	4.75	SP-SM		15	1990	
6	5.75	SP-SM	20	29.6					

Tabla. 5.11. Datos experimentales del estudio de campo exploratorio

Con estos datos, se realizó la correlación entre la resistividad eléctrica del subsuelo con el número de golpes del ensayo SPT a las profundidades correspondientes para el total de los puntos muestreados (Figura 5.21).

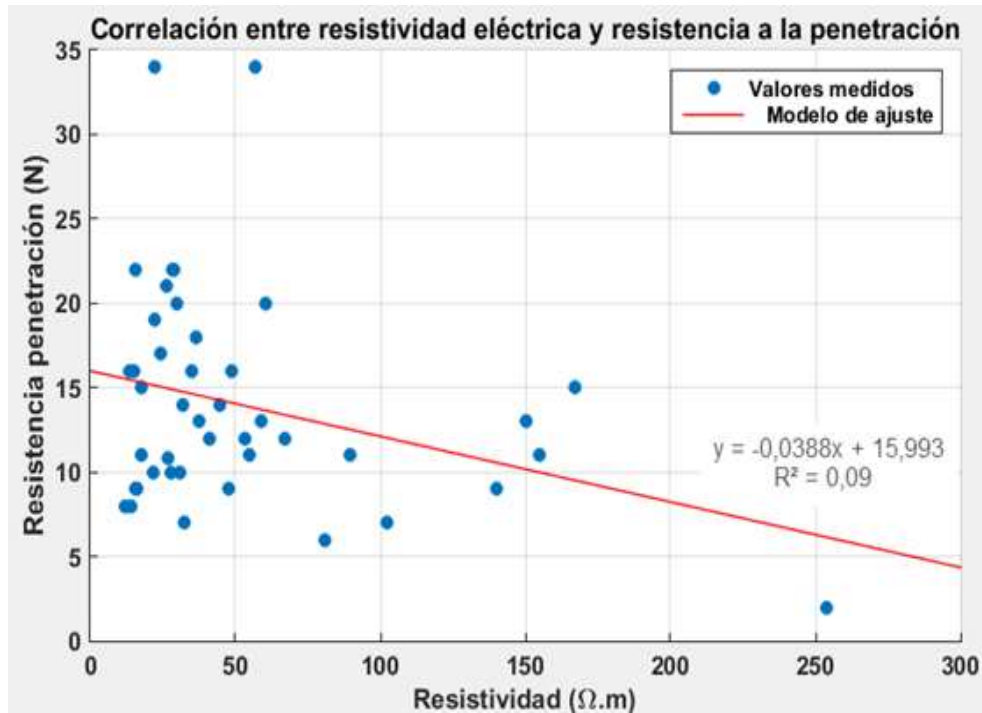


Figura 5.21. Correlación entre la resistividad eléctrica del subsuelo y su resistencia a la penetración.

Como puede observarse en esta curva, los valores se encuentran muy dispersos, obteniéndose un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.09$  muy pobre entre la resistividad eléctrica y el número de golpes del ensayo SPT.

Luego, se realizó la correlación entre la resistividad eléctrica del subsuelo y el número de golpes del ensayo SPT para los cuatro primeros puntos muestreados, que se encuentran ubicados en un terreno de aproximadamente  $2500m^2$  en la zona de Ayuí, Concordia, Entre Ríos (Ver plano ubicación de muestras en Ayuí en la figura 4.1).

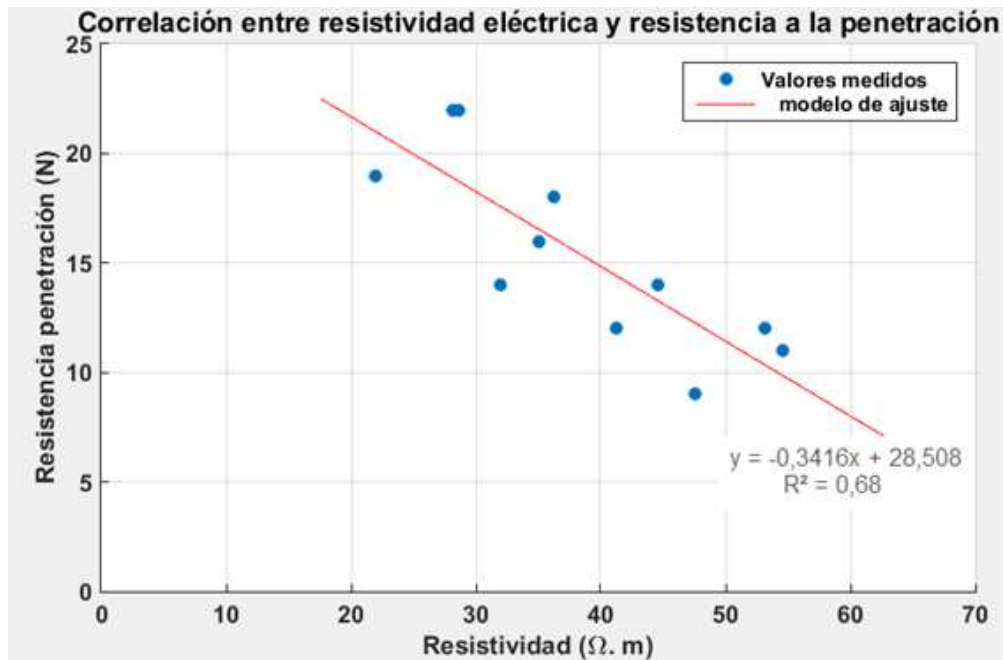


Figura 5.22. Correlación entre la resistividad eléctrica del subsuelo y la resistencia a la penetración.

En este caso se puede observar, que la curva de aproximación lineal presenta un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.68$ , considerado aceptable en modelos de ambientes naturales.

De los resultados anteriores, se puede manifestar que se han encontrado correlaciones locales favorables entre la resistividad eléctrica del subsuelo y el número de golpes del ensayo SPT, pero no así en forma regional.

Con los datos disponibles de los 32 sondeos mecánicos citados en el apartado 4.1, los cuales se encuentran en la región de las mediciones exploratorias, se realizó un registro de los tipos de suelos según su clasificación SUCS hasta una profundidad de 3 metros, obteniéndose la siguiente información de interés (Figura 5.23).

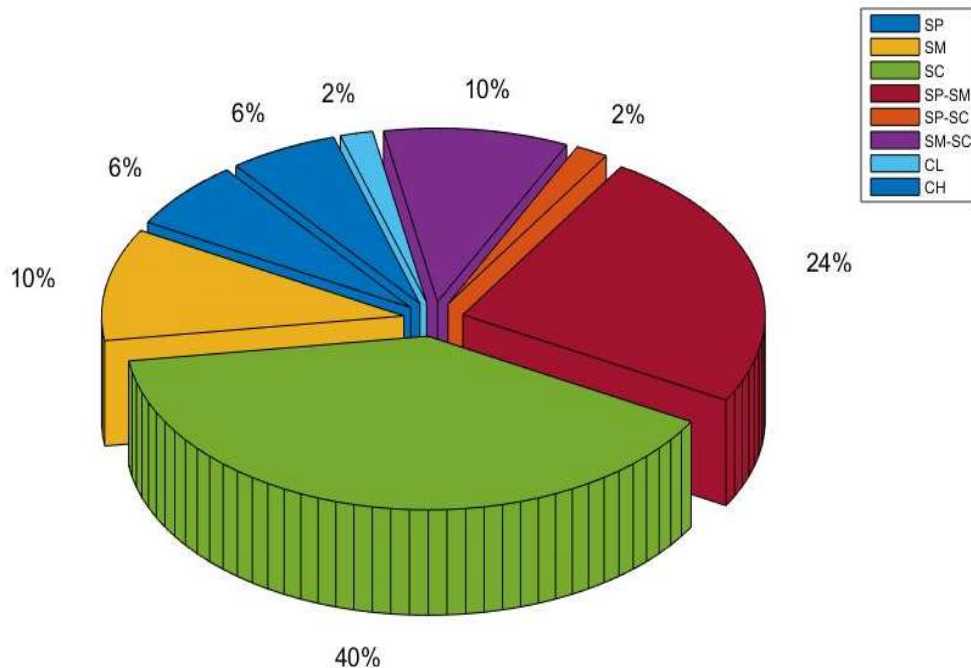


Figura 5.23. Tipología SUCS (Sistema Unificado de Casagrande) en la Formación Ubajay

Esta figura explica a priori, el porqué de la nula correlación entre las resistividades eléctricas del subsuelo con sus parámetros geomecánicos a nivel regional. La figura 5.23 evidencia la heterogeneidad litológica en los distintos tipos de sedimentos en la Formación Ubajay. Esta heterogeneidad regional determina que buscar correlaciones sin conocer la litología del suelo conduce a una errónea interpretación del comportamiento geomecánico. Se desprende de esto, que para observar correlaciones significativas (al menos  $R^2 = 0.7$ ) debe estudiarse localmente la litología de cada sondeo y tener presente que cambios significativos de la misma influirán en la respuesta resistiva. Resulta importante analizar el grado de homogeneidad de los suelos bajo estudio en caso de pretender algún tipo de correlación regional. Este aspecto, que parece conceptualmente trivial, pero se debe verificar in situ en cada tipo de suelos (unidad formacional) el grado de heterogeneidad litológica antes de buscar las correlaciones presentadas.

## 5.6. Análisis del estudio paramétrico de las resistividades eléctricas en el ZED

En la tabla 5.12. se muestran los datos experimentales obtenidos del estudio paramétrico realizado en el ZED (Capítulo 4, apartado 3). En la misma se puede observar los parámetros mecánicos del suelo (Anexo E) y las

interpretaciones de las resistividades eléctricas verdaderas (Anexo F). Estas mediciones se realizaron con una temperatura del suelo de 20.7°C a una profundidad de 1.2 metros.

	Profundidad (m)	Resistividad medida ( $\Omega$ m)	Contenido finos (%) (Tamiz N°200)	Contenido arcilla (%)	Ángulo fricción (°)	Cohesión (kg/cm <sup>2</sup> )	Humedad Natural (%)
Muestra 1	0.5	6.84	47.14	37	5	0.5	23.46
Muestra 2	1.0	17.9	34.62	26	14	0.95	12.9
Muestra 3	1.5	57.1	22.67	17	20	0.6	12
Muestra 4	0.5	9.12	46.1	37	5	0.5	23.6
Muestra 5	0.5	5.6	47.78	32	5	0.5	29.2
Muestra 6	0.5	4.46	40.37	32	6	0.35	18.8

Tabla 5.12. Datos experimentales obtenidos del estudio paramétrico en el ZED.

Con los datos presentados, se realizaron las correlaciones entre la resistividad eléctrica del subsuelo a la profundidad de cada una de las muestras extraídas con sus respectivos parámetros mecánicos, obteniéndose las siguientes curvas (Figura 5.24) (Figura 5.25) (Figura 5.26) (Figura 5.27) y (Figura 5.28).

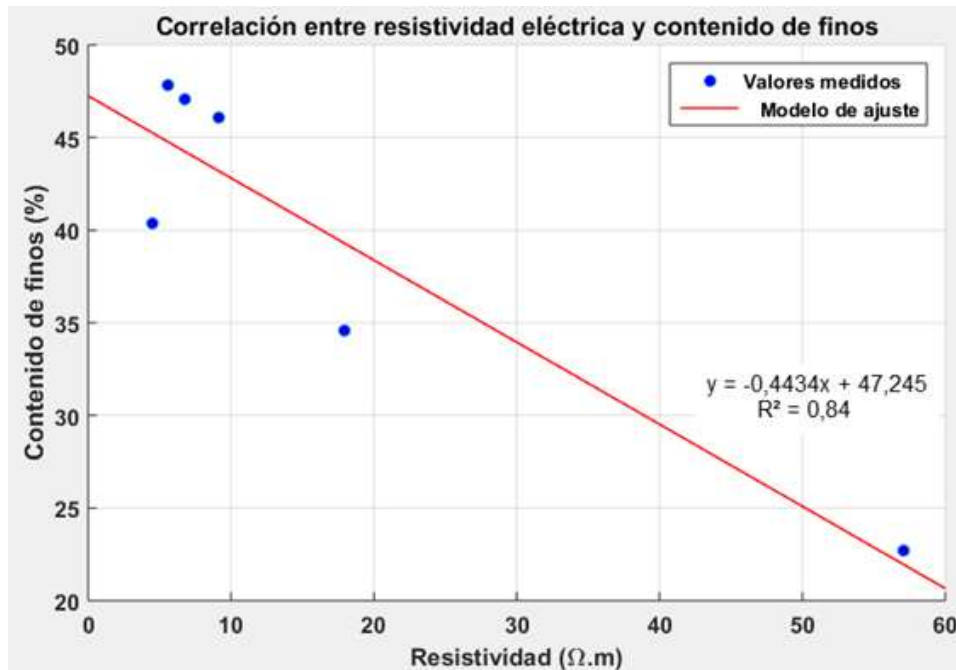


Figura 5.24. Correlación entre la resistividad eléctrica del subsuelo y su contenido de finos.

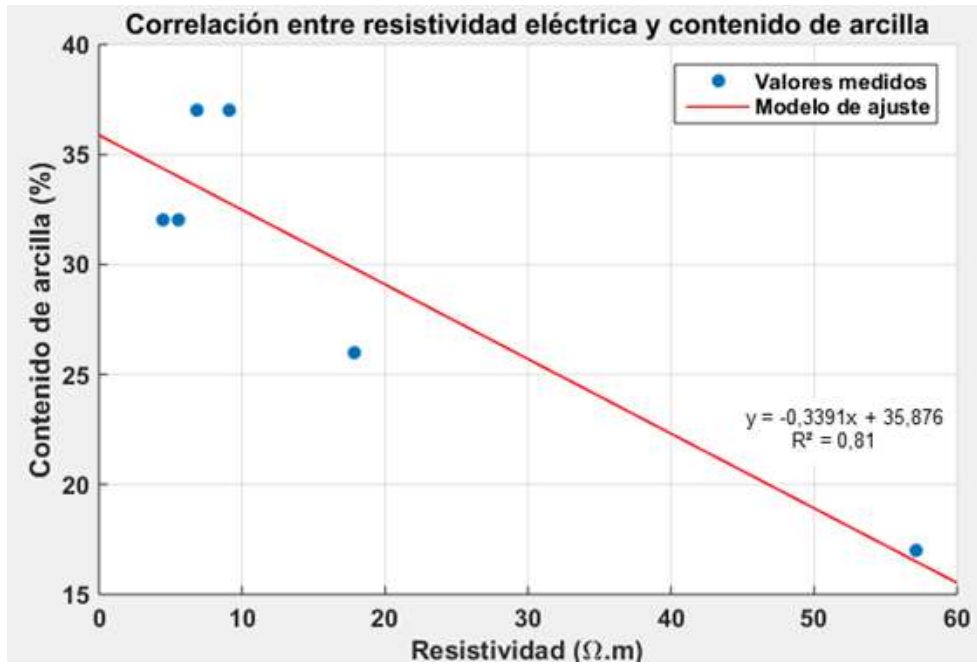


Figura 5.25. Correlación entre la resistividad eléctrica del subsuelo y su contenido de arcilla.

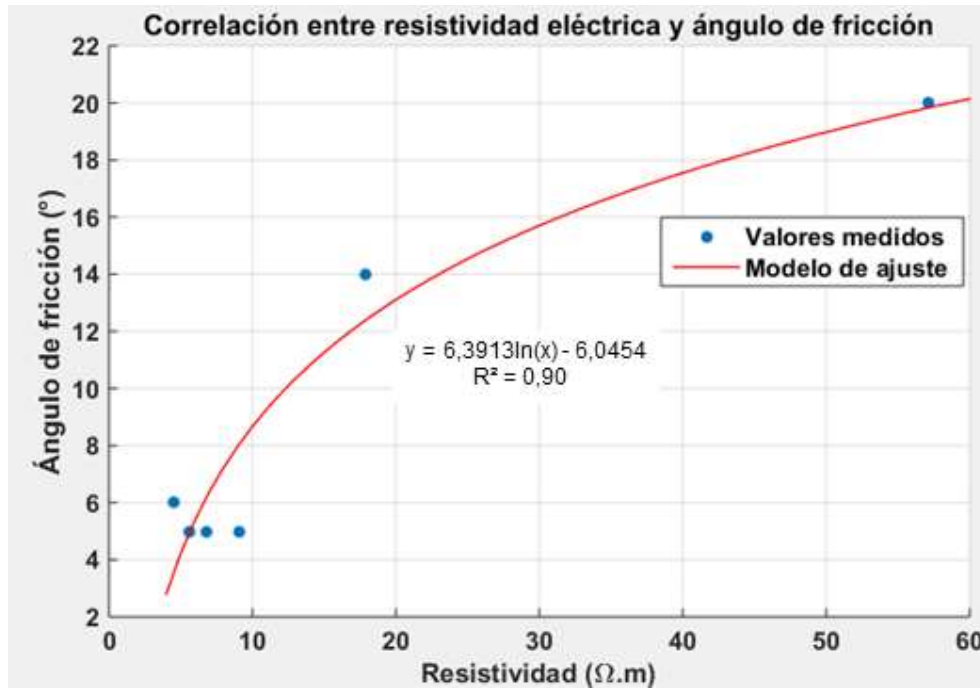


Figura 5.26. Correlación entre la resistividad eléctrica del subsuelo y su ángulo interno de fricción.

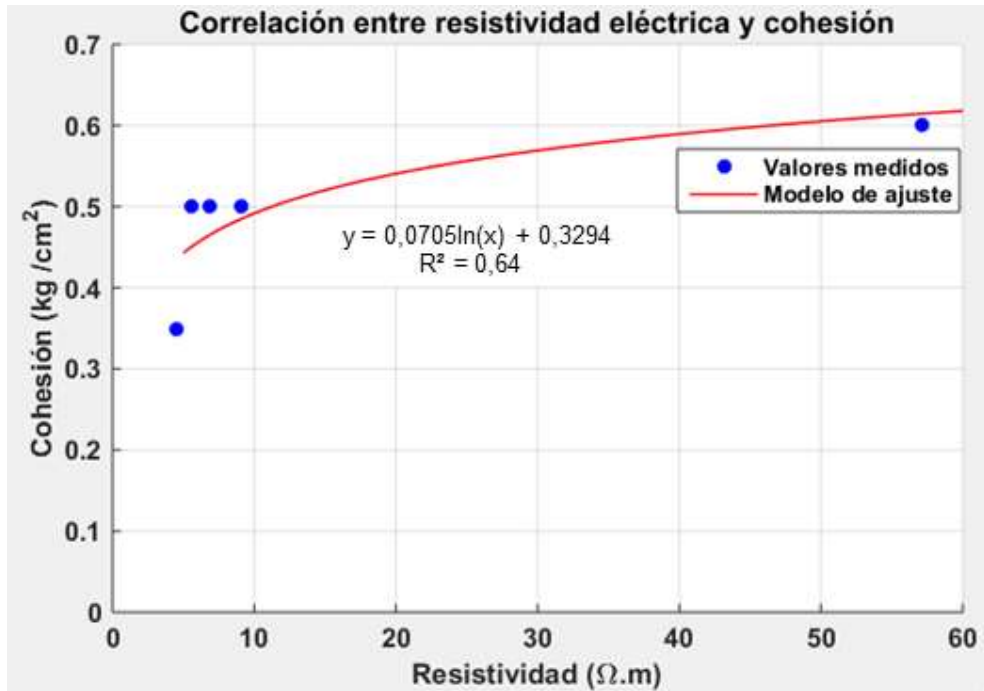


Figura 5.27. Correlación entre la resistividad eléctrica del subsuelo y su cohesión.

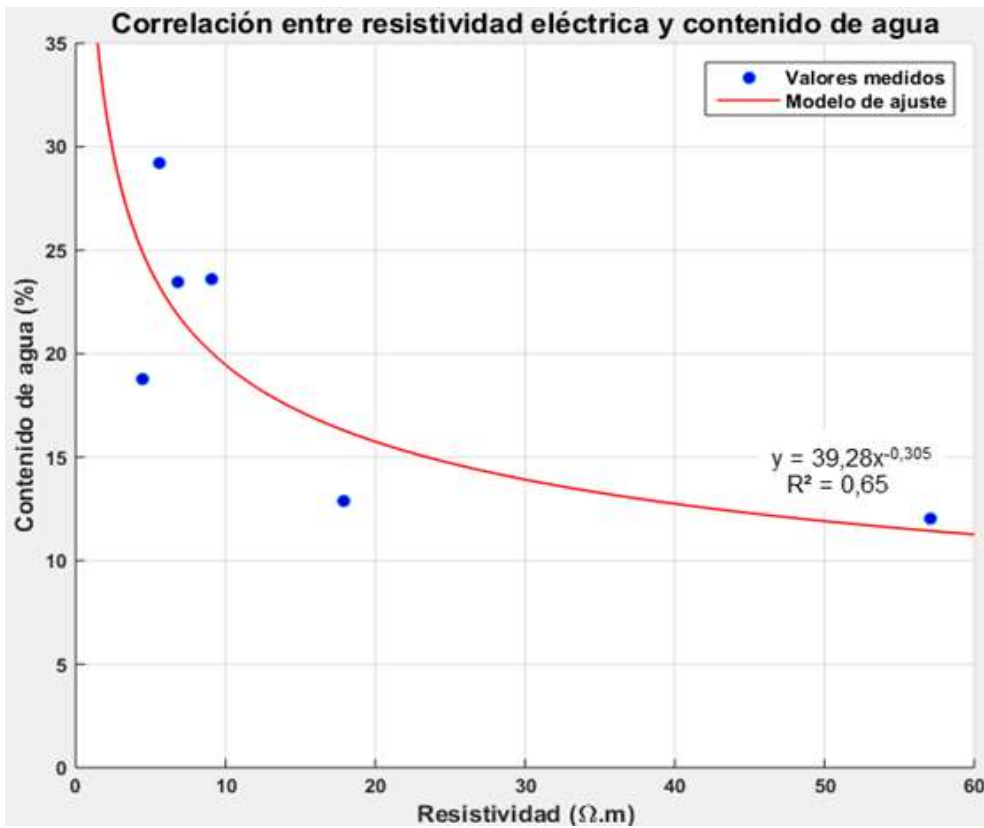


Figura 5.28. Correlación entre la resistividad eléctrica del subsuelo y contenido de agua.

Con respecto a la figura 5.24, se puede apreciar que al aumentar el contenido de finos (pasante tamiz N°200, limos y arcillas), la resistividad eléctrica

disminuye, de acuerdo a lo expresado en el capítulo 2, apartado 1.5 y su coeficiente de determinación  $R^2 = 0.84$  muestra una muy buena dependencia entre ellos. La presencia de material fino mejora la gradación del suelo (mejorando su capacidad portante), al mismo tiempo el material fino tiende a aumentar los puntos de contactos de forma tal que disminuiría su resistividad eléctrica, porque se está aumentando la superficie de contacto.

De la figura 5.25, se puede observar que, al aumentar el contenido de arcilla (tamaño inferior a  $2\mu m$ ), la resistividad eléctrica disminuye, de acuerdo a lo expresado en el capítulo 2, apartado 1.5. Aquí también se puede señalar una muy buena relación entre dichas variables y con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.81$ .

Un dato importante es que en los antecedentes disponibles en la bibliografía actual no se han hallado análisis que incluyan estas dos últimas relaciones, es decir, entre la resistividad eléctrica y el contenido de finos y la resistividad eléctrica y el porcentaje de arcilla. En este trabajo se considera que siendo el material fino y las arcillas dos elementos claves para comprender la cohesión de los suelos no debe pasarse por alto el análisis resistivo diferenciado de los mismos. Las correlaciones de ambos parámetros en este caso resultan significativamente similares, no obstante, en otro tipo de suelos con una mineralogía de arcillas diferentes podría no presentar correlaciones coincidentes.

Con respecto a la figura 5.26, se puede observar que el valor del ángulo interno de fricción se incrementa con el aumento de la resistividad eléctrica y su coeficiente de determinación  $R^2 = 0.90$  es altamente significativo. Estas mismas apreciaciones fueron realizadas en (Siddiqui y Osman, 2012) y (Jusoh y Osman, 2017). No obstante, dichos autores no proponen una hipótesis que intente explicar esta observación. El ángulo interno de fricción se relaciona con la fábrica del material sedimentario, o sea con el ordenamiento de las partículas en el suelo. Este ordenamiento también puede condicionar la cantidad de puntos de contacto (donde también tendrá efecto la esfericidad y angulosidad de las partículas) teniendo nuevamente influencia sobre la resistividad, ya que, a mayores puntos de contactos, mayor superficie de contacto y entonces menor resistividad.

De la figura 5.27 se puede observar que la cohesión se incrementa con el aumento de la resistividad eléctrica y su coeficiente de determinación  $R^2 = 0.64$  es significativo.

La cohesión es una propiedad de los suelos que depende de dos factores, atracción debida al tamaño de partícula (ley de Haynes) y atracción debida a la incorporación de cationes por parte de los minerales de arcilla (ley de Russel).

La interpretación propuesta por Jusoh y Osman (2017) explicando variaciones resistivas sobre la base de aumento de tamaño de partículas (menos finos) alude a la ley de Haynes y puede explicar este fenómeno en algunos suelos. No obstante, no debe olvidarse la respuesta “capacitiva” que ofrecen los minerales de arcilla. Estos últimos sometidos a un campo eléctrico pueden cargarse diferencialmente dependiendo del tipo mineralógico de arcilla presente en los finos. Sería dable esperar diferente comportamiento resistivos para diferentes tipos mineralógicos de arcilla. Esta hipótesis, que alude a la ley de Russel, puede explicar los resultados dispares de las correlaciones propuestas por los diferentes autores (op. cit.) e incluso explicaría la correlación logarítmica significativa ( $R^2 = 0.64$ ) que se observa en este estudio. A semejanza de la curva de carga de un capacitor eléctrico, siendo este aspecto el fundamento de los estudios de suelos por medio de la técnica de polarización inducida.

Otra explicación conceptualmente más geológica tiene que ver con el hecho de que la Formación Ubajay suele tener niveles silcretizados. Es decir, niveles clásticos en los cuales los procesos de cementación han precipitado sílice ( $\text{SiO}_2$ ) como material ligante e incluso obsturante. Estos silcretos fácilmente visibles y de ocurrencia frecuente en las excavaciones realizadas en la Formación Ubajay aumentan notoriamente la competencia mecánica del suelo (son niveles similares a una roca dura) lo que da como consecuencia un aumento de la resistividad. Dado que la existencia de estos silcretos es considerada aleatoria sería probable encontrar puntos anómalos o con resistividades anómalas que harían disminuir los valores de correlación. Esta es una característica geológica específica de la formación Ubajay. Pero es probable que en otras unidades que no involucran estos procesos diagenéticos probablemente presente correlaciones más significativas.

Con respecto a la figura 5.28 se muestra que la resistividad eléctrica del suelo disminuye conforme aumenta su contenido de agua, como fue expresado en el capítulo 2, apartado 1.5 y fue empíricamente demostrado en este capítulo en el apartado 3. Entre estas variables se observa una buena correlación potencial con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.65$ . Esto, también fue fundamentado en (Siddiqui y Osman, 2012a) (Ozcep et al., 2009) (Sudhir y Pradeep, 2014) (Jusoh y Osman, 2017). En resumen, esta correlación será más o menos significativa dependiendo del contenido de humedad, de alcanzar la saturación y del contenido salino del agua, incluso, de la interacción de todos estos factores entre sí. Es en cierta forma parte del fundamento, junto con la matriz del suelo, de las interpretaciones de métodos geoelectrónicos.

## 6. MODELO CONCEPTUAL GEOMECÁNICO RESISTIVO

### 6.1. Mapas geoelectricos

A partir de la interpretación (resistividades eléctricas verdaderas y espesores) de los doce sondeos eléctricos verticales realizados en el terreno de la ZED (capítulo 4, apartado 4) se obtuvo un modelo de la distribución espacial de la resistividad eléctrica del subsuelo para las profundidades de 0.5, 1 y 1.5 m. (Figura 6.1, 6.2 y 6.3). Estos mapas fueron realizados mediante el software "Surfer 10" y utilizando como método de interpolación el de vecinos naturales.

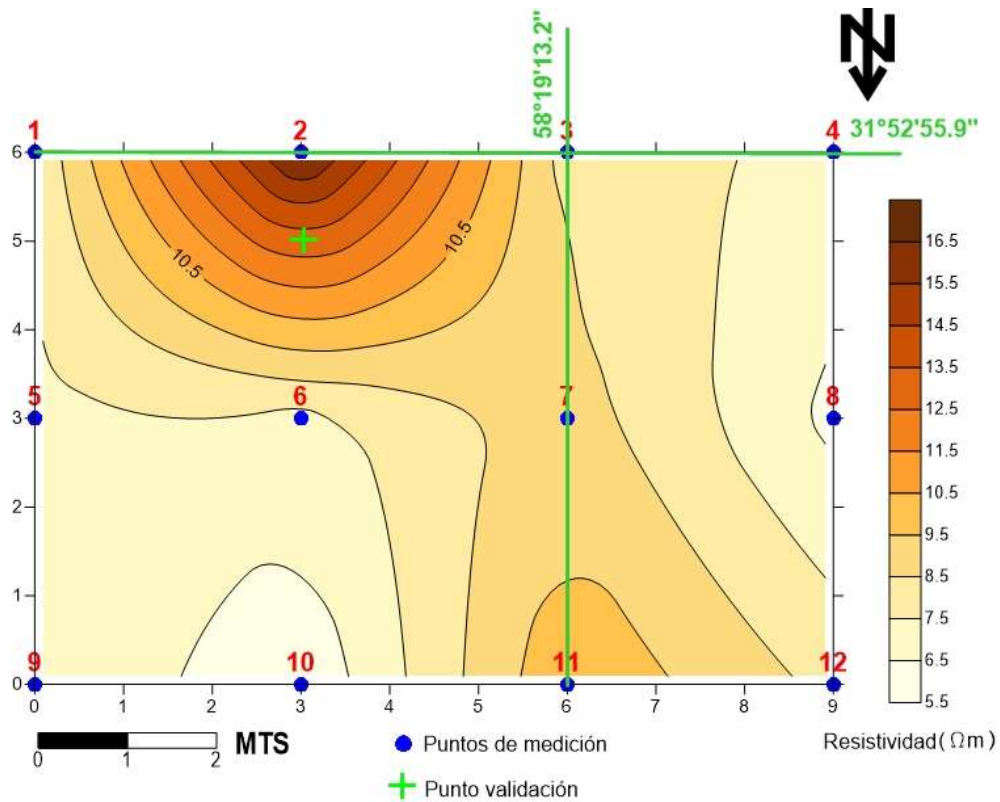


Figura 6.1. Resistividad eléctrica del terreno a 0.5 m de profundidad.

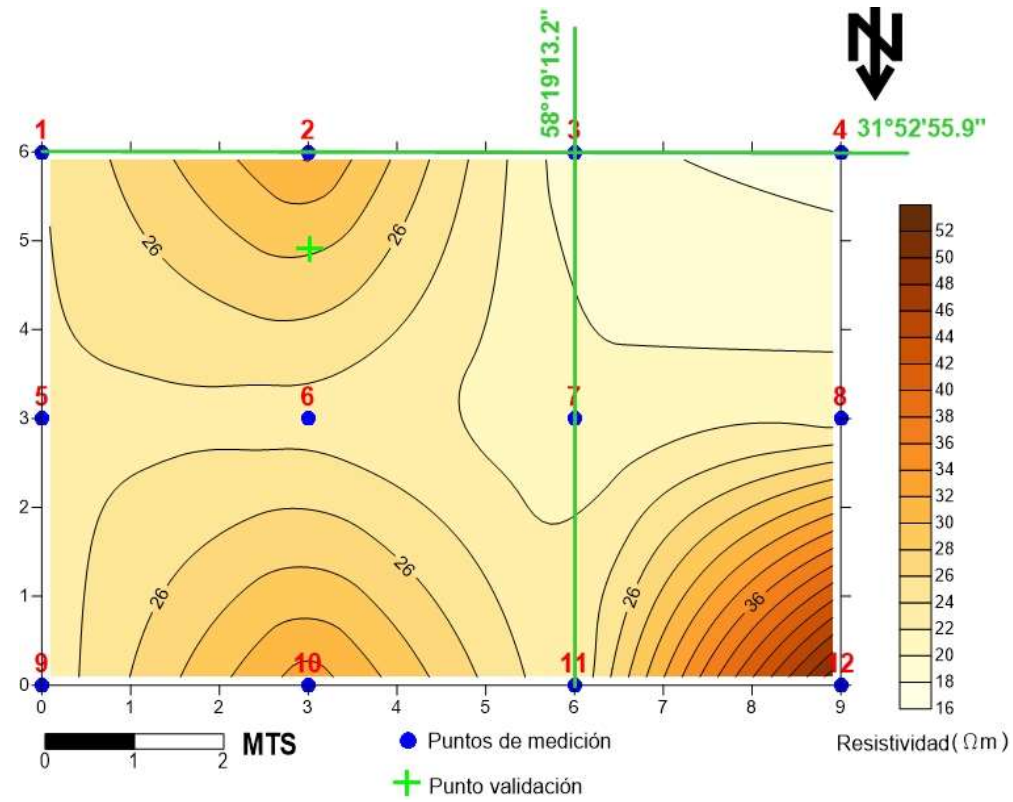


Figura 6.2. Resistividad eléctrica del terreno a 1 m de profundidad.

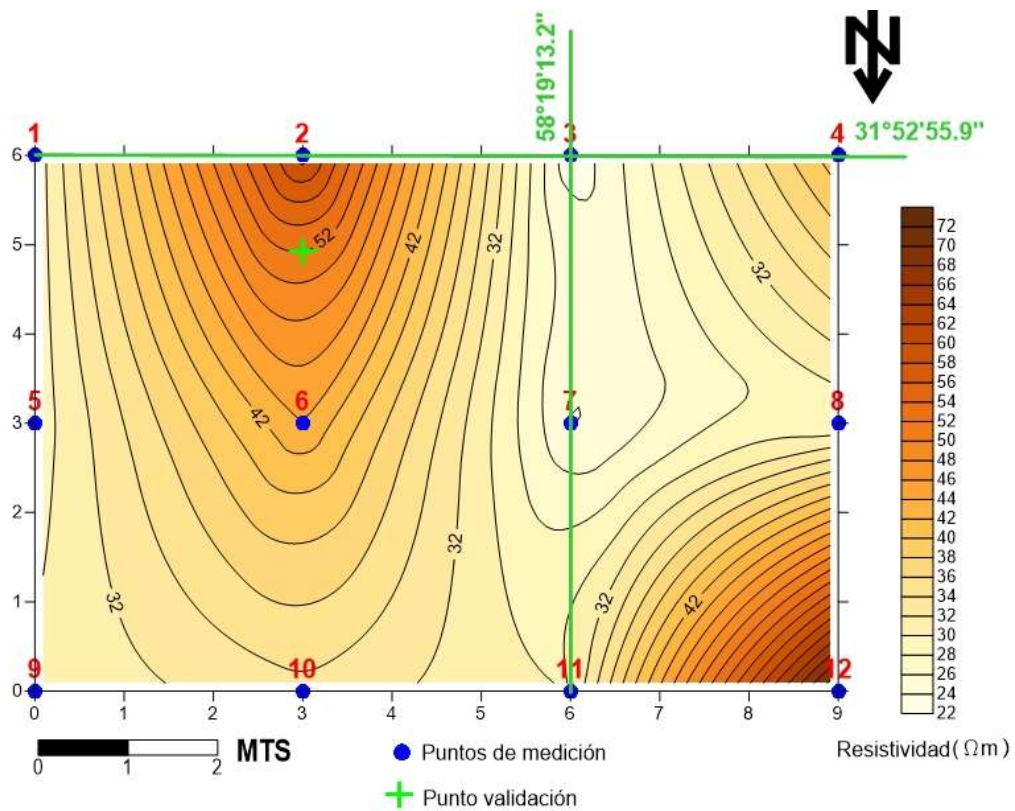


Figura 6.3. Resistividad eléctrica del terreno a 1.5 m de profundidad.

Con respecto al mapa de la distribución de la resistividad eléctrica presentado en la figura 6.1 y que se corresponde con una profundidad de 0.5 m, se puede observar que la resistividad eléctrica presenta un rango de variación de aproximadamente 12  $\Omega m$ , con un valor mínimo de 5.5  $\Omega m$  y un máximo de 17.5  $\Omega m$ .

En relación al mapa presentado en la figura 6.2 y que se corresponde a una profundidad de 1 m, se puede ver que el rango de variación de la resistividad eléctrica es de 38  $\Omega m$ , con un mínimo de 16  $\Omega m$  y un máximo de 54  $\Omega m$ .

Por último, se puede observar en el mapa de la figura 6.3, correspondiente a una profundidad de 1.5 m, que el rango de variación de la resistividad eléctrica es del orden de los 52  $\Omega m$ , presentando un mínimo de 22  $\Omega m$  y un máximo de 74  $\Omega m$ .

Además, se puede apreciar que existe una zona con mayor resistividad eléctrica en los dos primeros mapas y dos zonas para el caso del tercero. Esto se debe a un menor contenido de finos y por lo tanto un mayor contenido de arena, la cual eleva la resistividad de los mismos.

## **6.2. Mapas geomecánicos**

Mediante el uso de los mapas geoelectricos mostrados en el apartado anterior y por medio de la aplicación de las funciones de correlación obtenidas, entre la resistividad eléctrica y los parámetros geomecánicos (capítulo 5, apartado 6), se pueden generar los mapas geomecánicos (Figura 6.4).

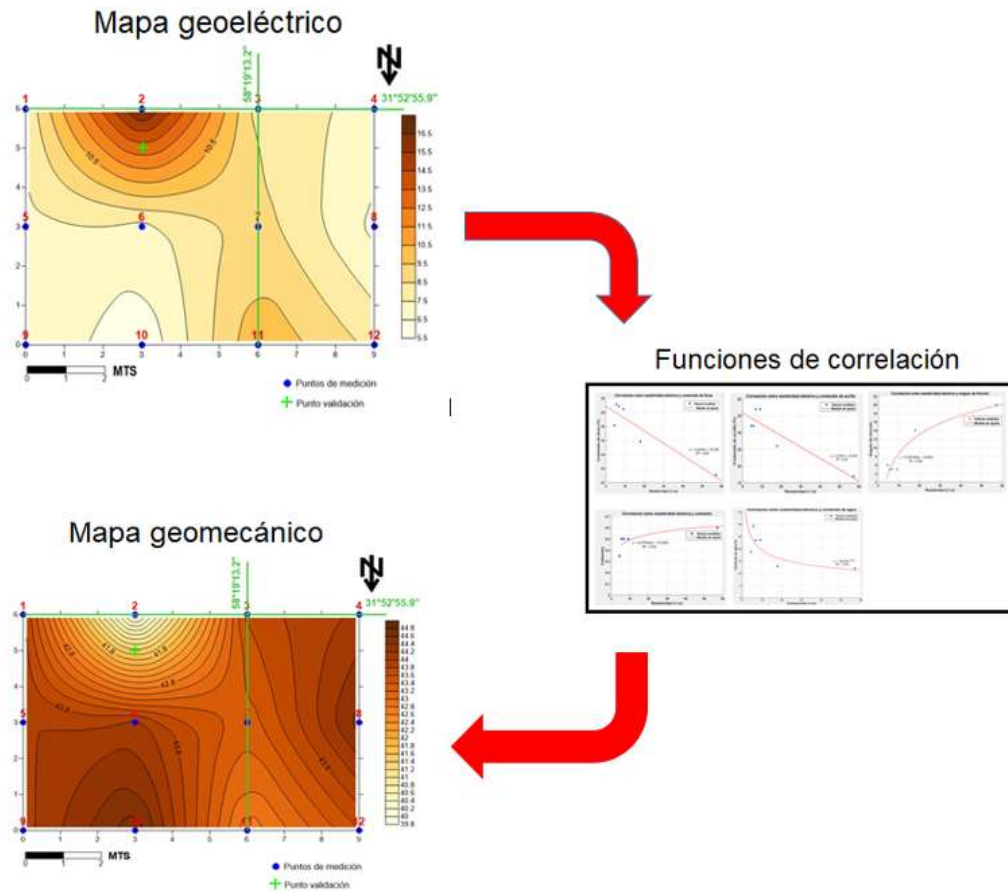


Figura 6.4. Metodología para obtención de los mapas geomecánicos.

Entonces por medio de la aplicación de esta metodología, se representan los mapas de la distribución espacial del contenido de finos, contenido de arcilla, ángulo interno de fricción, cohesión y contenido de agua para las profundidades de 0.5, 1 y 1.5 m (Figuras 6.5 a 6.19).

### 6.2.1. Contenido de finos

En la distribución espacial del contenido de finos a distintas profundidades, que se visualiza en las figuras 6.5, 6.6 y 6.7, se puede apreciar que en los lugares que se presenta un bajo contenido de finos, se corresponde con un mayor valor de la resistividad eléctrica en el mapa geoelectrico a la profundidad respectiva, como es previsible.

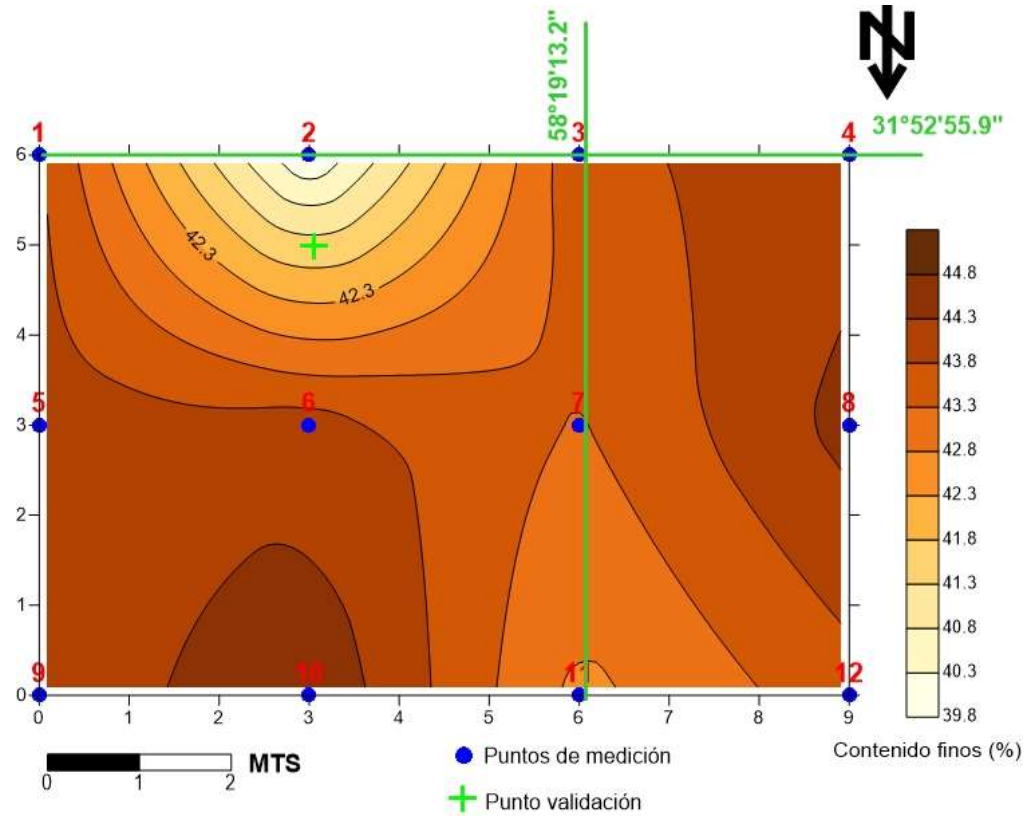


Figura 6.5. Distribución espacial del contenido de finos a 0.5 m de profundidad.

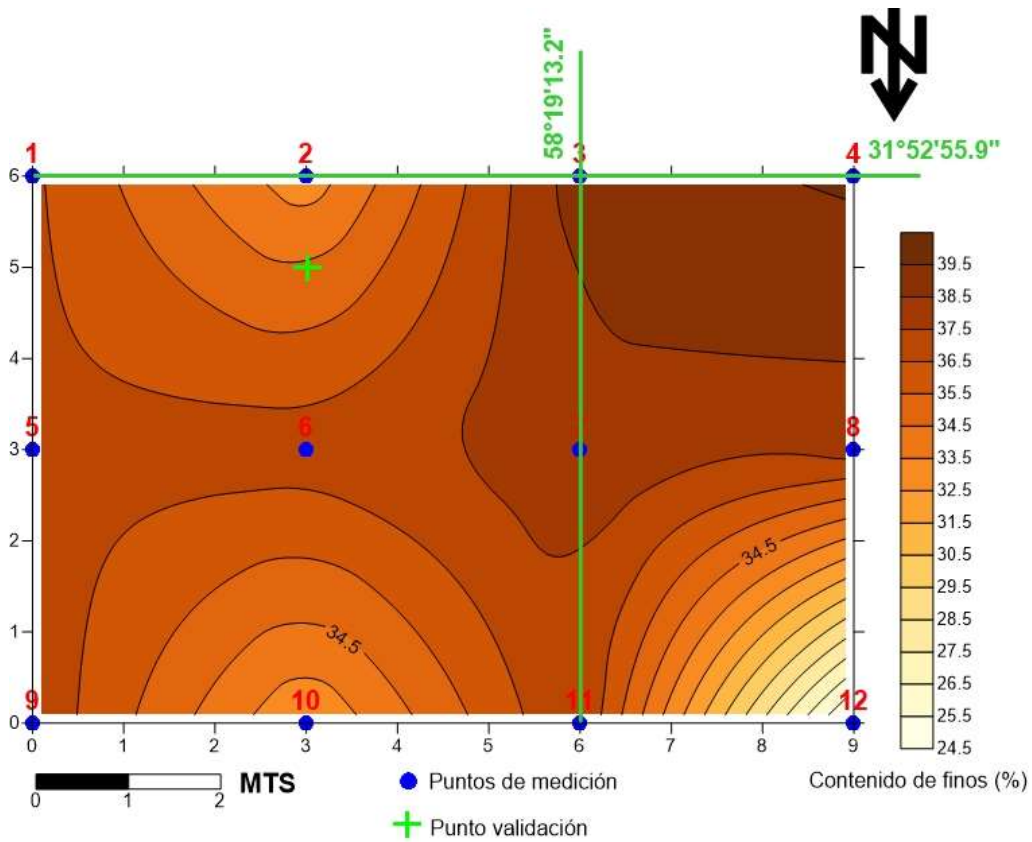


Figura 6.6. Distribución espacial del contenido de finos a 1 m de profundidad.

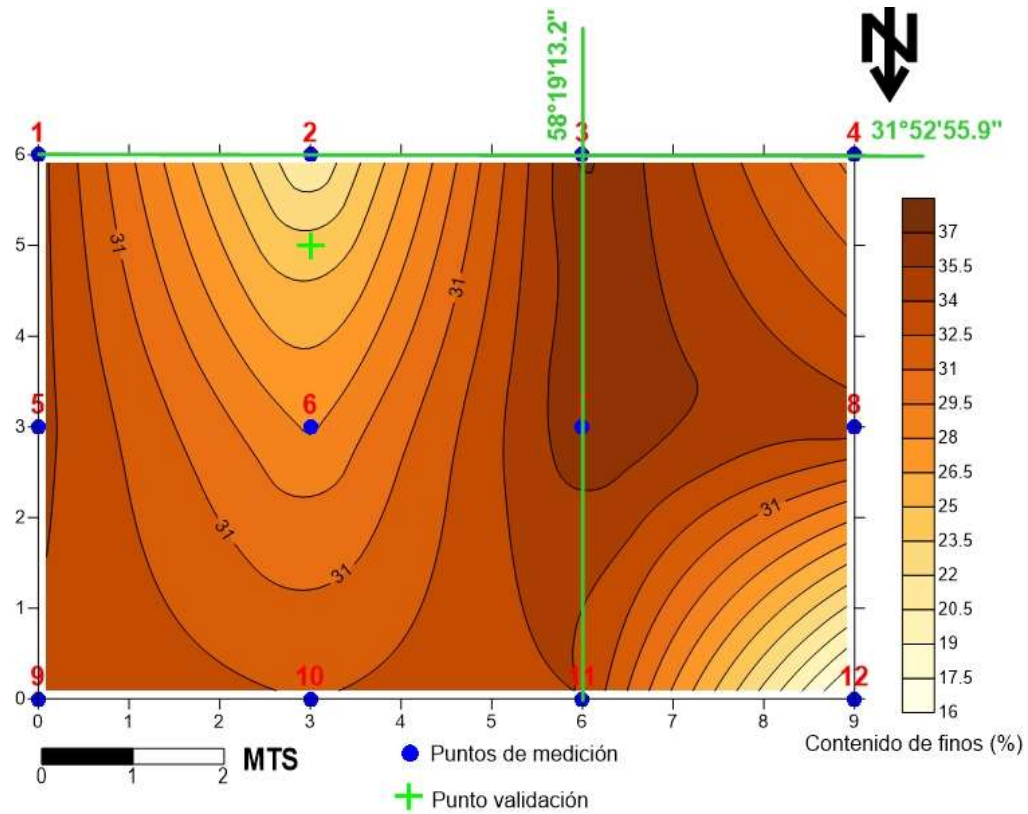


Figura 6.7. Distribución espacial del contenido de finos a 1.5 m de profundidad.

### 6.2.2. Contenido de arcilla

En los siguientes tres mapas (Figuras 6.8, 6.9 y 6.10), pueden observarse la distribución espacial del contenido de arcilla a las profundidades bajo estudio. De la misma manera que para el caso del contenido de finos, se visualiza que las zonas con menor contenido de arcilla se corresponden con los valores más altos de la resistividad eléctrica en los mapas geoelectricos.

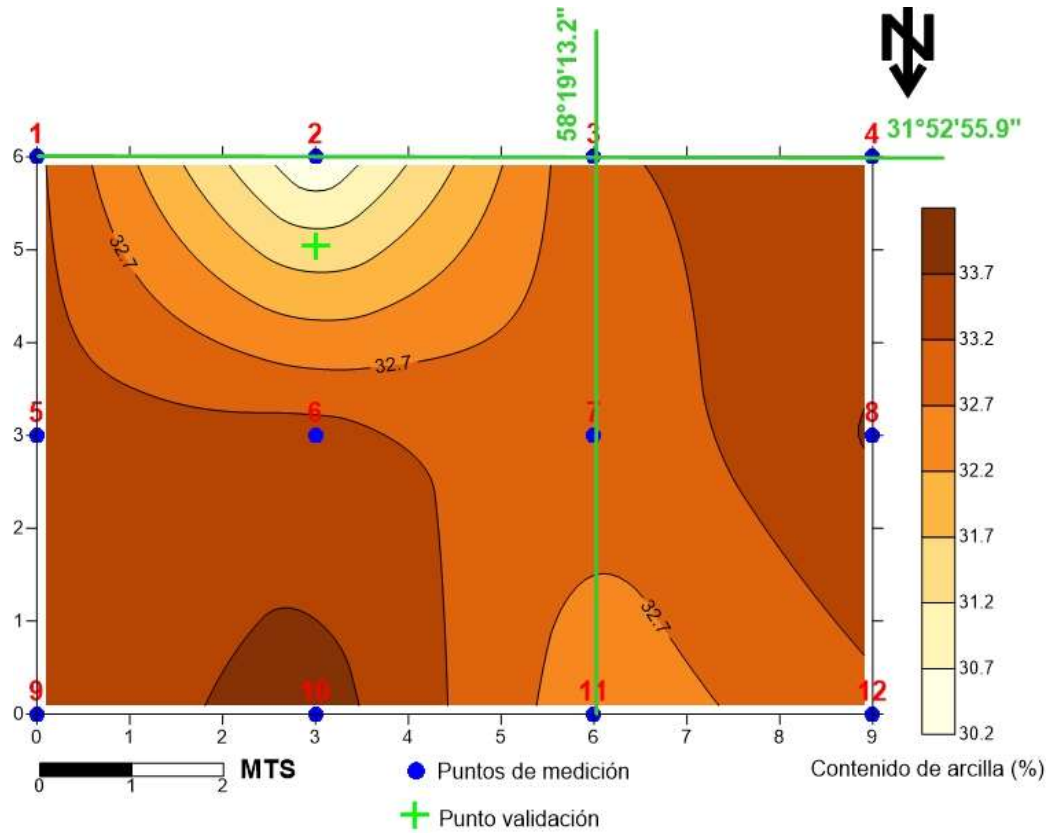


Figura 6.8. Distribución espacial del contenido de arcilla a los 0.5 m de profundidad.

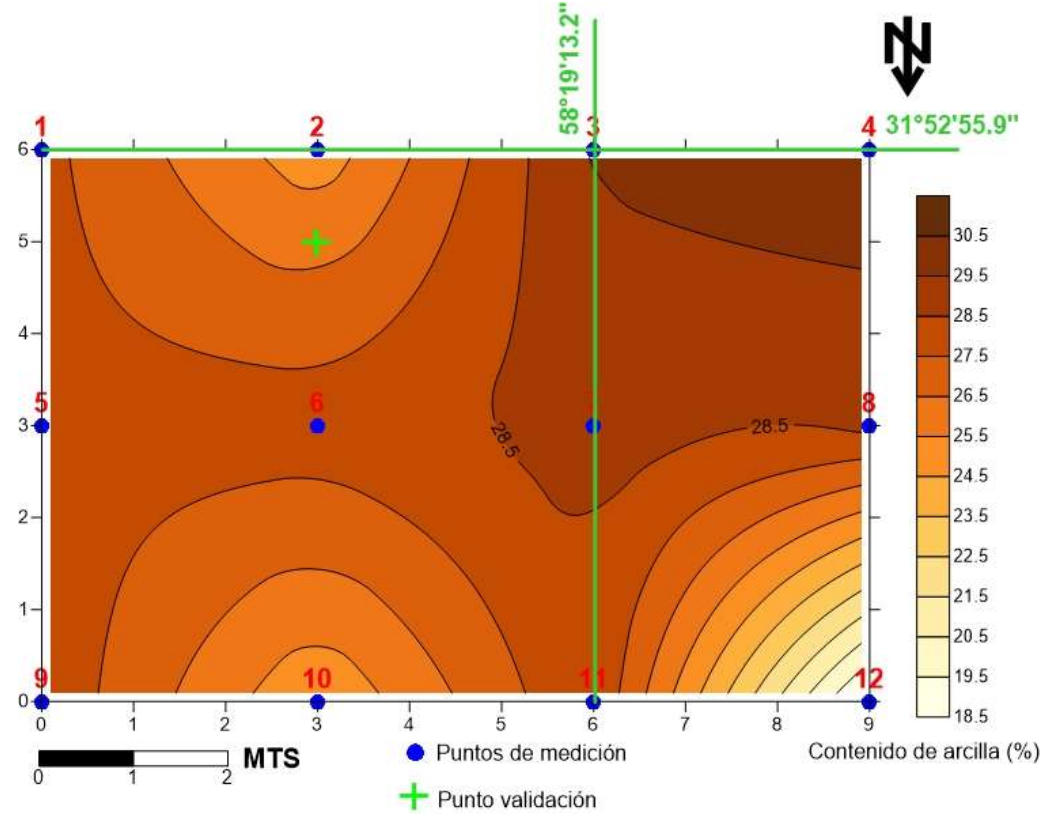


Figura 6.9. Distribución espacial del contenido de arcilla a 1 m de profundidad.

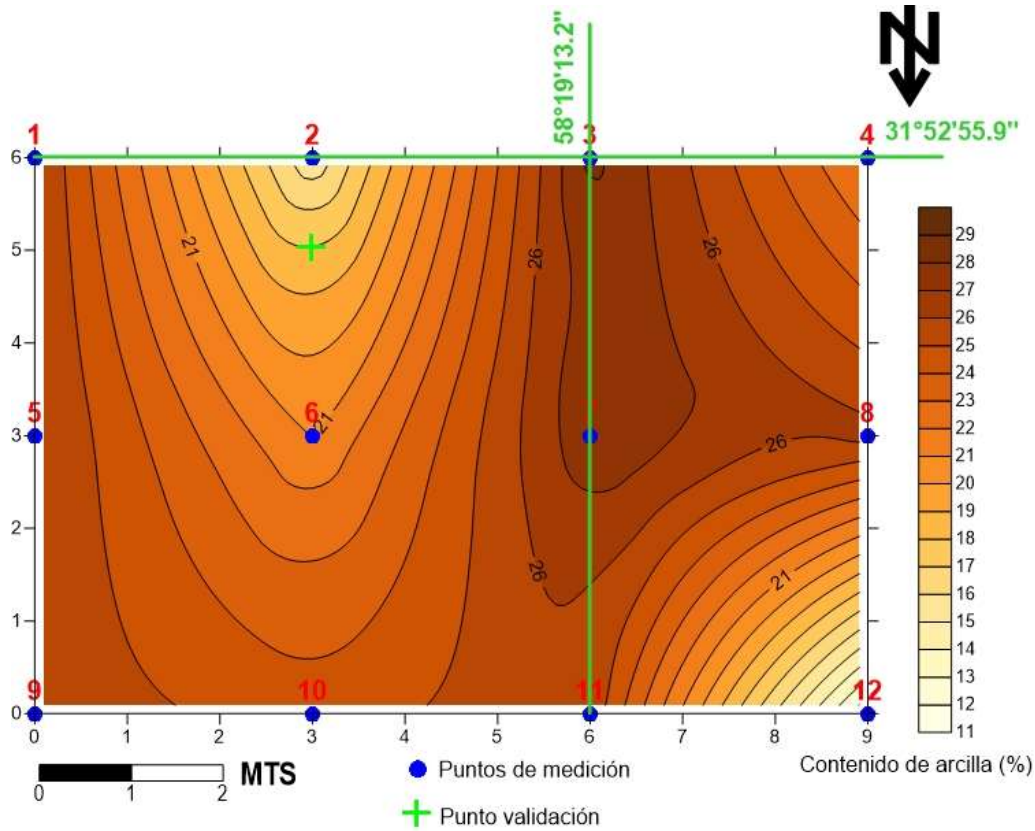


Figura 6.10. Distribución espacial del contenido de arcilla a 1.5 m de profundidad.

### 6.2.3. Ángulo interno de fricción

En las figuras 6.11, 6.12 y 6.13 se exhiben los mapas de distribución espacial del ángulo interno de fricción para las tres profundidades de estudio. En ellos, pueden observarse, que los lugares con mayor valor del ángulo interno de fricción se corresponden con valores de resistividad eléctrica más alta en los mapas geoelectricos o con las zonas de mayor contenido de arena.

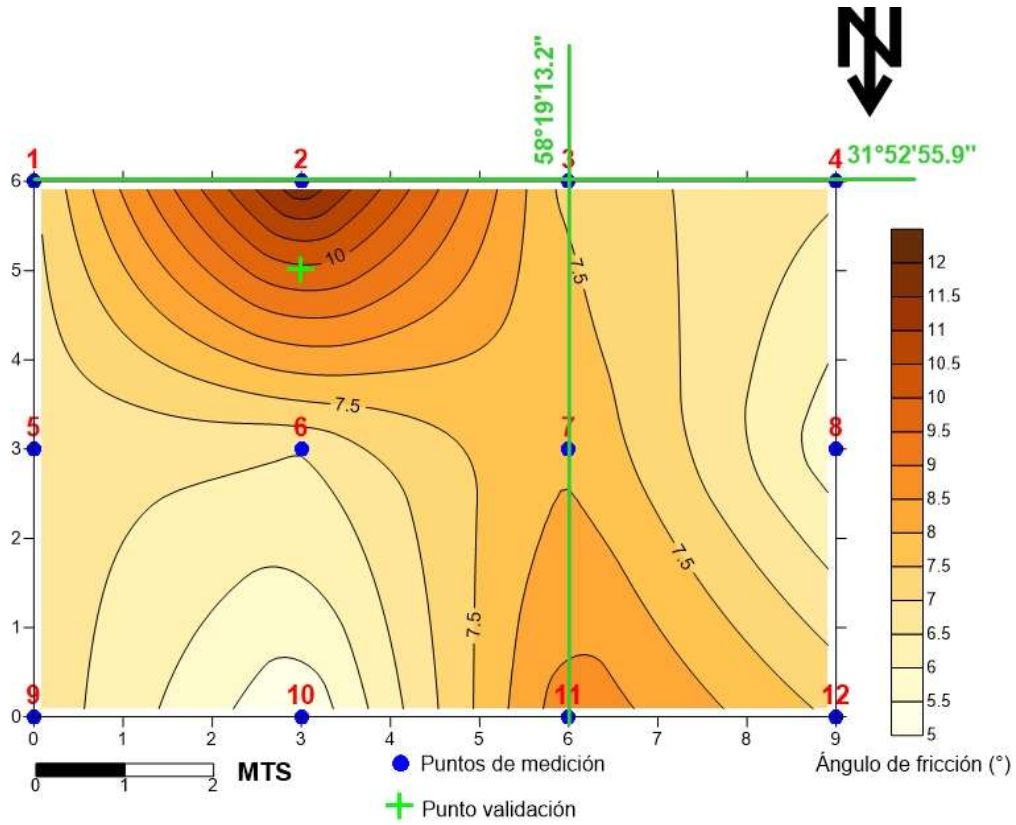


Figura 6.11. Distribución espacial del ángulo interno de fricción a 0.5 m de profundidad.

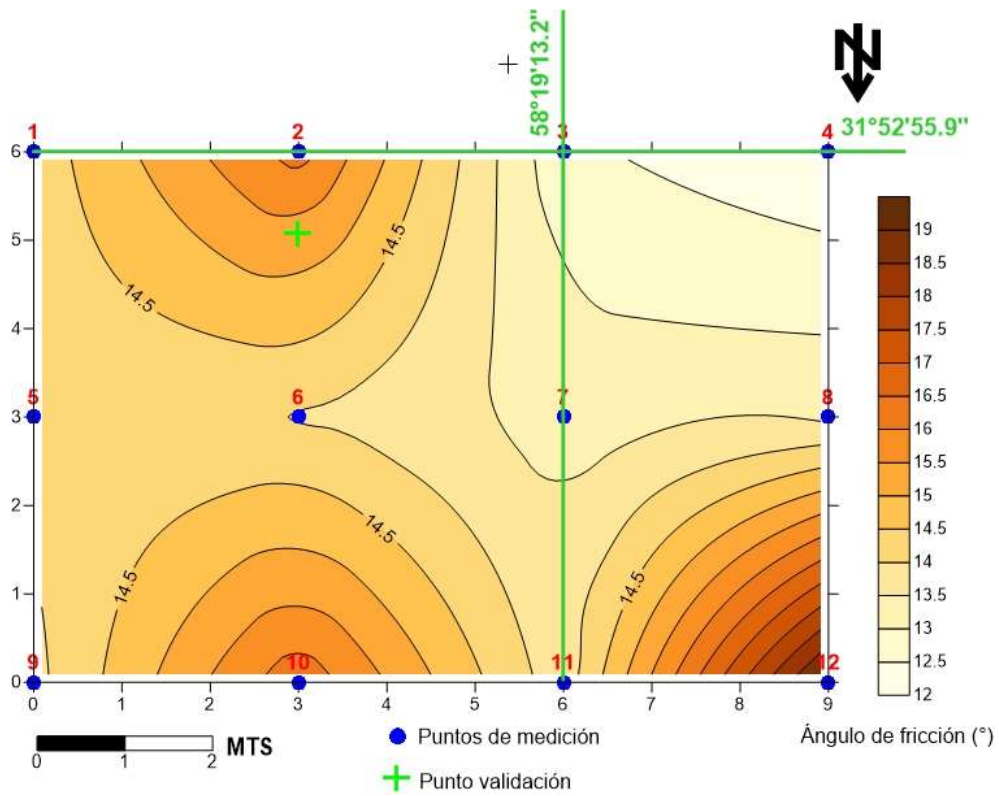


Figura 6.12. Distribución espacial del ángulo interno de fricción a 1 m de profundidad.

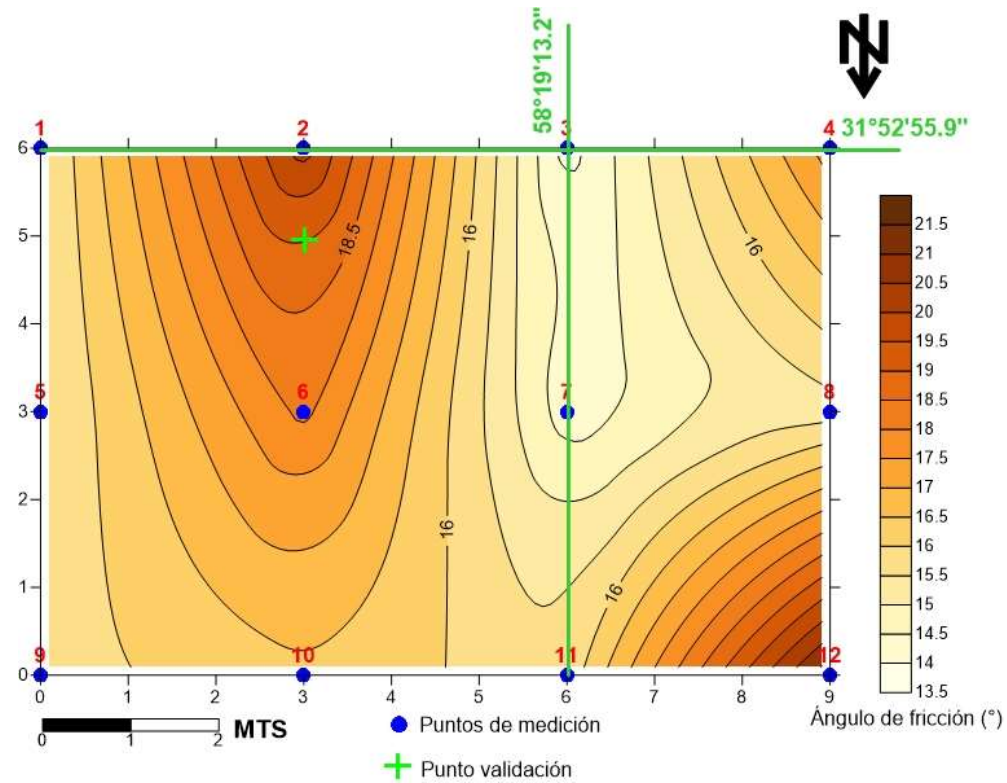


Figura 6.13. Distribución espacial del ángulo interno de fricción a 1.5 m de profundidad.

#### 6.2.4. Cohesión

La distribución espacial de la cohesión a las tres profundidades de estudio puede observarse de las figuras 6.14, 6.15 y 6.16. A diferencia de los mapas generados anteriormente, para este caso se puede notar que los valores numéricos estimados muestran una representación homogénea. Hay que tener en cuenta, que la correlación encontrada entre la resistividad eléctrica con este parámetro fue una de las más débiles.

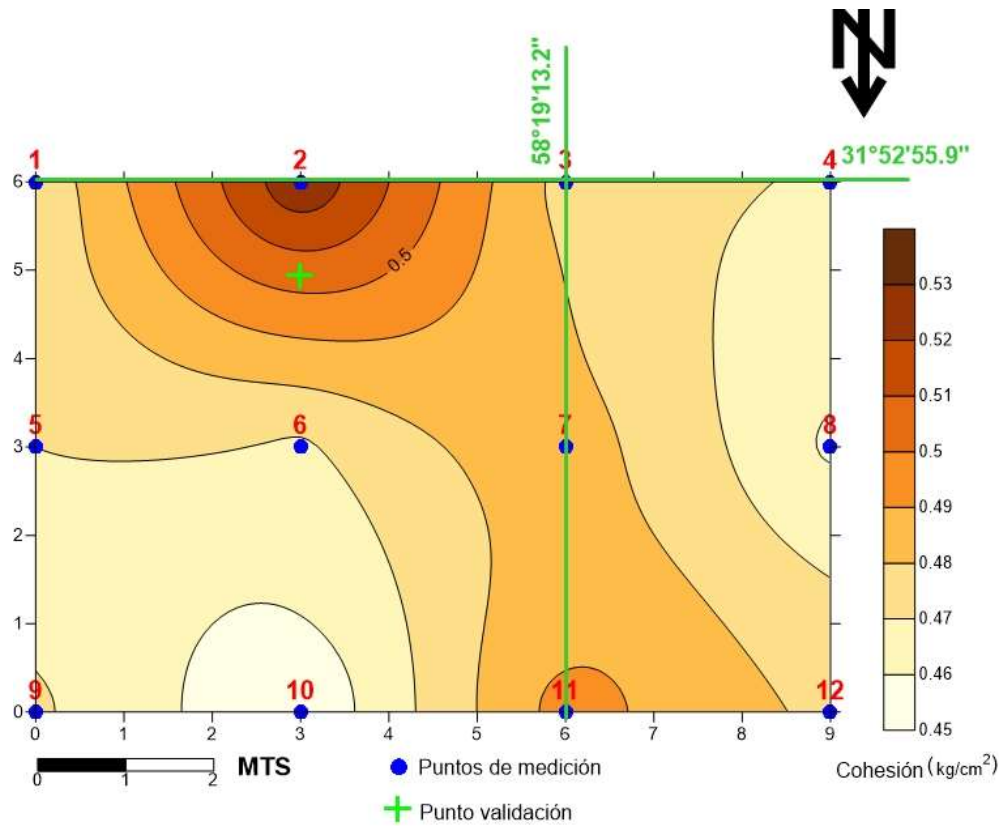


Figura 6.14. Distribución espacial de la cohesión a 0.5 m de profundidad.

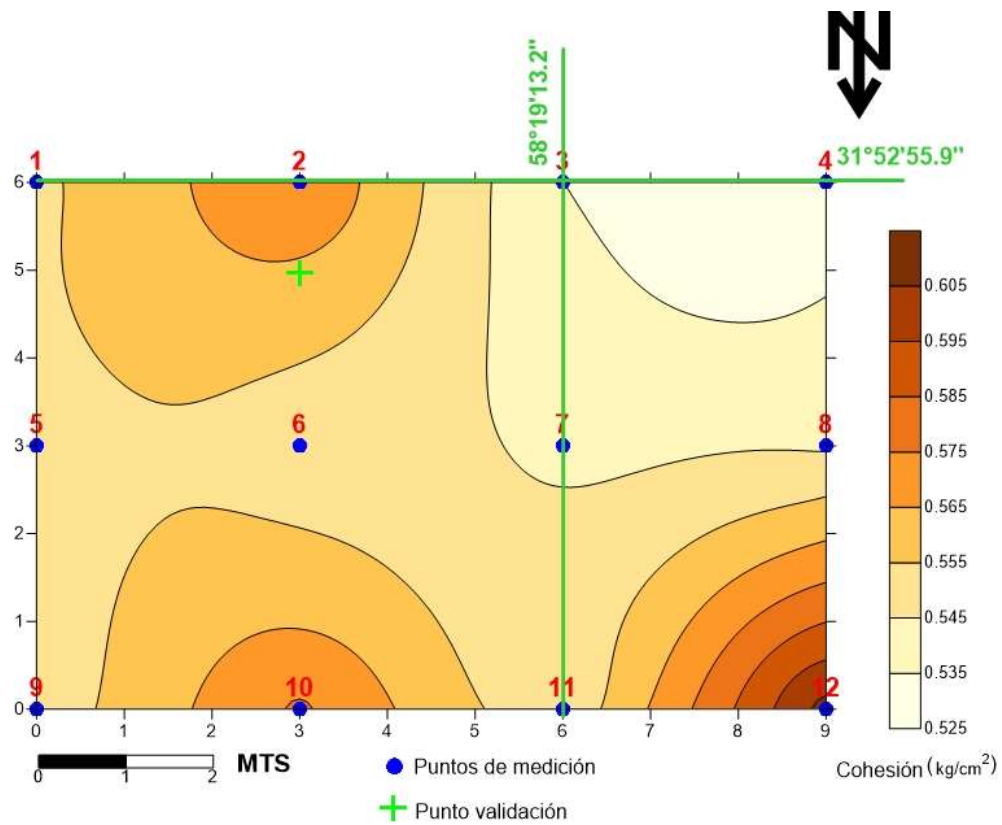


Figura 6.15. Distribución espacial de la cohesión a 1 m de profundidad.

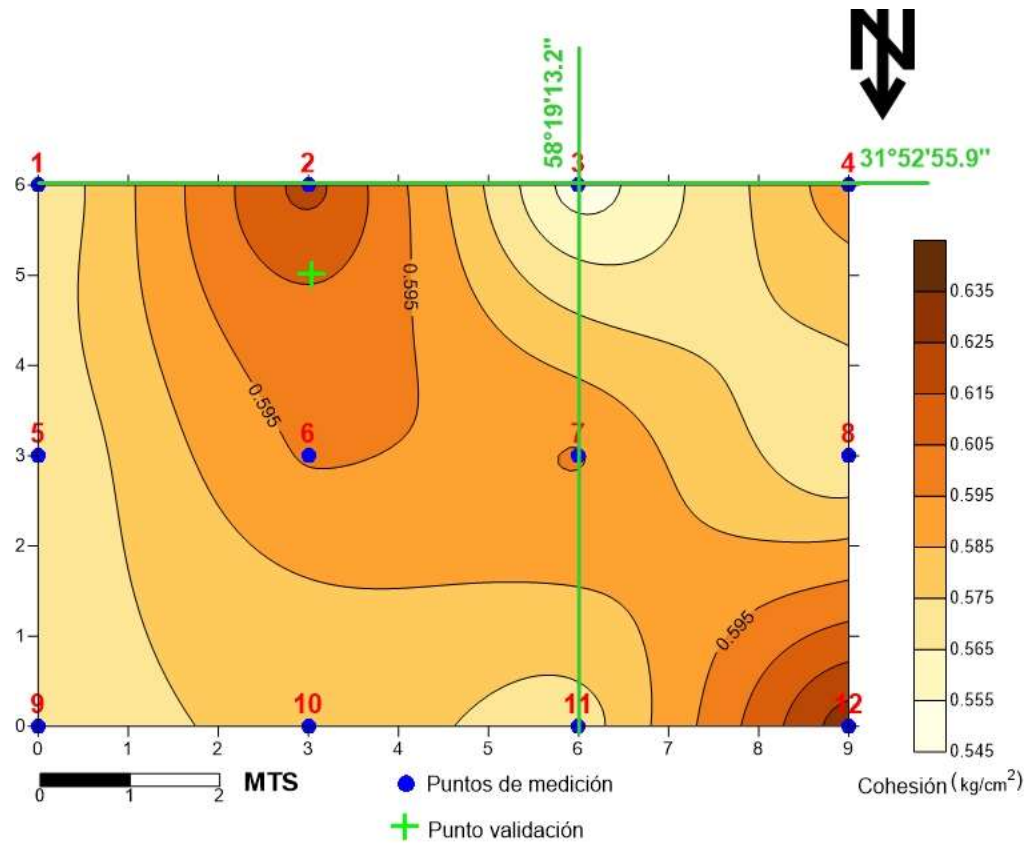


Figura 6.16. Distribución espacial de la cohesión a 1.5 m de profundidad.

### 6.2.5. Contenido de agua

Con respecto a los mapas que se representan en las figuras 6.17, 6.18 y 6.19, que muestran la distribución espacial del contenido de agua, a las profundidades bajo estudio, se puede observar que en los lugares que se presentan un menor contenido de la misma, se relacionan con mayores valores en la resistividad eléctrica en los mapas geoelectrónicos. Esto es esperable ya que el agua es el elemento fundamental de conducción en la matriz agua-roca.

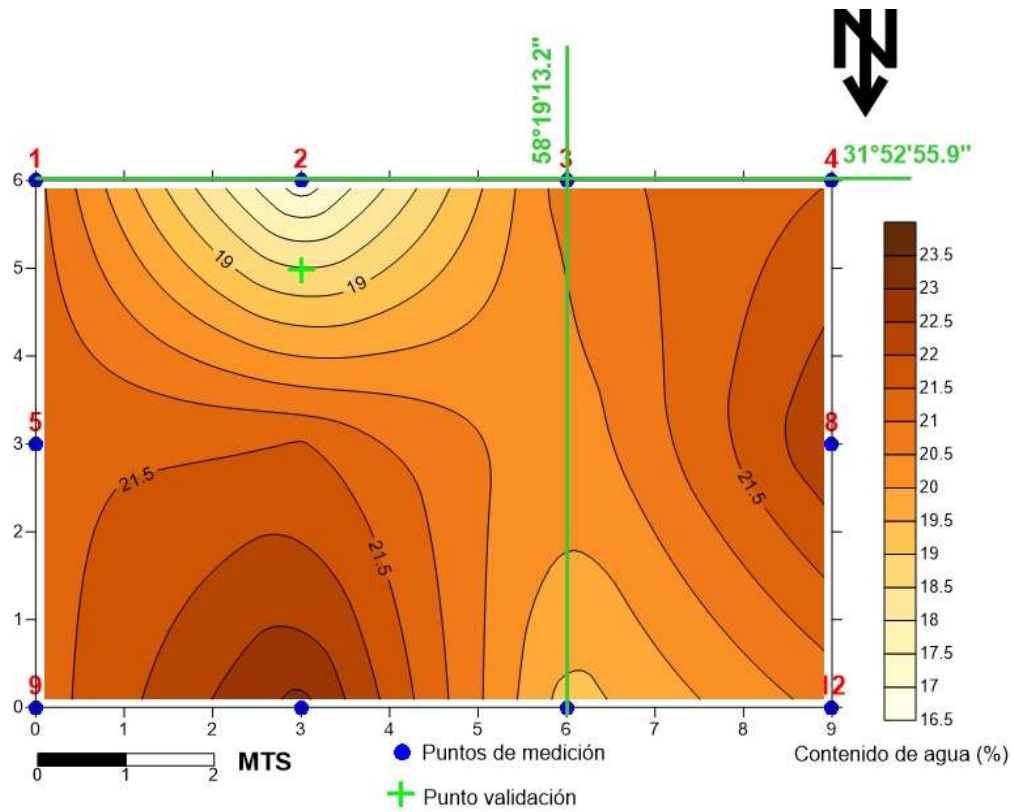


Figura 6.17. Distribución espacial del contenido de agua a 0.5 m de profundidad.

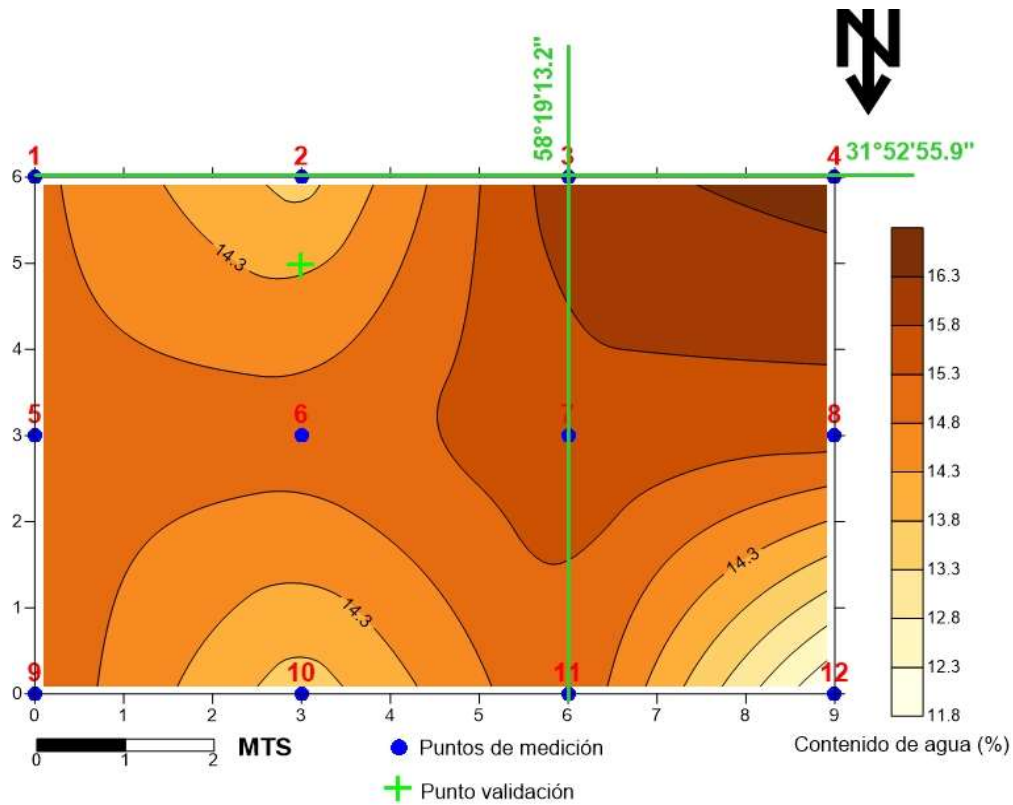


Figura 6.18. Distribución espacial del contenido de agua a 1 m de profundidad.

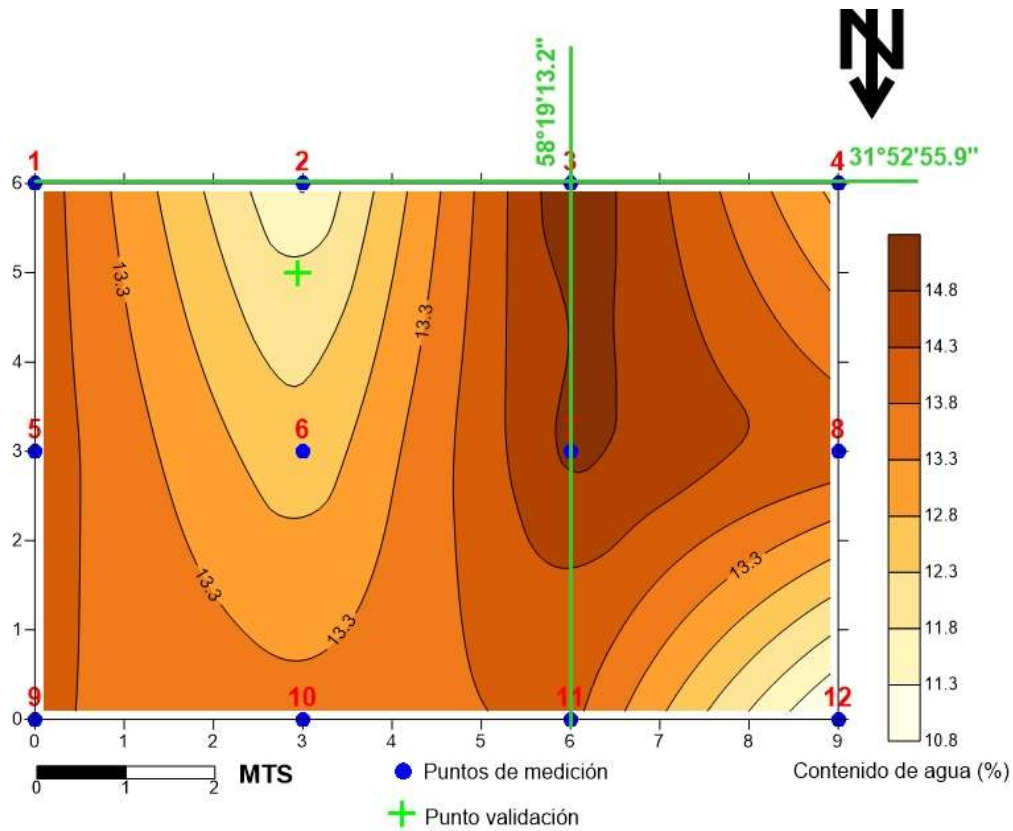


Figura 6.19. Distribución espacial del contenido de agua a 1.5 m de profundidad.

### 6.3. Validación del modelo

De acuerdo con lo expresado en el capítulo 4, apartado 6, se extrajo del ZED una muestra al azar a una profundidad de 0.5 m con el objetivo de validar las estimaciones generadas por los modelos geomecánicos presentados en los mapas del apartado anterior (6.2).

La tabla 6.1 muestra la comparación entre las determinaciones hechas en laboratorio sobre la muestra extraída del ZED (Anexo H) con los valores geomecánicos estimados por los modelos encontrados.

Parámetro	Determinación de laboratorio	Estimación del modelo	Error absoluto
Contenido de finos	41.5 %	41.4 %	0.1 %
Contenido de arcilla	32 %	31.4 %	0.6 %
Ángulo interno de fricción	9.0°	9.9°	0.9°
Cohesión	0.65 kg/cm <sup>2</sup>	0.5 kg/cm <sup>2</sup>	0.15 kg/cm <sup>2</sup>
Contenido de agua	17.7 %	18.5 %	0.8 %

Tabla 6.1. Validación de modelo geomecánico.

En la tabla 6.1 se puede apreciar que las estimaciones realizadas utilizando los modelos encontrados, resultaron ser del orden de los valores determinados mediante ensayos de laboratorio sobre la muestra extraída.

#### **6.4. Procedimiento metodológico de análisis resistivo**

La idea del siguiente apartado es plantear los pasos a seguir, de acuerdo con la experiencia lograda en el presente trabajo, para que esta metodología pueda ser de utilidad para los profesionales que se desempeñan en el estudio de suelos, para complementar en gran medida su trabajo.

Una vez determinado las cantidades y ubicaciones de los puntos de muestreos mecánicos a realizar en el área bajo estudio, según las sugerencias que brindan las normas establecidas, se procede a realizar en primer lugar sobre dichos puntos sondeos eléctricos verticales paramétricos. Previamente se aconseja medir a una profundidad cercana a un metro la temperatura del subsuelo.

Una vez que se han realizado los sondeos eléctricos verticales paramétricos, se procede a realizar en dichos puntos los SPT.

Según el grado de detalle en la construcción del mapa geomecánico, que el profesional quiera realizar, se armará una grilla similar a la figura 4.14 para ubicar los puntos donde se realizarán los sondeos eléctricos verticales, los que serán utilizados para realizar los mapas geoeléctricos. Si estos SEV se realizan un día diferente al que se realizaron los SEV paramétricos, es necesario medir nuevamente la temperatura del subsuelo, para que una vez interpretados todos los SEV, se corrijan sus valores por temperatura, según la ecuación 2.18.

En este punto ya es posible generar los mapas geoeléctricos para las profundidades elegidas.

Luego que se tienen los resultados de laboratorio de las muestras extraídas del lugar, hay que realizar las correlaciones entre los parámetros mecánicos de interés con las resistividades eléctricas verdaderas de los SEV paramétricos.

Con estas funciones de correlaciones encontradas, para cada parámetro geomecánico, se pueden realizar partiendo de los mapas geoeléctricos los mapas geomecánicos de los parámetros de utilidad.

Todo lo expresado anteriormente, se encuentra de manera visual en el diagrama de flujo en la figura 6.20.

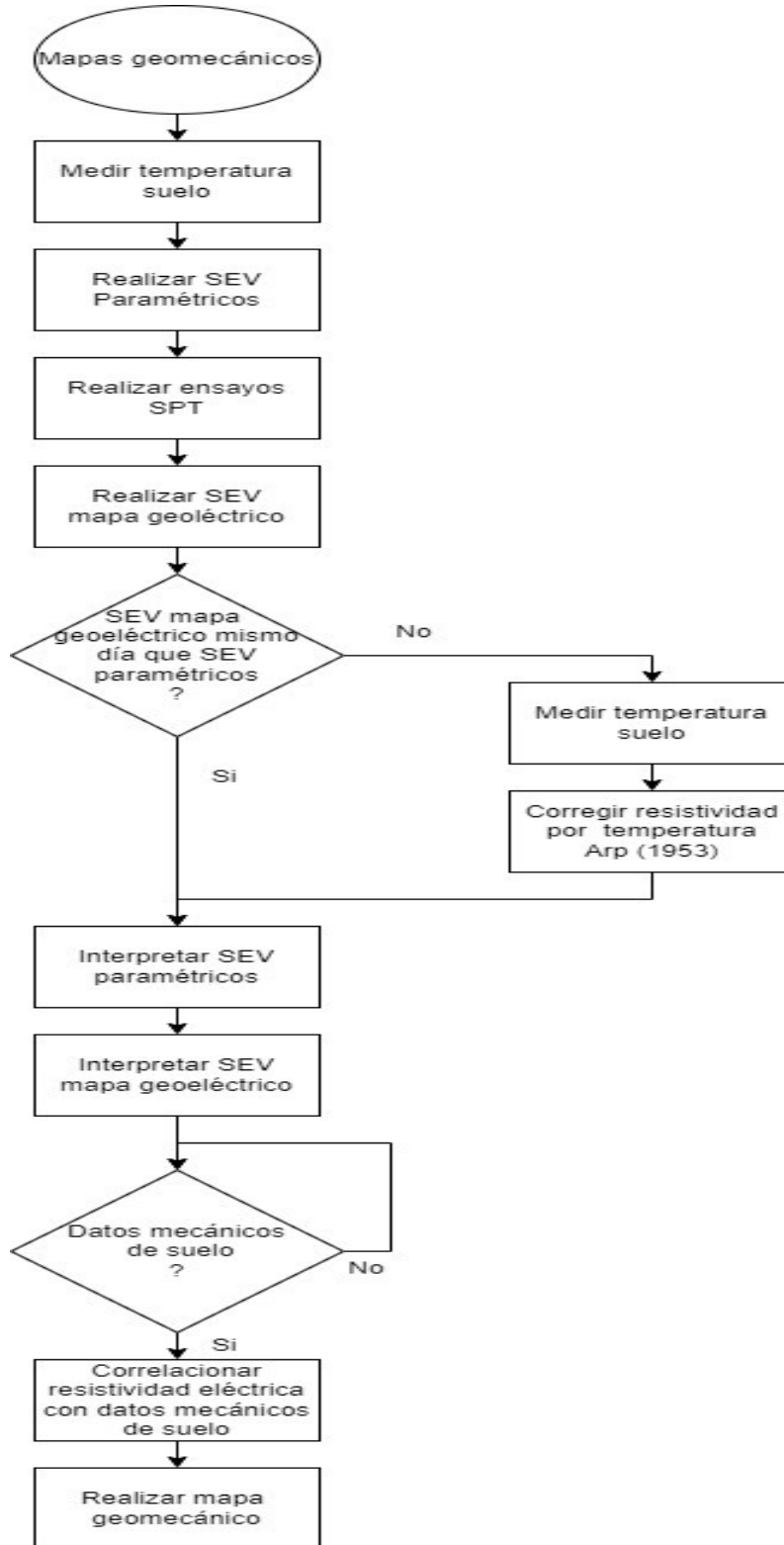


Figura 6.20. Procedimiento metodológico para obtener los mapas geomecánicos.

## 7. CONCLUSIONES

El uso de métodos geoelectricos para la caracterización de suelos con énfasis en aplicaciones geotécnicas y mecánicas de suelos ha sido poco utilizado a nivel mundial, solo algunos artículos han mostrado su interés al intentar relacionar algunos registros de resistividad con condiciones geológicas y/o mecánicas de suelo (Arias, 2011).

Se desprende de este estudio, que queda confirmada la hipótesis de que es posible estimar cuantitativamente los parámetros geomecánicos mencionados analizando su comportamiento geoelectrico, tanto en campo como en laboratorio. En tal sentido, conociendo que el subsuelo es un medio conductor, en mayor o menor medida, y que esto tiene relación no solo con la humedad relativa sino con la matriz sólida del mismo, este estudio propone un modelo de correlación de este comportamiento que incluya la matriz sólida del mismo. Esta metodología es perfectamente replicable en cualquier unidad geológica atendiendo a las premisas y consideraciones llevadas adelante a lo largo de esta tesis.

Los resultados de laboratorio permitieron establecer que es necesario tener en cuenta la temperatura del suelo para obtener resultados precisos y confiables al momento de interpretar las mediciones de resistividad eléctrica del suelo.

Además, se demostró que, con el aumento del contenido de agua del suelo, se obtiene una disminución en su resistividad eléctrica.

También, su resistividad eléctrica disminuye con la disminución de su porosidad o también se puede decir con el aumento de material fino. Tal como se mencionó en el apartado 5.3.

Así mismo, se ha validado la ley de Archie para salinidades del agua menores a los valores para los cuales fue originalmente definida. Ampliando el dominio de aplicación de la misma, una deuda ausente en la bibliografía.

Aun observando dificultades en la correlación regional de los datos es claro que existen correlaciones locales entre la resistividad eléctrica y los parámetros geomecánicos presentados en este estudio. No obstante, esto no significa que no se pueda establecer una correlación de los mismos a nivel regional, sino por el contrario significa que habrá que estudiar una hipótesis de alcance regional

sobre la base del comportamiento que en forma local se deduce en esta tesis.  
Aspecto que quedará pendiente para futuras investigaciones.

## 8. PUBLICACIONES DESARROLLADAS DURANTE EL DESARROLLO DE LA TESIS

### 8.1. Congresos y jornadas

- Chury, Mario. “Generación de Conocimientos en el Desarrollo de un Tomógrafo Eléctrico Resistivo”. *V Jornada de Cartografía y IV Jornada de Geofísica*. Salto - Uruguay, del 26 al 27 de octubre del 2017
- Chury, Mario; Silva Busso, Adrián. “Aspectos Generales de la Relación entre Parámetros Geomecánicos y Resistividad de Subsuelo”. *ASAGAI I. I Congreso Argentino de Geológica Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*. ISBN 978-987-21766-5-5. San Luis, del 22 al 24 de agosto de 2018.
- Chury, Mario; Silva Busso, Adrián. “Ensayos Geomecánicos vs. Resistividad en Suelos de la F. Ubajay”. *JorCyTec 2018. Jornadas de Ciencia y Tecnología de la UTN Regional Concordia*. Concordia - Argentina, 10 de octubre de 2018.
- Chury, Mario; Silva Busso, Adrián; Riccardi, Gerardo. “Modelo de distribución resistivo del subsuelo y sus aplicaciones en ingeniería geológica, cuenca del arroyo palmar, Entre Ríos”. *I Jornadas de Doctorandos de la UTN Regional Concordia*. Concordia - Argentina, 10 de octubre de 2019.
- Chury, Mario; Venturino Viviana; Delaloye, Silvia. “Estudio de la variación de la resistividad eléctrica del suelo a lo largo del año”. *JorCyTec 2021. Jornadas de Ciencia y Tecnología de la UTN Regional Concordia*. Concordia - Argentina, 5-7 de octubre de 2021.
- Chury, Mario; Silva Busso, Adrián; Riccardi, Gerardo. “Modelo de distribución resistivo del subsuelo y sus aplicaciones en ingeniería geológica, cuenca del arroyo palmar, Entre Ríos”. *II Jornadas de Doctorandos de la UTN Regional Concordia*. Concordia - Argentina, 3 de noviembre de 2022.

## **8.2. Publicaciones en revistas**

- Chury, Mario; Silva Busso, Adrián. 2019. “Relación entre datos geomecánicos medidos en ensayos SPT y resistividad del subsuelo en la F. Ubajay, Entre Ríos, Argentina”. *Revista ASAGAI*. ISSN: 2422-5703. N°42 pag: 23-34

## **8.3. Cursos de posgrado dictados**

- Chury, Mario; Silva Busso, Adrián. *Métodos geoeléctricos aplicados en aguas subterráneas, suelo y ambiente*.  
Lugar: Universidad Tecnológica Nacional. Regional Concordia.  
Fecha de realización: 18 al 20 de septiembre de 2019. Duración: 30 h.

## **8.4. Disertaciones**

- Silva Busso, Adrián; Chury, Mario. “Geoeléctrica una mixtura del espartiz y la ciencia”. Society of Exploration Geophysicists. Capítulo estudiantil Universidad Nacional de Tucumán.  
Videoconferencia. 6 de septiembre de 2021.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

Aceñolanza, F. (2000). "La Formación Paraná (Mioceno medio): estratigrafía, distribución regional y unidades equivalentes". En: Aceñolanza, F. y Herbst, R. (Ed.) El Neógeno de Argentina. Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo de la Universidad Nacional de Tucumán, Instituto Superior de Correlación Geológica (INSUGEO), Serie Correlación Geológica 14: 9-27, Tucumán.

Aceñolanza, F. (2007). "Geología y Recursos Geológicos de la Mesopotamia Argentina", *INSUGEO Serie de Correlación Geológica*, 22, Tucumán, Argentina. 150 pp

Adli, Z. H., Musa, M., Arifin, M. (2010). "Electrical Resistivity of Subsurface: Field and Laboratory Assessment", *International Journal of Geological and Environmental Engineering*, 4, (9), 422-425.

Archie, G. (1941). "The electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics", *Trans AIME, Petrol*, 146, 54-62.

Arias, D. (2011). "Exploración geotécnica - relaciones geoelectricas", Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia.

Arias, D., Echeverri, O., Hoyos, F. (2012). "Relaciones Geoelectricas en la Exploración Geotécnica", *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 31, 39-50.

Arp, J. (1953). "The effect of temperature on the density and electrical resistivity of sodium chloride solutions", *J. Pet. Technol*, 195, 17-20.

Astier, J. (1982). *Geofísica Aplicada a la Hidrogeología*. Madrid, España: Ed. Paraninfo, 343p.

ASTM G57. (2002). "Standard test method for measurement of soil resistivity using the Wenner four electrode method".

ASTM D422. (2002). "Standard test method for particle size analysis of soil".

ASTM D2216. (2019). "Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass".

Chebli, G., O. Tofalo y G. Turazzini, 1979. Mesopotamia. En: Chebli, G. y L. Spalletti (Ed.) Cuencas Sedimentarias Argentinas. Universidad Nacional de Tucumán, Instituto Superior de Correlación Geológica, Serie Correlación Geológica N° 6: 79-100, Tucumán

Chury, M., Silva Busso, A. (2019). "Relación entre datos geomecánicos medidos en ensayos SPT y resistividad del subsuelo en la F. Ubajay, Entre Ríos, Argentina". *Revista ASAGAI*. ISSN: 2422-5703. N°42 pag: 23-34.

Cosenza, P., Marmet, E., Rejiba, F., Cui, Y., Tabbagh, A., Charlery, Y. (2006). "Correlations Between Geotechnical and Electrical Data: A Case Study at Garchy in France", *Journal of Applied Geophysics*, 60, 165-178.

Cuñez Uvidia, J. (2015). "Comportamiento de la Resistividad Eléctrica de los Suelos ante Variaciones de Humedad y Grado de Compactación", Tesis (Grado en ingeniería civil), Universidad de Cuenca, Ecuador.

De Alba, E. (1953). "Geología del Alto Paraná, en Relación con los Trabajos de Derrocamiento entre Ituzaingó y Posadas". *Revista Asociación Geológica Argentina*, 8(3), 129-161.

De Alba, E., Serra, N. (1959). "Aprovechamiento del Río Uruguay en la zona de Salto Grande". *Informe sobre las condiciones y características geológicas*. Dirección Nacional de Geología y Minería Anales 11, Buenos Aires, Argentina. pp:162.

Figuerola, J. (1974). *Tratado de Geofísica Aplicada*. Madrid, España: Ed. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Minas, 520p.

Filho, A., Oliveira, M., Pires, T., Alves, A., Calixto, A., Narciso, M. (2016). "Correlation Method of Physical Characteristics With Electrical Properties of Soil", *IEEE Transactionson Environment and Electrical Engineering*, 2, (2), 16-24.

García, P. (1954). *Hoja de Reconocimiento Geológico e Hidrogeológico Arroyo Barú 1/100000*. Servicio de Inteligencia Militar del Terreno. Ejército Argentino (inédito) 78pp.

Gentili, C. Y. Rimoldi, H. (1979). "Mesopotamia". *Academia Nacional de Ciencias, Segundo Simposio Geología Regional Argentina*, 1: 185-223, Córdoba.

González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C. (2004). *Ingeniería Geológica*. Madrid, España: Ed. Pearson Educación, 744p.

Hazreek, Z., Rosli, S., Fauziah, A., Wijeyesekera, D., Ashraf, M., Faizal, T., Kamarudin, A., Rais, Y., Dan, M., Azhar, A., Hafiz, Z. (2018). "Determination of Soil Moisture Content Using Laboratory Experimental and Field Electrical Resistivity Values", *Journal of physics*, 995, 1-11.

Heiland, C. (1946). *Geophysical Exploration*. Nueva York: Ed. Prentice Hall ,1013p.

Iakubovskii, I., Liajov, L. (1980). *Exploración Eléctrica*. Barcelona, España: Editorial Reverté, 421p.

INTA, 2002. Carta de Suelos de la República Argentina, Departamento Colón, Provincia de Entre Ríos, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), EEA Paraná, Serie Relevamiento de Recursos Naturales N° 21, 242 pp.

Iriondo, M. (1980). El cuaternario de Entre Ríos, Rev. Asoc. Cienc. Nat. Litoral, n°11, p.:125-141, Santa Fe, Argentina.

Iriondo, M. (1987). Geomorfología y Cuaternario de la Provincia de Santa Fe (Argentina). *D´Orbignyana* 4: 1-54.

Jusoh, H., Osman, S. (2017). "The Correlation Between Resistivity and Soil Properties as an Alternative to Soil Investigation", *Indian Journal of Science and Technology*, 10, (6), 1-5.

Kazmi, D., Qasim, S., Siddiqui, F., Azhar, S. (2016). "Exploring the Relationship Between Moisture Content and Electrical Resistivity for Sandy and Silty Soils", *International Journal of Science Invention*, 5, (7), 42-47.

Kirsch, R. (2009). *Groundwater geophysics. A tool for hidrology*. Berlin, Alemania: Springer, 542p.

Kouchaki, B. (2017). "Laboratory resistivity measurements for soil characterization", Trabajo de grado. Universidad de Arkansas.

Kowalczyk, S., Maslakowski, M., Tucholka, P. (2014). "Determination of the Correlation Between the Electrical Resistivity of Non-cohesive Soils and the Degree of Compaction", *Journal of Applied Geophysics*, 110, 43-50.

Marengo, H. (2002). "La transgresión de Laguna Paiva: distribución y problemas estratigráficos". *15° Congreso Geológico Argentino*. Actas 1: 637-642, Buenos Aires.

Mc Dowell, P., Barker, R., Butcher, A., Culshaw, M., Jackson, P., McCann, D., Skipp, B., Matthews, S., Arthur, J. (2002). *Geophysics in Engineering Investigations*. London: Construction Industry Research and Information Association, 252p.

Mársico, D. (2013). "Aportes a la perspectiva geológica e hidrogeológica regional en el sector centro este de la Cuenca Chacoparaneana". Universidad de La Coruña, Tesis de doctorado, (Inédita) pp 209, La Coruña, Galicia, España.

Matsui, T., Park, S., Park, M., Matsuura, S. (2016). "Relationship Between Electrical Resistivity and Physical Properties of Rocks", *European Association of Geoscientists and Engineers*, 2016, 1-5.

Molina, G., Rinaldi, V., Taborda, R. (2003). "Sistema Automático para Tomografía Geoelectrica", Tesis (Grado en Ingeniería Electrónica), Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba.

Muñoz, L., Treppo O., Calvo, C. (2010). "Recuperación de canteras en la región centro este de la provincia de Entre Ríos". *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, 24, 25-33, Córdoba, Argentina.

Orellana, E. (1982). *Prospección Geoelectrica en Corriente Continua*. Madrid, España: Ed. Paraninfo, 578p.

Ozcep, F., Tezel, O., Asci, M. (2009). "Correlation Between Electrical Resistivity and Soil-water Content: Istanbul and Golkuk", *International Journal of Physical Science*, 4, (6), 362-365.

Parkomenko, E. (1967). *Electrical Properties of Rocks*. Boston: ed. Springer, 314p.

- Peinado, H., Green, C., Delgado, O., Herrera, J., Belmonte, S., Ladrón de Guevara, M., Shevnin, V. (2010). "Estimación de la Conductividad Hidráulica y Contenido de Finos a Partir de Leyes Experimentales que Relacionan Parámetros Hidráulicos y Eléctricos", *Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable*, 6, (3), 469-476.
- Reig, O. (1956). "Sobre la posición sistemática de *Zygolestesparanensis* Amegh. y de *Zygolestesenterrianus* Amegh". *Revista Holmbergia*, 5 (12-13): 209-226, Buenos Aires.
- Reynolds, W., Elrick, D. (1985). "In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the  $\alpha$ -parameter using the Guelph permeameter". *Soil Science Journal*, 140, (4), 292-302.
- Rossi, A. (2012). *Aspectos de la Contaminación con Nitratos en el Agua Subterránea de la Ciudad de Concordia, Entre Ríos*. Trabajo Final Especialista en Ingeniería Ambiental Facultad Regional Concordia, Universidad Tecnológica Nacional (Inédito). 165pp.
- Schon, J. (2015). *Physical Properties of Rocks*. Gran Bretaña: ed. Elsevier, 481p.
- Siddiqui, F., Osman, S. (2012a). "Electrical Resistivity Based Non-destructive Testing Method for Determination of Soil's Strength Properties". *Advanced Materials Research*, 488-489, 1553-1557.
- Siddiqui, F., Osman, S. (2012b). "Integrating Geo-electrical and Geotechnical Data for Soil Characterization", *International Journal of Applied Physics and Mathematics*, 2, (2), 104-106.
- Silva Busso, A. (1999). "Contribución al conocimiento geológico e hidrogeológico del Sistema Acuífero Termal de la Cuenca Chacoparanense Oriental argentina". Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Tesis de doctorado, Buenos Aires pp:574.
- Silva Busso, A., Fernandez Garrasino, C. (2004). "Presencia de las Formaciones Piramboia y Botucatú (Triásico – Jurásico) en el Subsuelo Oriental de la Provincia de Entre Ríos". *Revista Asociación Geológica Argentina*, 59 (1), 141-151.

Silva Busso, A., Machado, P., Cosentino, J. (2011). "Propuesta de control de las estructuras del subsuelo sobre la geología Terciario-Cuaternaria y su relación con la geomorfología fluvial en la Provincia de Entre Ríos, Argentina". Convenio UTN (Concordia) – YPF, Universidad Tecnológica Nacional FRCON. Informe final Inédito. 245pp.

Silva Busso, A. y Amato, S. (2013). Posibilidades de Explotación y Demanda Hídrica sobre el Acuífero Ubajay en el Sector Oriental de la Provincia de Entre Ríos, *Congreso Nacional del Agua XXIV CONAGUA 2013*, San Juan, Argentina. Actas en CD.

Silva Busso, A., Amato, S. (2017). "Depósitos Fluviales del Plio-pleistoceno-holoceno de la Provincia de Entre Ríos y sus Implicancias Hidrogeológicas". *Revista de la Asociación Geológica Argentina, Rev. Asoc. Geol. Argent.*, 74 (3), 338 – 356.

Silva Busso, A.; Moreno Merino, L.; Chury, M. (2021). "Evaluación de la recarga en los acuíferos de las formaciones Salto Chico, Hernandarias y Ubajay. Arroyo Palmar, Entre Ríos, Argentina". *Revista del Instituto Geológico Minero de España*, 132, (3), 253 – 271.

Sudha, M., Israil, M., Mittal, S., Rai, J. (2009). "Soil Characterization Using Electrical Resistivity Tomography and Geotechnical Investigations", *Journal of Applied Geophysics*, 67, 74 - 79.

Sudhir, B. Pradeep, K. (2014). "Correlation Between Electrical Resistivity and Water Content of Sand. A Statistical Approach", *American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering and Mathematics*, 6, (2), 115-121.

Tófalo, O. (1986). "*Caracterización sedimentológica y estratigrafía de las Formaciones Puerto Yerúa y Arroyo Avalos, provincias de Entre Ríos y Corrientes*". Tesis doctoral inédita Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la UBA, Buenos Aires, Argentina. 221pp.

Zhou, M., Wang, J., Cai, L., Fan, Y. Zheng, Z. (2015). "Laboratory Investigation on Factors Affecting Soil Electrical Resistivity and the Measurement", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51, (6), 5358-5365.



# ANEXOS

## **ANEXO A. Desarrollo de instrumentación geoelectrica**

Para llevar a cabo los objetivos propuestos en este trabajo de investigación, se diseñaron y desarrollaron una serie de equipos, con conocimiento propio, para poder llevar a cabo las mediciones necesarias de resistividad eléctrica y de polarización inducida de suelos, tanto para su utilización en las mediciones de campo, como también las realizadas en laboratorio.

Cronológicamente el primer instrumento desarrollado fue un Tomógrafo Eléctrico Resistivo (TER), el cual demandó de dos años de trabajo, para poder hacerlo operativo. Este equipo de medición presenta algunas prestaciones que lo hacen diferente a lo que se puede encontrar disponible en el mercado.

Aunque existen varios fabricantes que ofrecen estos tipos de dispositivos automáticos de medida (ABEM, Terraplus, AGI, Campus, Iris, Zonge entre otros), estos equipos son sistemas cerrados que no permiten al usuario la modificación de determinados parámetros, además cada uno de estos sistemas tienen sus propias cualidades de funcionamiento, sus propios accesorios y repuestos (Molina et al., 2003).

Por otra parte, se pretende generar un conocimiento propio en el desarrollo de estos equipos para esta línea de investigación al igual que ha ocurrido en otras universidades del mundo (Moscú, Estocolmo, etc.).

Continuando con la línea de tiempo, el segundo equipo desarrollado fue un medidor de resistividad eléctrica (resistivímetro) para su utilización en mediciones de laboratorio sobre muestras tomadas en campo, el cuál de la misma manera que el tomógrafo eléctrico resistivo, cuenta con algunas características que lo hacen particular. Su tiempo de diseño e implementación fue en este caso mucho menor que su predecesor, de tres meses, a causa del conocimiento adquirido previamente.

Debido a que la resistividad eléctrica de un suelo arcilloso puede ser numéricamente del mismo orden de magnitud que la de un suelo arenoso parcial o totalmente saturado en agua, fue necesario diseñar y desarrollar un tercer equipo que pudiera medir, no solo resistividad eléctrica, sino también polarización inducida que permitiría discernir si se trata de uno u otro tipo de suelo. En esta oportunidad el tiempo de desarrollo fue de 6 meses.

En los próximos apartados, se explicará la constitución y el funcionamiento de los equipos desarrollados.

### **A.1. Tomógrafo eléctrico resistivo**

Como se expuso en el marco teórico el tomógrafo eléctrico resistivo es un equipo que se utiliza para la obtención del corte geoelectrico del subsuelo, por medio de la utilización de un sistema automático de medición multielectrónico.

El tomógrafo eléctrico resistivo diseñado y desarrollado, puede observarse en la figura A.1.



Figura A.1. Tomógrafo Eléctrico Resistivo desarrollado.

#### **A.1.1. Descripción general del Tomógrafo Eléctrico Resistivo.**

El equipo desarrollado, está compuesto básicamente por una unidad de control, una unidad de medición, una unidad de alimentación, placas de red y un conjunto de electrodos que se colocan sobre la superficie del terreno (Figura A.2).

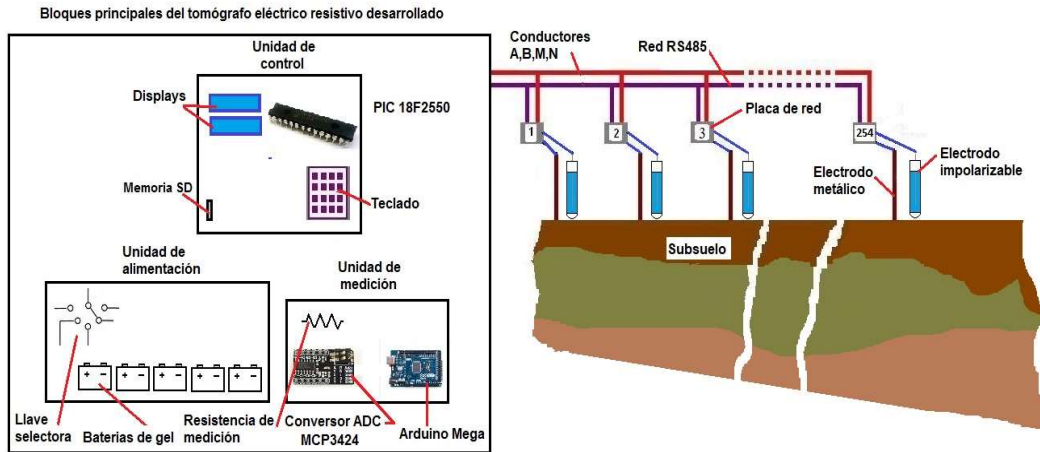


Figura A.2. Esquema básico del tomógrafo eléctrico resistivo desarrollado.

### A.1.2. Unidad de control

Es la unidad principal del equipo y tiene como principal elemento un microcontrolador PIC18F2550 de la empresa Microchip, cuyas características más destacadas son su memoria de programa de 32 kbytes, una memoria RAM de 2048 bytes y de 24 pines de entrada / salida.

Por medio de un teclado matricial conectado a dicha unidad, el prospectador (usuario del equipo) accede a un menú que le permite la selección del tipo de arreglo electródico a emplear, definir la cantidad de electrodos a utilizar, el tiempo de lectura, etc. Estas opciones se visualizan en un display inteligente de 16x2 caracteres, colocado en la parte inferior del equipo (display de información).

Una vez que el usuario configura todos los parámetros requeridos según sus necesidades, puede ordenarle al equipo que comience automáticamente con las mediciones propuestas.

Para llevar a cabo estas mediciones el equipo debe realizar la conexión y desconexión automática de los pares de electrodos A-B (inyección y medición de corriente) y M-N (medición de potencial), según la secuencia establecida del arreglo electródico previamente elegido por el usuario. Para ello la unidad de control se conecta por medio de una red utilizando una conexión física RS485 con un conjunto de placas electrónicas (esclavos), que tienen como finalidad la conexión o desconexión física de uno de los dos electrodos que tiene asociado cada placa, con uno de los cuatro conductores A, B, M o N según corresponda (Figura A.3).

Una vez conectados los electrodos, el equipo procede a la medición de la corriente eléctrica y a la medición tanto de la tensión telúrica como de la inducida. Posteriormente los valores medidos se visualizan en un segundo display inteligente de 16x2 caracteres (display de medición) colocado en la parte superior del equipo, y en el display de información se le consulta al usuario si desea aceptar o rechazar las mediciones realizada. En caso de que el usuario rechace las mediciones, el equipo las realiza nuevamente, y si son aceptadas las almacena en una memoria SD, para su posterior descarga e interpretación de los resultados.



Figura A.3. Unidad de control.

### A.1.3. Placas de red

Estas placas poseen como cerebro del sistema un microcontrolador PIC16F84A de la empresa Microchip, que posee una memoria de programa de 1 Kbyte, una memoria RAM de 64 bytes y 13 pines de entrada / salida. Dichas placas se encuentran conectadas por medio de un cable de red de ocho conductores (dos de alimentación, dos de datos y los cuatro restantes se corresponden con los conductores A, B, M o N) con la unidad de control, y por medio de esta conexión reciben los comandos desde dicha unidad, como se explicó anteriormente, para la conexión o desconexión física de uno de los dos electrodos que tiene asociado, a uno de los cuatro conductores A, B, M o N según lo que establezca la secuencia del sistema electródico elegido, mediante una conexión eléctrica por medio de micro relés (Figura A.4).



Figura A.4. Cable de red.

Además, esta placa cuenta con un led que parpadea en forma intermitente indicando su correcto funcionamiento (heart beat) y cuatro leds adicionales que indican a cuál de los cuatro conductores A, B, M o N se está conectando uno de los dos electrodos que tiene asociado (Figura A.5).



Figura A.5. Placa de red.

Como una primera innovación de este equipo con respecto a los disponibles en el mercado, se puede mencionar que por medio de la existencia de la red RS485, permite la posibilidad de trabajar con un número de electrodos variable y hasta 254 de ellos, con un alcance de 1200 metros y con separaciones

según las necesidades del usuario (agregando conectores extras al cable de red), que en los equipos comerciales estas separaciones son fijas y no pueden modificarse de ninguna manera.

#### **A.1.4. Unidad de alimentación**

La unidad de alimentación consiste en 4 baterías de gel de 12 voltios y 1,8 mAh que son utilizadas para la aplicación de la tensión de inyección en el terreno y de dos baterías adicionales, de las mismas características que las anteriores, para la alimentación de la electrónica de la que dispone el equipo (Figura A.6).

El valor de la tensión de inyección puede ser modificada por el operador del equipo por medio de una llave selectora de 5 posiciones. Las tensiones disponibles de inyección son 12, 24, 36 y 48 voltios.



Figura A.6. Unidad de alimentación.

#### **A.1.5. Unidad de Medición**

El sistema de medición está compuesto por un conversor ADC (Analog to Digital Converter) de cuatro canales MCP3424 de la firma Microchip, que posee una resolución de 18 bits (Figura A.7). Este conversor se encuentra conectado a un módulo Arduino Mega cuya función es la de ordenarle al conversor que realice las mediciones en cada uno de los canales en el momento indicado desde la unidad de control, visualizar las lecturas realizadas en el display correspondiente y almacenar dichos valores en una memoria SD.

De este conversor se utilizan solamente dos canales, el primero de ellos para medir la tensión presente en los electrodos de potencial M-N y el segundo para la medición indirecta de la corriente que circula en el terreno como consecuencia de la aplicación de la tensión de inyección a través de los electrodos A-B, mediante la medición de la caída de tensión en una resistencia calibrada de 1 ohm.

Los valores mínimos detectables tanto en tensión como en corriente son del orden de los 18  $\mu\text{V}$  y 18  $\mu\text{A}$  respectivamente. Mientras que los valores máximos soportados por el equipo en ambas magnitudes son 2.5 V y 2.5 A.

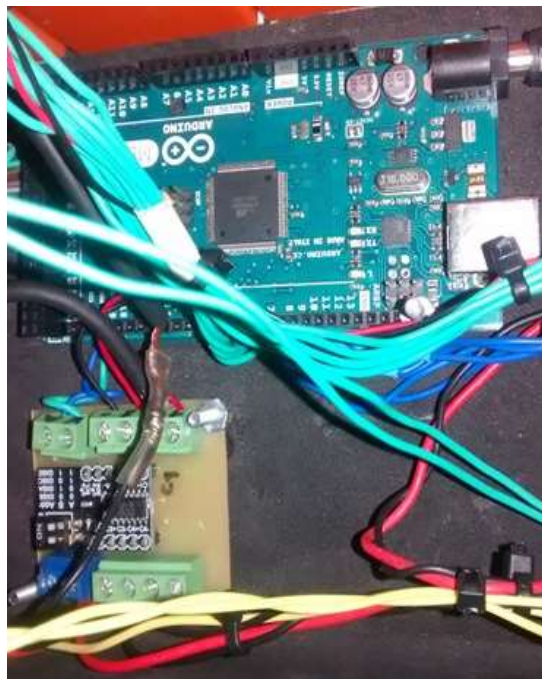


Figura A.7. Unidad de medición.

#### **A.1.6. Electrodo de medición**

Es aquí, donde se realizó la segunda y más importante innovación con respecto a los equipos comerciales, y que consiste en la utilización de dos electrodos. El primer electrodo está construido de acero inoxidable y es utilizado para la inyección de corriente y el segundo electrodo es del tipo impolarizable que es el encargado de la medición de la diferencia de potencial, tanto telúrica como la inducida por la corriente eléctrica inyectada en el terreno (Figura A.8).



Figura A.8. Electrodo de inyección de corriente y de medición de potencial.

Como ya ha sido visto anteriormente, cuando se realiza un sondeo eléctrico vertical (SEV), se utilizan dos electrodos metálicos A-B para inyectar la corriente en el terreno y dos electrodos impolarizables M-N para medir diferencia de potencial entre ellos. Si no se utilizaran los electrodos impolarizables y en su lugar se colocarían electrodos metálicos, se generarían entre los dos electrodos de medición de potencial tensiones de valores diferentes en cada uno, debido a efectos electroquímicos variables en el tiempo y esto alteraría la medición.

Como al realizar una tomografía eléctrica resistiva, es necesario la colocación de más electrodos, para poder hacer en forma automática mediciones tanto laterales como en profundidad, dichos electrodos tienen que ser capaces de inyectar corriente y de medir potencial de acuerdo con la secuencia del arreglo eléctrico elegido por el usuario. Como es imposible inyectar corriente por los electrodos impolarizables, que están formados por una solución de sulfato de cobre, los equipos comerciales que realizan dichas mediciones lo hacen con electrodos metálicos y corrigen por medio de complejas relaciones fisicomatemáticas, el efecto de la polarización de los electrodos.

## **A.2. Resistímetro de laboratorio**

Este equipo cumple la función de medir la resistividad eléctrica sobre una muestra de suelo extraída del lugar bajo estudio (Figura A.9).



Figura A.9. Resistivímetro de laboratorio.

Para realizar la medición con este equipo se debió confeccionar una caja estandarizada denominada "*Caja de Miller*", en donde se deposita la muestra de suelo tratando de no alterar sus condiciones naturales.

A diferencia de la caja original, se le incorporó un sensor digital de temperatura DS18B20 de la empresa Maxim en su base, para tener registro de la temperatura a la que se encuentra la muestra (Figura A.10), variable fundamental en la conducción electrolítica.

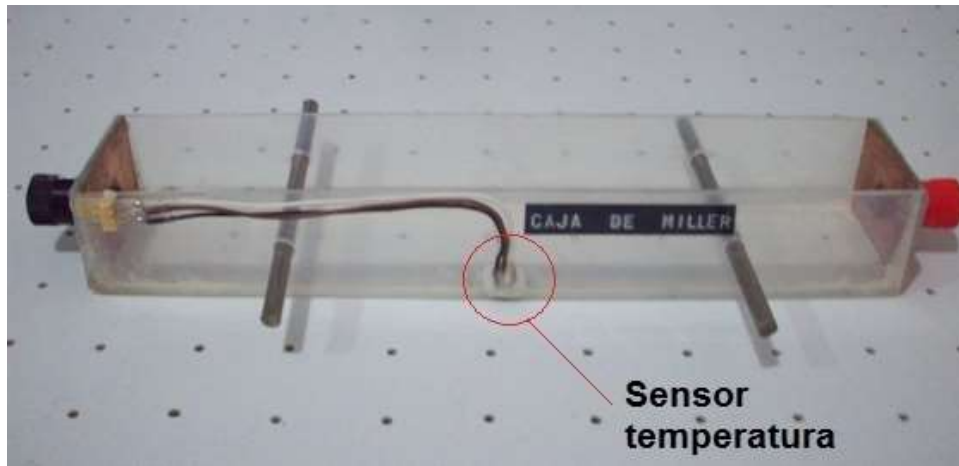


Figura A.10. Caja de Miller adaptada.

### A.2.1. Descripción general del Resistivímetro de laboratorio.

Este instrumento de medición está compuesto principalmente por una unidad de control, una unidad de medición y una unidad de alimentación (Figura 5.11).

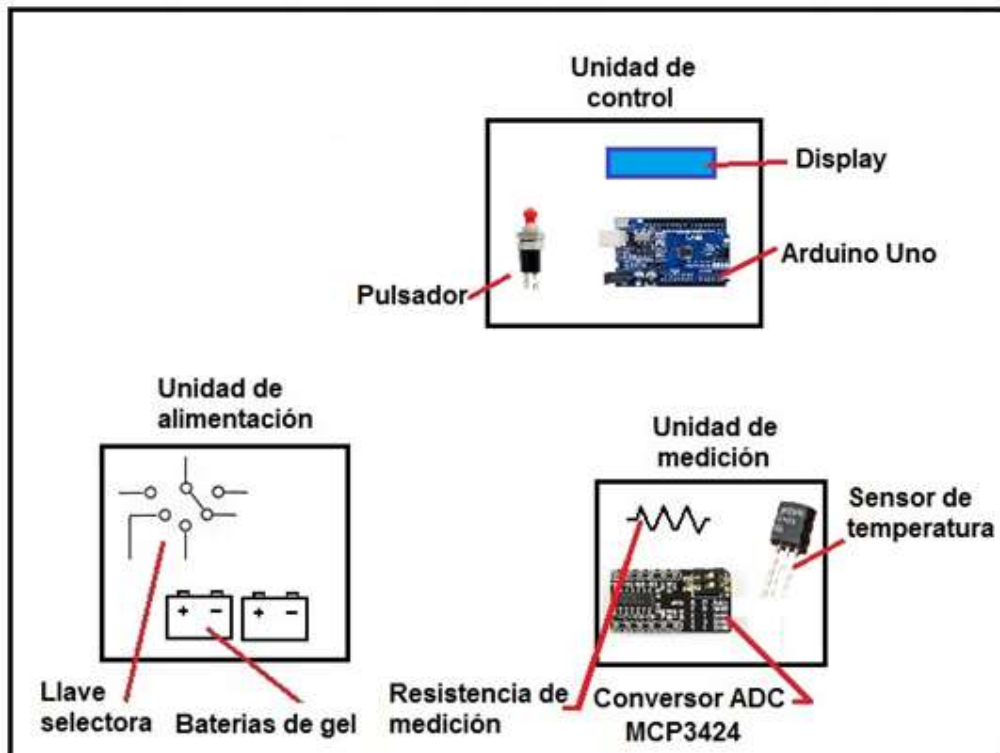


Figura A.11. Bloques fundamentales del resistivímetro de laboratorio.

### **A.2.2. Unidad de control**

Esta unidad tiene como principal elemento un módulo Arduino Uno (Figura A.12), que es el encargado en primer lugar de ser un nexo entre el usuario y el equipo.

Por medio de este módulo el usuario puede ordenarle con la pulsación de un botón, que se realice la medición, y que los resultados de tensión parasita, tensión inducida, corriente inyectada y temperatura a la que se encuentra la muestra, se visualicen en un display inteligente de 16x2 caracteres.



Figura A.12. Módulo Arduino.

### **A.2.3. Unidad de alimentación**

Esta unidad está compuesta de dos baterías de gel de 12V y 1.8 Ah, de las cuales una de ellas se utiliza para la alimentación de la electrónica de funcionamiento del equipo, y la otra se utiliza para la inyección de la corriente eléctrica que se aplica a la muestra.

### **A.2.4. Unidad de medición**

Esta unidad está compuesta de la misma manera que la del tomógrafo eléctrico resistivo, o sea por un conversor ADC MCP3424 de 18 bits (Figura A.13), conectado al módulo Arduino Uno de la unidad de control que es el encargado de generar la orden para se realice la medición tanto de tensión como de corriente. Esta última se lleva a cabo mediante la medición de la caída de

potencial que genera el paso de la corriente de inyección sobre una resistencia calibrada de un ohm.

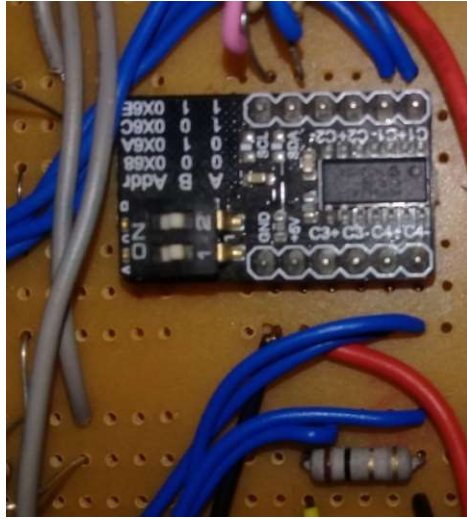


Figura A.13. Sistema de medición.

### A.3. Resistivímetro 1D y polarización Inducida

Este equipo está diseñado para que el usuario pueda medir a voluntad tanto la resistividad del subsuelo como también su polarización inducida por medio de la activación de los pulsadores correspondientes (Figura A.14).



Figura A.14. Equipo para medición de resistividad y polarización inducida.

### A.3.1. Descripción general del equipo

Este instrumento de medición está compuesto básicamente por los mismos bloques principales que el equipo anterior, o sea, por una unidad de control, una unidad de medición y una unidad de alimentación (Figura A.11). Además, se incorpora un sistema de impresión.

### A.3.2. Unidad de control

Está formada principalmente por un módulo Arduino Mega (Figura A.15). Por medio de este módulo el usuario pulsando un botón puede ordenarle al equipo que realice la medición de resistividad eléctrica y que los resultados de tensión parasita, tensión inducida y corriente se visualicen en un display inteligente de 16x4 caracteres.

De la misma manera si el operador desea realizar una medición de polarización inducida, por medio de la pulsación de un segundo botón, el equipo realiza dicha medición, mostrando en el display la información de tensión en los electrodos durante la inyección de corriente, tensión residual y el índice de polarizabilidad.



Figura A.15. Módulo Arduino Mega.

### A.3.3. Unidad de alimentación

De la misma manera que el equipo de medición de resistividad en laboratorio, esta unidad está compuesta de dos baterías de gel de 12V pero de 4 Ah (Figura A.16), de las cuales una de ellas se utiliza para la alimentación de la electrónica de funcionamiento del equipo, y la otra para el sistema de inyección de corriente eléctrica al subsuelo.



Figura A.16. Batería de 12V 4Ah empleadas.

A diferencia del equipo anteriormente nombrado, la tensión de inyección se logra por medio de la utilización de un convertidor de tensión elevador de corriente continua (Figura A.17), que toma la tensión de entrada de 12 V proveniente de la batería de inyección y según la posición de un potenciómetro el operario puede seleccionar una tensión de salida variable entre 12 y 48V.

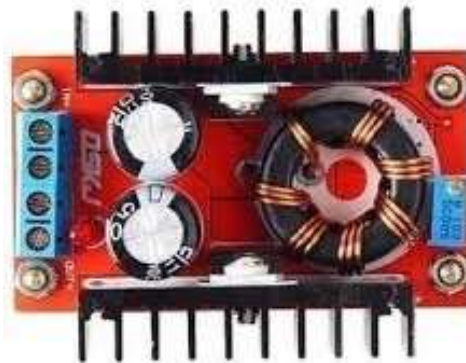


Figura A.17. Conversor elevador de corriente continua.

#### **A.3.4. Unidad de medición**

Esta unidad sigue siendo la misma que en los equipos anteriores, o sea compuesta de un convertidor ADC MCP3424 de 18 bits (Figura A.13), conectado al módulo Arduino Mega de la unidad de control.

#### **A.3.5. Sistema de impresión**

Cada vez que el usuario realiza una medición tanto de resistividad como de polarización inducida, al aceptar la medición por medio de un pulsador, los

valores medidos que son presentados en el display son además impreso mediante la utilización de una impresora térmica (Figura A.18).



Figura A.18. Impresora térmica.

















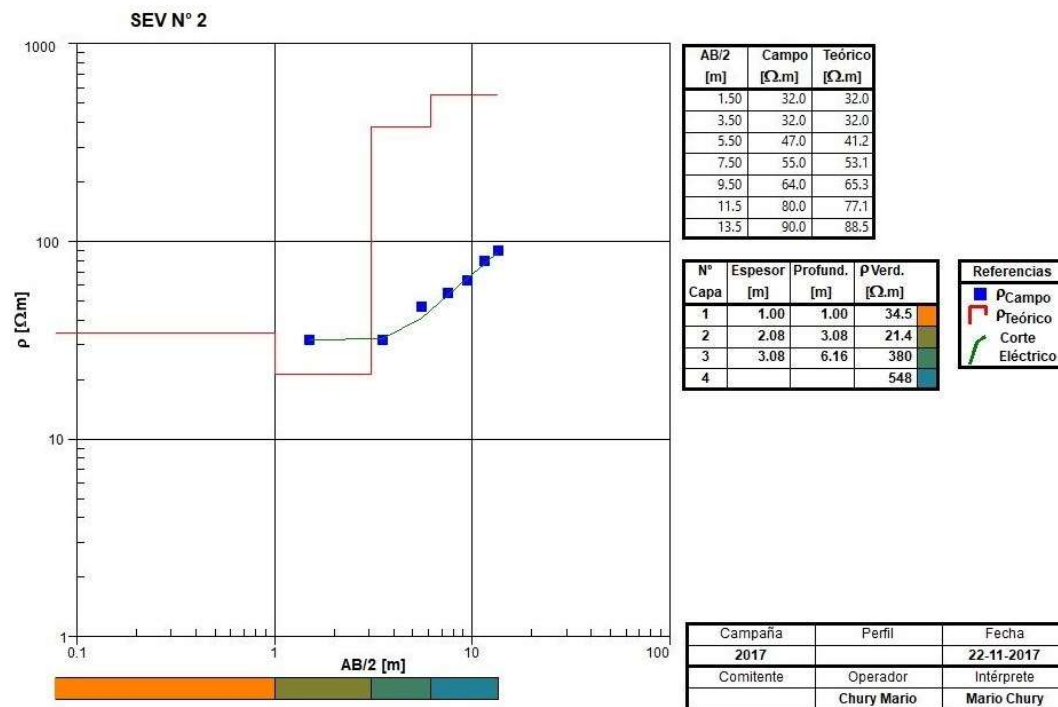
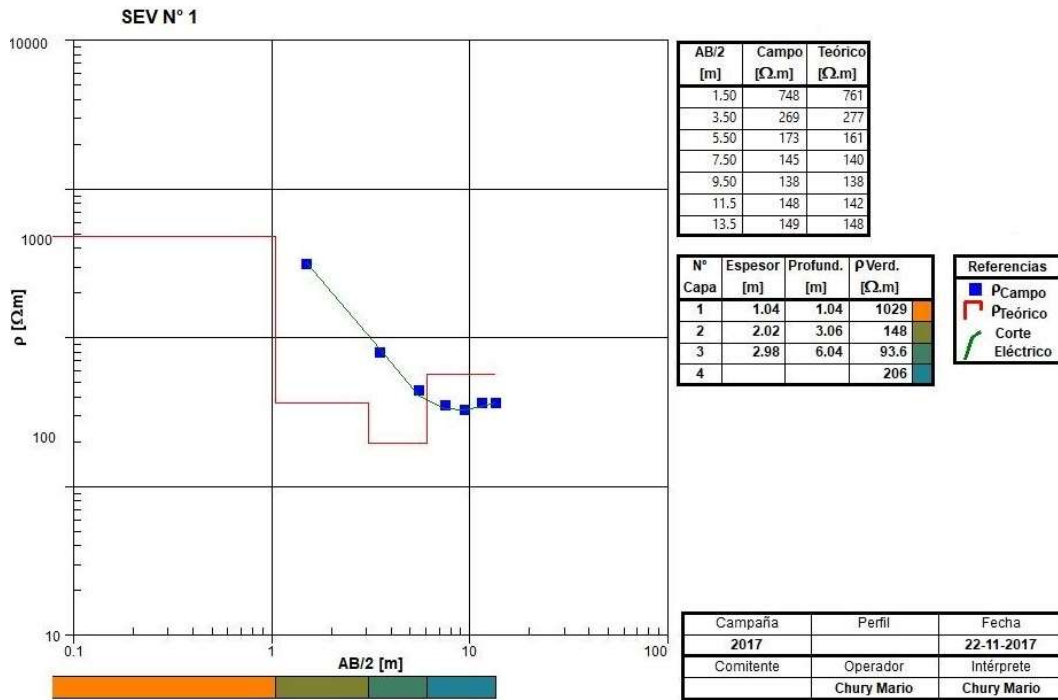
SÓNDEC N°9	MUESTRA N°	PROFUNDIDAD (m)	COTA (m)	COLOR	CLASIFICACION SUCS	DESCRIPCIÓN	RESISTENCIA A PENETRACION N		PROPIEDADES FISICAS										Cu (kg/cm²)	Ang. Fricc. Interna (grados)	OBSERVACIONES
							10	20	30	40	50	HUMEDAD NATURAL					LIMITE PLASTICO				



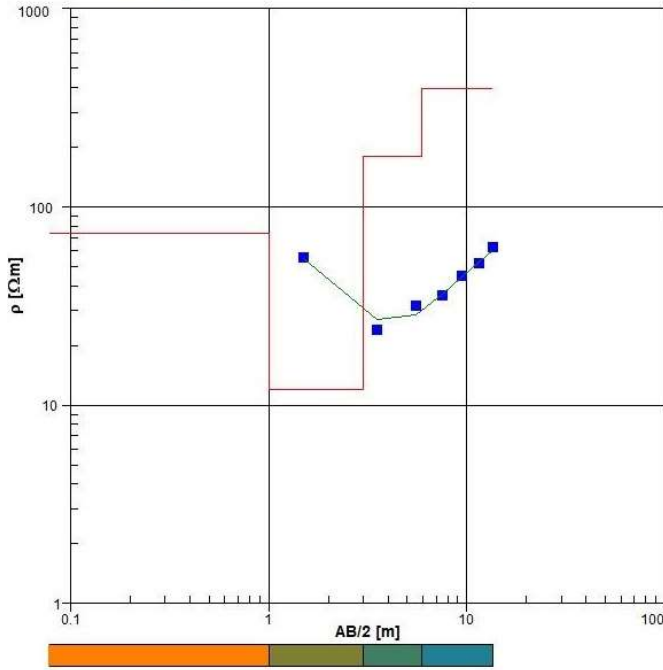




# ANEXO C. Curvas de campo e interpretación geoelectrica de estudio exploratorio



SEV N° 3



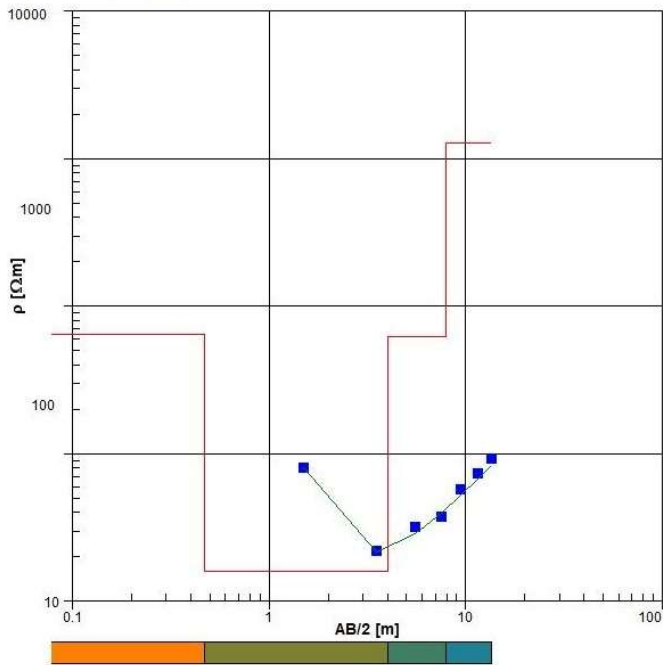
AB/2 [m]	Campo [Ω.m]	Teórico [Ω.m]
1.50	56.0	54.6
3.50	24.0	27.0
5.50	32.0	28.6
7.50	36.0	36.3
9.50	45.0	44.6
11.5	52.0	52.6
13.5	63.0	60.4

N° Capa	Espesor [m]	Profund. [m]	ρ Verd. [Ω.m]
1	1.00	1.00	73.9
2	2.00	3.00	12.0
3	2.94	5.94	179
4			395

Referencias
■ ρ Campo
— ρ Teórico
— Corte Eléctrico

Campaña	Perfil	Fecha
2017		22-11-2017
Comitente	Operador	Intérprete
	Mario Chury	Mario Chury

SEV N° 4



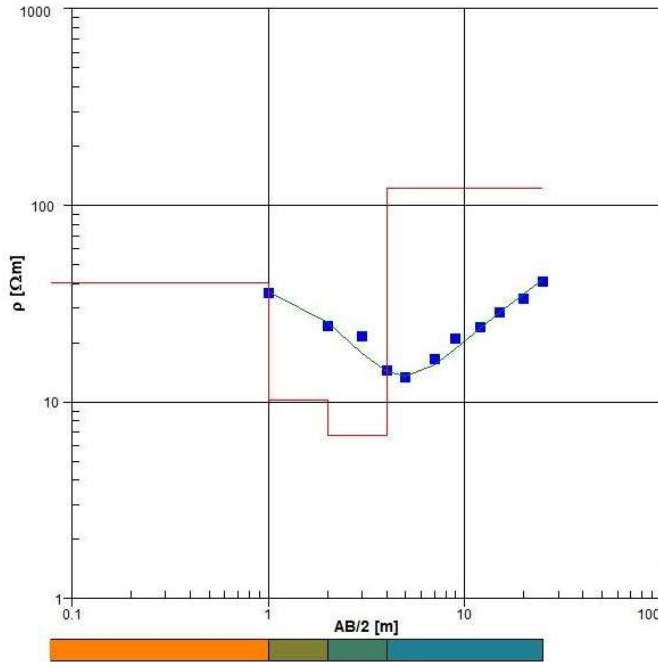
AB/2 [m]	Campo [Ω.m]	Teórico [Ω.m]
1.50	48.0	47.6
3.50	18.0	17.9
5.50	24.0	22.0
7.50	27.0	28.2
9.50	37.0	35.0
11.5	45.0	41.9
13.5	53.0	48.9

N° Capa	Espesor [m]	Profund. [m]	ρ Verd. [Ω.m]
1	0.47	0.47	229
2	3.53	4.00	14.2
3	3.93	7.93	221
4			2145

Referencias
■ ρ Campo
— ρ Teórico
— Corte Eléctrico

Campaña	Perfil	Fecha
2017		22-11-2017
Comitente	Operador	Intérprete
	Mario Chury	Mario Chury

SEV N° 5



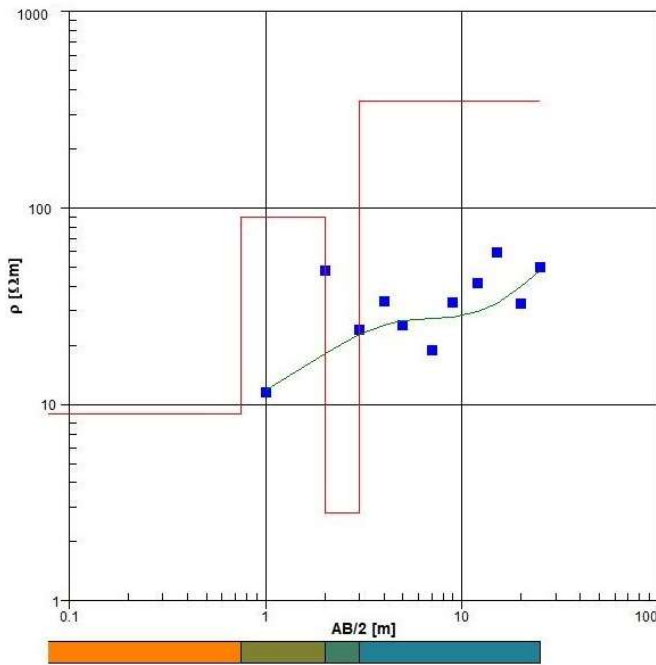
AB/2 [m]	Campo [Ω.m]	Teórico [Ω.m]
1.00	36.0	36.4
2.00	24.4	25.5
3.00	21.5	17.6
4.00	14.4	14.3
5.00	13.3	13.6
7.00	16.6	15.5
9.00	21.0	18.8
12.0	23.9	23.8
15.0	28.4	28.5
20.0	33.7	35.6
25.0	40.7	41.9

N° Capa	Espesor [m]	Profund. [m]	ρ Verd. [Ω.m]
1	1.00	1.00	40.3
2	1.00	2.00	10.3
3	2.00	4.00	6.76
4			123

Referencias	
	PCampo
	Pteórico
	Corte Eléctrico

Campaña	Perfil	Fecha
2016	0000	15-12-2016
Comitente	Operador	Intérprete
UTN-FRCON	Mario Chury	Mario Chury

SEV N° 6



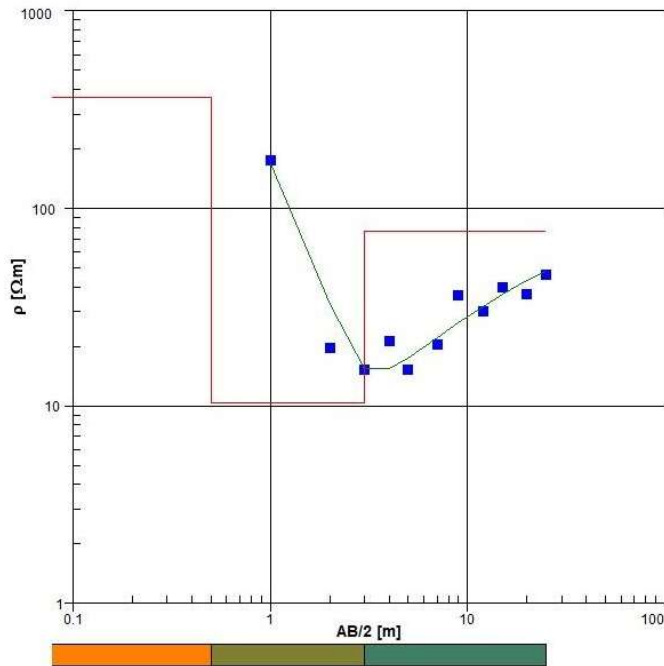
AB/2 [m]	Campo [Ω.m]	Teórico [Ω.m]
1.00	11.6	11.8
2.00	48.2	18.2
3.00	23.9	22.8
4.00	33.5	25.5
5.00	25.3	26.8
7.00	18.9	27.6
9.00	33.0	28.0
12.0	41.6	29.6
15.0	59.4	32.8
20.0	32.7	40.1
25.0	50.0	48.2

N° Capa	Espesor [m]	Profund. [m]	ρ Verd. [Ω.m]
1	0.75	0.75	8.98
2	1.26	2.01	89.8
3	1.00	3.01	2.81
4			352

Referencias	
	PCampo
	Pteórico
	Corte Eléctrico

Campaña	Perfil	Fecha
2017	1	5-4-2017
Comitente	Operador	Intérprete
	Mario Chury	Mario Chury

SEV N° 7



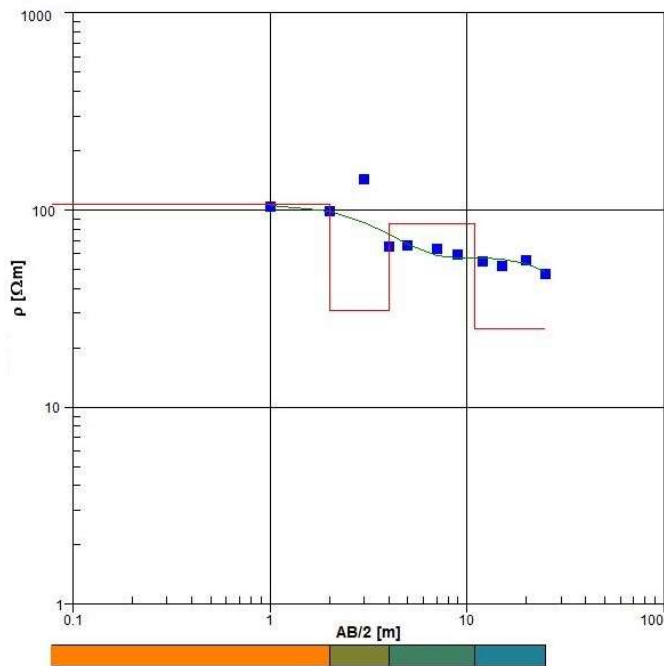
AB/2 [m]	Campo [Ω.m]	Teórico [Ω.m]
1.00	175	168
2.00	19.6	32.5
3.00	15.3	15.4
4.00	21.3	15.5
5.00	15.3	17.5
7.00	20.6	22.1
9.00	36.3	26.4
12.0	30.1	32.0
15.0	39.9	36.7
20.0	36.8	43.1
25.0	46.1	48.1

N° Capa	Espesor [m]	Profund. [m]	ρ Verd. [Ω.m]
1	0.50	0.50	366
2	2.50	3.00	10.3
3			76.8

Referencias
■ PCampo
▭ Pteórico
— Corte
— Eléctrico

Campaña	Perfil	Fecha
2016	1	15-12-2016
Comitente	Operador	Intérprete
UTN-FRCON	Mario Chury	

SEV N° 8



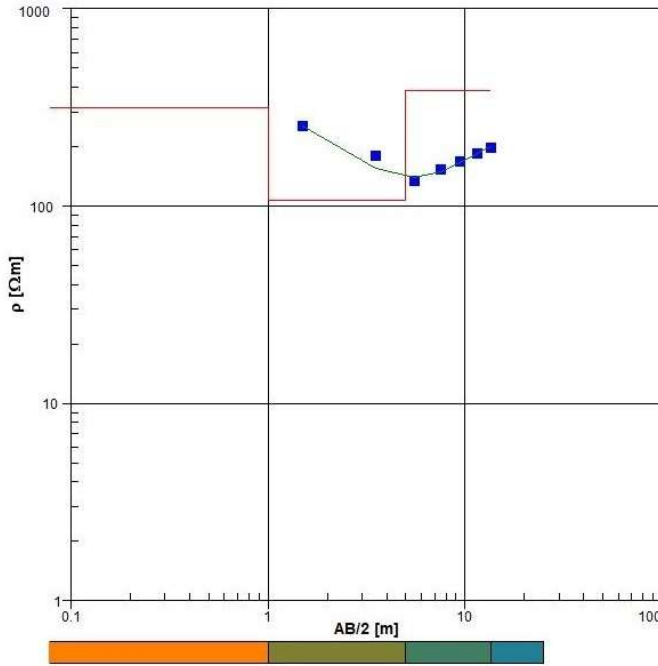
AB/2 [m]	Campo [Ω.m]	Teórico [Ω.m]
1.00	104	106
2.00	98.8	98.2
3.00	144	86.6
4.00	65.5	75.3
5.00	65.9	66.9
7.00	63.7	58.7
9.00	59.8	57.0
12.0	54.9	57.1
15.0	52.0	56.6
20.0	55.7	53.2
25.0	47.5	48.5

N° Capa	Espesor [m]	Profund. [m]	ρ Verd. [Ω.m]
1	2.00	2.00	107
2	2.00	4.00	31.0
3	7.00	11.0	85.3
4			25.2

Referencias
■ PCampo
▭ Pteórico
— Corte
— Eléctrico

Campaña	Perfil	Fecha
2017	1	26-03-2017
Comitente	Operador	Intérprete
	Chury Mario	Mario Chury

SEV N° 9



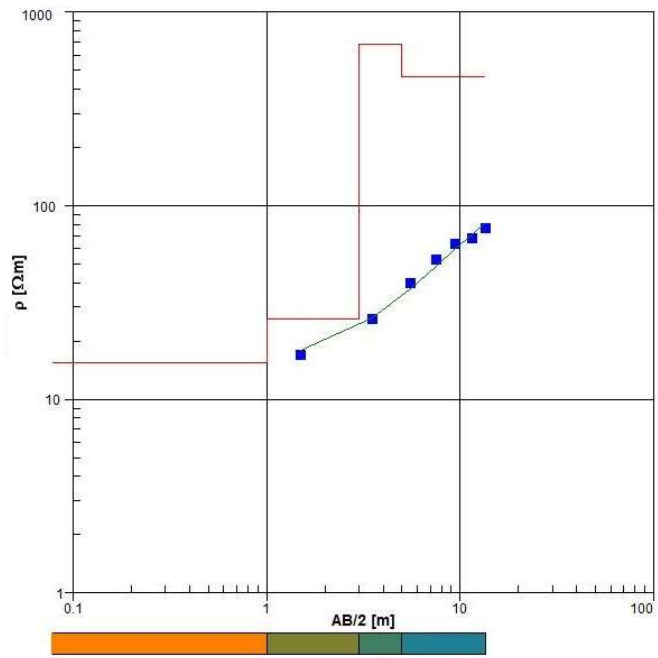
AB/2 [m]	Campo [Ω.m]	Teórico [Ω.m]
1.50	254	254
3.50	179	155
5.50	135	140
7.50	154	150
9.50	168	167
11.5	185	184
13.5	197	200

N° Capa	Esesor [m]	Profund. [m]	ρVerd. [Ω.m]
1	1.00	1.00	313
2	4.00	5.00	107
3			383

Referencias	
<span style="color: blue;">■</span>	ρCampo
<span style="color: red;">—</span>	ρTeórico
<span style="color: green;">—</span>	Corte Eléctrico

Campaña	Perfil	Fecha
2017		11-11-2017
Comitente	Operador	Intérprete
	Mario Chury	Mario Chury

SEV N° 10



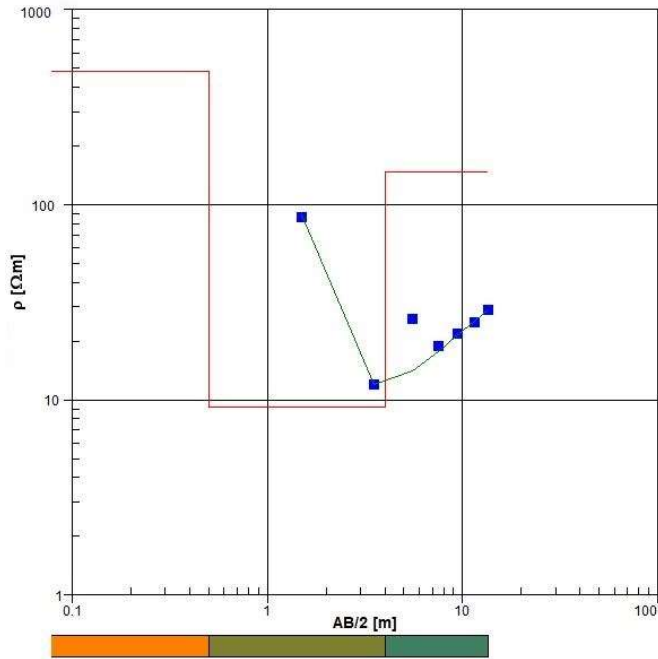
AB/2 [m]	Campo [Ω.m]	Teórico [Ω.m]
1.50	17.0	17.8
3.50	26.0	26.5
5.50	40.0	37.3
7.50	53.0	48.9
9.50	64.0	60.3
11.5	68.0	71.2
13.5	77.0	81.7

N° Capa	Esesor [m]	Profund. [m]	ρVerd. [Ω.m]
1	1.00	1.00	15.5
2	2.00	3.00	26.1
3	2.00	5.00	683
4			467

Referencias	
<span style="color: blue;">■</span>	ρCampo
<span style="color: red;">—</span>	ρTeórico
<span style="color: green;">—</span>	Corte Eléctrico

Campaña	Perfil	Fecha
2017		11-11-2017
Comitente	Operador	Intérprete
	Mario Chury	Mario Chury

SEV N° 11



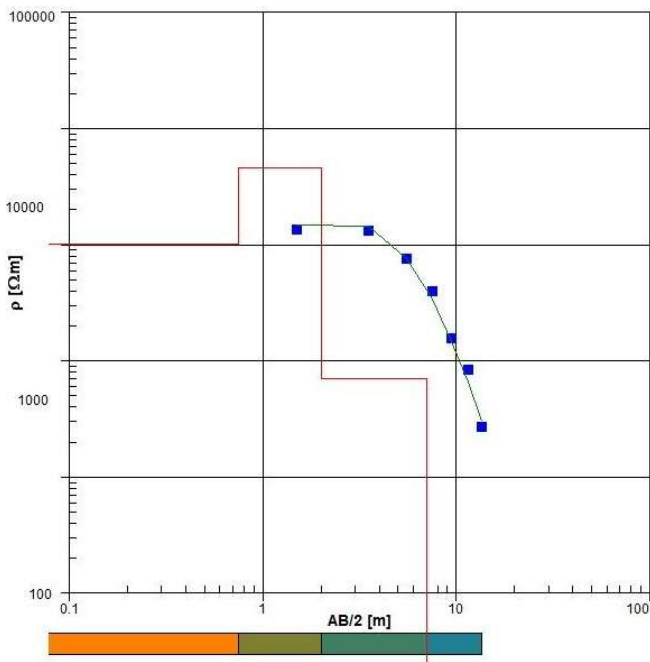
AB/2 [m]	Campo [Ω.m]	Teórico [Ω.m]
1.50	87.0	89.3
3.50	12.0	12.1
5.50	26.0	14.1
7.50	19.0	17.7
9.50	22.0	21.6
11.5	25.0	25.4
13.5	29.0	29.0

N° Capa	Espesor [m]	Profund. [m]	ρ Verd. [Ω.m]
1	0.50	0.50	481
2	3.50	4.00	9.15
3			147

Referencias	
■	ρ Campo
—	ρ Teórico
—	Corte
—	Eléctrico

Campaña	Perfil	Fecha
2017		11-11-2017
Comitente	Operador	Intérprete
	Mario Chury	Mario Chury

SEV N° 12



AB/2 [m]	Campo [Ω.m]	Teórico [Ω.m]
1.50	7592	7967
3.50	7442	7848
5.50	5342	5363
7.50	3619	3291
9.50	2073	1990
11.5	1429	1227
13.5	722	777

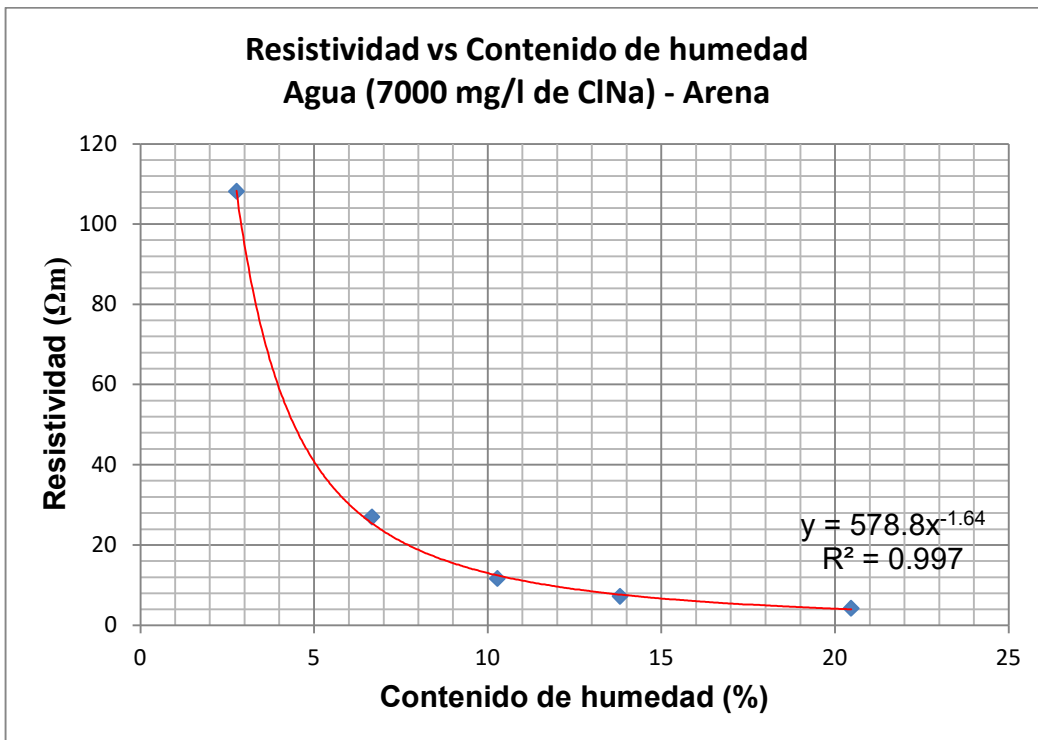
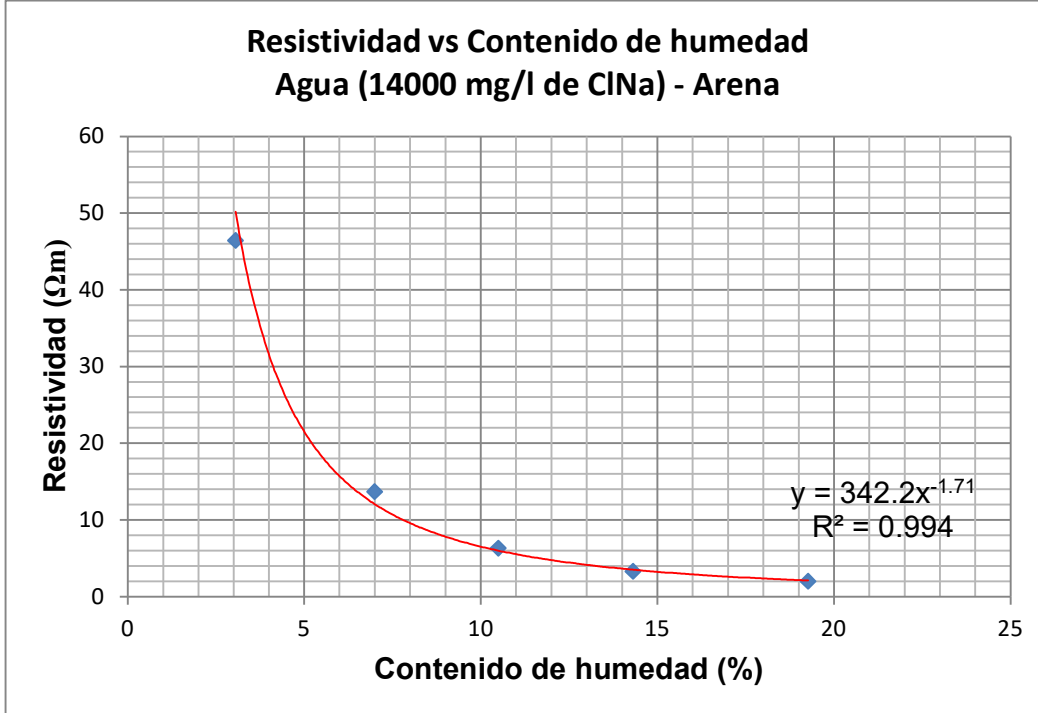
N° Capa	Espesor [m]	Profund. [m]	ρ Verd. [Ω.m]
1	0.75	0.75	6402
2	1.25	2.00	15709
3	5.00	7.00	1284
4			26.6

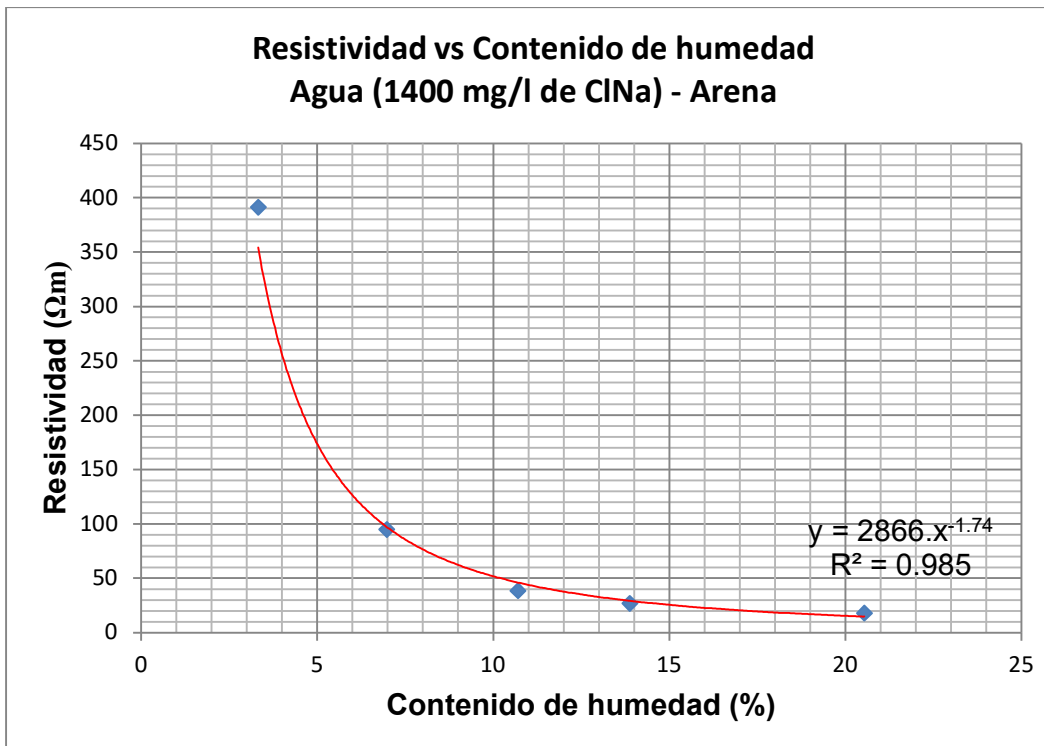
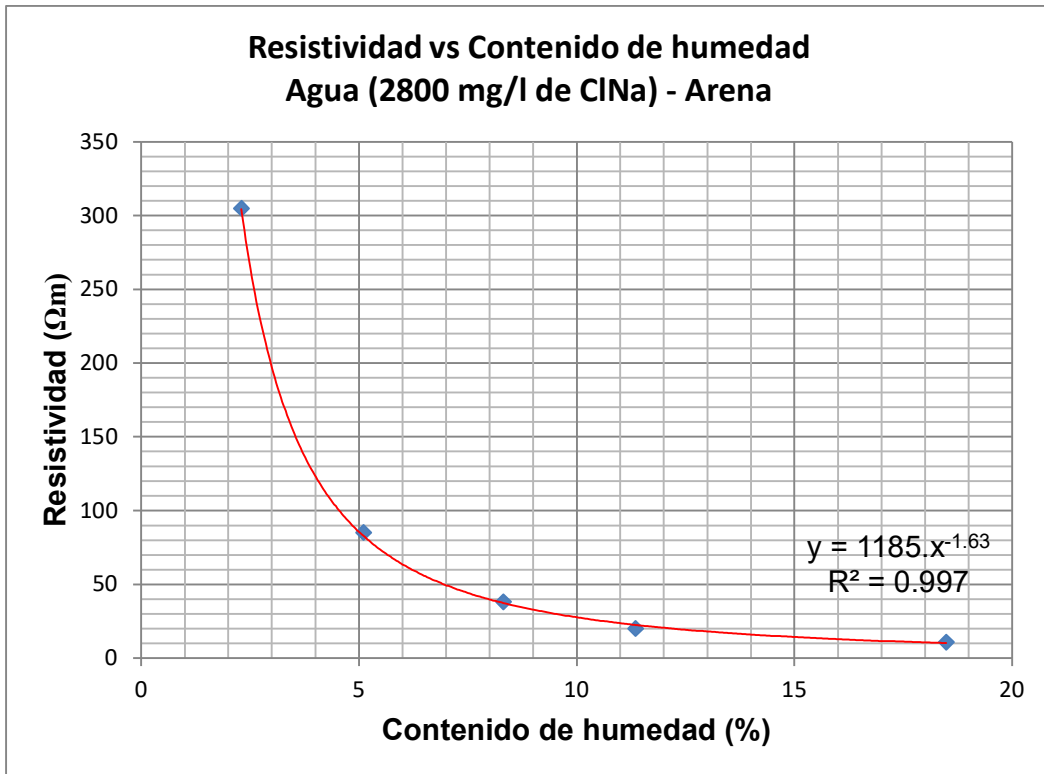
Referencias	
■	ρ Campo
—	ρ Teórico
—	Corte
—	Eléctrico

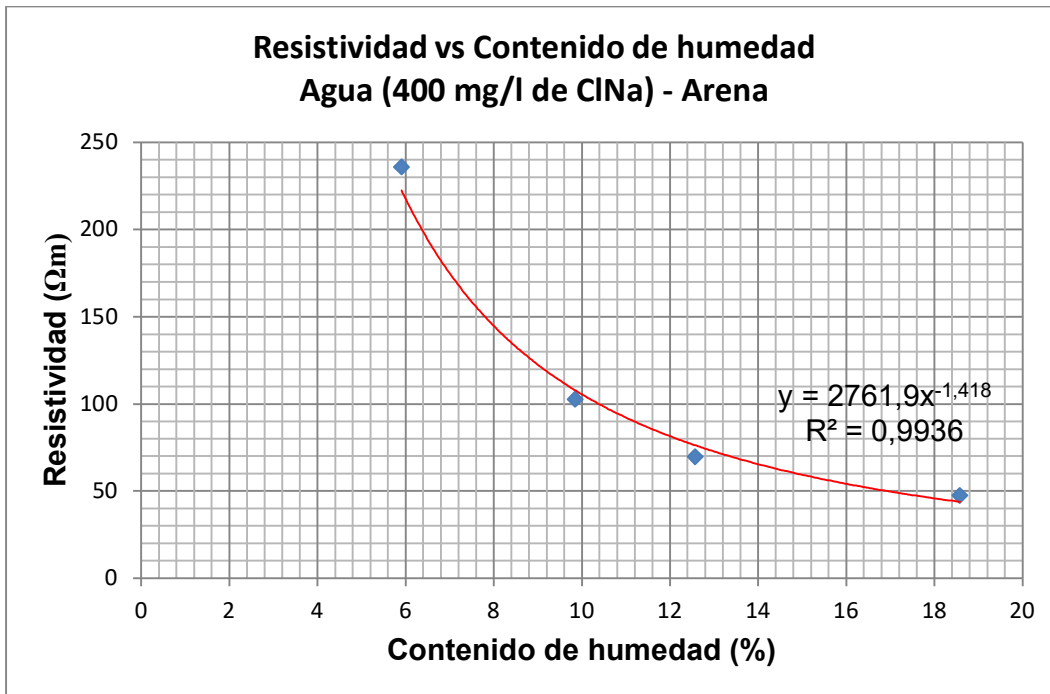
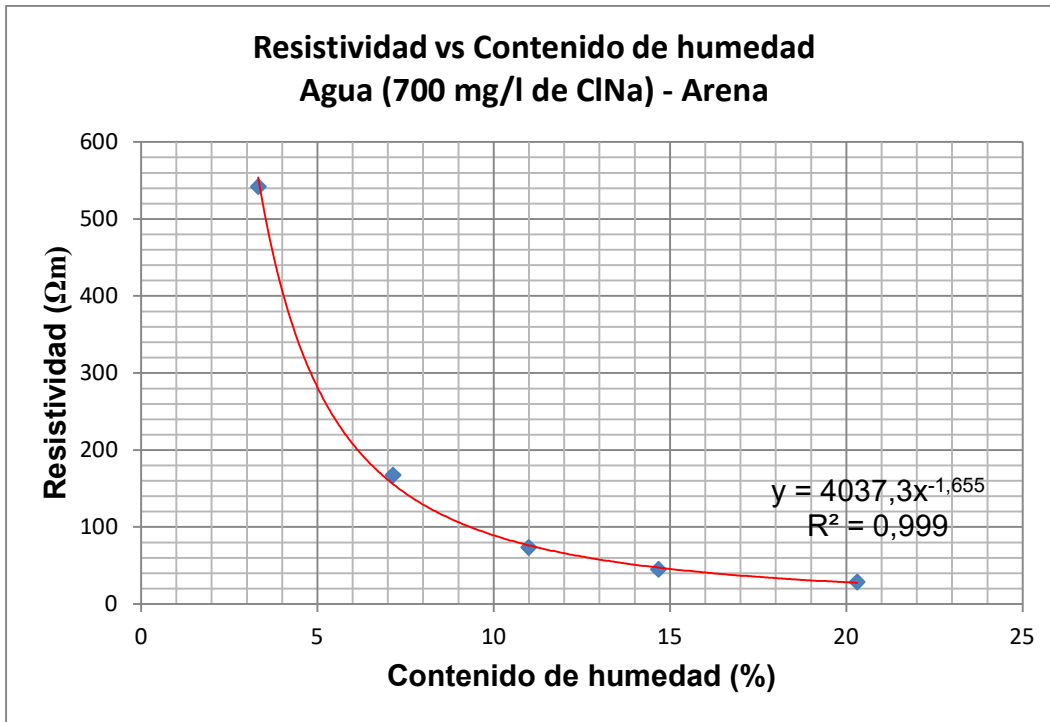
Campaña	Perfil	Fecha
2017		11-11-2017
Comitente	Operador	Intérprete
	Mario Chury	Mario Chury

## ANEXO D. Mediciones en laboratorio de resistividad eléctrica de muestras seleccionadas

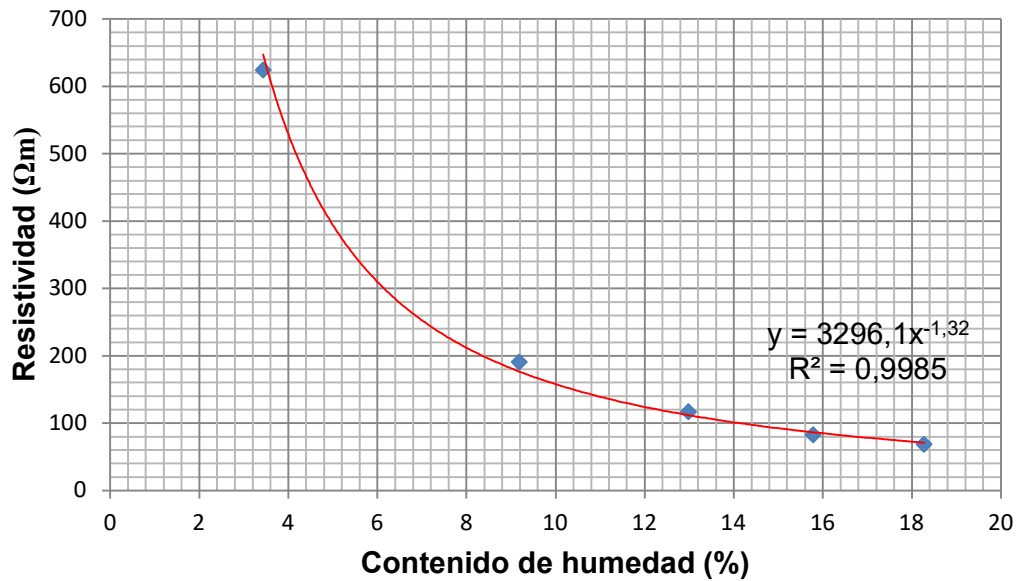
Correlaciones entre resistividad eléctrica y contenido de agua, en muestra de arena



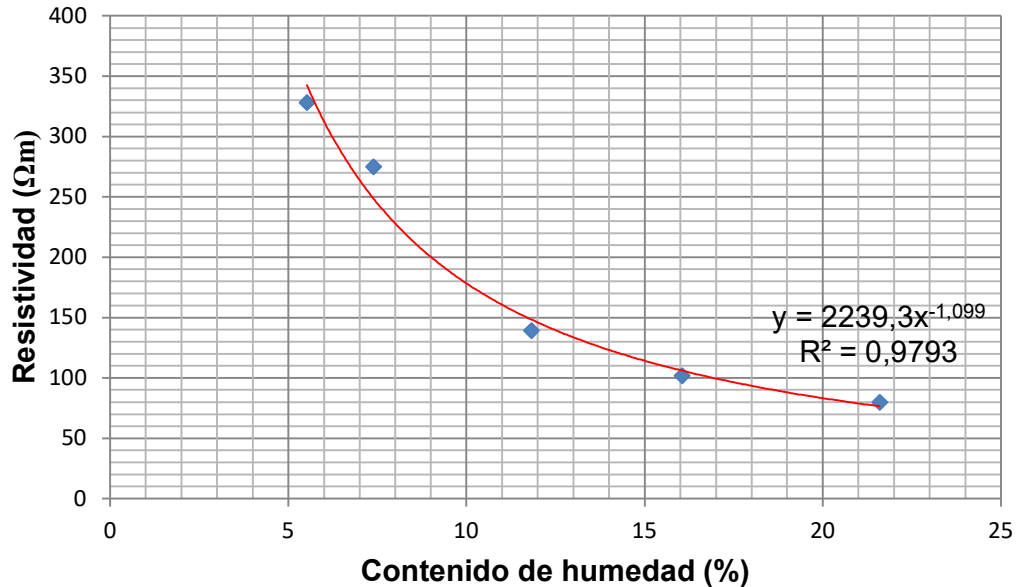




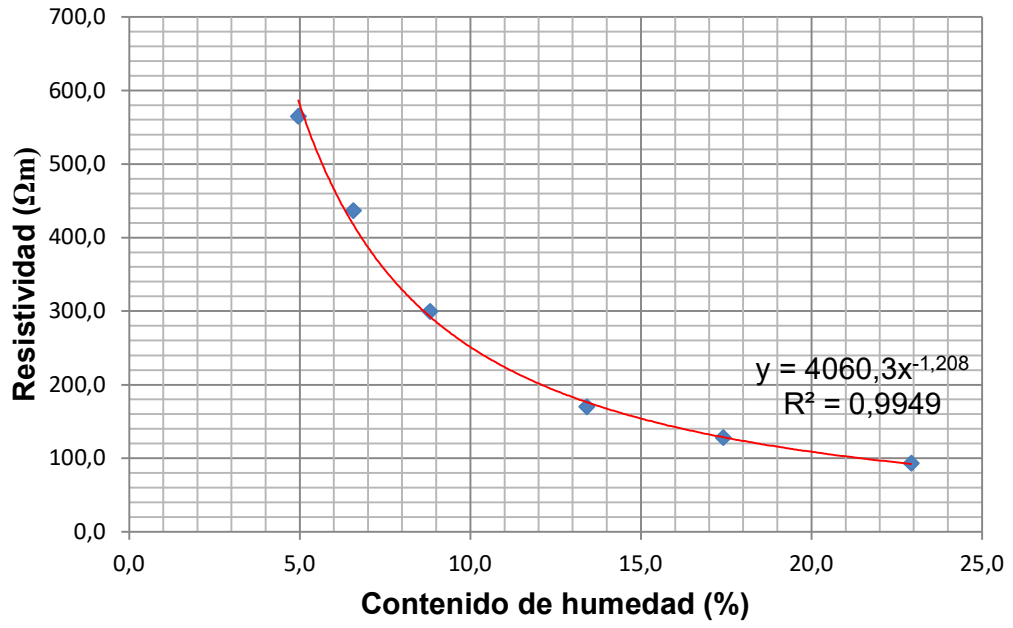
**Resistividad vs Contenido de humedad  
Agua (250 mg/l de ClNa) - Arena**



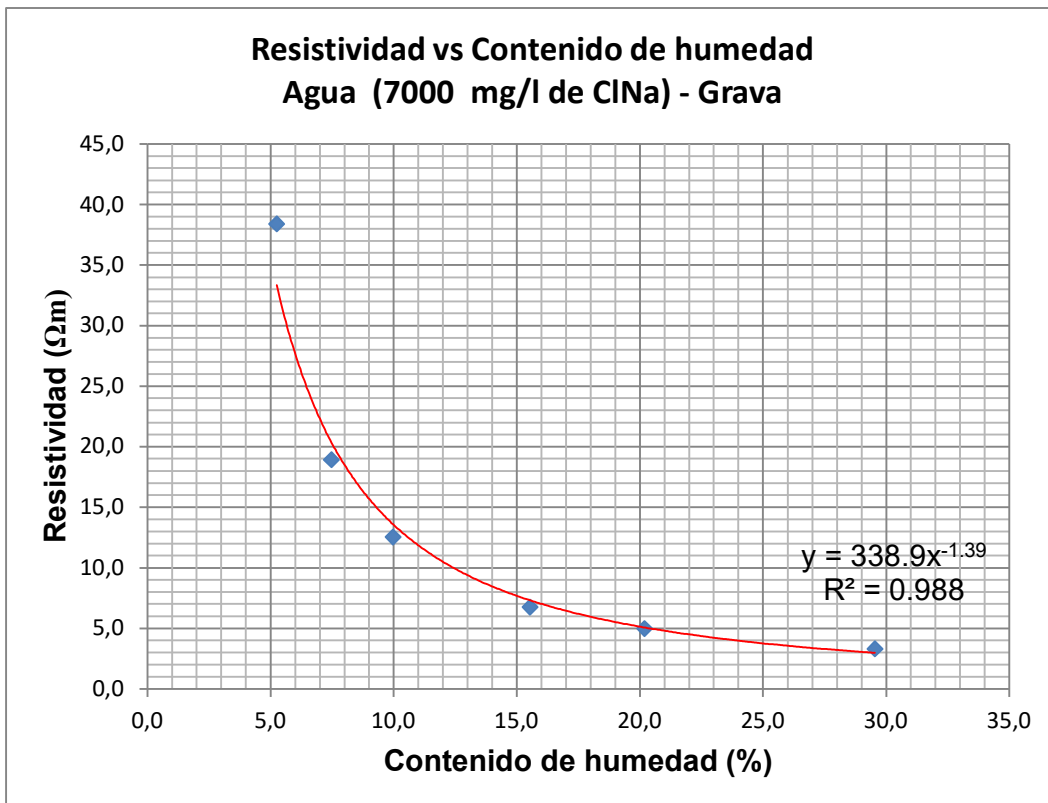
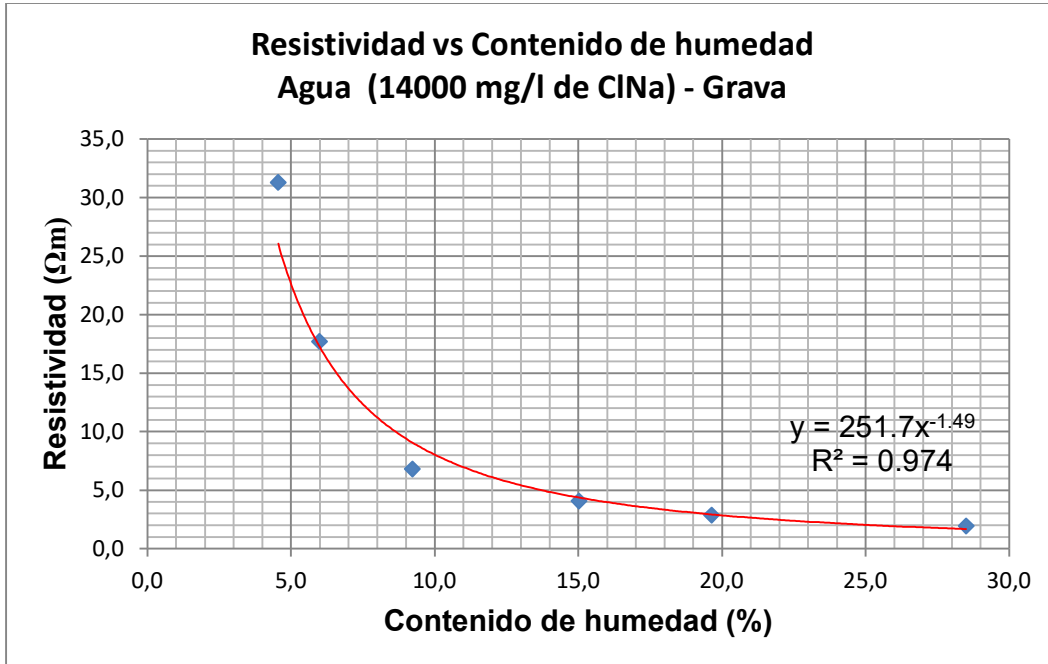
**Resistividad vs Contenido de humedad  
Agua (200 mg/l de ClNa) - Arena**

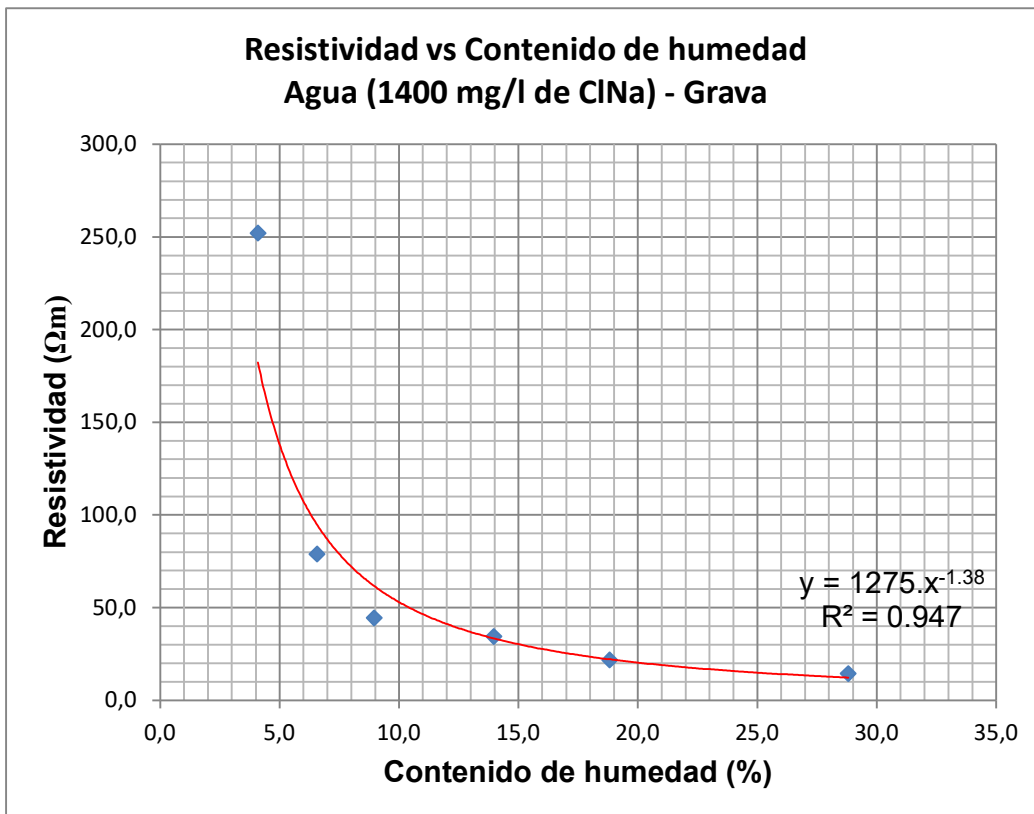
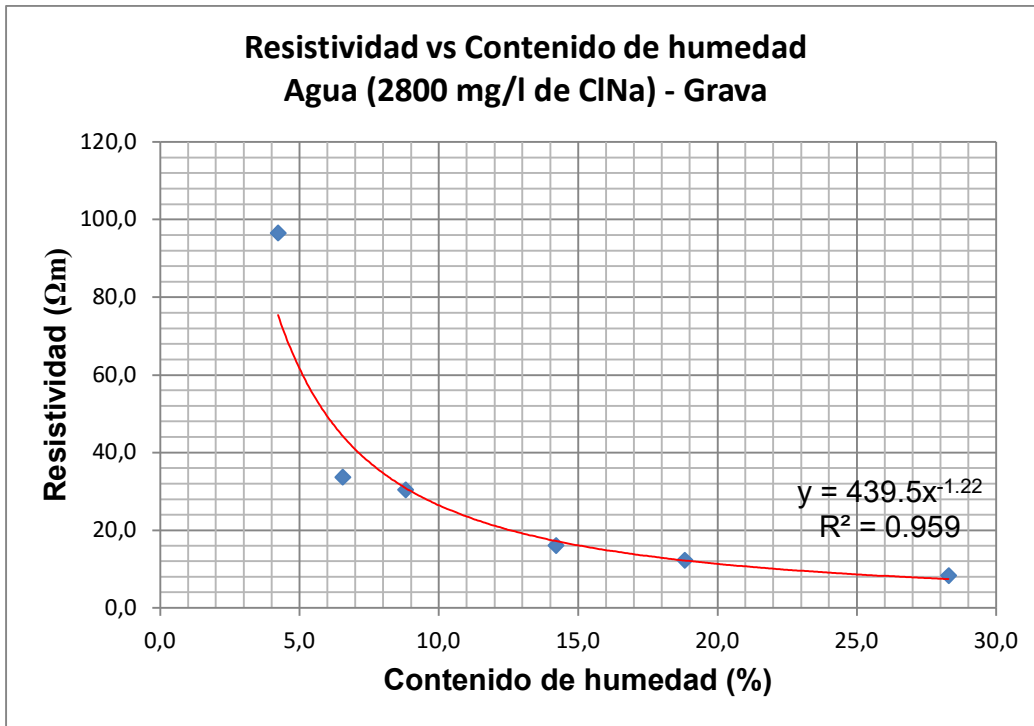


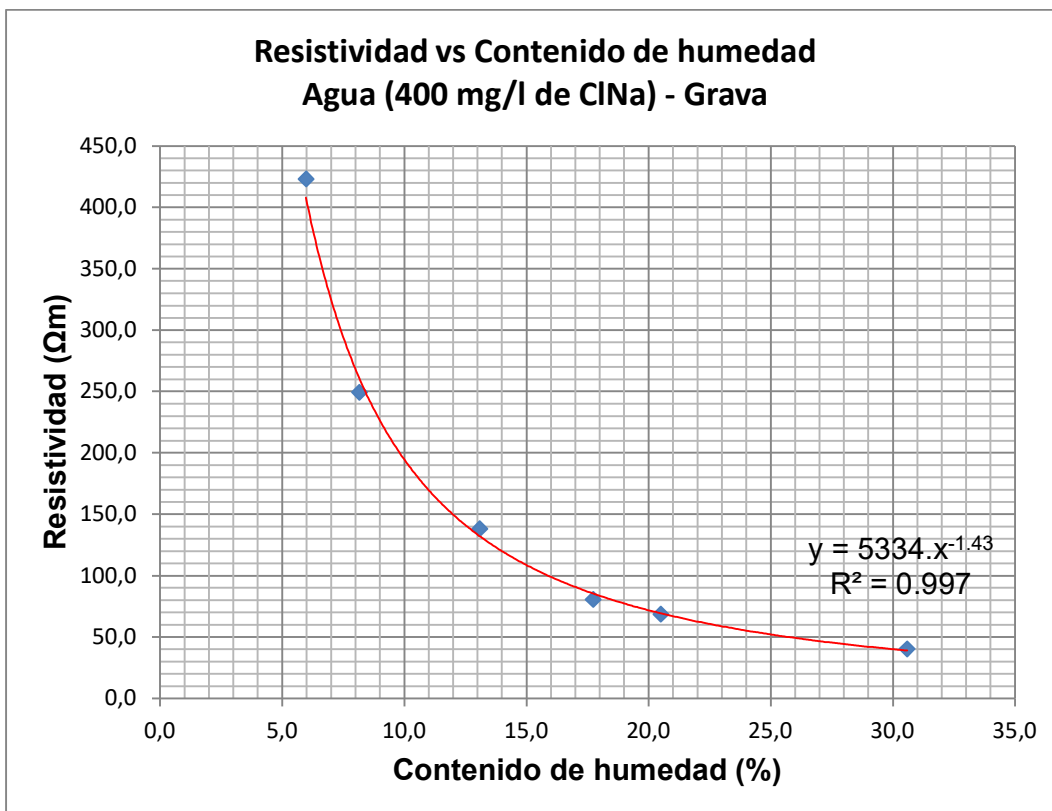
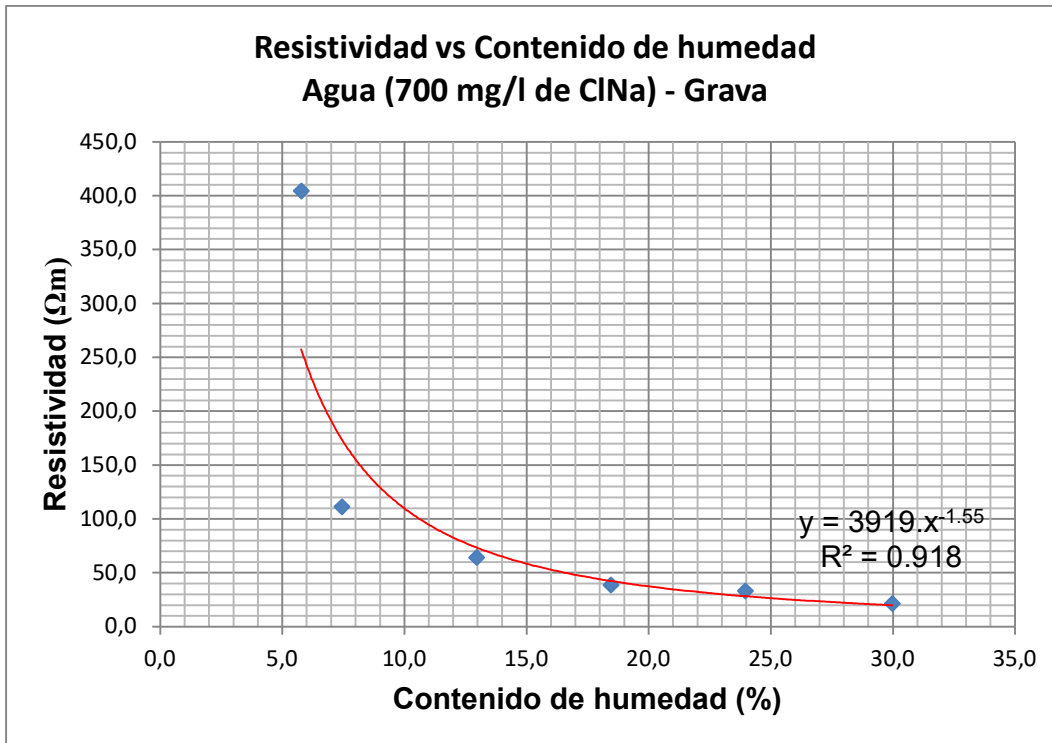
**Resistividad vs Contenido de humedad  
Agua (180 mg/l de ClNa) - Arena**

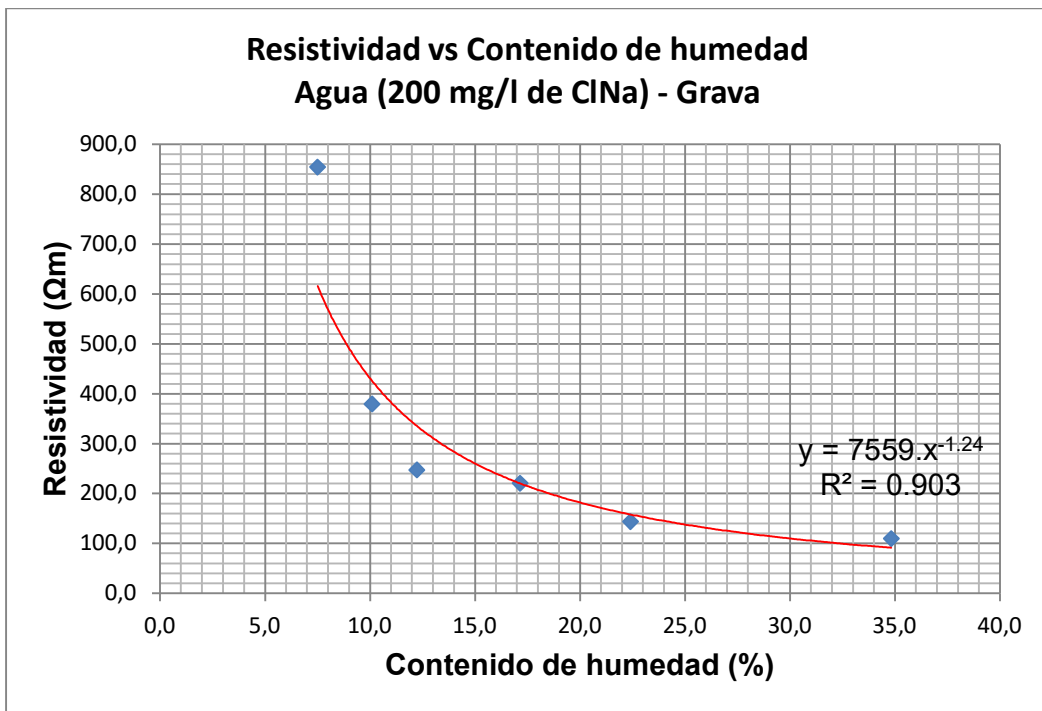
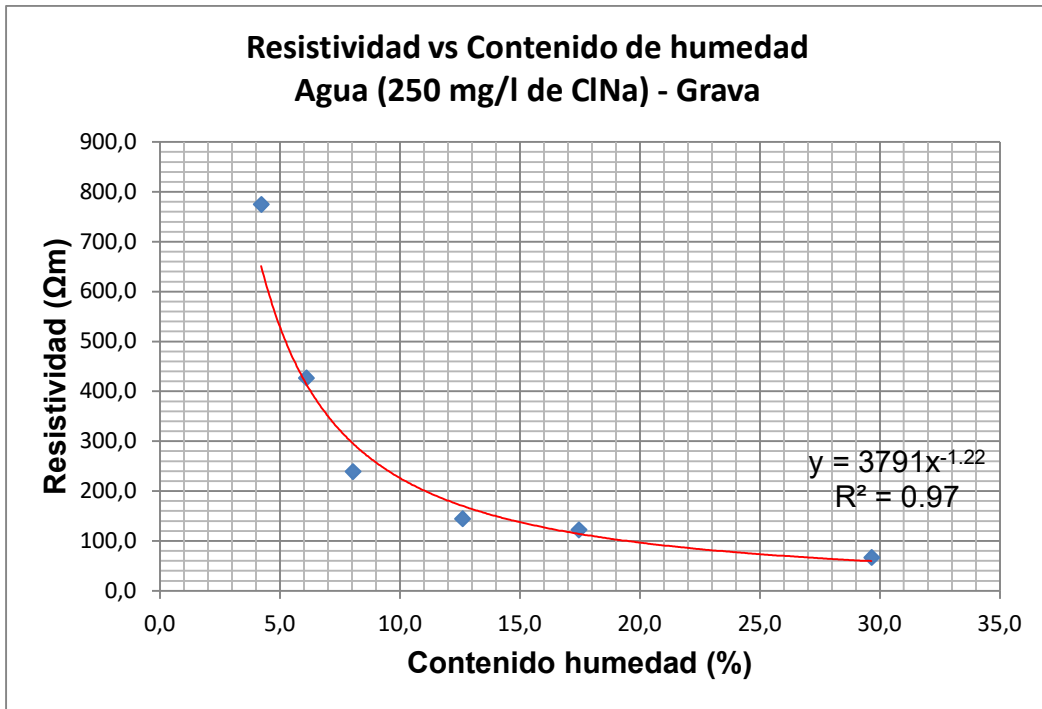


**Correlaciones entre resistividad eléctrica vs contenido de agua, en muestra de grava**

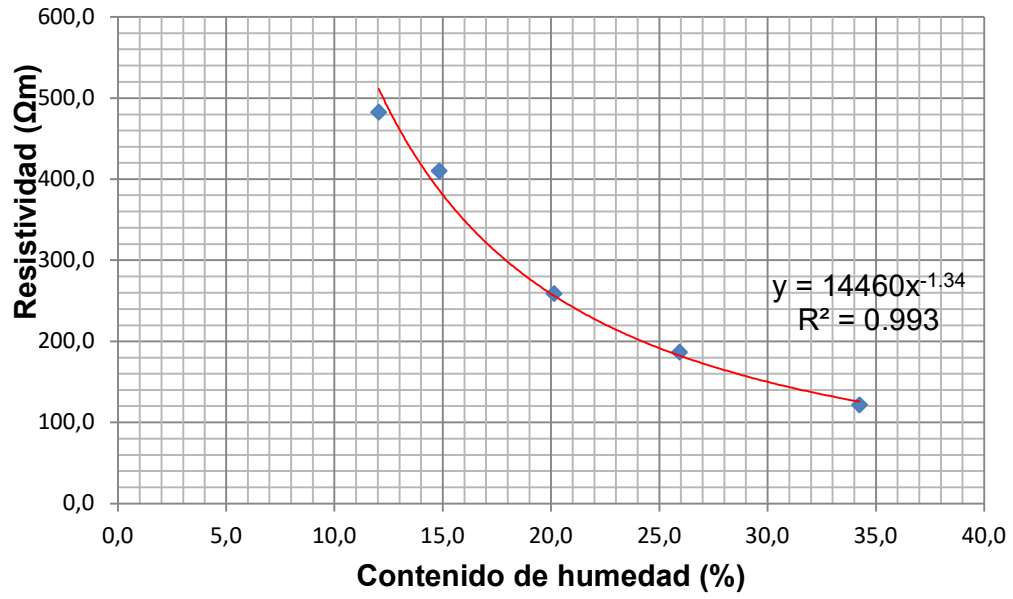




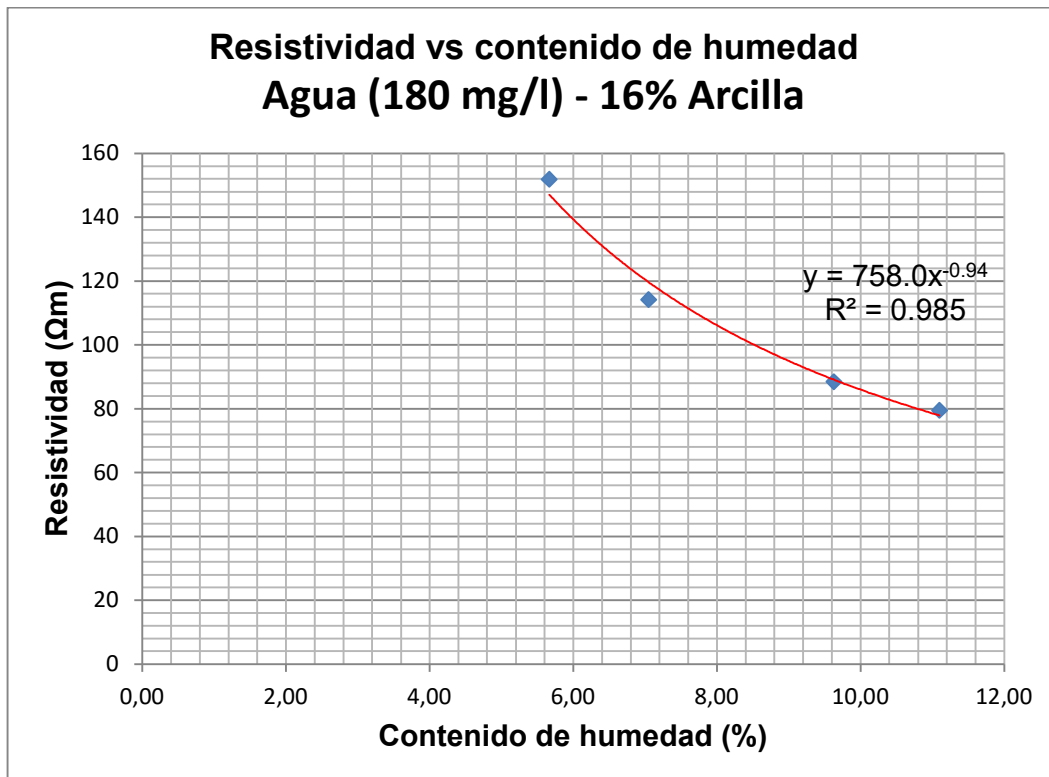
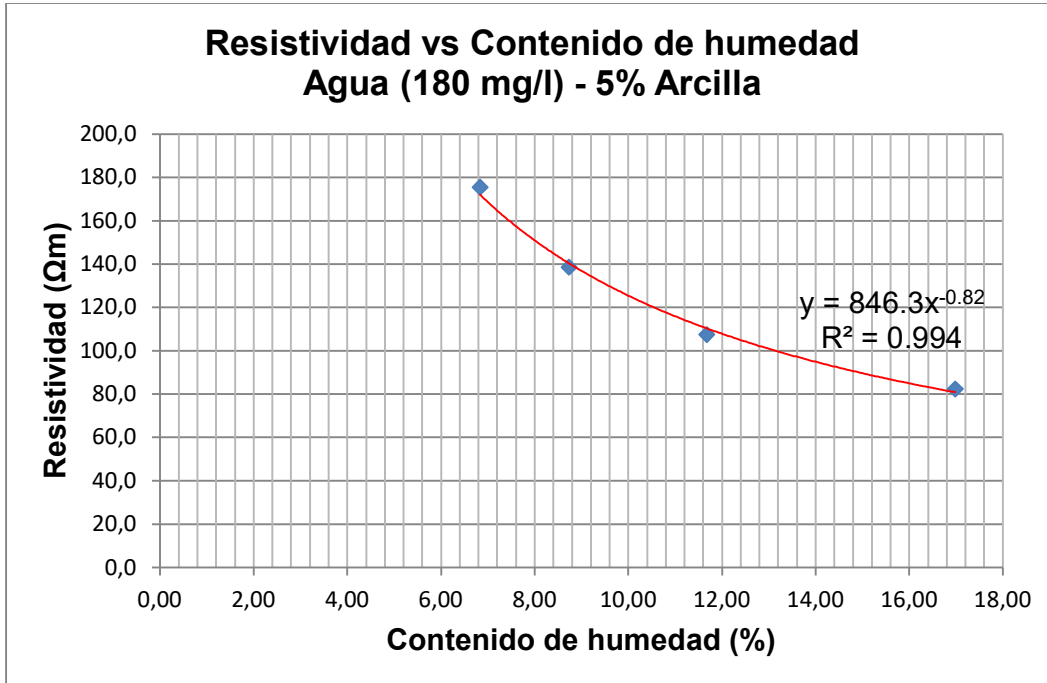




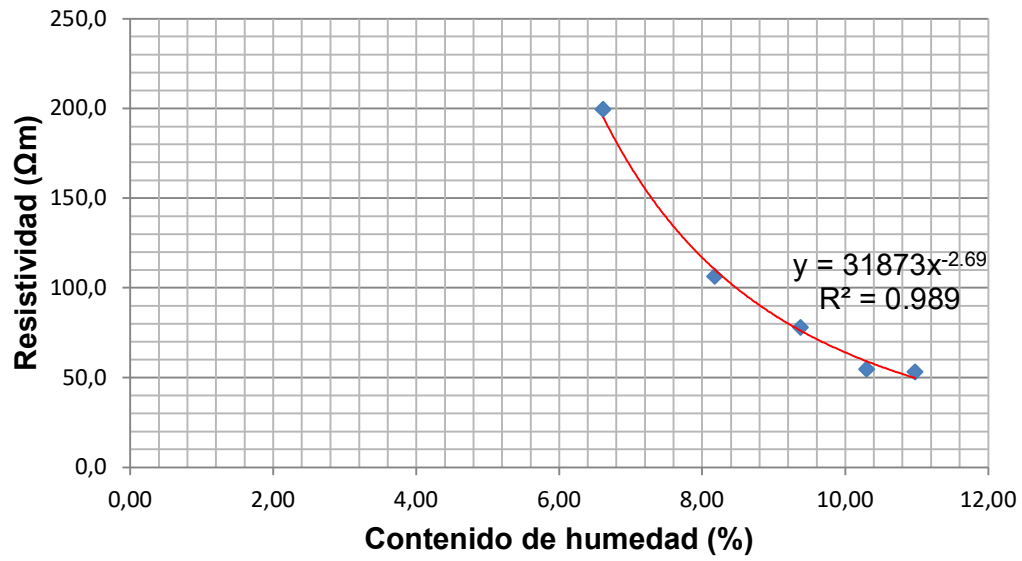
**Resistividad vs Contenido de humedad**  
**Agua (180 mg/l de ClNa) - Grava**



**Correlaciones resistividad eléctrica vs contenido de agua, en muestra de arena con arcillas**



**Resistividad vs contenido de humedad  
Agua (180 mg/l) - 40% Arcilla**



# ANEXO E. Datos geomecánicos en estudio paramétrico



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL  
Facultad Regional Concordia

## PLANILLA DE ENSAYO - ANÁLISIS HIDROMÉTRICO - LÍMITES DE ATTERBERG

Fecha: 01/07/2021

### DATOS DE LA MUESTRA

Ubicación: El Palmar  
Muestra: M1  
Profundidad: Pozo 1 - 0,5m  
Defloculante: Hexametáfosfato de sodio  
Ws (gr): 100  
Tamizado: N°40

Día	Hora	Δt (min)	Temp (°C)	R (g/l)	Temp (°F)	CH (g/l)	R' (g/l)	α	ρ (%)	KL	Kg	Kn	d' (mm)	dreal (mm)
24-jun-21	#####	0												
		1	23.50	54.00	74.3	-5.54	48.46	1.00	48.46	0.700	1.000	0.960	0.0571	0.0384
		2	23.50	52.00	74.3	-5.54	46.46	1.00	46.46	0.715	1.000	0.960	0.0404	0.0277
		5	23.50	51.00	74.3	-5.54	45.46	1.00	45.46	0.720	1.000	0.960	0.0255	0.0177
		8	23.50	50.00	74.3	-5.54	44.46	1.00	44.46	0.725	1.000	0.960	0.0202	0.0141
		15	23.50	48.00	74.3	-5.54	42.46	1.00	42.46	0.740	1.000	0.960	0.0147	0.0105
		30	23.50	48.00	74.3	-5.54	42.46	1.00	42.46	0.740	1.000	0.960	0.0104	0.0074
		60	23.00	46.00	73.4	-5.72	40.28	1.00	40.28	0.750	1.000	0.965	0.0074	0.0053
		360	19.00	45.00	66.2	-7.36	37.64	1.00	37.64	0.755	1.000	1.000	0.0030	0.0023
		480	23.00	43.00	73.4	-5.72	37.28	1.00	37.28	0.765	1.000	0.965	0.0026	0.0019
		1832	19.00	41.00	66.2	-7.36	33.64	1.00	33.64	0.775	1.000	1.000	0.0013	0.0010

Lavado sobre tamiz N° 200:

PF N°	Tara (gr)	PSS + T (gr)	PSS (gr)
23	42.96	95.53	52.57

% pasante T N° 200 = 47.43

Ing. María Emilia Medina  
Laboratorio de suelos

Observaciones: .....

.....

.....





UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL  
Facultad Regional Concordia

**PLANILLA DE ENSAYO - ANÁLISIS HIDROMÉTRICO - LÍMITES DE ATTERBERG**

Fecha: .....

**DATOS DE LA MUESTRA**

**Ubicación:** El Palmar  
**Muestra:** M4  
**Profundidad:** Pozo 2 - 0,5m  
**Defloculante:** Hexametáfosfato de sodio  
**Ws (gr) :** 100  
**Tamizado:** N°10

Día	Hora	Δt (min)	Temp (°C)	R (g/l)	Temp (°F)	CH (g/l)	R' (g/l)	α	ρ (%)	KL	Kg	Kn	d' (mm)	dreal (mm)
		0												
		1	20.50	53.00	68.9	-6.74	46.26	1.00	46.26	0.710	1.000	0.990	0.0571	0.0402
		2	20.50	52.00	68.9	-6.74	45.26	1.00	45.26	0.715	1.000	0.990	0.0404	0.0286
		5	20.50	49.00	68.9	-6.74	42.26	1.00	42.26	0.735	1.000	0.990	0.0255	0.0186
		8	24.00	48.50	75.2	-5.36	43.14	1.00	43.14	0.740	1.000	0.955	0.0202	0.0143
		15	24.00	47.00	75.2	-5.36	41.64	1.00	41.64	0.745	1.000	0.955	0.0147	0.0105
		30	25.00	46.00	77.0	-4.90	41.10	1.00	41.10	0.750	1.000	0.945	0.0104	0.0074
		60	24.50	44.00	76.1	-5.17	38.83	1.00	38.83	0.760	1.000	0.950	0.0074	0.0053
		244	20.50	44.00	68.9	-6.74	37.26	1.00	37.26	0.760	1.000	0.990	0.0037	0.0028
		1188	21.00	43.00	69.8	-6.52	36.48	1.00	36.48	0.765	1.000	0.980	0.0017	0.0012
		1357	20.00	42.00	68.0	-6.90	35.10	1.00	35.10	0.770	1.000	1.000	0.0016	0.0012

Lavado sobre tamiz N° 200:

PF N°	Tara (gr)	PSS + T (gr)	PSS (gr)
62	44.6	97.86	53.26

% pasante T N° 200 = 46.74

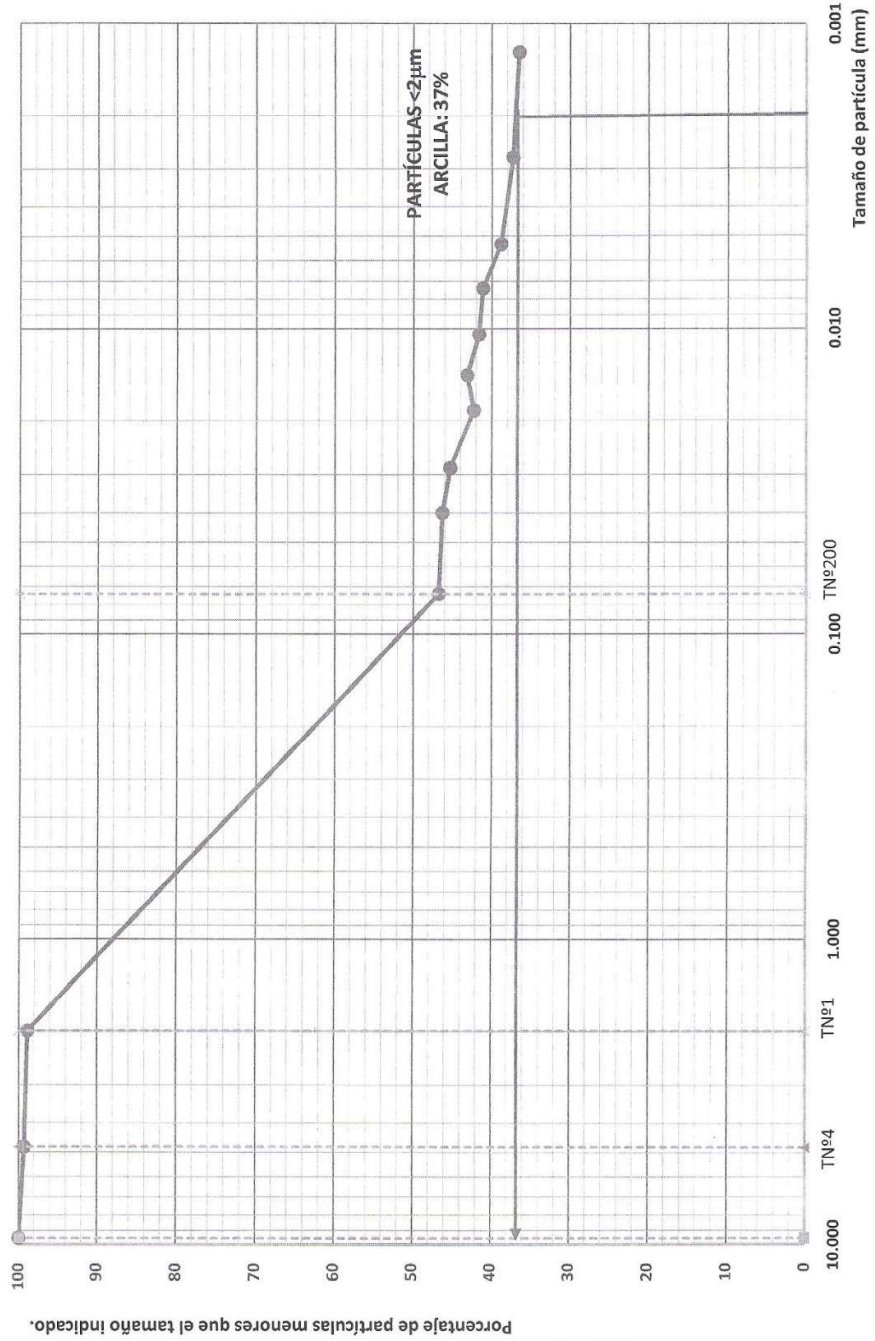
Ing. María Emilia Medina  
Laboratorio de suelos

**Observaciones:** .....

.....

.....

CURVA GRANULOMÉTRICA - Muestra 4



*Estudio*  
 Ing. María Emilia Medina  
 Laboratorio de suelos



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL  
Facultad Regional Concordia

**PLANILLA DE ENSAYO - ANÁLISIS HIDROMÉTRICO - LÍMITES DE ATTERBERG**

Fecha: .....

**DATOS DE LA MUESTRA**

**Ubicación:** El Palmar  
**Muestra:** M5  
**Profundidad:** Pozo 3 - 0,5m  
**Defloculante:** Hexametáfosfato de sodio  
**Ws (gr) :** 100  
**Tamizado:** N°10

Día	Hora	Δt (min)	Temp (°C)	R (g/l)	Temp (°F)	CH (g/l)	R' (g/l)	α	p (%)	KL	Kg	Kn	d' (mm)	dreal (mm)
		0												
		1	22.50	49.00	72.5	-5.95	43.05	1.00	43.05	0.730	1.000	0.965	0.0571	0.0402
		2	22.50	48.50	72.5	-5.95	42.55	1.00	42.55	0.732	1.000	0.965	0.0404	0.0285
		5	22.50	48.00	72.5	-5.95	42.05	1.00	42.05	0.735	1.000	0.965	0.0255	0.0181
		8	22.50	47.00	72.5	-5.95	41.05	1.00	41.05	0.740	1.000	0.965	0.0202	0.0144
		15	22.50	46.00	72.5	-5.95	40.05	1.00	40.05	0.745	1.000	0.965	0.0147	0.0106
		30	22.50	42.00	72.5	-5.95	36.05	1.00	36.05	0.765	1.000	0.965	0.0104	0.0077
		65	24.00	40.00	75.2	-5.16	34.84	1.00	34.84	0.780	1.000	0.955	0.0071	0.0053
		500	30.50	35.00	86.9	-2.73	32.27	1.00	32.27	0.815	1.000	0.895	0.0026	0.0019
		1140	18.00	40.00	64.4	-7.72	32.28	1.00	32.28	0.780	1.000	1.015	0.0017	0.0013
		1445	25.00	37.00	77.0	-4.90	32.10	1.00	32.10	0.800	1.000	0.945	0.0015	0.0011

Lavado sobre tamiz N° 200:

PF N°	Tara (gr)	PSS + T (gr)	PSS (gr)
M2	42.35	97.73	55.38

% pasante T N° 200 = 44.62

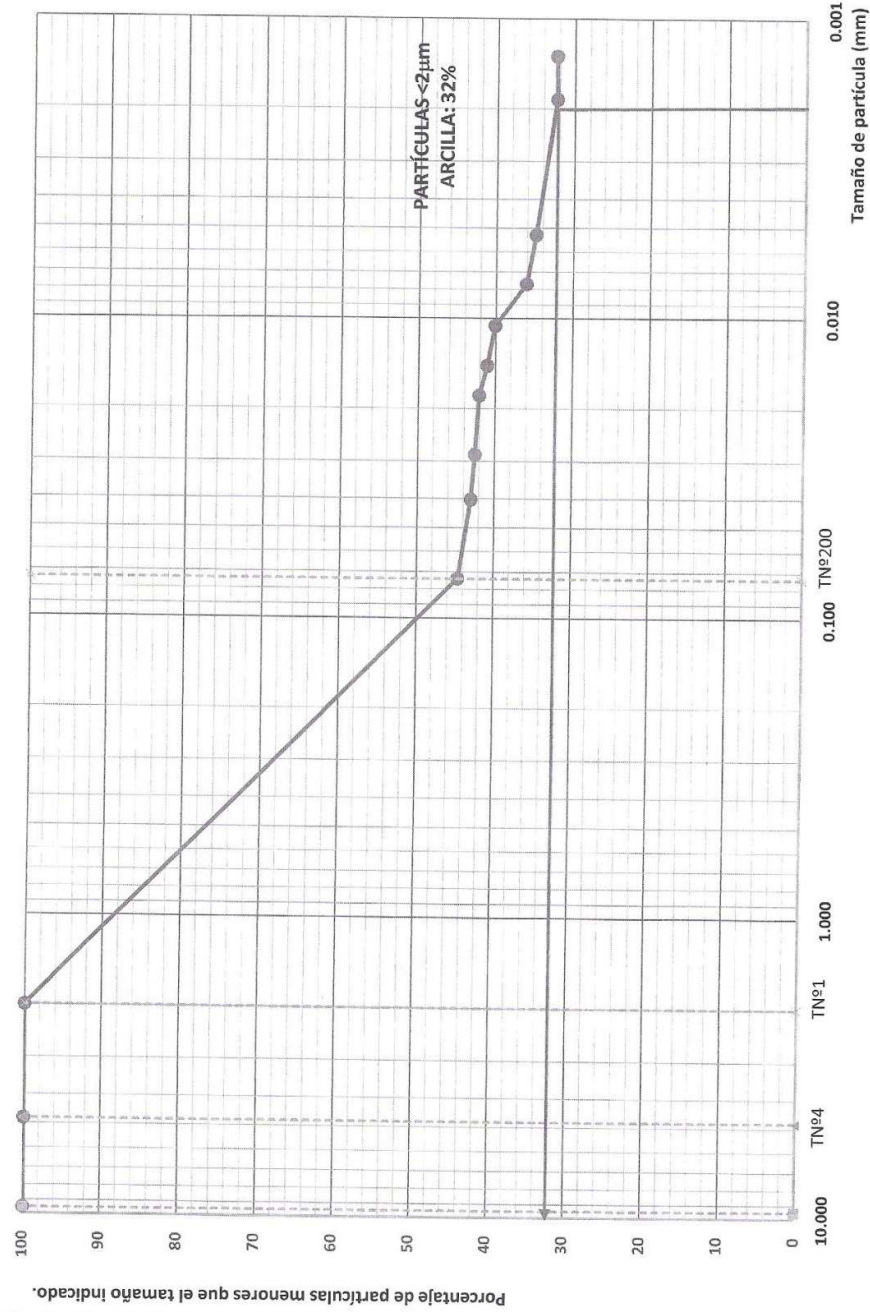
Ing. María Emilia Medina  
Laboratorio de suelos

Observaciones: .....

.....

.....

CURVA GRANULOMÉTRICA - Muestra 5



*Blade*  
 Ing. María Emilia Medina  
 Laboratorio de suelos



Universidad Tecnológica  
Nacional - Facultad  
Regional Concordia

OBBA:

UBICACIÓN: FIPalmar

M. ENSAYO: TRIAXIAL ESCALONADO

FECHA: 23/4/2021

Hoja  
N° 3 de 3

## Determinación de $Cu - \phi$

Resultados

Rotura N°:

Tensión de Confinam.:  $\sigma_3 = 0,5 \text{ kg/cm}^2$   
Tensión Desviante:  $\sigma_d = 1,24 \text{ kg/cm}^2$   
Tensión:  $\sigma_1 = 1,74 \text{ kg/cm}^2$

Rotura N°:

Tensión de Confinam.:  $\sigma_3 = 1 \text{ kg/cm}^2$   
Tensión Desviante:  $\sigma_d = 1,41 \text{ kg/cm}^2$   
Tensión:  $\sigma_1 = 2,41 \text{ kg/cm}^2$

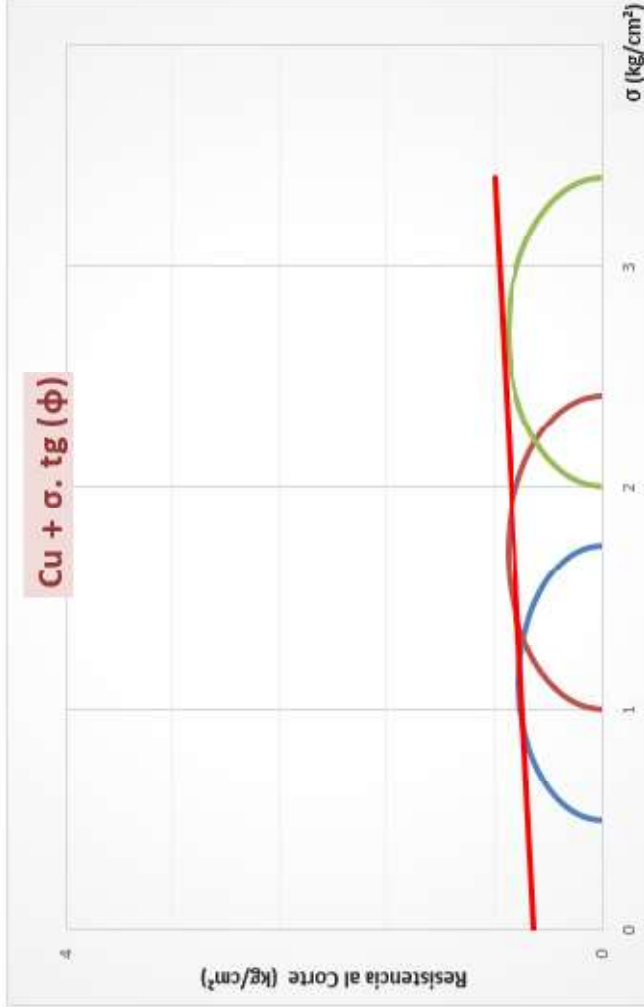
Rotura N°:

Tensión de Confinam.:  $\sigma_3 = 2 \text{ kg/cm}^2$   
Tensión Desviante:  $\sigma_d = 1,40 \text{ kg/cm}^2$   
Tensión:  $\sigma_1 = 3,40 \text{ kg/cm}^2$

**Cu = 0,5**

**$\phi = 5$**

Cu +  $\sigma \cdot \text{tg}(\phi)$





UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL  
Facultad Regional Concordia

**PLANILLA DE ENSAYO - ANÁLISIS HIDROMÉTRICO - LÍMITES DE ATTERBERG**

Fecha: 24/06/2021

**DATOS DE LA MUESTRA**

Ubicación: El Palmar  
Muestra: M2  
Profundidad: Pozo 1 - 1m  
Defloculante: Hexametáfosfato de sodio  
Ws (gr): 50  
Tamizado: N°40

Día	Hora	$\Delta t$ (min)	Temp (°C)	R (g/l)	Temp (°F)	CH (g/l)	R' (g/l)	$\alpha$	$\rho$ (%)	KL	Kg	Kn	d' (mm)	dreal (mm)
24-jun-21	#####	0												
		1	19.50	26.00	67.1	-7.17	18.83	1.00	37.66	0.860	1.000	1.010	0.0571	0.0496
		2	19.50	25.00	67.1	-7.17	17.83	1.00	35.66	0.870	1.000	1.010	0.0404	0.0355
		5	19.50	24.00	67.1	-7.17	16.83	1.00	33.66	0.870	1.000	1.010	0.0255	0.0224
		8	19.50	24.00	67.1	-7.17	16.83	1.00	33.66	0.870	1.000	1.010	0.0202	0.0177
		15	20.50	22.00	68.9	-6.72	15.28	1.00	30.56	0.880	1.000	0.990	0.0147	0.0128
		30	21.00	22.00	69.8	-6.54	15.46	1.00	30.92	0.880	1.000	1.000	0.0104	0.0092
		60	20.50	21.00	68.9	-6.72	14.28	1.00	28.56	0.890	1.000	0.990	0.0074	0.0065
		1506	19.00	20.00	66.2	-7.36	12.64	1.00	25.28	0.880	1.000	1.000	0.0015	0.0013

Lavado sobre tamiz N° 200:

PF N°	Tara (gr)	PSS + T (gr)	PSS (gr)
21	47.66	78.7	31.04

% pasante T N° 200 = 37.92

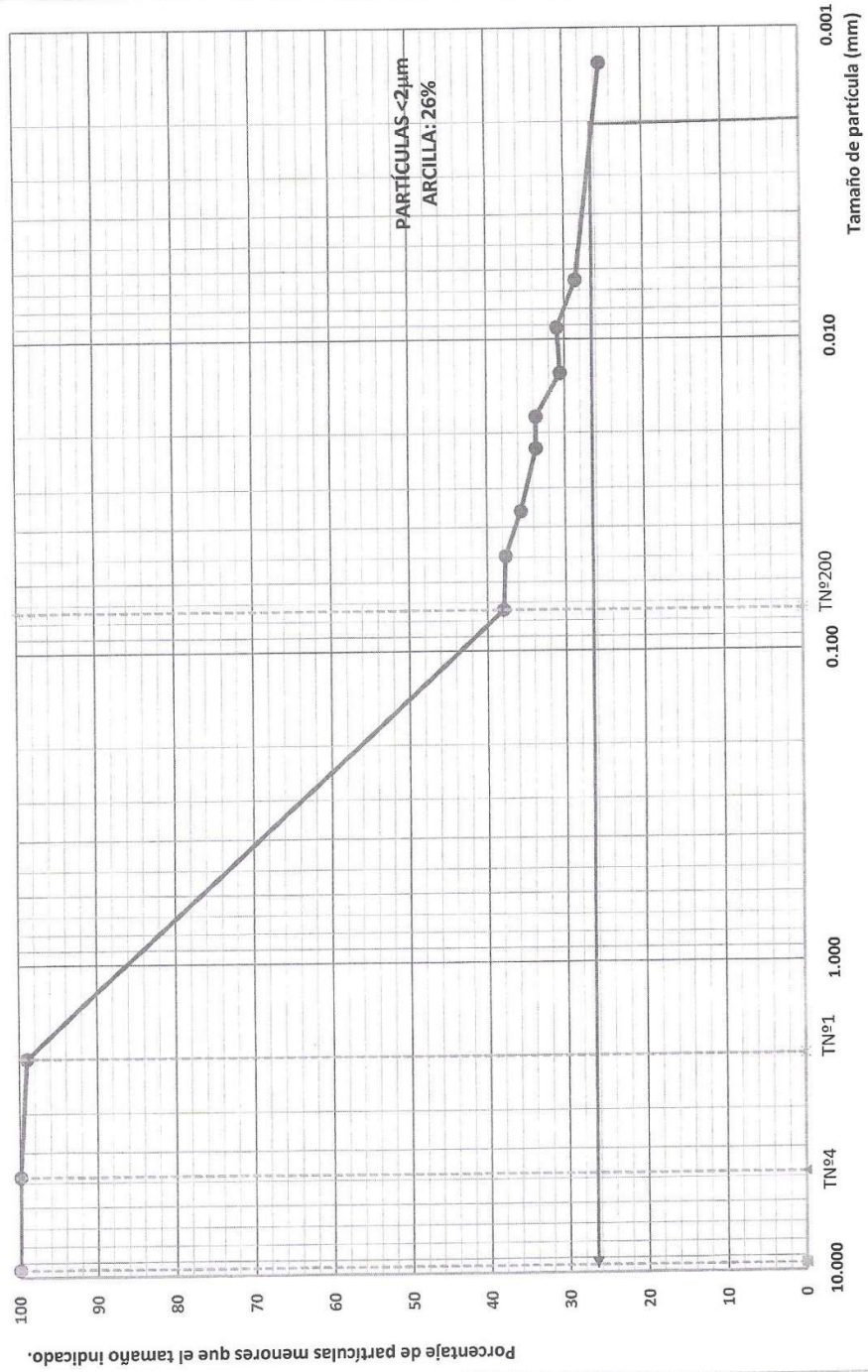
Ing. María Emilia Medina  
Laboratorio de suelos

Observaciones: .....

.....

.....

### CURVA GRANULOMÉTRICA - Muestra 2



Ing. María Emilia Medina  
Laboratorio de suelos



Universidad Tecnológica  
Nacional - Facultad  
Regional Concordia

OBRA:  
UBICACIÓN  
N.

El Palmar

ENSAYO: TRIAXIAL ESCALONADO

FECHA: 23/4/2021

Hoja  
N° 3 de 3

## Determinación de $C_u - \phi$

Resultados

Rotura N°:

Tensión de Confinam.:  $\sigma_3 = 0,5 \text{ kg/cm}^2$   
Tensión Desviante:  $\sigma_4 = 2,70 \text{ kg/cm}^2$   
Tensión  $\sigma_1 = 3,20 \text{ kg/cm}^2$

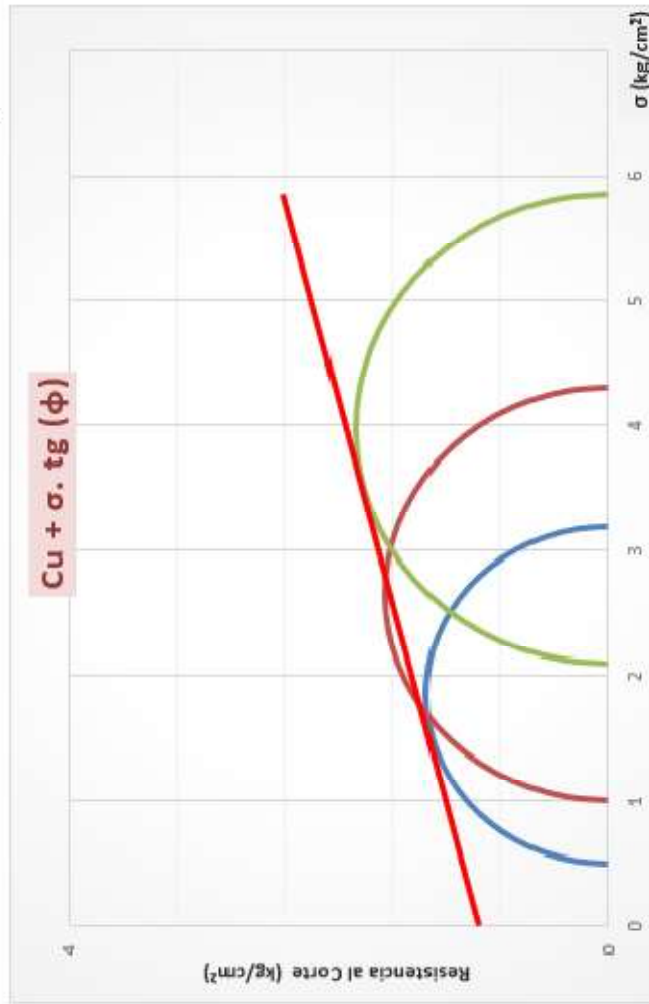
Rotura N°:

Tensión de Confinam.:  $\sigma_3 = 1 \text{ kg/cm}^2$   
Tensión Desviante:  $\sigma_4 = 3,30 \text{ kg/cm}^2$   
Tensión  $\sigma_1 = 4,30 \text{ kg/cm}^2$

Rotura N°:

Tensión de Confinam.:  $\sigma_3 = 2,1 \text{ kg/cm}^2$   
Tensión Desviante:  $\sigma_4 = 3,75 \text{ kg/cm}^2$   
Tensión  $\sigma_1 = 5,85 \text{ kg/cm}^2$

**$C_u = 0,95$**   
 **$\phi = 14$**





UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL  
Facultad Regional Concordia

**PLANILLA DE ENSAYO - ANÁLISIS HIDROMÉTRICO - LÍMITES DE ATTERBERG**

Fecha: .....

**DATOS DE LA MUESTRA**

**Ubicación:** El Palmar  
**Muestra:** M3  
**Profundidad:** Pozo 1 - 1,5m  
**Defloculante:** Hexametáfosfato de sodio  
**Ws (gr) :** 100  
**Tamizado:** N°10

Día	Hora	Δt (min)	Temp (°C)	R (g/l)	Temp (°F)	CH (g/l)	R' (g/l)	α	ρ (%)	KL	Kg	Kn	d' (mm)	dreal (mm)
		0												
		1	22.00	29.00	71.6	-6.18	22.82	1.00	22.82	0.850	1.000	0.975	0.0571	0.0473
		2	22.00	27.50	71.6	-6.18	21.32	1.00	21.32	0.855	1.000	0.975	0.0404	0.0337
		5	22.00	25.50	71.6	-6.18	19.32	1.00	19.32	0.865	1.000	0.975	0.0255	0.0215
		8	24.00	25.00	75.2	-5.36	19.64	1.00	19.64	0.870	1.000	0.955	0.0202	0.0168
		15	26.50	24.00	79.7	-4.36	19.64	1.00	19.64	0.875	1.000	0.925	0.0147	0.0119
		30	27.50	23.00	81.5	-3.95	19.05	1.00	19.05	0.880	1.000	0.915	0.0104	0.0084
		60	26.00	23.00	78.8	-4.54	18.46	1.00	18.46	0.880	1.000	0.930	0.0074	0.0060
		244	21.00	25.00	69.8	-6.54	18.46	1.00	18.46	0.870	1.000	0.980	0.0037	0.0031
		1211	21.00	23.00	69.8	-6.54	16.46	1.00	16.46	0.880	1.000	0.980	0.0016	0.0014
		1380	20.00	23.00	68.0	-6.90	16.10	1.00	16.10	0.880	1.000	1.000	0.0015	0.0014

Lavado sobre tamiz N° 200:

PF N°	Tara (gr)	PSS + T (gr)	PSS (gr)
240	44.02	121.94	77.92

% pasante T N° 200 = 22.08

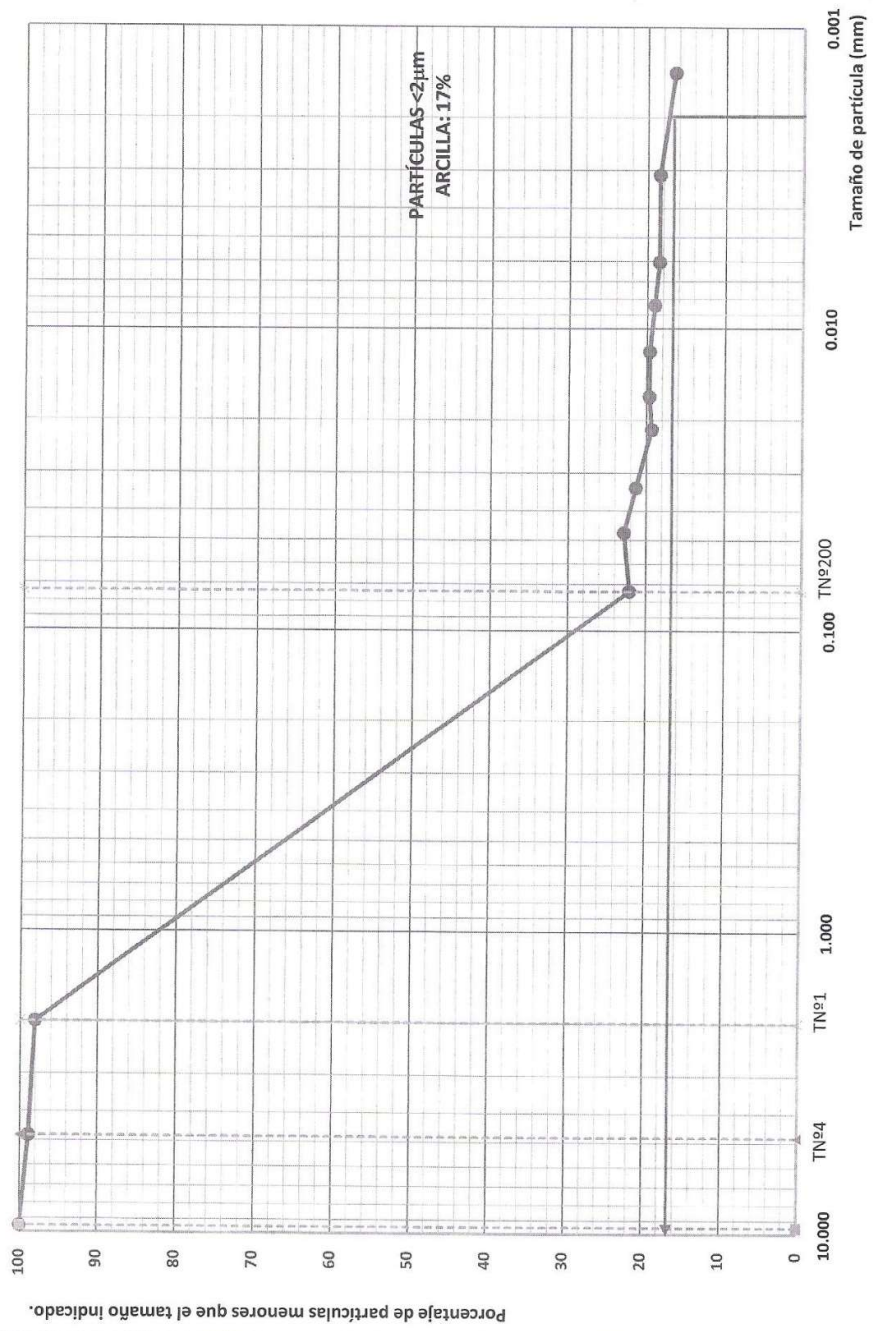
Ing. María Emilia Medina  
Laboratorio de suelos

**Observaciones:** .....

.....

.....

CURVA GRANULOMÉTRICA - Muestra 3



  
 Ing. María Emilia Medina  
 Laboratorio de Suelos



Universidad Tecnológica  
Nacional - Facultad  
Regional Concordia

OBBA:

TUBICACION El Palmar

M. ENSAYO: TRIAXIAL ESCALONADO

FECHA: 23/4/2021

Hoja  
N° 3 de 3

### Determinación de $C_u - \phi$

Resultados

Rotura N°:

Tensión de Confinam.:  $\sigma_3 = 0,5 \text{ kg/cm}^2$   
Tensión Desviante:  $\sigma_4 = 2,15 \text{ kg/cm}^2$   
Tensión:  $\sigma_1 = 2,65 \text{ kg/cm}^2$

Rotura N°:

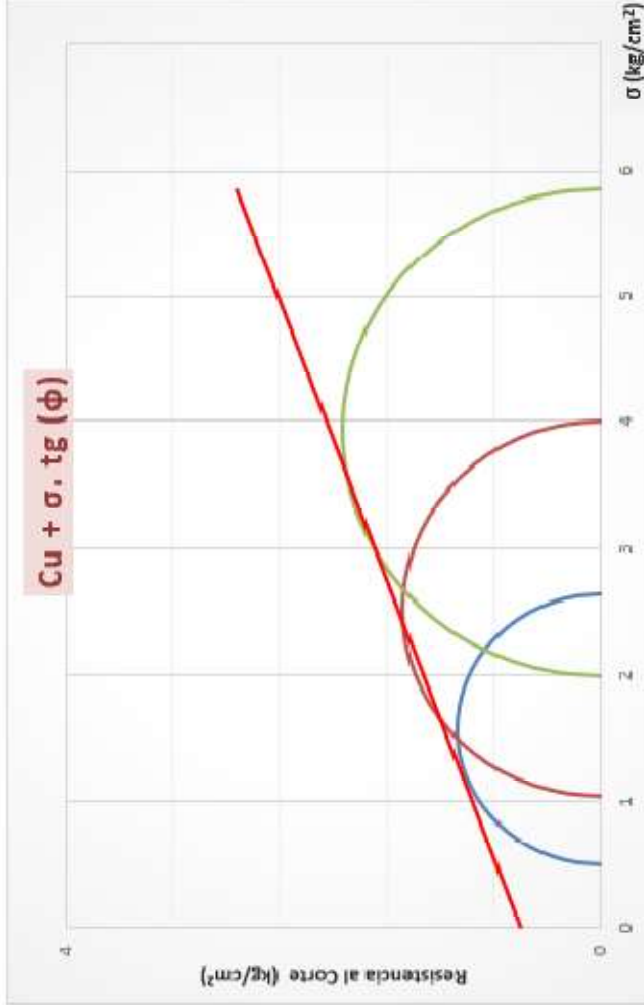
Tensión de Confinam.:  $\sigma_3 = 1,05 \text{ kg/cm}^2$   
Tensión Desviante:  $\sigma_4 = 2,95 \text{ kg/cm}^2$   
Tensión:  $\sigma_1 = 4,00 \text{ kg/cm}^2$

Rotura N°:

Tensión de Confinam.:  $\sigma_3 = 2 \text{ kg/cm}^2$   
Tensión Desviante:  $\sigma_4 = 3,85 \text{ kg/cm}^2$   
Tensión:  $\sigma_1 = 5,85 \text{ kg/cm}^2$

**$C_u =$**   
**0,6**

**$\phi =$**   
**20**





UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL  
Facultad Regional Concordia

**PLANILLA DE ENSAYO - ANÁLISIS HIDROMÉTRICO - LÍMITES DE ATTERBERG**

Fecha: .....

**DATOS DE LA MUESTRA**

Ubicación: El Palmar  
Muestra: M6  
Profundidad: Pozo 4 - 0.5m  
Defloculante: Hexametáfosfato de sodio  
Ws (gr): 100  
Tamizado: N°10

Día	Hora	Δt (min)	Temp (°C)	R (g/l)	Temp (°F)	CH (g/l)	R' (g/l)	α	ρ (%)	KL	Kg	Kn	d' (mm)	dreal (mm)
		0												
		1	20.00	49.00	68.0	-6.90	42.10	1.00	42.10	0.730	1.000	1.000	0.0571	0.0417
		2	20.00	47.00	68.0	-6.90	40.10	1.00	40.10	0.740	1.000	1.000	0.0404	0.0299
		5	20.00	45.00	68.0	-6.90	38.10	1.00	38.10	0.750	1.000	1.000	0.0255	0.0192
		8	20.00	44.00	68.0	-6.90	37.10	1.00	37.10	0.755	1.000	1.000	0.0202	0.0152
		15	21.50	43.00	70.7	-6.36	36.64	1.00	36.64	0.760	1.000	0.980	0.0147	0.0110
		30	23.00	41.00	73.4	-5.72	35.28	1.00	35.28	0.775	1.000	0.965	0.0104	0.0078
		65	24.50	39.50	76.1	-5.18	34.32	1.00	34.32	0.780	1.000	0.950	0.0071	0.0053
		500	30.50	34.00	86.9	-2.72	31.28	1.00	31.28	0.815	1.000	0.895	0.0026	0.0019
		1140	18.00	39.00	64.4	-7.72	31.28	1.00	31.28	0.785	1.000	1.015	0.0017	0.0013
		1445	25.00	36.00	77.0	-4.90	31.10	1.00	31.10	0.810	1.000	0.945	0.0015	0.0012

Lavado sobre tamiz N° 200:

PF N°	Tara (gr)	PSS + T (gr)	PSS (gr)
18	30.64	89.29	58.65

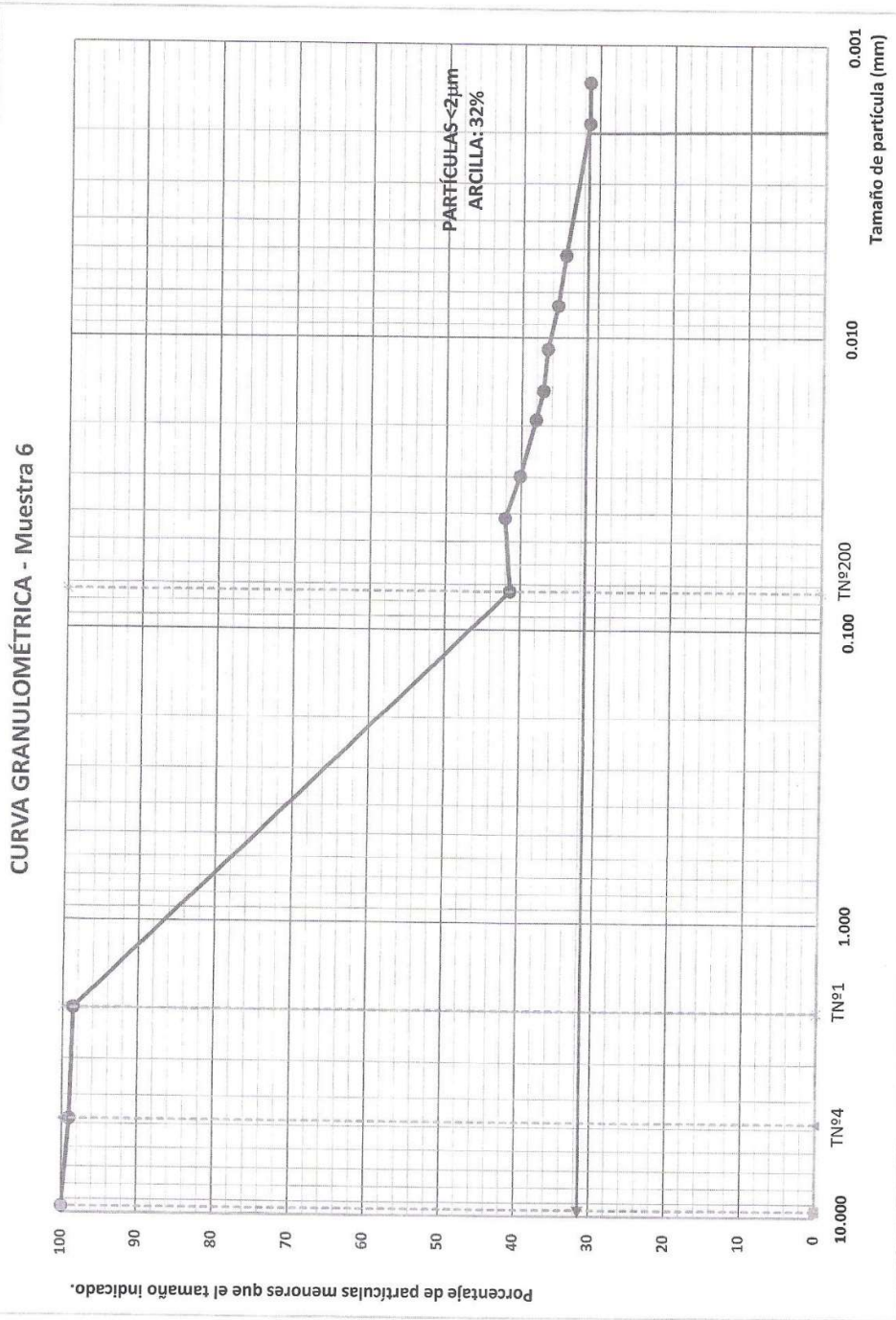
% pasante T N° 200 = 41.35

Ing. María Emilia Medina  
Laboratorio de suelos

Observaciones: .....

.....

.....



  
 Ing. María Emilia Medina  
 Laboratorio de suelos

### Determinación de $C_u - \phi$

Resultados

Rotura N°:

Tensión de Confinam.: 0,5 kg/cm<sup>2</sup>  
 Tensión Desviante: 0,82 kg/cm<sup>2</sup>  
 Tensión: 1,32 kg/cm<sup>2</sup>

**$C_u =$**   
**0,35**

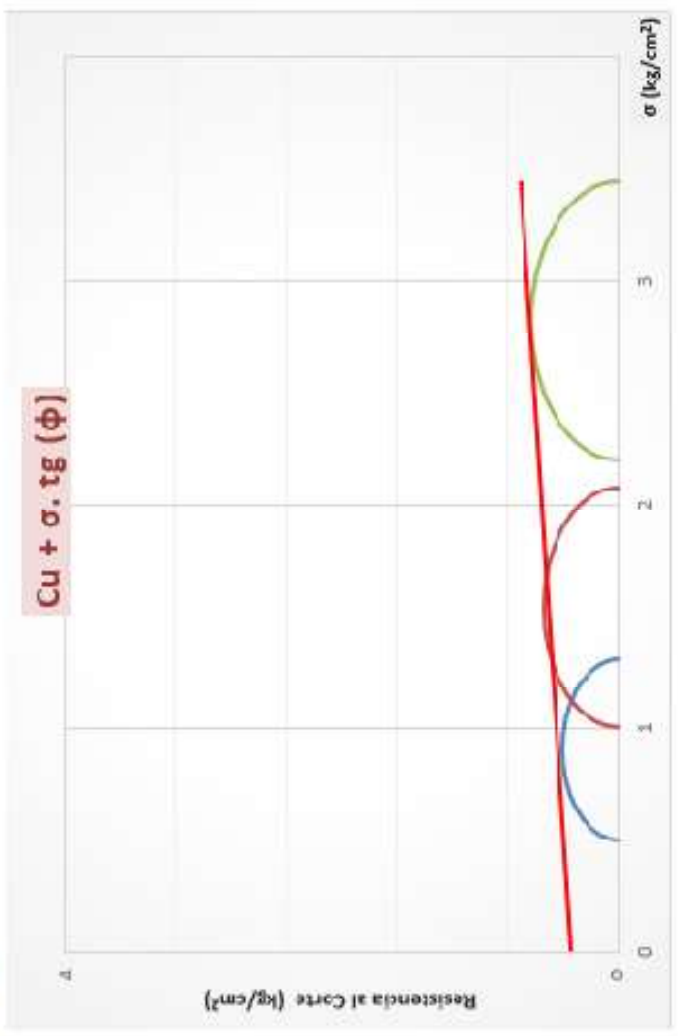
Rotura N°:

Tensión de Confinam.: 1 kg/cm<sup>2</sup>  
 Tensión Desviante: 1,08 kg/cm<sup>2</sup>  
 Tensión: 2,08 kg/cm<sup>2</sup>

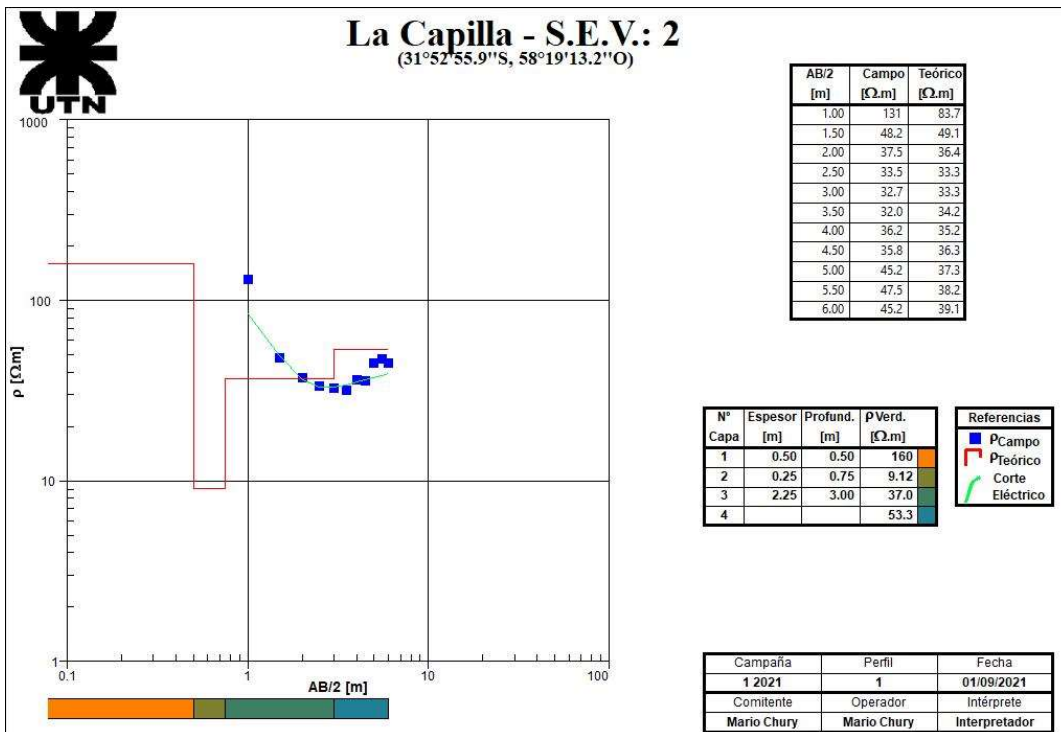
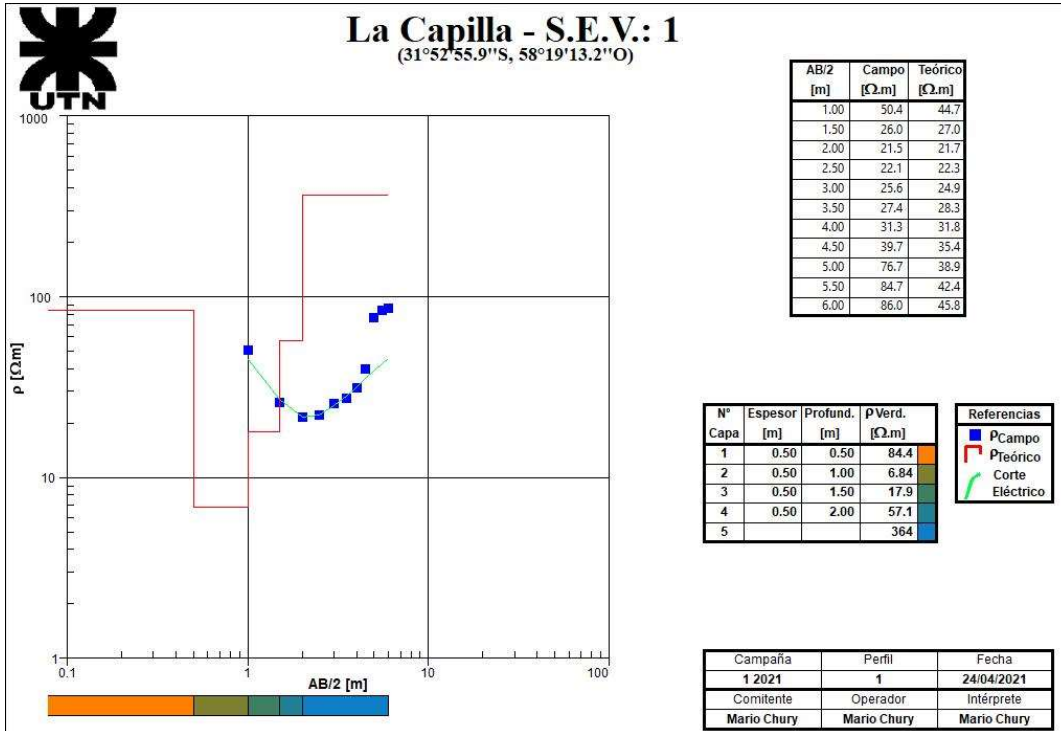
**$\phi =$**   
**6**

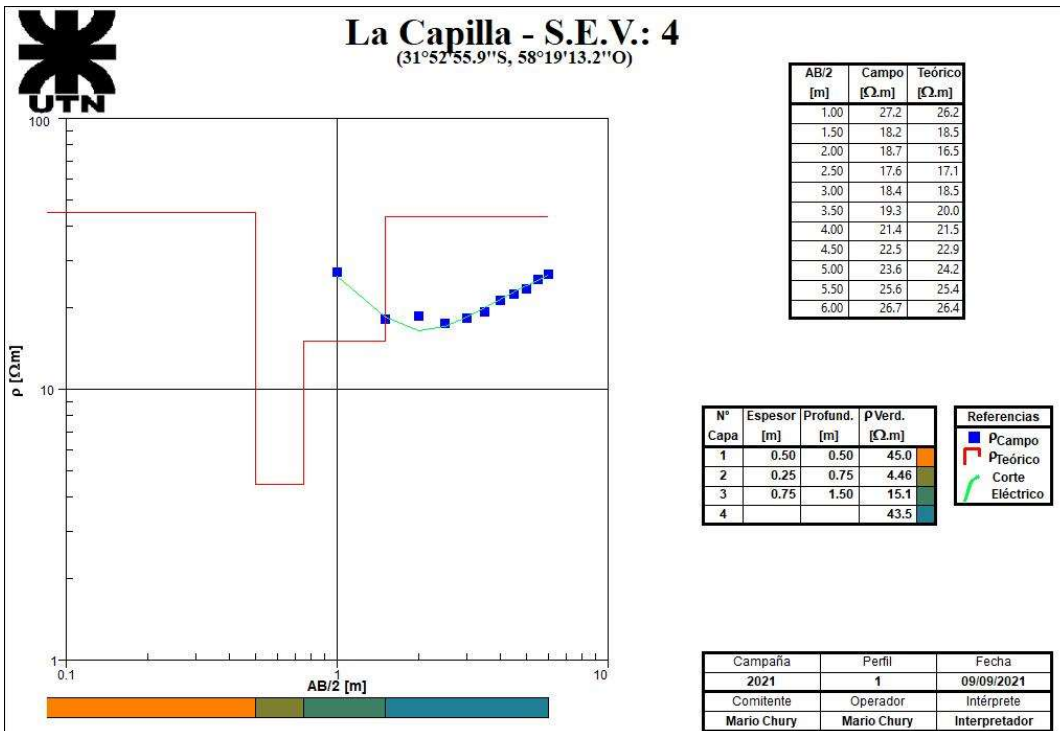
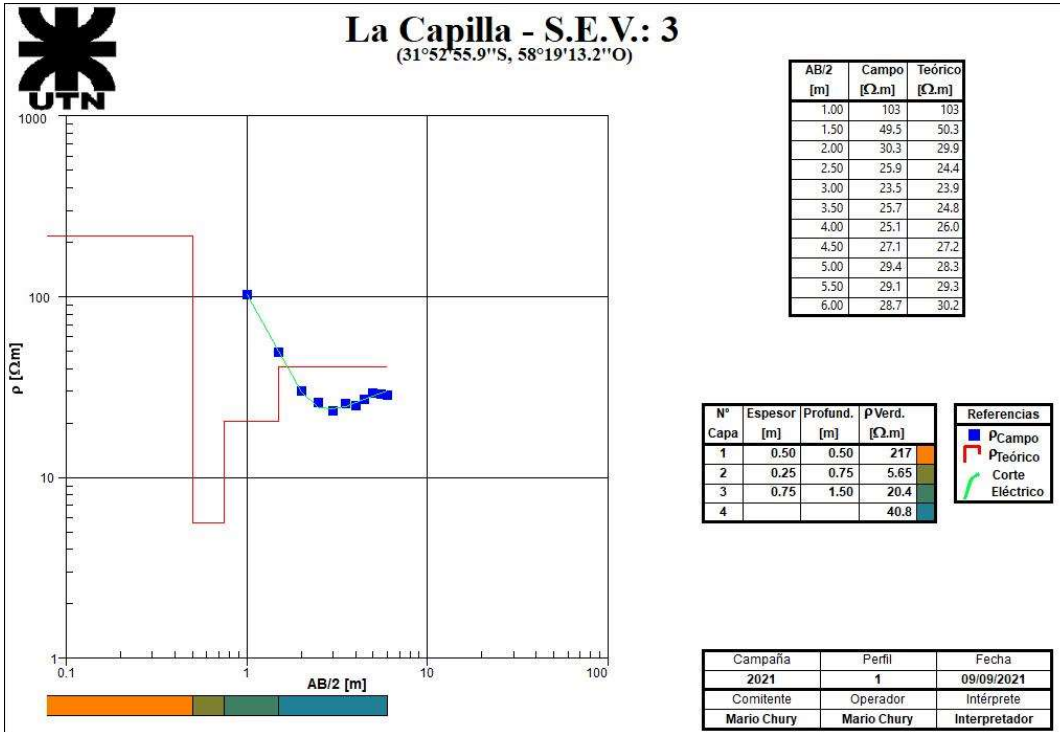
Rotura N°:

Tensión de Confinam.: 2,2 kg/cm<sup>2</sup>  
 Tensión Desviante: 1,25 kg/cm<sup>2</sup>  
 Tensión: 3,45 kg/cm<sup>2</sup>



# ANEXO F. Curvas de campo e interpretación geoelectrica del estudio paramétrico

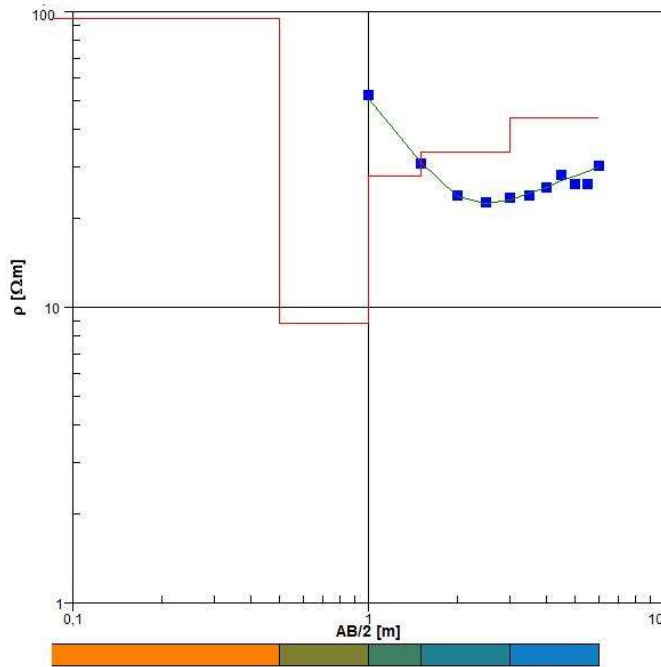




# ANEXO G. Curvas de campo e interpretación geoelectrica para construcción de mapas geomecánicos

## La Capilla - S.E.V.: 1

SEVs realizados para generar el mapa geoelectrico



AB/2 [m]	Campo [Ω.m]	Teórico [Ω.m]
1,00	52,4	51,3
1,50	30,8	31,0
2,00	23,9	23,7
2,50	22,8	22,5
3,00	23,6	23,1
3,50	24,0	24,4
4,00	25,5	25,6
4,50	28,1	26,8
5,00	26,3	27,9
5,50	26,2	28,9
6,00	30,3	29,8

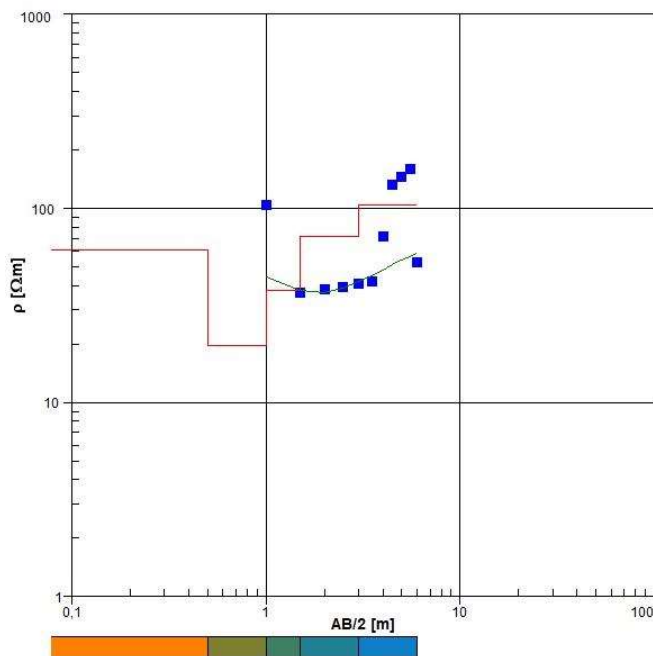
Nº Capa	Espesor [m]	Profund. [m]	ρVerd. [Ω.m]
1	0,50	0,50	95,3
2	0,50	1,00	8,89
3	0,50	1,50	27,9
4	1,50	3,00	33,5
5			44,0

Referencias	
■	PCampo
—	Pteórico
—	Corte Eléctrico

Campaña	Perfil	Fecha
1	1	13/09/2021
Comitente	Operador	Intérprete
Mario Chury	Mario Chury	Mario Chury

## La Capilla - S.E.V.: 2

SEVs realizados para generar el mapa geoelectrico



AB/2 [m]	Campo [Ω.m]	Teórico [Ω.m]
1,00	104	44,3
1,50	36,9	37,7
2,00	38,2	37,0
2,50	39,5	39,1
3,00	40,8	42,0
3,50	42,2	45,2
4,00	71,5	48,3
4,50	132	51,2
5,00	146	53,9
5,50	160	56,4
6,00	52,6	58,8

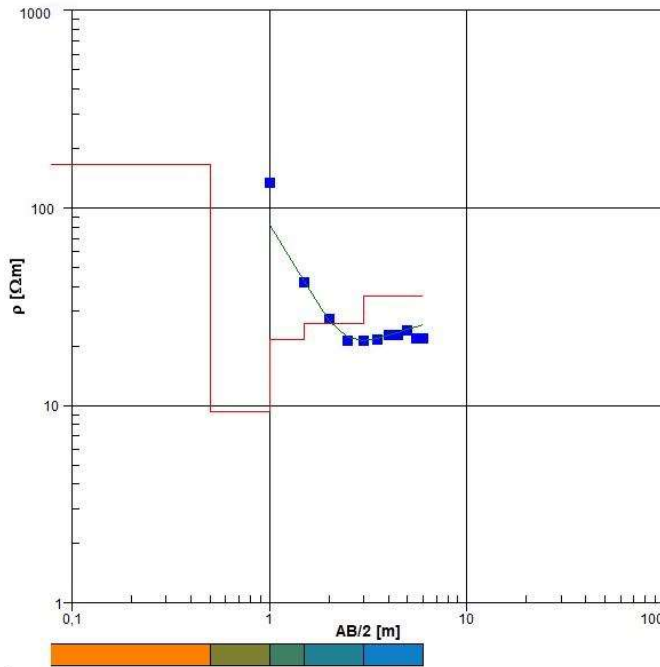
Nº Capa	Espesor [m]	Profund. [m]	ρVerd. [Ω.m]
1	0,50	0,50	60,8
2	0,50	1,00	19,7
3	0,50	1,50	38,0
4	1,50	3,00	71,5
5			104

Referencias	
■	PCampo
—	Pteórico
—	Corte Eléctrico

Campaña	Perfil	Fecha
2	1	18/05/2021
Comitente	Operador	Intérprete
Mario Chury	Mario Chury	Mario Chury

## La Capilla - S.E.V.: 3

SEVs realizados para generar el mapa geoelectrico



AB/2 [m]	Campo [Ω.m]	Teórico [Ω.m]
1,00	135	82,4
1,50	42,0	42,4
2,00	27,4	26,6
2,50	21,4	22,0
3,00	21,4	21,4
3,50	21,7	21,9
4,00	22,8	22,7
4,50	22,8	23,5
5,00	23,9	24,3
5,50	21,8	25,0
6,00	22,0	25,7

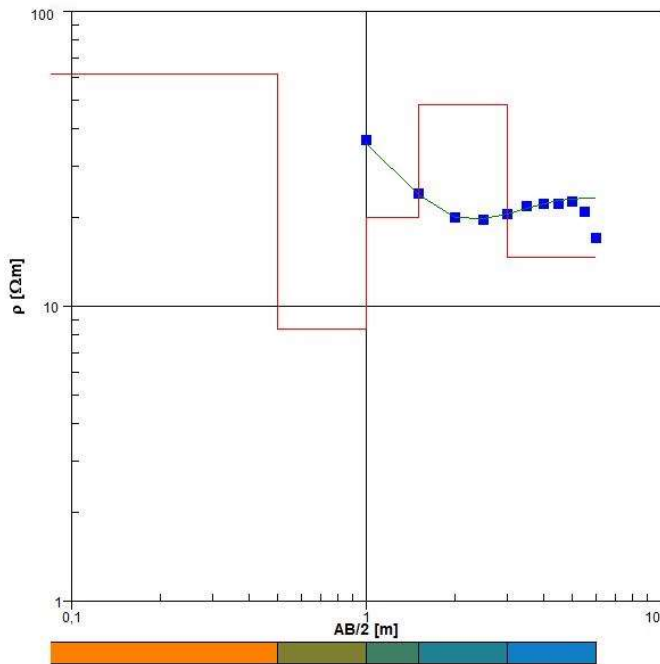
Nº Capa	Espesor [m]	Profund. [m]	ρ Verd. [Ω.m]
1	0,50	0,50	167
2	0,50	1,00	9,37
3	0,50	1,50	21,6
4	1,50	3,00	26,0
5			36,1

Referencias	
	PCampo
	PTeórico
	Corte Eléctrico

Campaña	Perfil	Fecha
1	1	18/01/2021
Comitente	Operador	Intérprete
Mario Chury	Mario Chury	Mario Chury

## La Capilla - S.E.V.: 4

SEVs realizados para generar el mapa geoelectrico



AB/2 [m]	Campo [Ω.m]	Teórico [Ω.m]
1,00	36,6	35,7
1,50	24,3	24,0
2,00	20,1	20,2
2,50	19,7	19,9
3,00	20,6	20,7
3,50	22,0	21,6
4,00	22,4	22,3
4,50	22,4	22,9
5,00	22,8	23,2
5,50	21,0	23,4
6,00	17,1	23,4

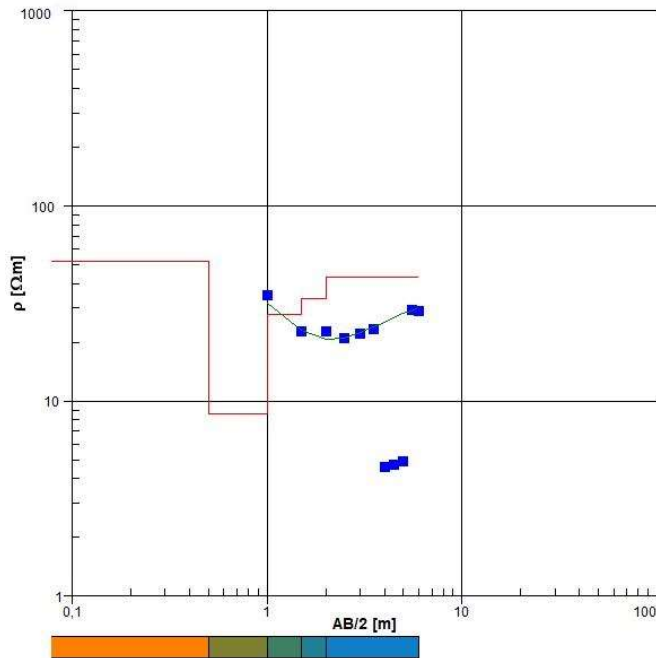
Nº Capa	Espesor [m]	Profund. [m]	ρ Verd. [Ω.m]
1	0,50	0,50	61,6
2	0,50	1,00	8,44
3	0,50	1,50	20,0
4	1,50	3,00	48,5
5			14,8

Referencias	
	PCampo
	PTeórico
	Corte Eléctrico

Campaña	Perfil	Fecha
1	1	13/09/2021
Comitente	Operador	Intérprete
Mario Chury	Mario Chury	Mario Chury

## La Capilla - S.E.V.: 5

SEVs realizados para generar el mapa geoelectrico



AB/2 [m]	Campo [Ω.m]	Teórico [Ω.m]
1,00	35,1	31,8
1,50	22,8	23,0
2,00	22,9	20,6
2,50	21,0	21,1
3,00	22,3	22,5
3,50	23,5	24,0
4,00	4,57	25,5
4,50	4,74	26,8
5,00	4,92	28,0
5,50	29,5	29,1
6,00	28,8	30,1

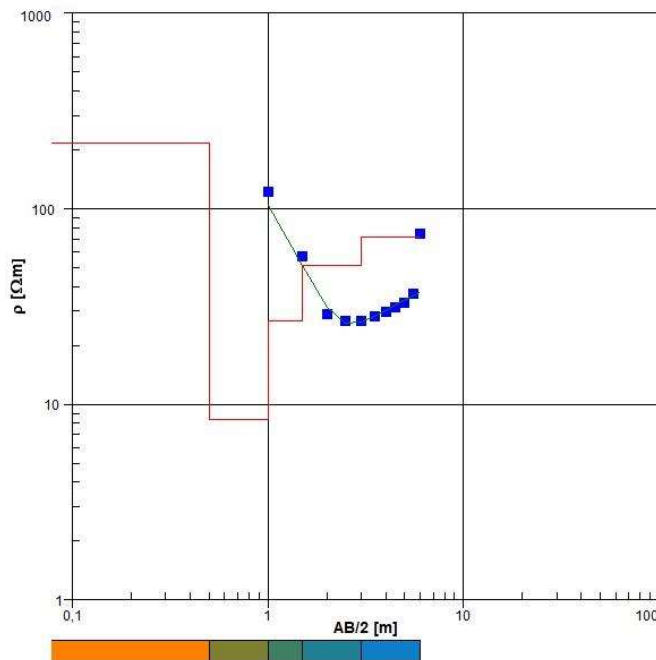
Nº Capa	Espesor [m]	Profund. [m]	ρ Verd. [Ω.m]
1	0,50	0,50	52,2
2	0,50	1,00	8,59
3	0,50	1,50	27,7
4	0,50	2,00	33,7
5			43,3

Referencias	
	ρ Campo
	ρ Teórico
	Corte Eléctrico

Campaña	Perfil	Fecha
1	2	13/09/2021
Comitente	Operador	Intérprete
Mario Chury	Mario Chury	Mario Chury

## La Capilla - S.E.V.: 6

SEVs realizados para generar el mapa geoelectrico



AB/2 [m]	Campo [Ω.m]	Teórico [Ω.m]
1,00	123	105
1,50	57,5	51,4
2,00	29,1	31,2
2,50	26,7	26,2
3,00	26,8	26,4
3,50	28,3	28,1
4,00	29,7	30,1
4,50	31,4	32,1
5,00	33,2	34,0
5,50	36,7	35,8
6,00	74,4	37,4

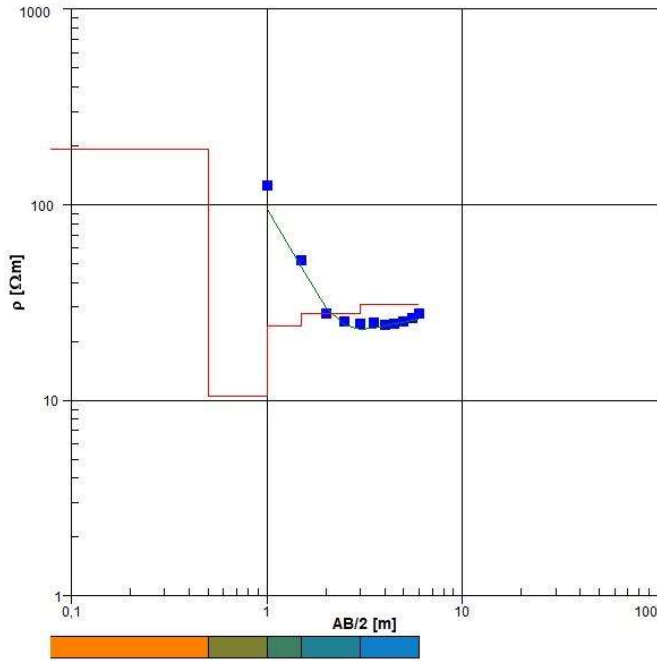
Nº Capa	Espesor [m]	Profund. [m]	ρ Verd. [Ω.m]
1	0,50	0,50	218
2	0,50	1,00	8,36
3	0,50	1,50	26,7
4	1,50	3,00	51,4
5			71,3

Referencias	
	ρ Campo
	ρ Teórico
	Corte Eléctrico

Campaña	Perfil	Fecha
2	2	18/05/2021
Comitente	Operador	Intérprete
Mario Chury	Mario Chury	Mario Chury

## La Capilla - S.E.V.: 7

SEVs realizados para generar el mapa geoelectrico



AB/2 [m]	Campo [ $\Omega.m$ ]	Teórico [ $\Omega.m$ ]
1,00	126	94,8
1,50	52,4	48,3
2,00	27,9	29,8
2,50	25,5	24,2
3,00	24,8	23,2
3,50	24,9	23,4
4,00	24,3	24,0
4,50	24,8	24,6
5,00	25,3	25,2
5,50	26,5	25,7
6,00	27,8	26,1

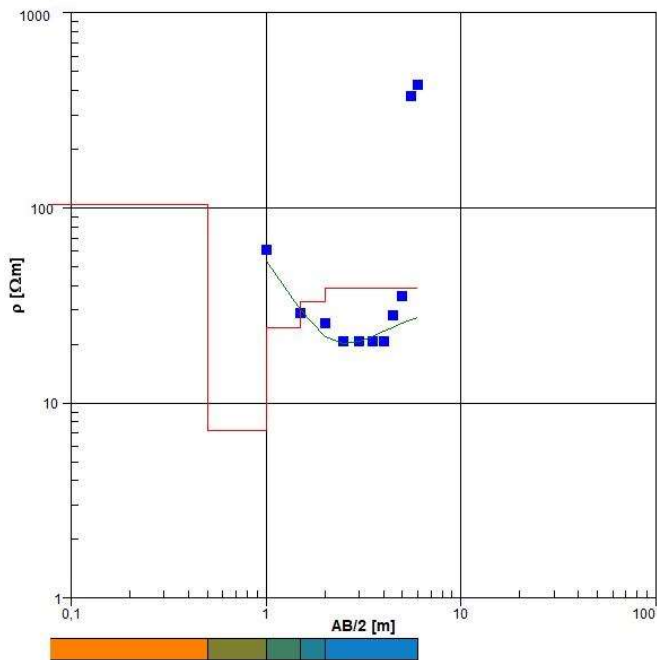
N° Capa	Espesor [m]	Profund. [m]	$\rho$ Verd. [ $\Omega.m$ ]
1	0,50	0,50	192
2	0,50	1,00	10,5
3	0,50	1,50	24,1
4	1,50	3,00	27,9
5			31,0

Referencias	
<span style="color: blue;">■</span>	$\rho$ Campo
<span style="color: red;">—</span>	$\rho$ Teórico
<span style="color: green;">—</span>	Corte
<span style="color: blue;">—</span>	Eléctrico

Campaña	Perfil	Fecha
2	2	14/09/2021
Comitente	Operador	Intérprete
Mario Chury	Mario Chury	Mario Chury

## La Capilla - S.E.V.: 8

SEVs realizados para generar el mapa geoelectrico



AB/2 [m]	Campo [ $\Omega.m$ ]	Teórico [ $\Omega.m$ ]
1,00	61,0	53,4
1,50	28,8	30,1
2,00	25,8	21,8
2,50	20,7	20,1
3,00	20,7	20,8
3,50	20,7	22,0
4,00	20,7	23,3
4,50	28,1	24,5
5,00	35,6	25,6
5,50	373	26,6
6,00	428	27,5

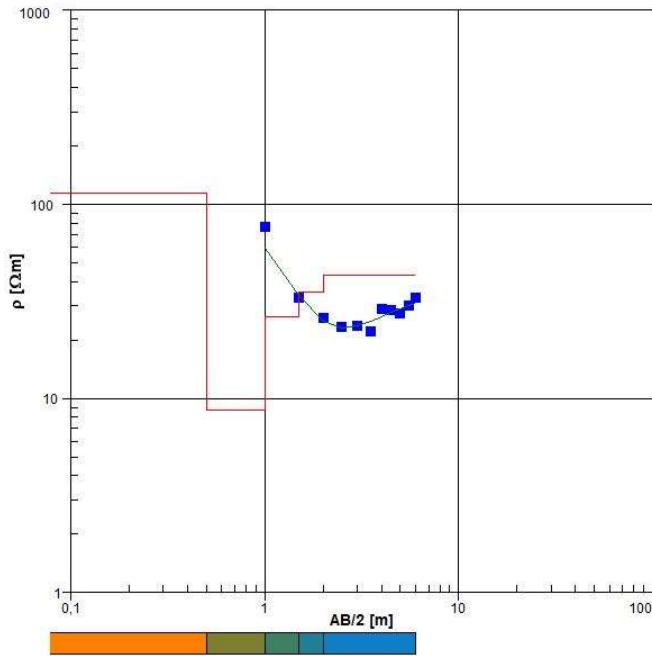
N° Capa	Espesor [m]	Profund. [m]	$\rho$ Verd. [ $\Omega.m$ ]
1	0,50	0,50	104
2	0,50	1,00	7,28
3	0,50	1,50	24,5
4	0,50	2,00	32,9
5			39,0

Referencias	
<span style="color: blue;">■</span>	$\rho$ Campo
<span style="color: red;">—</span>	$\rho$ Teórico
<span style="color: green;">—</span>	Corte
<span style="color: blue;">—</span>	Eléctrico

Campaña	Perfil	Fecha
2	2	14/09/2021
Comitente	Operador	Intérprete
Mario Chury	Mario Chury	Mario Chury

## La Capilla - S.E.V.: 9

SEVs realizados para generar el mapa geoelectrico



AB/2 [m]	Campo [Ω.m]	Teórico [Ω.m]
1,00	77,0	59,4
1,50	33,3	34,1
2,00	25,9	24,9
2,50	23,4	23,1
3,00	23,8	23,8
3,50	22,2	25,1
4,00	28,8	26,5
4,50	28,7	27,8
5,00	27,3	29,0
5,50	30,2	30,1
6,00	33,1	31,1

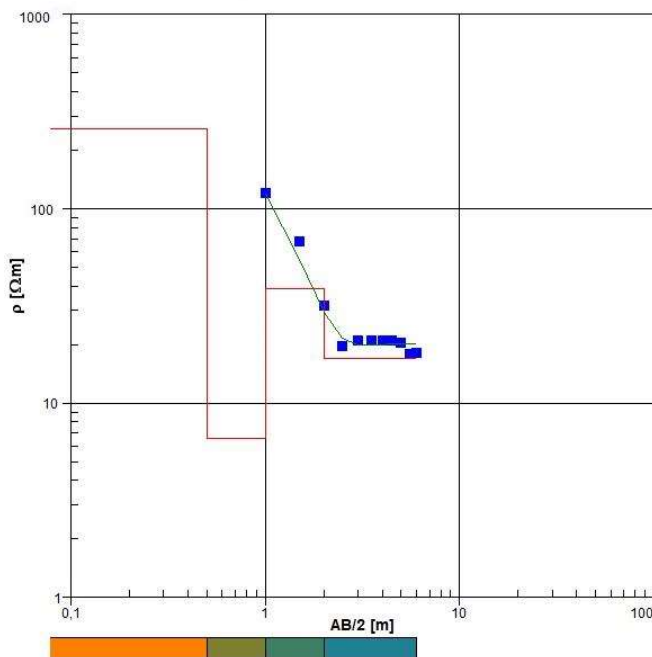
Nº Capa	Esesor [m]	Profund. [m]	ρ Verd. [Ω.m]
1	0,50	0,50	114
2	0,50	1,00	8,78
3	0,50	1,50	26,3
4	0,50	2,00	35,6
5			43,3

Referencias	
	PCampo
	PTeórico
	Corte Eléctrico

Campaña	Perfil	Fecha
2	3	18/05/2021
Comitente	Operador	Intérprete
Mario Chury	Mario Chury	Mario Chury

## La Capilla - S.E.V.: 10

SEVs realizados para generar el mapa geoelectrico



AB/2 [m]	Campo [Ω.m]	Teórico [Ω.m]
1,00	121	120
1,50	68,2	54,7
2,00	31,7	29,3
2,50	19,8	21,7
3,00	21,1	19,9
3,50	21,1	19,8
4,00	21,1	20,0
4,50	21,1	20,2
5,00	20,5	20,2
5,50	17,8	20,2
6,00	18,1	20,1

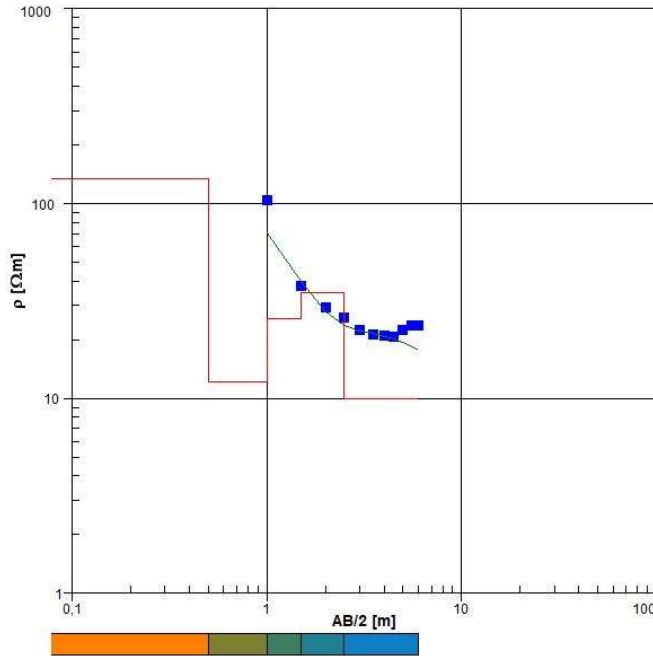
Nº Capa	Esesor [m]	Profund. [m]	ρ Verd. [Ω.m]
1	0,50	0,50	257
2	0,50	1,00	6,58
3	1,00	2,00	39,0
4			16,9

Referencias	
	PCampo
	PTeórico
	Corte Eléctrico

Campaña	Perfil	Fecha
2	3	18/05/2021
Comitente	Operador	Intérprete
Mario Chury	Mario Chury	Mario Chury

## La Capilla - S.E.V.: 11

SEVs realizados para generar el mapa geoelectrico



AB/2 [m]	Campo [Ω.m]	Teórico [Ω.m]
1,00	104	70,3
1,50	37,6	40,1
2,00	29,4	27,8
2,50	25,9	23,7
3,00	22,5	22,3
3,50	21,2	21,5
4,00	20,9	20,9
4,50	20,8	20,1
5,00	22,4	19,3
5,50	23,6	18,5
6,00	23,6	17,7

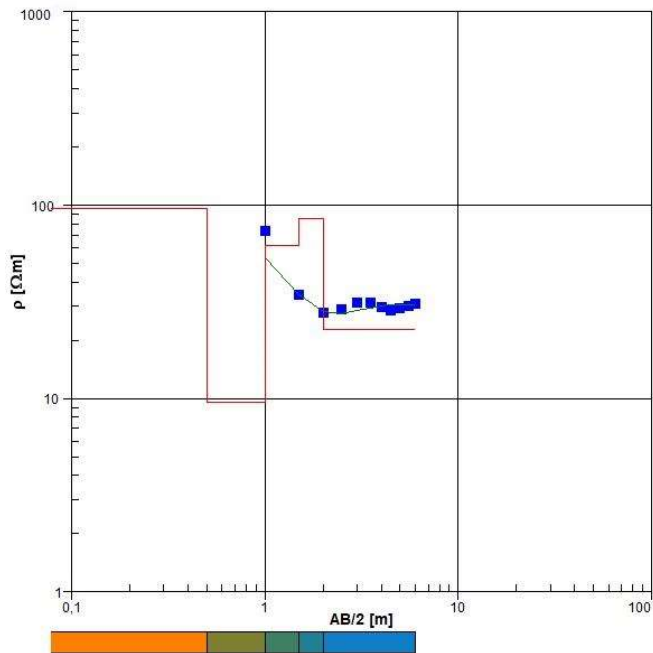
Nº Capa	Espesor [m]	Profund. [m]	ρ Verd. [Ω.m]
1	0,50	0,50	133
2	0,50	1,00	12,1
3	0,50	1,50	25,7
4	1,00	2,50	35,0
5			9,97

Referencias	
<span style="color: blue;">■</span>	PCampo
<span style="color: red;">—</span>	Pteórico
<span style="color: green;">—</span>	Corte
<span style="color: blue;">—</span>	Eléctrico

Campaña	Perfil	Fecha
2	3	18/05/2021
Comitente	Operador	Intérprete
Mario Chury	Mario Chury	Mario Chury

## La Capilla - S.E.V.: 12

SEVs realizados para generar el mapa geoelectrico



AB/2 [m]	Campo [Ω.m]	Teórico [Ω.m]
1,00	73,3	53,3
1,50	34,4	34,3
2,00	28,0	28,2
2,50	28,9	27,6
3,00	31,4	28,5
3,50	31,4	29,4
4,00	29,6	30,1
4,50	28,5	30,6
5,00	29,3	30,7
5,50	30,1	30,7
6,00	30,9	30,6

Nº Capa	Espesor [m]	Profund. [m]	ρ Verd. [Ω.m]
1	0,50	0,50	96,2
2	0,50	1,00	9,62
3	0,50	1,50	61,7
4	0,50	2,00	85,5
5			22,8

Referencias	
<span style="color: blue;">■</span>	PCampo
<span style="color: red;">—</span>	Pteórico
<span style="color: green;">—</span>	Corte
<span style="color: blue;">—</span>	Eléctrico

Campaña	Perfil	Fecha
2	3	18/05/2021
Comitente	Operador	Intérprete
Mario Chury	Mario Chury	Mario Chury

# ANEXO H. Datos geomecánicos de muestra para validación en estudio paramétrico



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL  
Facultad Regional Concordia

## PLANILLA DE ENSAYO - ANALISIS HIDROMETRICO

Fecha: 12/5/2022

### DATOS DE LA MUESTRA

Ubicación: El Palmar  
 Muestra: 1  
 Profundidad: 0,5 m  
 Defloculante: Hexametáfosfato de sodio  
 Ws (gr): 100  
 Tamizado: N°10

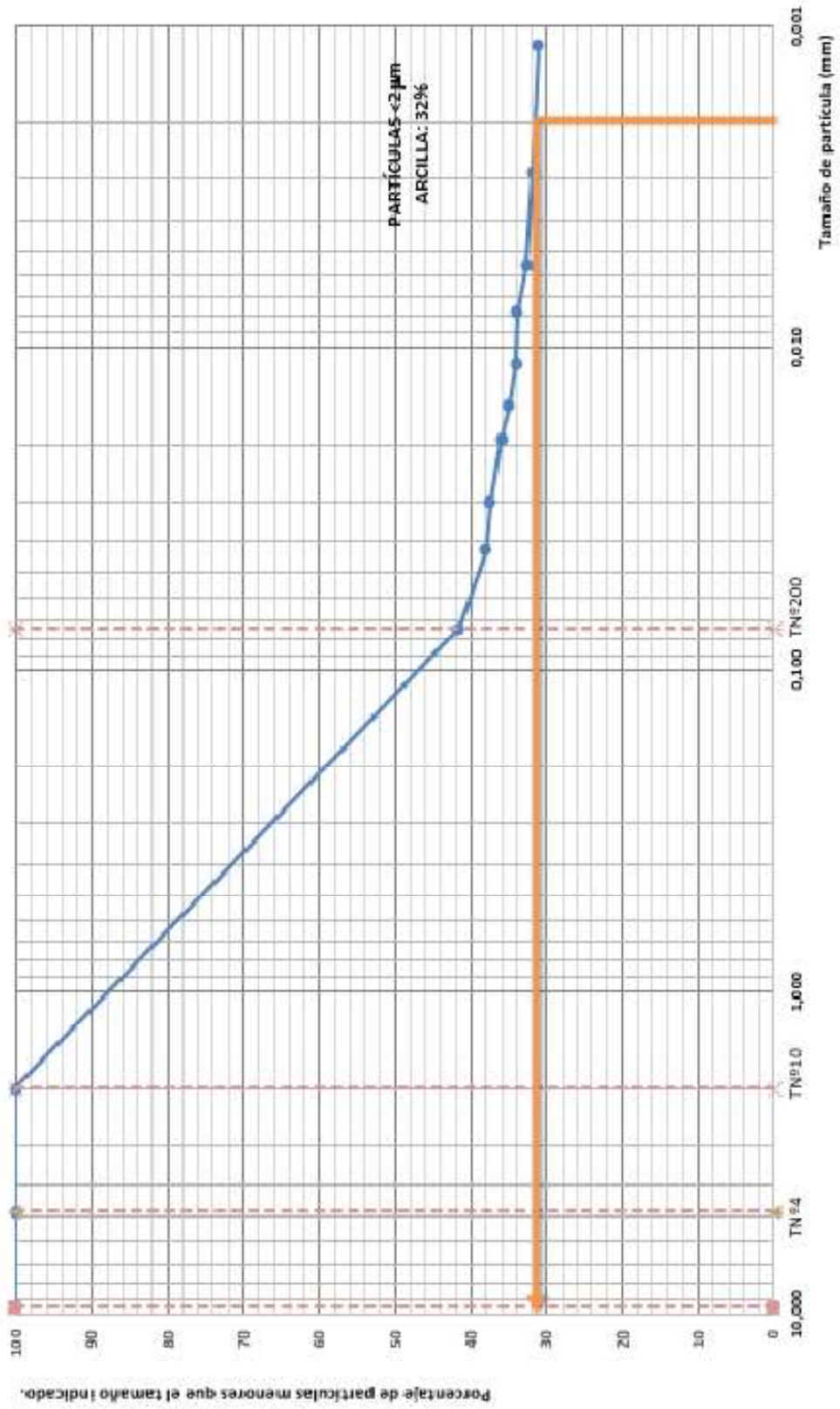
Día	Hora	Δt (min)	Temp (°C)	R (g/l)	Temp (°F)	CH (g/l)	R' (g/l)	α	P (%)	KL	Kg	Kn	d' (mm)	dreal (mm)
12-may-22	16:36:00	1	24,00	43,00	75,2	-5,36	37,64	1,01	38,02	0,770	1,010	0,953	0,0571	0,0423
		2	24,00	42,50	75,2	-5,36	37,14	1,01	37,51	0,775	1,010	0,953	0,0404	0,0301
		5	24,00	41,00	75,2	-5,36	35,64	1,01	36,00	0,780	1,010	0,953	0,0255	0,0192
		8	24,00	40,00	75,2	-5,36	34,64	1,01	34,99	0,785	1,010	0,953	0,0202	0,0153
		15	24,00	39,00	75,2	-5,36	33,64	1,01	33,98	0,790	1,010	0,953	0,0147	0,0112
		30	26,00	38,00	78,8	-4,54	33,46	1,01	33,79	0,795	1,010	0,935	0,0104	0,0078
13-may-22	16:41:00	60	26,00	37,00	78,8	-4,54	32,46	1,01	32,78	0,800	1,010	0,935	0,0074	0,0056
		20:36:00	240	26,00	36,00	78,8	-4,54	31,46	1,01	31,77	0,810	1,010	0,935	0,0037
14-may-22	08:10:00	2254	28,50	35,00	83,30	-3,54	31,46	1,01	31,77	0,815	1,010	0,910	0,0012	0,0009

Lavado sobre tamiz N° 200:

PF N°	Tara (gr)	PSS + T (gr)	PSS (gr)
33	31,02	89,48	58,46

% pasante T N° 200 = 41,54

CURVA GRANULOMÉTRICA - Muestra 1





Universidad Tecnológica  
Nacional - Fracilind  
Regional Concordia

UBRA:  
UBICAL  
C.M.

El Palmar

ENSAJO: TRIAXIAL ESCALINADO

Hoja  
N° 3 de 3

FECHA: 27/4/2022

### Determinación de Cu - φ

Resultados

Rotura N°:

Tensión de Confinam.:  $\sigma_3 = 0,5 \text{ kg/cm}^2$   
Tensión Desviante:  $\sigma_2 = 1,61 \text{ kg/cm}^2$   
Tensión:  $\sigma_1 = 2,11 \text{ kg/cm}^2$

**Cu =**  
**0,65**

Rotura N°:

Tensión de Confinam.:  $\sigma_3 = 1 \text{ kg/cm}^2$   
Tensión Desviante:  $\sigma_2 = 1,98 \text{ kg/cm}^2$   
Tensión:  $\sigma_1 = 2,96 \text{ kg/cm}^2$

**φ =**  
**9**

Rotura N°:

Tensión de Confinam.:  $\sigma_3 = 2 \text{ kg/cm}^2$   
Tensión Desviante:  $\sigma_2 = 2,24 \text{ kg/cm}^2$   
Tensión:  $\sigma_1 = 4,24 \text{ kg/cm}^2$

