



FACULTAD DE INGENIERIA

Maestría en Ingeniería Civil

Trabajo de Grado

Determinación De La Variabilidad Espacial De Las Propiedades En Muestras  
De Rocas Degradadas Mediante El Empleo De Sonda Eléctrica.

Presentado por:

Jairo Enrique Velandia González.

Ledding Farley Vera Bautista

Director

PHD. Manuel Santiago Ocampo Terreros

Codirector

Msc. Orlando Rincón Arango

Bogotá D.C.

Octubre de 2013

## **APROBACIÓN**

El Trabajo de grado con título “Determinación De La Variabilidad Espacial De Las Propiedades En Muestras De Rocas Degradadas Mediante El Empleo De Sonda Eléctrica”, desarrollado por los estudiantes Jairo Enrique Velandia González y Ledding Farley Vera Bautista, en cumplimiento de uno de los requisitos dispuestos por la Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, para optar el Título de Magister en Ingeniería Civil, fue aprobado por:

**PHD. Manuel Santiago Ocampo Terreros**  
Director de trabajo de grado

**MSC. Orlando Rincón Arango**  
Codirector de trabajo de grado

**PHD. Joan M. Larrahondo**  
Jurado I

**Ing. Luis Felipe Prada**  
Jurado II

**TÍTULO DE LA INVESTIGACIÓN Y SALVEDAD DE RESPONSABILIDAD  
INSTITUCIONAL**

Determinación De La Variabilidad Espacial De Las Propiedades En Muestras De Rocas  
Degradadas Mediante El Empleo De Sonda Eléctrica

Jairo Enrique Velandia González.

Ledding Farley Vera Bautista

*La Pontificia Universidad Javeriana, no es responsable por los conceptos emitidos por los autores-investigadores del presente trabajo, por lo cual son responsabilidad absoluta de sus autores y no comprometen la idoneidad de la institución ni de sus valores.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Después de haber batallado tantas luchas para conseguir nuestro objetivo primordial agradecemos al todo poderoso por darnos fuerzas y llevarnos por el camino adecuado en los momentos más difíciles para la realización de nuestro trabajo de grado.

A nuestros padres, hermanos, novias y amigos por estar siempre ahí apoyándonos con su aliento y confianza en la realización de nuestros logros y brindando confianza en las decisiones tomadas en esta etapa de superación académica y profesional.

A los ingenieros Manuel Santiago Ocampo y Orlando Rincón Arango Director y Codirector del Proyecto de Grado para La Maestría en Ingeniería Civil, por su dedicación, constante orientación y depositar total confianza en nosotros en el desarrollo de la investigación.

## RESUMEN

La variabilidad espacial de las propiedades del suelo afecta sus respuestas en macro escala. La variabilidad espacial es un parámetro propio de los suelos y sus propiedades, formados por procesos físicos que dependen del tiempo, presiones, temperaturas e intemperismo. Se pretende determinar la relación que existe entre diferentes niveles de degradación en muestras de rocas blandas con su resistividad eléctrica.

Se tomaron muestras en tres taludes del corredor vial Bogotá – Tunja las cuales se clasificaron empleando el método de “Slake Durability Rating” para determinar sus niveles de degradación. La variabilidad espacial en muestras de rocas degradadas se ha estudiado a través de un equipo electrónico de fácil construcción que sirve para medir las propiedades eléctricas de las muestras de rocas degradadas.

Se encontró que existe una tendencia entre los niveles de degradación y la resistividad eléctrica. Niveles de degradación de tipo SDR IV, muestran que la resistividad disminuye con el aumento en la humedad para valores comprendidos entre 5.73 k $\Omega$  y 9.25 k $\Omega$ .

Rocas que presentan consistencia dura indican valores de resistividad altos, es decir a medida que la degradación aumenta los valores de resistividad disminuyen.

**Palabras Claves:** Variabilidad espacial, resistividad eléctrica, Slake durability rating, degradación.

## ABSTRACT

The spatial variability of soil properties affects its response at the macro scale. Spatial variability is a parameter characteristic of soils and their properties, and depends on physical processes, time, pressure, temperature, and weathering. The aim of this research is to determine the relationship between different levels of degradation in soft-rock samples and electrical resistivity.

Samples were retrieved from three slopes on the Bogotá-Tunja highway. These samples were classified using the method of "Slake Durability Rating" (SDR) to determine their levels of degradation. The spatial variability in the rock samples was studied under conditions degraded via an easy to build electronic device able to measure the electrical properties of rocks soft.

Results showed that there is a tendency between the levels of degradation and electrical resistivity. Infact, degradation levels of SDR type IV, show that resistivity decreases with an increase in water content from 5.73 k $\Omega$  and 9.25 k $\Omega$  .

In addition sound rock sample correlate with high resistivity values; as the degradation increases resistivity values decrease.

**Keywords:** Spatial variability, electrical resistivity, Slake Durability Rating, degradation.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>12</b>
<b>1.1 PROBLEMA</b>	<b>13</b>
<b>1.2 OBJETIVO GENERAL</b>	<b>13</b>
<b>1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>14</b>
<b>1.4 JUSTIFICACIÓN</b>	<b>14</b>
<b>2. MARCO DE REFERENCIA</b>	<b>15</b>
<b>2.1 MARCO CONCEPTUAL</b>	<b>15</b>
2.1.1 Variabilidad espacial	15
2.1.2 Resistividad eléctrica	15
2.1.3 Degradación física de las rocas arcillosas	16
2.1.4 Slake	16
2.1.5 Prueba de durabilidad y desleimiento	17
<b>2.2 ANTECEDENTES</b>	<b>17</b>
2.2.1 Técnicas empleadas para medir resistividad	17
2.2.2 Variación de la resistividad eléctrica en función de las propiedades del suelo	17
2.2.3 Procesos climáticos que interfieren en la degradación de las rocas que contienen arcilla	18
2.2.4 Parámetros del Suelo	18
<b>2.3 MARCO TEÓRICO</b>	<b>21</b>
2.3.1 Variabilidad espacial	21
2.3.2 Propiedades electromagnéticas de los suelos	22
2.3.3 Diseño de la sonda	23
2.3.4 Slake durability rating.	25
2.3.5 Evaluación de la degradación por “clasificación durabilidad -desleimiento, SDR”	26
	<b>29</b>
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS.</b>	<b>30</b>
<b>3.1 DISEÑO Y DESARROLLO DE LA SONDA ELÉCTRICA</b>	<b>30</b>
3.1.1 Implementación y calibración del sistema electrónico	31

3.1.2	Adecuación de la sonda eléctrica	32
3.1.3	Equipos electrónicos empleados	34
3.1.4	Equipo mecánico de penetración	34
<b>3.2</b>	<b>MUESTREO Y CÁLCULO DEL NIVEL DE DEGRADACIÓN</b>	<b>35</b>
3.2.1	Localización sitios de Muestreo	36
3.2.2	Estratigrafía	36
3.2.3	Muestreo de campo	39
3.2.4	Determinación de los niveles de degradación empleando el método “Slake durability rating” (SDR)	40
<b>3.3</b>	<b>JAR SLAKE TEST Y ENSAYOS DE HUMEDAD</b>	<b>41</b>
3.3.1	Jar Slake Test.	41
3.3.2	Prueba de humedad	42
<b>3.4</b>	<b>ENSAYOS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA</b>	<b>43</b>
<b>4.</b>	<b><i>DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS</i></b>	<b>45</b>
4.1	Resultados SDR vs Resistividad eléctrica con diferentes contenidos de humedad	64
4.2	Degradación SDR Vs Resistividad eléctrica para humedad natural	69
4.3	Análisis Estadístico Multivariado	70
<b>5.</b>	<b><i>CONCLUSIONES</i></b>	<b>74</b>
<b>6.</b>	<b><i>RECOMENDACIONES</i></b>	<b>76</b>
<b>7.</b>	<b><i>BIBLIOGRAFÍA</i></b>	<b>77</b>
<b>8.</b>	<b><i>ANEXOS</i></b>	<b>81</b>



## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 2-1 Detección de Cambios locales en la relación de vacíos.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2-2 Localización sitios de muestreo.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 2-3 Principales Discontinuidades en talud Rocoso .....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 2-4 Bloque de roca típico sometido a degradación .....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 3-1 Esquema Metodología de trabajo.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3-2 Esquema general Configuración experimental sistema electrónico.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3-3 Esquema inicial montaje electrónico.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3-4 Montaje parcial sistema electrónico .....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3-5 Montaje final sistema electrónico.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3-6 Descripción Montaje sonda eléctrica.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3-7 Sonda eléctrica elaborada.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3-8 Sistema Mecánico de inserción .....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 3-9 Mapa Geográfico de localización taludes en estudio.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 3-10 Talud No 1 Gachancipa - El Roble.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 3-11 Talud No 2 Choconta.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 3-12 Talud No 3 Villa pinzón.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 3-13 Esquema de la toma de muestras      Figura 3-14 Protección de las muestras.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 3-15 Muestra representativa Medición Slake Durability Rating .....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 3-16 Jar Slake en muestras de rocas degradadas.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 3-17 Pruebas de humedad en laboratorio .....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 3-18 Esquema ensayos realizados .....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 4-1 Tendencia de resistividad talud No 1 Gachancipa parte baja SDR II.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 4-2 Perfil muestra Talud No 1 Bajo.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 4-3 Perfil 2 muestra Talud No 1 Bajo.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 4-4 Tendencia de resistividad. Talud No 1 Gachancipa parte media SDR II.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 4-5 Perfil muestra Talud No 1 Medio.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 4-6 Planta muestra Talud No 1 Bajo .....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 4-7 Tendencia de resistividad. Talud No 1 Gachancipa parte alta SDR III.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 4-8 Perfil muestra Talud No 1 Alto.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 4-9 Perfil 2 muestra Talud No 1 Alto.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 4-10 Tendencia de resistividad talud No 2 Chocontá parte baja SDR IV .....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4-11 Perfil muestra Talud No 2 Bajo.....</i>	<i>52</i>

<i>Figura 4-12 Planta muestra Talud No 2 Bajo.</i> .....	52
<i>Figura 4-13 Tendencia de resistividad talud No 2 Choconta parte media SDR IV.</i> .....	53
<i>Figura 4-14 Perfil muestra Talud No 2 Medio.</i> .....	54
<i>Figura 4-15 Planta muestra Talud No 2 Medio.</i> .....	54
<i>Figura 4-16 Tendencia de resistividad talud No 2 Choconta parte alta SDR III</i> .....	55
<i>Figura 4-17 Perfil muestra Talud No 2 Alto.</i> .....	56
<i>Figura 4-18 Planta muestra Talud No 2 Medio.</i> .....	56
<i>Figura 4-19 Tendencia de resistividad talud No 3 Villa Pinzón parte baja SDR II</i> .....	57
<i>Figura 4-20 Perfil muestra Talud No 3 Bajo.</i> .....	58
<i>Figura 4-21 Planta muestra Talud No 3 Bajo.</i> .....	58
<i>Figura 4-22 Tendencia de resistividad talud No 3 Villa Pinzón parte media SDR II.</i> .....	59
<i>Figura 4-23 Perfil muestra Talud No 3 Medio.</i> .....	60
<i>Figura 4-24 Planta muestra Talud No 3 Medio.</i> .....	60
<i>Figura 4-25 Tendencia de resistividad talud No 3 Villa Pinzón parte alta SDR I – B.</i> .....	61
<i>Figura 4-26 Perfil muestra Talud No 3 Alto.</i> .....	62
<i>Figura 4-27 Planta muestra Talud No 3 Alto.</i> .....	62
<i>Figura 4-28 Tendencia de resistividad promedio SDR I-B. Talud Villa Pinzón parte alta para diferentes grados de humedad.</i> .....	65
<i>Figura 4-29 Tendencia de resistividad promedio SDR II.</i> .....	66
<i>Figura 4-30 Tendencia de resistividad promedio SDR III.</i> .....	67
<i>Figura 4-31 Tendencia de resistividad promedio SDR IV.</i> .....	68

## LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 2-1 Características Geométricas de la sonda.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 2-2 Clasificación de durabilidad de la roca "SDR" .....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 3-1 Clasificación Geológica de Muestras de roca degradada .....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 3-2 Caracterización comportamiento Jar Slake.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 3-3 Cuantificación ensayos realizados.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 4-1 Resumen valores promedio de resistividad para cada uno de los taludes estudiados. ....</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 4-2 Valores de Resistividad para.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 4-3 Valores de Resistividad para degradación SDR II.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 4-4 Valores de resistividad para SDR III .....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 4-5 Valores de resistividad para degradacion SDR IV .....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 4-6 Clasificación SDR.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 4-7 Mediciones Promedio de Resistividad y Humedades .....</i>	<i>71</i>

## 1. INTRODUCCIÓN

Los taludes excavados en vías experimentan procesos de degradación de formas rápida, lo cual tiene una incidencia económica en las labores de mantenimiento y seguridad de la misma. Es por ello que se estudió la variabilidad espacial el cual es un parámetro propio de los suelos y sus propiedades, formado por procesos físicos que dependen del tiempo, presiones, temperaturas e intemperismo (Phoon & Kulhawy, 1999), y afecta las respuestas del suelo a macro escala. Los efectos de la variabilidad espacial en el comportamiento del suelo se han estudiado en el contexto de geo procesos tales como la licuación del suelo (Popescu & Prevost, 1996) (Kokusho, 1999), inestabilidad de taludes (Yong, Alonso, & Tabbá, 1977) (Tonon, Bernardini, & And Mammino, 2000) filtraciones (Griffiths & G.A, 1993), entre otros.

Se ha encontrado que la variabilidad espacial tiene un efecto importante, incluso en pequeños especímenes de laboratorio. Las muestras preparadas por el método de apisonamiento húmedo muestran resistencias de 200-300% superiores que especímenes preparados por el método de pluviación en seco (Ladd, 1974) (Townsend, 1978); dependiendo del método de preparación de la muestra, los resultados varían considerablemente (Lee., 2003).

Es por ello que se utilizó en este documento una técnica efectiva y sencilla para evaluar la variabilidad espacial de las muestras de roca blanda con resolución submilimétrica, la cual consiste en el empleo de una sonda del tamaño de una aguja la cual se introduce en la roca para medir localmente las propiedades electromagnéticas del medio a lo largo de la trayectoria de la sonda. La sonda de aguja está diseñada para evaluar la variabilidad espacial en las muestras de la roca mediante la medición de las propiedades electromagnéticas locales del suelo en la punta de contacto suelo – aguja, midiendo las pequeñas perturbaciones como ondas electromagnéticas que se propagan a través de la masa rocosa sin causar ningún efecto permanente.

La interpretación física de estas mediciones permite inferir un parámetro importante sobre las propiedades de la masa de roca, incluyendo su porosidad, contenido de agua y las características de los fluidos en los poros (P.ej: permitividad y concentración iónica, la anisotropía de la fábrica, y la interacción entre las distintas fases de degradación de la roca. (Cho, Lee, & Santamarina, 2004).

La medición de la variabilidad espacial en muestras de rocas meteorizadas mediante el empleo de sonda eléctrica hace parte de estudios realizados por Gye Chun Cho, Jong-Sub Lee y J. Carlos Santamarina (2004).

## **1.1 PROBLEMA**

En la actualidad no se cuenta con un método cuantitativo económico y rápido mediante el cual se determine el nivel de degradación de una roca blanda. Existen fenómenos como el "Slake" que dificultan el muestreo de estos materiales. Aplicando el concepto de variabilidad espacial empleando una sonda eléctrica, se pretende entender cómo se está degradando la roca blanda.

Esta variable es de gran importancia ya que afecta el comportamiento global de la roca blanda en problemas de flujo de agua, asentamientos y estabilidad de taludes.

## **1.2 OBJETIVO GENERAL**

Determinar la relación entre el nivel de degradación en muestras de rocas blandas en función de su resistividad eléctrica, infiriendo de forma indirecta la variabilidad espacial empleando una sonda eléctrica

### **1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar el grado de degradación de las rocas blandas, empleando el método “Slake Durability Rating (SDR)”.
- Determinar la resistividad eléctrica de rocas blandas, mediante el empleo de una sonda eléctrica.
- Establecer una relación entre los resultados obtenidos del grado de degradación y la conductividad eléctrica.
- Establecer una metodología de ensayo para este tipo de rocas blandas.

### **1.4 JUSTIFICACIÓN**

Es importante analizar los resultados obtenidos en el laboratorio mediante el empleo de una sonda eléctrica en muestras de rocas con diferentes estados de degradación, y de esta manera poder relacionar y comparar sus resultados analizando los cambios representativos buscando una relación directa entre ellos.

Los resultados obtenidos mediante esta relación serán de importancia para establecer una metodología que permita determinar el posible comportamiento a corto plazo de la roca.

Estos resultados servirán de aporte para contar con un método rápido en laboratorio, de bajo costo y que permita conocer el nivel de afectación desde superficie, de una muestra de roca blanda o de la capa superficial del talud.

## **2. MARCO DE REFERENCIA**

A continuación se presentan definiciones, antecedentes, variables, teorías y principios que son de gran importancia para dar claridad y poder llegar a la Determinación de la variabilidad espacial de las propiedades en muestras de rocas degradadas mediante el empleo de sonda eléctrica.

### **2.1 MARCO CONCEPTUAL**

#### **2.1.1 Variabilidad espacial**

La variabilidad espacial es un parámetro propio de los suelos y sus propiedades, formados por procesos físicos los cuales dependen del tiempo, presiones, temperaturas e intemperismo (Phoon & Kulhawy, 1999). Así mismo las propiedades del suelo varían espacialmente, incluso dentro de capas homogéneas, como resultado de procesos de pluviación y post- depositación, que causan la variación en las propiedades (Lacasse & Nadim, 1996). Sin embargo, la mayoría de los análisis geotécnicos adoptan un enfoque determinista donde se afirma que cualquier resultado corresponde a una causa y así, una vez dada la causa, el resultado ha de seguir sin posibles variaciones basado en parámetros del suelo que sólo se aplican a cada una de las capas del suelo (Cho & Eun, 2007).

#### **2.1.2 Resistividad eléctrica**

El propósito de estudios de resistividad eléctrica en suelos es determinar la distribución de la resistividad en su volumen empleando una sonda. Dado que la corriente eléctrica es generada artificialmente, se suministra al suelo con el propósito de medir las diferencias resultantes de potencial. Los patrones de diferencia de potencial proporcionan información sobre las heterogeneidades del subsuelo y de sus propiedades eléctricas (Kearey, Brooks, & Hill, 2002). Por consiguiente cuanto mayor es la diferencia eléctrica entre la matriz del suelo y la heterogeneidad, más fácil es la detección de la variabilidad. De igual manera la resistividad eléctrica del suelo puede ser considerada como un indicador de la variabilidad de las propiedades físicas del suelo (Banton, Seguin, & Cimon, 1997) y también de su

composición estructural, contenido de agua, entre otras. (A. Samouelian., 2004).

Debido a que este método es no destructivo y es muy sensible, ofrece una herramienta muy atractiva para la descripción de las propiedades del subsuelo inalterado. En efecto, el flujo de cargas eléctricas a través de materiales permite que materiales conductores como el metal, donde la conductividad es grande, deban distinguirse de los materiales aislantes como el aire. Los materiales del suelo exhiben propiedades eléctricas dependiendo de sus propiedades físicas y químicas (textura, contenido de salinidad o agua). (A. Samouelian., 2004).

### **2.1.3 Degradación física de las rocas arcillosas**

Teniendo en cuenta que grandes masas de roca arcillosa cubren grandes áreas en la superficie de la tierra y son muy sensibles a los cambios en su contenido de agua. Se conoce que las propiedades de resistencia y deformabilidad de estas rocas también se deterioran debido a humedecimiento y secado, provocando numerosos problemas de ingeniería (Erguler & Ulusay, 2009). Así mismo debido a la importancia de la degradación de las rocas que contienen arcilla en la práctica de la geotecnia, se han propuesto varios métodos de prueba sencillos y sistemas de clasificación con el fin de para evaluar la durabilidad de las rocas arcillosas. Así pues la prueba del índice de desleimiento - durabilidad es uno de los métodos cualitativos más utilizados en este tipo de pruebas (Erguler & Ulusay, 2009), el cual se basa en la comparación de muestras en laboratorio con los mismos afloramientos expuestos en condiciones atmosféricas durante un año, las cuales presentan resultados muy acordes a los descritos en la Tabla 2-2 donde se muestran seis clases, y describen sus propiedades físicas y mecánicas.

### **2.1.4 Slake**

En cuanto a la durabilidad de las rocas que contienen arcilla, se emplea el término “slake” (Erguler & Ulusay, 2009) como una medida de su deterioro en el tiempo que depende fuertemente de la interacción entre la roca y el agua (Hudec, 1982)



### **2.1.5 Prueba de durabilidad y desleimiento**

La prueba de durabilidad y desleimiento mide cualitativamente la durabilidad de rocas débiles y se usa ampliamente para la evaluación de los cambios físicos y/o comportamiento de disgregación de las rocas como resultado de procesos de humedecimiento y secado (Moon y Beattie, 1995; Gokceoglu, 1997; Koncagul y Santi, 1999; Gokceoglu et al, 2000.Sadisun et al,2005).

La prueba de desleimiento consiste básicamente en medir qué tan susceptible es el material a deshacerse cuando está sometido en contacto con el agua (Simon, 2012). Los fragmentos de roca de peso conocido son colocados en un tambor rotatorio de acuerdo a lo establecido en la norma (ASTM D4644). Estos fragmentos circulan a través de ciclos húmedos y secos, posteriormente se vuelven a pesar y de esta manera se determina el Slake Durability Index (SDI).

## **2.2 ANTECEDENTES**

### **2.2.1 Técnicas empleadas para medir resistividad**

Un método empleado para la medición de la resistividad eléctrica en suelos es el método Werner el cual consiste en enterrar cuatro pequeños electrodos tipo varilla en huecos hechos en el suelo a una profundidad y un ancho definido a los cuales se les inyecta una corriente eléctrica a los dos electrodos externos y un potencial a los internos. (Epm, 2008). El método de Schlumberger- Palmer es similar al del Warner con la variante que la separación entre los electrodos internos es diferente a la separación de los electrodos externos o de tensión (Epm, 2008).

Del mismo modo el método de la sonda de aguja eléctrica es considerado como una técnica que consiste en la penetración de una muestra de suelo para medir localmente las propiedades electromagnéticas del medio a lo largo de su trayectoria (Cho, Lee, & Santamarina, 2004).

### **2.2.2 Variación de la resistividad eléctrica en función de las propiedades del suelo**

Teniendo en cuenta que la resistividad eléctrica es una función que depende de las propiedades del suelo como por ejemplo la naturaleza de los componentes sólidos (del

tamaño de la partícula, la distribución, la mineralogía), la disposición de los vacíos (porosidad, distribución del tamaño de poro, conectividad), el grado de saturación de agua (contenido de agua), la resistividad eléctrica del fluido (concentración de soluto) y la temperatura. Estos parámetros afectan la resistividad eléctrica en diferentes formas y en distintos grados. Así mismo el aire es un medio aislante, por lo que la resistividad del agua se presenta en función de la concentración iónica y la resistividad de los granos sólidos se relaciona con la densidad de cargas eléctricas en la superficie de los componentes. Se han realizado experimentos de resistividad eléctrica para establecer su relación con cada una de estas características del suelo (A. Samouelian., 2004).

### **2.2.3 Procesos climáticos que interfieren en la degradación de las rocas que contienen arcilla**

Los procesos climáticos de calentamiento y enfriamiento, humedecimiento y secado, y la congelación y descongelación, son factores que afectan las características de degradación de las rocas que contienen arcilla en diferentes formas. Se sabe que estos procesos son los principales responsables de la degradación física de rocas bajo condiciones naturales. La mayoría de los investigadores han utilizado métodos basados exclusivamente en variaciones de contenido de agua (P.ej. la prueba del índice de durabilidad y desleimiento) para evaluar la degradación de las rocas que contienen arcilla. De acuerdo con (Erguler & Ulusay, 2009) estas evaluaciones pueden no ser suficientes para explicar el comportamiento en campo de las rocas que contienen arcilla sometidas a una amplia gama de procesos climáticos.

### **2.2.4 Parámetros del Suelo**

La respuesta eléctrica de un suelo se modela como una pérdida dieléctrica  $Z^*$  que involucra una resistencia  $R$  y un capacitor  $C$  en paralelo, la cual se calcula empleando la Ecuación 1

$$Z_{suelo}^* = \left[ \frac{1}{R_{suelo}} + j\omega C_{suelo} \right]^{-1} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde  $R_{suelo}(\Omega)$  y  $C_{suelo}(F)$  es la resistencia y capacitancia del suelo, respectivamente,  $j\omega$  corresponde a la unidad imaginaria usada para expresar magnitudes (fasores)

permitiendo un mejor manejo algebraico. Los parámetros del suelo, como resistividad  $\rho_{\text{suelo}}$  y permitividad  $k'_{\text{suelo}}$  o constante física que describe cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio, están relacionados con  $R_{\text{suelo}}$  y  $C_{\text{suelo}}$  mediante la Ecuación 2 y Ecuación 3.

$$R_{\text{suelo}} = \alpha \rho_{\text{suelo}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Y

$$C_{\text{suelo}} = \beta \varepsilon_0 k'_{\text{suelo}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde  $\beta$  y  $\alpha$  son factores de forma para la capacitancia de los electrodos y la resistencia del suelo determinada por la calibración con fluidos conocidos y  $\varepsilon_0$  corresponde a la permitividad eléctrica del vacío.

La porosidad,

$$n = \frac{V_w}{V_t} \quad \text{Ecuación 4}$$

Se deduce a partir de la resistividad  $\rho_{\text{suelo}}$  o la permitividad  $k'_{\text{suelo}}$  en su forma más simple. La permitividad del suelo  $k'_{\text{suelo}}$  puede ser expresada como un promedio volumétrico si el suelo está saturado

$$k'_{\text{suelo}} = n * k'_w + (1 - n) * k'_s \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde  $k'_w$  es la permitividad del agua y su valor aproximado es 79 F/m, y  $k'_s$  es la permitividad de los minerales que generan las partículas del suelo con valores entre 3 y 7. (Cho, Lee, & Santamarina, 2004).

De acuerdo con lo establecido en la Ecuación 5, se tiene que la porosidad  $n$  se puede expresar de la siguiente manera:

$$n = \frac{e}{1 + e} = \frac{k'_{suelo} - k'_s}{k'_w - k'_s}$$

Ecuación 6

Además, la resistividad del suelo  $\rho_{suelo}$  está relacionada con la resistividad de los fluidos en los poros  $\rho_{el}$  y la porosidad  $n$  (Archie., 1942).

$$\rho_{soil} = \rho_{el} n^\theta$$

Ecuación 7

Donde  $\theta \approx -1 a - 2.4$ ; la relación  $\rho_{suelo}/\rho_{el}$ , conocida como factor de formación.

Conjuntamente, los resultados de permitividad y resistividad pueden ser usados para determinar no sólo la porosidad sino las características de los fluidos en los poros (Cho, Lee, & Santamarina, 2004).

Algunos estudios realizados en muestras reconstituidas de arena de Ottawa y “Varved Clay” (depositación de sedimentos en capas durante un periodo de un año) se muestran en los siguientes resultados. (Cho, Lee, & Santamarina, 2004)

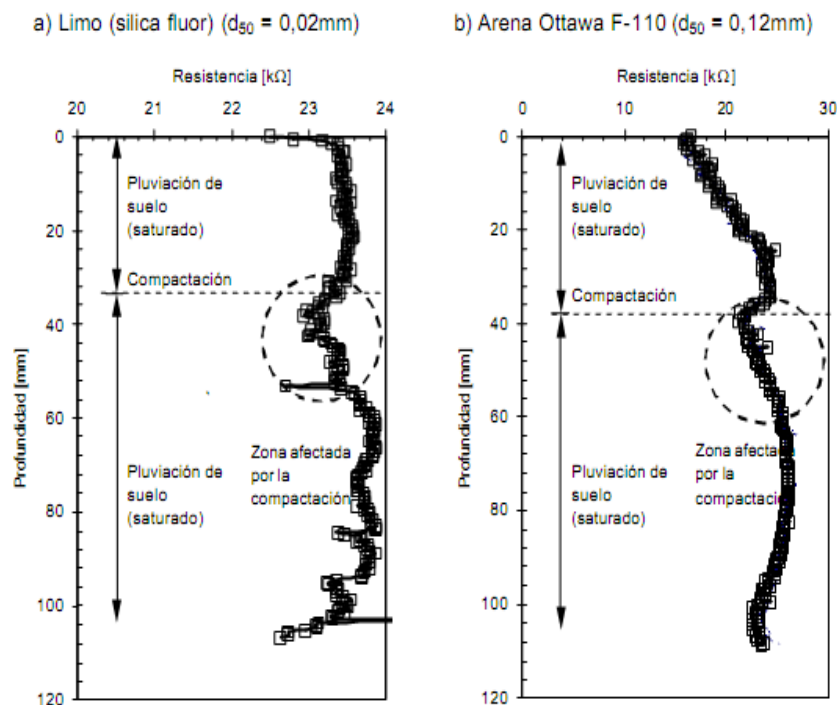


Figura 2-1 Detección de Cambios locales en la relación de vacíos

Fuente: (Cho, Lee, & Santamarina, 2004)

En la figura 2-1 se muestra la detección de cambios locales en la relación de vacíos de un espécimen que ha sido preparado por pluviación en agua, considerando que la compactación se realizó únicamente en una capa a media altura. Dado que la sonda eléctrica permite obtener resolución milimétrica de los cambios locales de resistividad y variabilidad espacial se puede observar cambios en las capas compactadas (Cho, Lee, & Santamarina, 2004).

## **2.3 MARCO TEÓRICO**

### **2.3.1 Variabilidad espacial**

De acuerdo con (Cho, Lee, & Santamarina, 2004), la variabilidad espacial de los parámetros del suelo afecta la respuesta del suelo a macro escala. Técnicas como la porosimetría de mercurio basada en la aplicación de presión con el fin de forzar la entrada del mercurio en el entramado poroso del sólido, adsorción de gases, y dispersión de rayos X son empleadas para evaluar la distribución del tamaño de poros y su variabilidad espacial (Mulilis J. P., Seed, Chan, Mitchell, & Arulanandan, 1977). Teniendo en cuenta que la porosimetría de mercurio y las técnicas de adsorción de gas se limitan a muestras de pequeño tamaño, y que la técnica de dispersión de rayos X es un método indirecto que requiere una calibración cuidadosa, y usualmente da información cualitativa en lugar de la información cuantitativa, Santamarina propone una técnica simple y efectiva, para evaluar la variabilidad espacial de las muestras de rocas blandas degradadas con resoluciones submilimétricas. Esta técnica consiste en una sonda del tamaño de una aguja que se introduce en la roca para permitir la medición de las propiedades electromagnéticas locales del medio a lo largo de su trayectoria.

A continuación se presenta una revisión de las propiedades electromagnéticas del suelo, describiendo el diseño de la sonda y demostrando sus capacidades (Cho, Lee, & Santamarina, 2004).

### 2.3.2 Propiedades electromagnéticas de los suelos

La propagación de ondas en el suelo depende principalmente de las propiedades eléctricas del suelo. De acuerdo con Santamarina (2001) una interpretación física de estas medidas permite inferir propiedades importantes de la masa del suelo, incluyendo su porosidad, contenido volumétrico de agua, características del fluido en los poros (P.ej. permitividad y concentración iónica, la anisotropía, y la interacción entre las distintas fases en suelos) Existen tres propiedades electromagnéticas:

- La conductividad eléctrica (o resistividad ( $\rho = 1/\sigma$ ), la cual es una medida de la movilidad de carga en respuesta a un campo eléctrico.
- La porosidad y la conductividad del electrolito determinan la conductividad eléctrica.
- La permitividad dieléctrica compleja  $k^*$  Ecuación 8 tiene dos partes, una parte real  $k'$  y una imaginaria  $k''$

$$k^* = k' + j \cdot k'' \quad \text{Ecuación 8}$$

La permitividad dieléctrica real de  $k'$  representa la polarizabilidad del material, mientras que la permitividad imaginaria captura pérdidas de polarización  $k''_{pol}$ . La medida “eficaz” de permitividad imaginaria  $k''_{eff}$  Ecuación 9 combina pérdidas de polarización y las pérdidas de conducción óhmica  $\sigma$ .

$$k''_{eff} = k''_{pol} + \frac{\sigma}{\omega \epsilon} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde  $\epsilon$ =permeabilidad de vacío ( $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$  F / m). La permitividad compleja refleja la interacción entre la porosidad volumétrica, contenido de agua, las características de los fluidos en los poros, superficie específica, mineralogía, y la fábrica (estructura).



La permeabilidad magnética compleja  $\mu^*$  captura la magnetibilidad y las pérdidas de magnetización del material. La mayoría de los suelos son no ferromagnéticos, por lo tanto la permeabilidad compleja  $\mu^*$  es la permeabilidad del vacío  $\mu_0$  ( $\mu^* = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m).

### 2.3.3 Diseño de la sonda

Para el diseño de la sonda eléctrica planteada por (Cho, Lee, & Santamarina, 2004) se propone un conductor coaxial de dos derivaciones la cual se construye mediante la inserción de un alambre aislado (electrodo central) en el interior de un tubo metálico delgado (electrodo externo), llenando el espacio entre los dos con resina epoxica. Por otra parte la punta de la sonda es esmerilada y pulida hasta alcanzar la forma deseada. Los prototipos fueron construidos con agujas hipodérmicas de acero inoxidable debido a que la sonda de aguja tiene que ser mecánicamente fuerte para ser empujada en el suelo.

La Tabla 2-1; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra un diseño típico con una sola punta de cuña, y resume las características geométricas de varias sondas similares utilizadas. Sin embargo para este estudio fue empleada las dimensiones de la aguja No 4 por ser las más aproximadas a los materiales encontrados en el país.

Tabla 2-1 Características Geométricas de la sonda  
Fuente: (Gye Chun Cho., 2004)

Needle Type	Needle Shape			
Side view (0°)				
Side view (90°)				
Needle Number	Needle #1	Needle #2 <sup>a</sup>	Needle #3	Needle #4
Outer Conductor	Stainless S	Stainless S	Stainless S	Copper
Outer Diameter, $d_{probe}$	2.108mm	2.108mm	1.270mm	2.159mm
Thickness, $t$	0.254mm	0.254mm	0.216mm	0.241mm
Dielectric Material	Epoxy	Epoxy	Epoxy	PTTF
Inner Conductor	T copper	T copper	T copper	SPCW
Inner Diameter, $d_c$	0.32mm	0.63mm	0.36mm	0.511mm
Wedge Length, $\lambda$	6.10mm	4.50mm	2.72mm	7.20mm
Gap b/w electrode	0.640mm	0.485mm	0.239mm	0.583mm

Además la sonda de medición y los procedimientos de diseño deben adaptarse no sólo a consideraciones de resistencia, sino que deben cumplir con criterios eléctricos, electroquímicos y geométricos. (Cho, Lee, & Santamarina, 2004)

### 2.3.3.1 Drenaje

La inserción de la aguja afecta al suelo, por lo que las condiciones de drenaje en la punta dependerán de la escala de tiempo para la disipación de la presión de poros  $t_{dis}$  y la escala de tiempo para la penetración  $t_{pen}$ . (Cho, Lee, & Santamarina, 2004)

$$\frac{t_{dis}}{t_{pen}} \cong \frac{\frac{d^2}{c_v}}{\frac{\lambda}{V_{in}}} = \left(\frac{d}{\lambda}\right) \frac{dV_{in}}{c_v} \quad \text{Ecuación 10}$$

Dónde:

$d$  = diámetro de la sonda de aguja-

$\lambda$  representa la longitud de la cuña

$V_{in}$  = velocidad de inserción.

$C_v$  = coeficiente de la disipación de exceso de presión de poros. En condición de penetración no drenada ( $t_{DIS}/ t_{pen} \gg 1$ ).

La medición no causa cambios locales en el volumen. Si  $t_{DIS}/ t_{pen} \ll 1$ , las condiciones de drenaje prevalecen, y los cambios en el volumen afectarán las medidas locales y los parámetros eléctricos. Se utilizaron bajas velocidades de penetración ( $V_{in}$  1 cm / min), en este estudio para condiciones drenadas.

### 2.3.3.2 Forma de punta

La experiencia adquirida con la inserción de sondas de penetración y los pilotes son relevantes para este dispositivo. Sin embargo, en este caso, el campo de la deformación volumétrica alrededor de la punta debe ser analizado en el contexto de la zona alcanzada por el campo eléctrico que se crea en la punta, equivalente al flujo neto (Cho, Lee, & Santamarina, 2004). Pueden preverse las siguientes situaciones:



- Una punta plana perpendicular al eje de la aguja. Se forma un tapón denso y se mueve con la punta (Vesic 1977.) El campo eléctrico desarrolla sobre todo dentro de este tapón, por lo tanto no se recomienda una forma de punta plana.
- Una punta cónica a 60 ° produce que el campo eléctrico se extienda dentro de la región que experimenta el mayor cambio en el volumen.
- Una punta afilada, de una sola cuña. Se limita y el campo se crea a lo largo de la longitud más corta que está en la dirección horizontal con la elevación del electrodo de núcleo (suponiendo que la aguja penetra verticalmente). La punta asimétrica de la aguja puede causar que esta se doble en suelos duros.
- Una aguja de dos cuñas en la punta. Mientras que un cambio en el volumen se produce a lo largo de las cuñas, el campo eléctrico se desarrolla preferentemente por delante de la punta, que es donde la distancia más corta entre el núcleo y el electrodo externo se encuentra; esta forma está actualmente en estudio en la Universidad de California, (Davis B. Kutter, comunicación personal).

Puntas más afiladas presentan menor compresión adelante del penetrómetro (Baligh Y Scott 1976). La deformación volumétrica se relaciona con los vacíos iniciales y los esfuerzos efectivos de confinamiento  $\sigma'$ . Puede ser dilatado para bajas combinaciones de  $(e-\sigma)$ , por debajo de la línea de estado crítico o de contracción. Por lo tanto, si la relación de vacío in situ es baja, una relación de vacíos mayor sería medida, pero si la proporción de vacíos in situ es alta, la relación medida sin efecto sería menor. Esto significa que la inserción de una sonda de penetración tiende a homogenizar el medio. La deformación volumétrica en la punta puede variar desde 1% hasta 4% (Davidson y Boghrat 1983).

#### **2.3.4 Slake durability rating.**

Según (Erguler & Ulusay, 2009) se implemento un programa de investigación desarrollado con las rocas que contienen arcilla para medir el grado de su degradación después de numerosos ciclos de humedecimiento y secado en condiciones de campo y de laboratorio

Ellos analizaron veinte localidades de diferentes partes de Turquía (Figura 2-2), con presencia de rocas arcillosas. Estos sitios fueron seleccionados como sitios de muestreo y se obtuvieron toma de muestras en bloque, donde se evaluó el comportamiento de las rocas seleccionadas (arcillosas, lutitas, limolitas, marga y toba) después de la degradación en condiciones de campo. A demás se investigaron los tipos de roca evaluando y tomando medidas para caracterizar las discontinuidades presentes en las condiciones iniciales así como su mineralogía. (Erguler & Ulusay, 2009)



Figura 2-2 Localización sitios de muestreo  
Fuente: (Erguler & Ulusay, 2009)

Se determinaron las propiedades de disgregación de las rocas para un nuevo enfoque adoptado en el estudio realizado, donde se determinó la prueba del índice de degradación. Finalmente, se recomienda un cuadro de clasificación, que puede ser útil en la evaluación del grado de degradación de las rocas debido a procesos atmosféricos en el campo (Erguler & Ulusay, 2009).

### 2.3.5 Evaluación de la degradación por “clasificación durabilidad -desleimiento, SDR”

El SDR es un nuevo método propuesto por (Erguler & Ulusay, 2009), para cuantificar numéricamente la degradación de las rocas que contienen arcilla, en condiciones de campo, basado en la frecuencia de fracturas. Erguler y Ulusay clasifican la degradación de la siguiente manera:

Un valor de calificación de cero se asigna al material más débil (la roca completamente desintegrada cuando se somete a procesos atmosféricos), y 100 para el material de roca más fuerte (roca que no muestra ningún cambio después de un número de estos ciclos de humedecimiento y secado). Teóricamente, rocas con un valor SDR de 100 no indican ninguna degradación en el campo. A medida que disminuye la duración, aumenta la intensidad de degradación, resultando valores de SDR menores a 100. Como se observa a partir de la Figura 2-3.

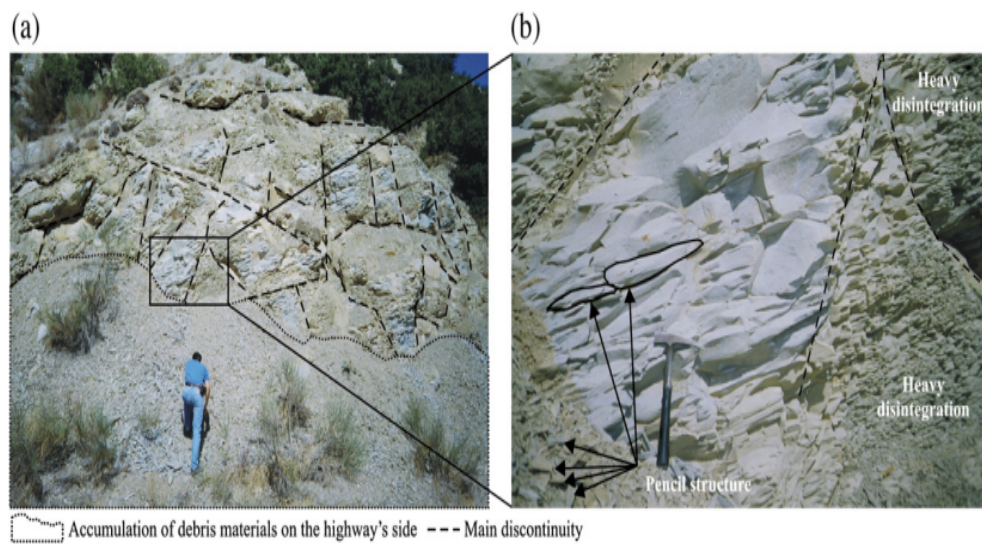


Figura 2-3 Principales Discontinuidades en talud Rocoso  
 (a) La discontinuidad principal se pone en un afloramiento de margas, y (b) Desglose pesado observado entre familias de discontinuidades principales.  
 Fuente: (Erguler & Ulusay, 2009)

De acuerdo al este estudio realizado por Erguler se utilizó una escala de 100 mm de longitud para contar las fracturas. Como se muestra en la figura (2-3-b), las fracturas son contadas a lo largo de diferentes líneas orientadas perpendicularmente a las fracturas, y la línea de intersección con más fracturas se utiliza en las determinaciones de la degradación. Al considerar la frecuencia de las fracturas (inverso de la separación de las fracturas), la ecuación 11 se emplea en la determinación de la intensidad de fractura resultante de los procesos atmosféricos (Erguler & Ulusay, 2009).

$$\lambda = \frac{n}{l} \quad \text{Ecuación 11}$$

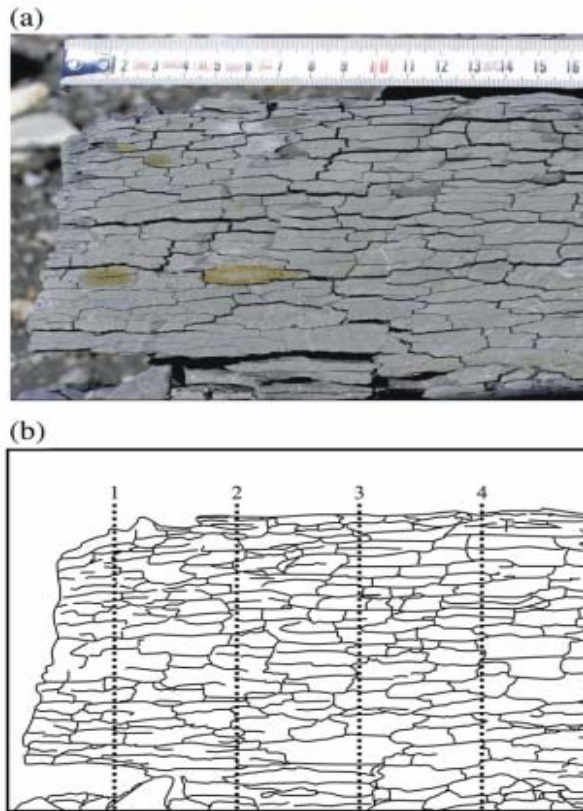


Figura 2-4 Bloque de roca típico sometido a degradación  
 Un bloque de roca típico sometido a degradación en condiciones de campo, y (b) a lo largo de líneas la distribución superficial de las desintegraciones se determinan (localización L 15-s1).

Fuente: (Erguler & Ulusay, 2009)

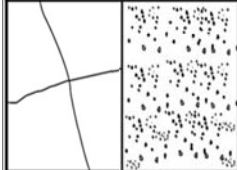
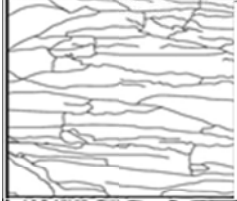
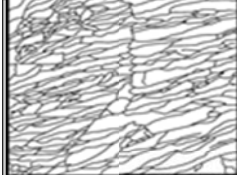
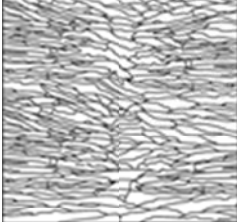
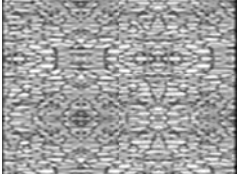
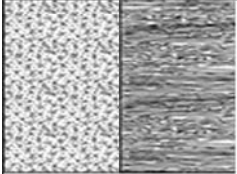
Dónde,  $\lambda$  es la frecuencia de fractura media,  $l$  es la longitud de la regla y / o cinta (longitud máxima es de 100 mm en este estudio), y  $n$  es el número de fracturas contadas a lo largo de la línea. Después de una investigación de campo, la densidad con más fracturas se observa en la ubicación numerada 15-s1 y la frecuencia de fractura media es de 1 mm. Sobre la base de aceptar una relación lineal entre  $\lambda$  y SDR, se sugiere la Ecuación 12 se emplea en la clasificación de durabilidad de las rocas que contienen arcilla, con el fin de medir su comportamiento in-situ (Erguler & Ulusay, 2009)

Una descripción detallada de los distintos grados de degradación propuestos por el método “Slake Durability Rating” se presentan en la Tabla 2-2

$$SDR = 100 - 100 * \lambda$$

Ecuación 12

Tabla 2-2 Clasificación de durabilidad de la roca "SDR"  
Fuente: (Erguler & Ulusay, 2009)

Distribucion espacial de la desintegración en sitio.	SDR = 100 - 100*λ		
	Clase	SDR	Descripción
	IA	100	La rotura mecánica es dominante en la prueba de durabilidad desleimiento. Rocas de esta clase tienen contenidos de carbonatos altos y bajos contenidos de minerales arcillosos. No se observa reacción después de ciclos de humedecimiento y secado. Es posible tomar muestras del núcleo para la determinación de las propiedades mecánicas. Aw está entre 0.7 y 2. Los valores de porosidad por lo general están en un rango de 2 y 5 %. Id2 y DI(av) rango entre 99 % y 100 %, respectivamente.
	IB	95 - 99	Minerales arcillosos como la illita y caolinita son dominantes. Los tipos de rocas que caen en esta clase también son durables contra la disgregación. Es posible tomar muestras de núcleo para la determinación de las propiedades mecánicas. Aw está entre 3 y 8. En esta clase, la porosidad, Id2 y DI(av) están entre 6 y 19%, 93 y 98 % y 95 y 98%, respectivamente, KDI rangos entre 0.98 y 1.
	II	80 - 94	La desintegración del cuerpo rocoso es dominante, los contenidos de arcilla en esta clase de rocas se encuentran entre 21 y 34 %. Como la clase IA y IB, la extracción de núcleos en la muestra es posible para la determinación de las propiedades mecánicas. Debido a la alta presencia de cantidades altas en esmectita, las unidades de roca en esta clase rápidamente se desintegran. Aw cambios de 9 a 20. Porosidad rangos entre 20 y 35 %. En comparación con la clase IB, cantidades importantes se disminuyen en los valores de DI(av) (75-94%) y KDI (0.50-0.97). Los valores de Id2 no muestras importantes disminuciones (90-92%) cuando se comparan con los de clase IB.
	III	60 - 79	La magnitud de desintegración en esta clase es debida a procesos atmosféricos y son mayores que los de la clase II, debido a la fuerte degradación la extracción de muestras de núcleo para las propiedades mecánicas no es posible incluso para pruebas de bloque (BPI). Los contenidos de arcilla en esta clase de rocas varían 35 a 40 %. Aw están entre 21 y 30, la porosidad tiene valores entre un rango de 36 al 40%, DI(av) y KDI están entre 55 y 74%, 0.40 y 0.79 respectivamente, pero los rangos de Id2 tienen valores pequeños (85 y 89%).
	IV	40 - 59	Como resultado de procesos de humedecimiento y secado, la disgregación en la roca es dominante, las unidades de la roca se dividen en placas y láminas causando muestras esféricas, la prueba de desleimiento- durabilidad se dificulta. Similar a la clase III, incluso especímenes en forma de disco no pueden ser extraídos en forma de bloques simples. Contenidos de arcilla con rangos entre 41 y 45 %, el grupo de minerales de esmectita está entre los principales minerales arcillosos. Aw valores entre 31 y 40. La porosidad valores entre 41 y 50. Id2 valores por lo general entre 66 y 84. DI(av) y KDI varían entre 31 y 54%, 0.26 y 0.39 respectivamente.
	V	20 - 39	Presencia de rocas-cojinete con altos contenidos de minerales arcillosos (45 a 54%) caen en esta clase. El incremento de minerales típicos arcillosos (grupos de esmectita) abundan. Se dificulta la determinación de las propiedades mecánicas se necesita la ayuda de la prueba BPI, carga de puntos y prueba de penetrómetros con aguja, sin embargo las propiedades físicas pueden ser determinadas. Aw valores entre 41 y 50. La porosidad valores mayores al 50%. Id2 valores por lo general entre 56 y 65%. DI(av) y KDI varían entre 11 y 30%, 0.10 y 0.25 respectivamente.
	VI	0 - 19	Las rocas que contienen arcilla con un porcentaje que oscila entre el 55 y el 75% y un bajo contenido de carbonatos (5-10%) se encuentran generalmente en esta clase. Las rocas que se encuentran en esta clase se encuentran completamente desintegradas en lodo o rompen en laminado muy fino y fragmentos debido a las condiciones atmosféricas. Es bastante difícil determinar sus propiedades físicas y mecánicas. Aw es mayor que 50. Algunas rocas de esta clase son bastante sensibles a los procesos atmosféricos y los valores de I y Dw se encuentran entre 16 y 55% y entre 0 y 10, respectivamente.

**SDR: Calificación de Desleimiento- Durabilidad, Aw: Absorción, Id2 Segundo ciclo de la prueba durabilidad desleimiento, DI(av) Promedio de la prueba de desintegración, KDI Intervalo del coeficiente de distribución.**

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS.

En la Figura 3-1 se presenta de manera general y simplificada el esquema de trabajo realizado, con el cual fue elaborada la presente investigación.



Figura 3-1 Esquema metodología de trabajo

#### 3.1 DISEÑO Y DESARROLLO DE LA SONDA ELÉCTRICA

En esta etapa de investigación se realizó el diseño, desarrollo, calibración e implementación del equipo electrónico y mecánico con el que se opera la sonda eléctrica. El equipo fue utilizado para realizar la medición de cambios de voltaje en las muestras de roca degradada, siendo éste el parámetro empleado para la determinación de la resistividad eléctrica del material (ver Figura 3-2).

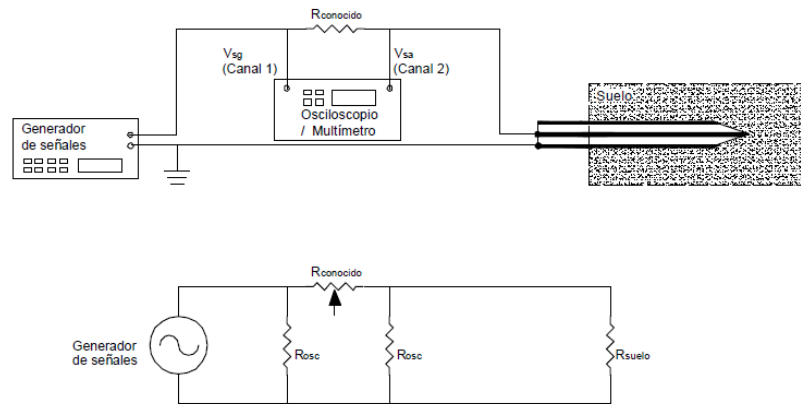


Figura 3-2 Esquema general Configuración experimental sistema electrónico  
Fuente: (Cho, Lee, & Santamarina, 2004)

### 3.1.1 Implementación y calibración del sistema electrónico

Para la implementación del sistema electrónico fue necesario el empleo de una protoboard o tablero con orificios. En este se insertó una resistencia conocida y cables para el montaje principal, ayudando a probar el circuito y determinando su funcionalidad. Este sistema se construyó finalmente en una baquelita impresa con las conexiones establecidas en la Figura 3-3 reduciendo considerablemente el ruido que presentó el sistema en sus dos primeras etapas de pruebas (ver Figura 3-3 y Figura 3-4).

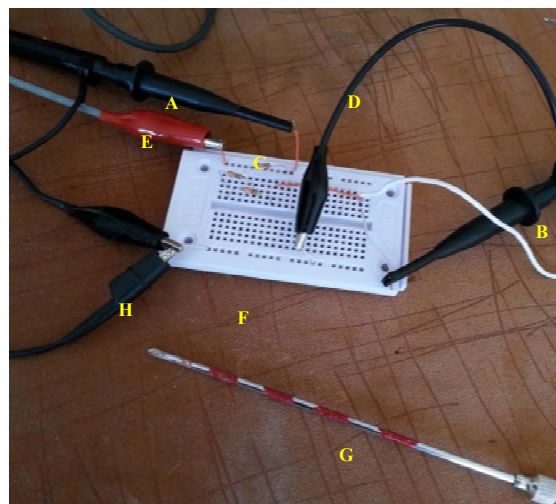


Figura 3-3 Esquema inicial montaje electrónico  
(A) Canal de entrada No 1 (B) Canal entrada No 2 (C) Resistencia Conocida (D) Polo a tierra 1  
(E) Generador señal Seno (F) Protoboard (G) Sonda de aguja eléctrica (H) Polos a tierra

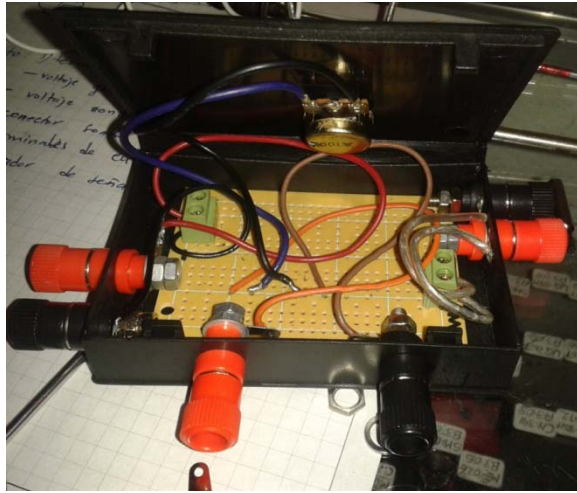


Figura 3-4 Montaje parcial sistema electrónico

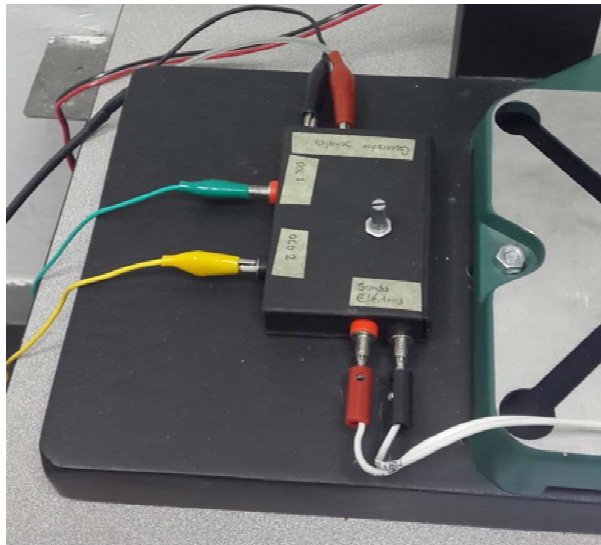


Figura 3-5 Montaje final sistema electrónico

### 3.1.2 Adecuación de la sonda eléctrica

La sonda es un conductor coaxial que se construyó insertando un hilo de cobre esmaltado encauchado (conductor interno) con un diámetro de 0.51 mm (calibre 24) dentro de un tubo metálico fino (aguja hipodérmica), que funciona como conductor externo. El espacio



anular restante se llenó con una resina epóxica de tipo rally la cual permite un correcto manejo y moldeado, que garantiza el correcto aislamiento del conductor interno. Luego la punta se limó para obtener un doble bisel, para facilitar la penetración y para generar un campo eléctrico al frente de la sonda en la zona no perturbada por la inserción (Cho, Lee, & Santamarina, 2004)

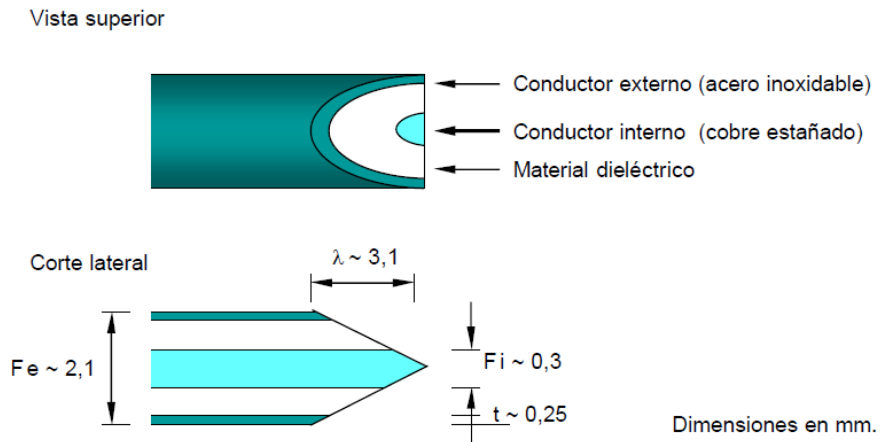


Figura 3-6 Descripción Montaje sonda eléctrica  
 Fuente: (Cho, Lee, & Santamarina, 2004)



Figura 3-7 Sonda eléctrica elaborada

### **3.1.3 Equipos electrónicos empleados**

A continuación se presenta una descripción general sobre los equipos empleados en la elaboración del sistema de adquisición de datos (resistividad en las muestras de rocas degradadas).

#### *3.1.3.1 Osciloscopio*

El osciloscopio empleado en la investigación (Tectronix Tds 210) es el encargado de acoplar al sistema electrónico la sonda eléctrica mediante sus dos canales: el de entrada que proviene del generador de señales con una amplitud conocida de 1 Voltio, y el de la señal de salida proveniente de la sonda eléctrica (encargada de tomar los cambios de voltaje en las muestras de roca degradada).

#### *3.1.3.2 Generador de Señales*

El generador de señales es el encargado de generar la señal de entrada al sistema, por medio de una función seno con una frecuencia  $\sim 100$  kHz. Dicha frecuencia debe ser establecida en este nivel con el fin de minimizar efectos de corrosión, polarización de electrodos y la resonancia eléctrica del circuito. Esta señal de entrada deberá tener una amplitud de 1 Voltio pico a pico para mejorar la calidad de la lectura en las medidas mostradas en el osciloscopio.

### **3.1.4 Equipo mecánico de penetración**

El equipo de penetración es implementado, para asegurar la velocidad constante inserción de la aguja en las muestras de roca blanda. Las condiciones de drenaje en la punta dependerán de la escala de tiempo para la disipación de la presión de poros  $t_{dis}$  y la escala de tiempo para la penetración  $t_{pen}$  (Cho & Eun, 2007) (ver Ecuación 10)

El equipo implementado se muestra en la Figura 3-8 el cual cuenta con un motor SKF con capacidad de empuje de 350 kg que inicia con 1000 rpm y reduce a un rango de 10 a 70 rpm mediante un sistema de piñones y tornillo sin fin. El motor es calibrado mediante un potenciómetro que garantiza la velocidad de inserción. La presión es ejercida mediante un

pistón el localizado de forma perpendicular a la muestra. La aguja de sonda eléctrica es asegurada en la punta del pistón por medio de un mandril.

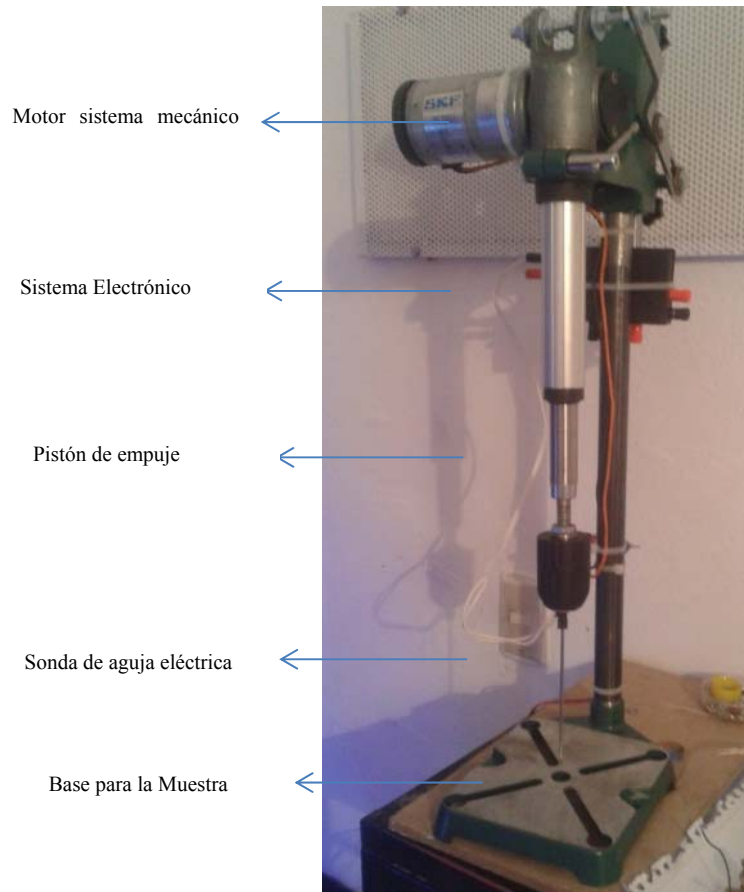


Figura 3-8 Sistema Mecánico de inserción

### 3.2 MUESTREO Y CÁLCULO DEL NIVEL DE DEGRADACIÓN

En esta etapa se presenta el esquema implementado para la obtención de las muestras en el sitio estudiado. En este trabajo se escogieron tres taludes que se localizan sobre la vía que conduce desde Bogotá hasta la ciudad de Tunja en el Departamento de Boyacá.

### 3.2.1 Localización sitios de Muestreo

Los sitios escogidos para la recolección de muestras están ubicados en taludes sobre tres puntos (ver Figura 3-9) de la vía que cuentan con diferentes características, las cuales se resumen en la tabla No 3.

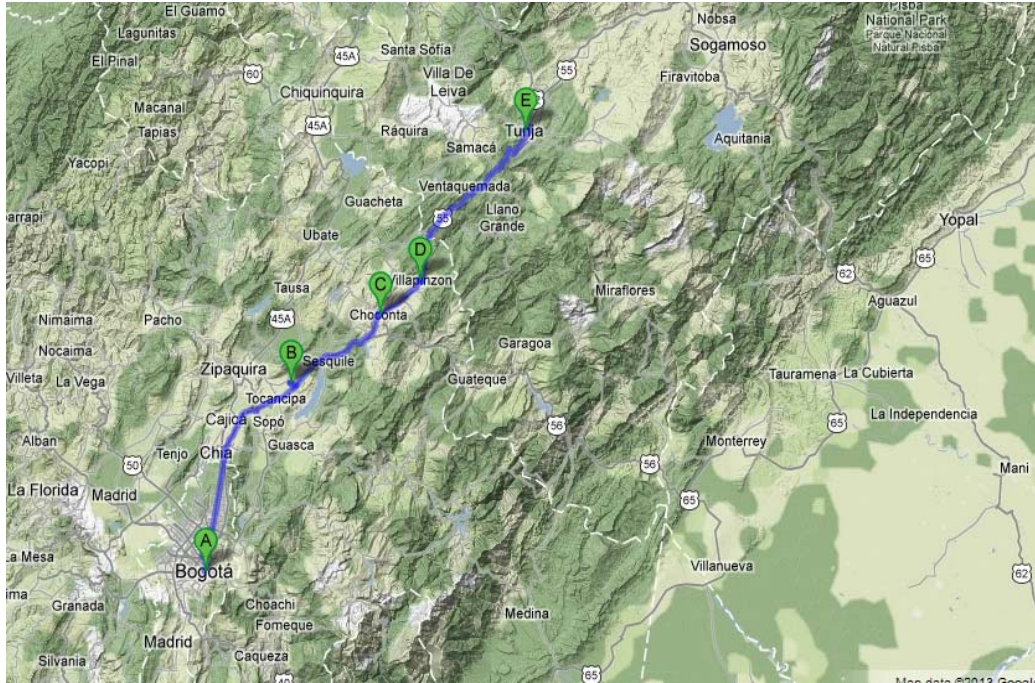


Figura 3-9 Mapa Geográfico de localización taludes en estudio (Imagen Google Earth)

(A) Punto de salida Bogotá (B) Talud No 1 Gachancipa (C) Talud No 2 Chocontá (D) Talud No 3 Villapinzón (E) Punto de llegada Tunja.

### 3.2.2 Estratigrafía

Empleando las cartas geológicas, donde se muestra sobre un mapa la distribución de las rocas y materiales superficiales no consolidados y las estructuras que los afectan, se logró obtener la clasificación geológica del sector en estudio de cada una de las muestras, caracterizándolas de acuerdo con mostrado en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1 Clasificación Geológica de Muestras de roca degradada

Descripción	Talud No1	Talud No2	Talud No3
Ubicación	Gachancipá	Chocontá	Villapinzón
Coordenadas	Longitud: 286° 9' 40.7''	Longitud: 286° 18' 33.92''	Longitud: 286° 23' 46.48''
Geográficas	Latitud : 5° 1' 56.16''	Latitud : 5° 8' 30.34''	Latitud : 5° 12' 16.22''
Formación	Guadalupe	Tilatá	Guadalupe
Estratigrafía Regional	Arcillas limosas gris clara y oscura, Arenisca cuarzosa gris clara.	Areniscas y arenas de grano fino a grueso blancuzco a rojizo.	Arcillas limosas gris clara y Arenisca cuarzosa gris clara.
Edad	Finales del Cretáceo	Plioceno Mioceno	Finales del Cretáceo
Tipo de roca	Lodolita con arcillolitas limosas y areniscas	Capas gruesas de grava clasto- soportadas. Areniscas conglomeradas y grava	(Arcilloso - Arenoso) Depositados por ríos
No de Bloques	3	3	3
Observaciones	Grietas generadas por el talud en erosión.	Acumulación de ceniza volcánica.	Grietas en los taludes ocasionadas por agua



Figura 3-10 Talud No 1 Gachancipa - El Roble



Figura 3-11 Talud No 2 Choconta



Figura 3-12 Talud No 3 Villa Pinzón

### 3.2.3 Muestreo de campo

Una vez identificados y localizados los sitios para la realización del muestreo, se procedió a realizar la extracción de las muestras teniendo en cuenta las siguientes recomendaciones:

- ✓ Identificación visual de tres diferentes niveles de degradación en la muestra dentro de un mismo talud. (Figura 3-13)
- ✓ Extracción de tres muestras. Esta actividad se realizó empleando herramienta adecuadas (pala – pica – barra) para evitar la alteración o destrucción de la muestra en su estado natural.
- ✓ Se empleó vinipel para envolver la muestra y conservar las condiciones iniciales de degradación, evitando la desintegración de la muestra; ésto contribuye a la conservación de la humedad natural (ver Figura 3-13)
- ✓ Almacenar la muestra en un recipiente el cual debe contener aserrín preferiblemente, el cual ayudara a evitar el posible desmoronamiento por causa del transporte de las muestras.

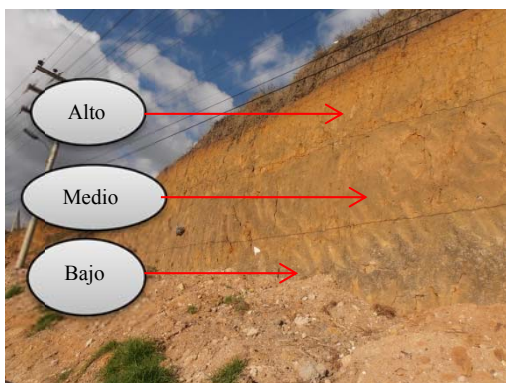


Figura 3-13 Esquema de la toma de muestras



Figura 3-14 Protección de las muestras

### 3.2.4 Determinación de los niveles de degradación empleando el método “Slake durability rating” (SDR)

Para la determinación del grado de degradación de las muestras extraídas se realizó el siguiente procedimiento en laboratorio:

- ✓ Corte de la muestra hasta lograr la similitud de sus lados, buscando un bloque de 10 cm x 10 cm x 10 cm aproximadamente; la medida final del bloque se denotó como "l"
- ✓ Contabilizar las fisuras encontradas; el número de fisuras se denotó como "n" .  
(ver Figura 3-15)



Figura 3-15 Muestra representativa Medición Slake Durability Rating



- ✓ Teniendo en cuenta la longitud de la muestra " $l$ " y el número de fisuras " $n$ " se procedió a calcular los niveles de degradación "Slake Durability Rating" empleado la Ecuación 11 y Ecuación 12:
- ✓ Con los resultados de SDR de cada una de las muestras y empleando la Tabla 2-2 se determinó el nivel de degradación de las muestras. (Ver Anexos).

$$\lambda = \frac{n}{l} \quad \text{Ecuación 13}$$

$$SDR = 100 - 100 * \lambda \quad \text{Ecuación 142}$$

### **3.3 JAR SLAKE TEST Y ENSAYOS DE HUMEDAD**

En esta etapa de investigación, las muestras adquiridas en el proceso descrito en el numeral 3.2, fueron sometidas a un proceso de desintegración controlado (Jar slake test) con el fin de evaluar la resistencia a la degradación por agua en un procedimiento rápido y sencillo, empleando el procedimiento descrito en la norma INV-E122-07.

#### **3.3.1 Jar Slake Test.**

El alcance de esta prueba consiste en evaluar la resistencia a la degradación de la muestra de roca por agua. El fundamento de la prueba consiste en determinar el comportamiento de la muestra con materiales arcillosos cementados o consolidados, la cual es sumergida en agua destilada durante 24 horas, determinando si la muestra es débil o no y si se desagrega fácilmente. (Fieldman, 2012)

Tabla 3-2 Caracterización comportamiento Jar Slake

Jar Index	Descripción
1	Se degrada en capas (desintegración completa)
2	Se rompe rápidamente y/o formas muchas grumos
3	Se rompe lentamente y/o formas muchas grumos
4	Se rompe rápidamente y/o desarrolla varias fisuras
5	Se rompe lentamente y/o formas pocas fisuras
6	Sin cambios

En la Figura 3-16 se muestra el proceso que se realizó en el proceso de la prueba “Jar slake” con las diferentes muestras de rocas degradadas estudiadas.



Figura 3-16 Jar Slake en muestras de rocas degradadas

### 3.3.2 Prueba de humedad

Empleando lo descrito en la norma INV-E122-07, y después de realizar la prueba del “Jar Slake” en las muestras de rocas degradadas, se procedió a inducir las humedades

correspondientes al 65% - 45% - 30% - 25% y humedad natural para realizar posteriormente las pruebas de resistividad eléctrica para cada humedad.



Figura 3-17 Pruebas de humedad en laboratorio

(a) Toma de pesos en condiciones iniciales (b) Secado de muestras de rocas degradadas en horno

### 3.4 ENSAYOS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

Para la elaboración de las pruebas de resistividad propuestas en esta investigación fue necesario realizar todos los procesos descritos en las diferentes etapas, buscando siempre la calidad de los resultados. Para ello fue necesario tener protocolos descritos anteriormente en la recolección de muestras en campo, remoldeo de muestras en laboratorio e implementación de sistema electrónico y mecánico.

Los resultados y discusiones se ven descritos en el siguiente capítulo, conservando el siguiente esquema para la elaboración de los diferentes ensayos.



Figura 3-18 Esquema ensayos realizados

En la Tabla 3-3 se presenta una descripción general de los ensayos realizados en la presente investigación, dando cumplimiento a los objetivos planteados para tal fin.

Tabla 3-3 Cuantificación ensayos realizados

TALUD	No Muestras	Clasificación DSR	Clasificación jar slake	Ensayos de humedad	Ensayos de resistividad
1	3	3	3	15	45
2	3	3	3	15	45
3	3	3	3	15	45
<b>Total</b>		<b>9</b>	<b>9</b>	<b>45</b>	<b>135</b>

#### 4. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presenta los distintos resultados obtenidos con la realización de los ensayos de resistividad eléctrica bajo diferentes condiciones establecidas anteriormente, como son los diferentes grados de degradación de las muestras en rocas degradadas empleando el método “Slake Durability Rating”. Además la relación de los resultados aplicando distintos grados de humedad.

Con el fin de simplificar y analizar los resultados obtenidos, se muestra la representación gráfica de promedios y de las pruebas de resistividad con diferentes grados de humedad, (ver en la Figura 4-1).

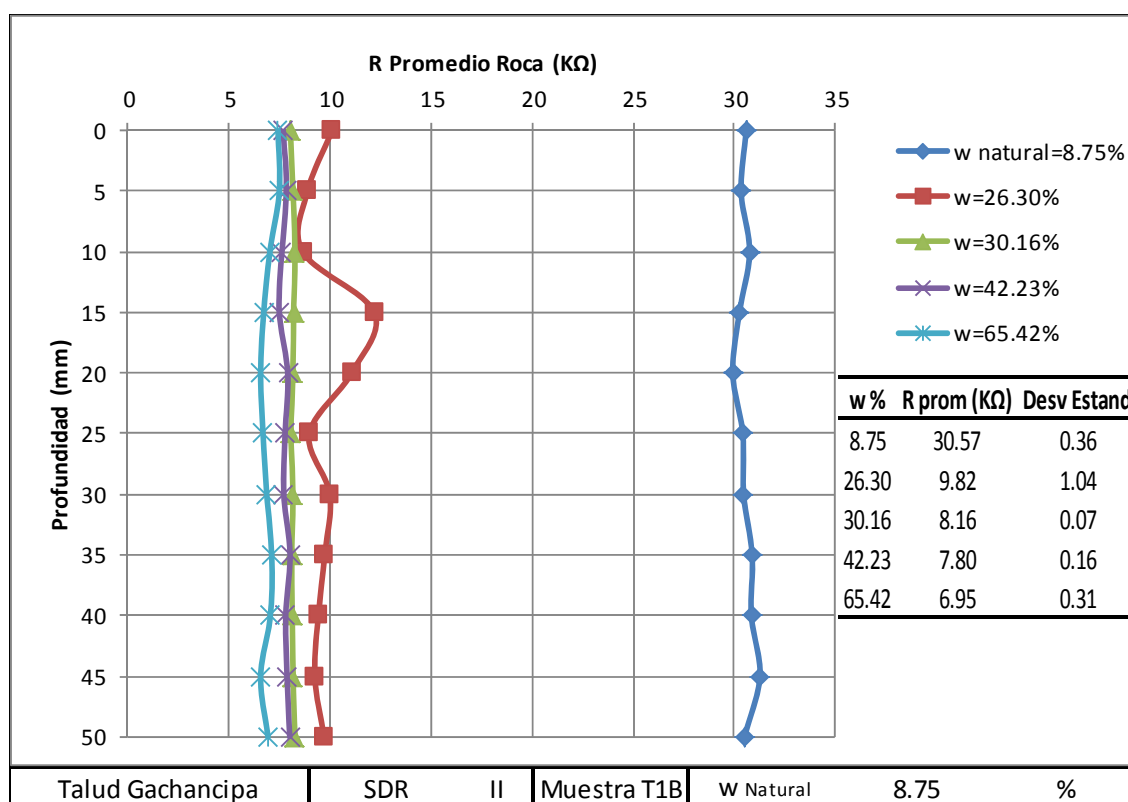


Figura 4-1 Tendencia de resistividad talud No 1 Gachancipa parte baja SDR II.

En el estado inicial sin degradar (w natural) la muestra de roca (ver Figura 4-2), presenta una variación uniforme con la penetración de la aguja; la resistividad disminuye

ligeramente porque la muestra presenta indicios de degradación, se encuentra microfisurada. En la Figura 4-1 se pueden observar que existen variaciones de resistividad en los dos primeros centímetros, se observa cambios en la homogeneidad de la muestra. En la parte inferior del recipiente, el material fino se sedimentó por efecto en los cambios de humedad, se observa una mejor acomodación de las partículas lo que indica que los cambios no son muy altos en la resistividad respecto al inicio del ensayo, ver Figura 4-2.



Figura 4-2 Perfil muestra Talud No 1 Bajo.



Figura 4-3 Perfil 2 muestra Talud No 1 Bajo.

En la Figura 4-4, se observa que a partir de la humedad del 25.22% la muestra tiende a resultados de resistividad entre 6 kΩ y 9 kΩ. Estos valores están generados para rangos de humedades entre el 25.22% al 68.88% y son valores cercanos entre sí debido a que la muestra se encuentra remoldeada por la adición del agua, es una roca blanda donde el material se degrada fácilmente, los cambios no son representativos, la resistividad de la roca es homogénea por la degradación del material en partículas finas.

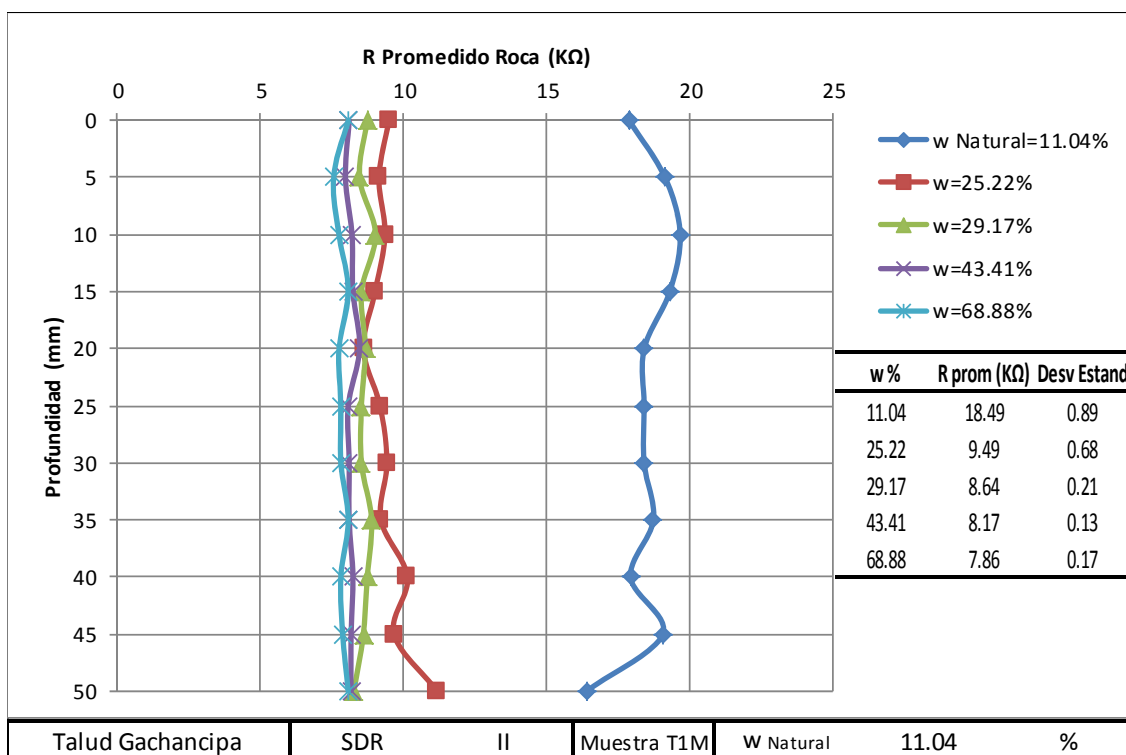


Figura 4-4 Tendencia de resistividad. Talud No 1 Gachancipa parte media SDR II.

En la Figura 4-5 y Figura 4-6 se observa un estado degradado de la muestra de roca después de haber sido sometida al Jar Slake, donde se refleja un rompimiento rápido que forma capas de material en forma laminada.

Existe una sedimentación de material fino modificando la consistencia de la misma, los fragmentos más pequeños se depositan en la parte inferior del recipiente quedando los fragmentos más gruesos en la parte superior, con este proceso las partículas de la muestra se acomodan cambiando la relación de vacíos.

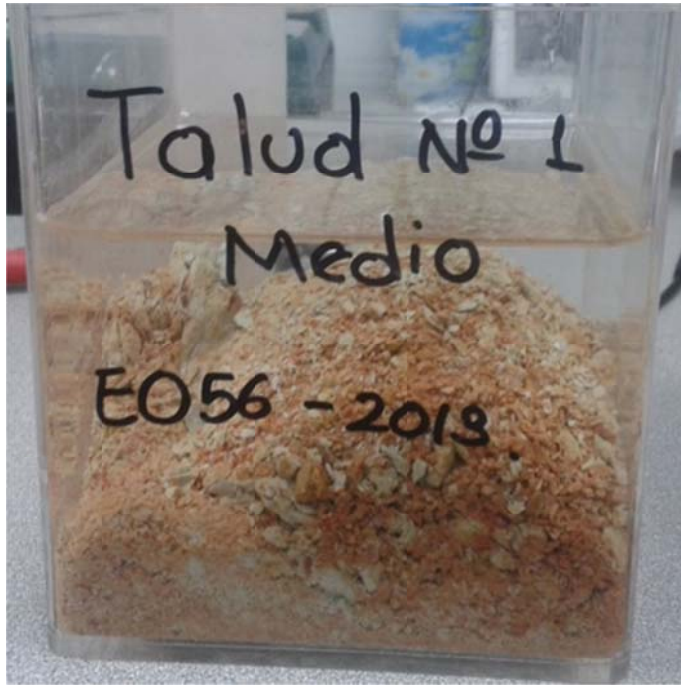


Figura 4-5 Perfil muestra Talud No 1 Medio.



Figura 4-6 Planta muestra Talud No 1 Bajo.



Se observa que la variabilidad espacial de la muestra Figura 4-8, cambia entre los 2 cm a los 3 cm, la tendencia tiene un cambio al aumento de resistividad porque en este punto los materiales cambian de consistencia, tiene comportamiento similar a la muestra del talud Número 1 por su consistencia y rigidez.

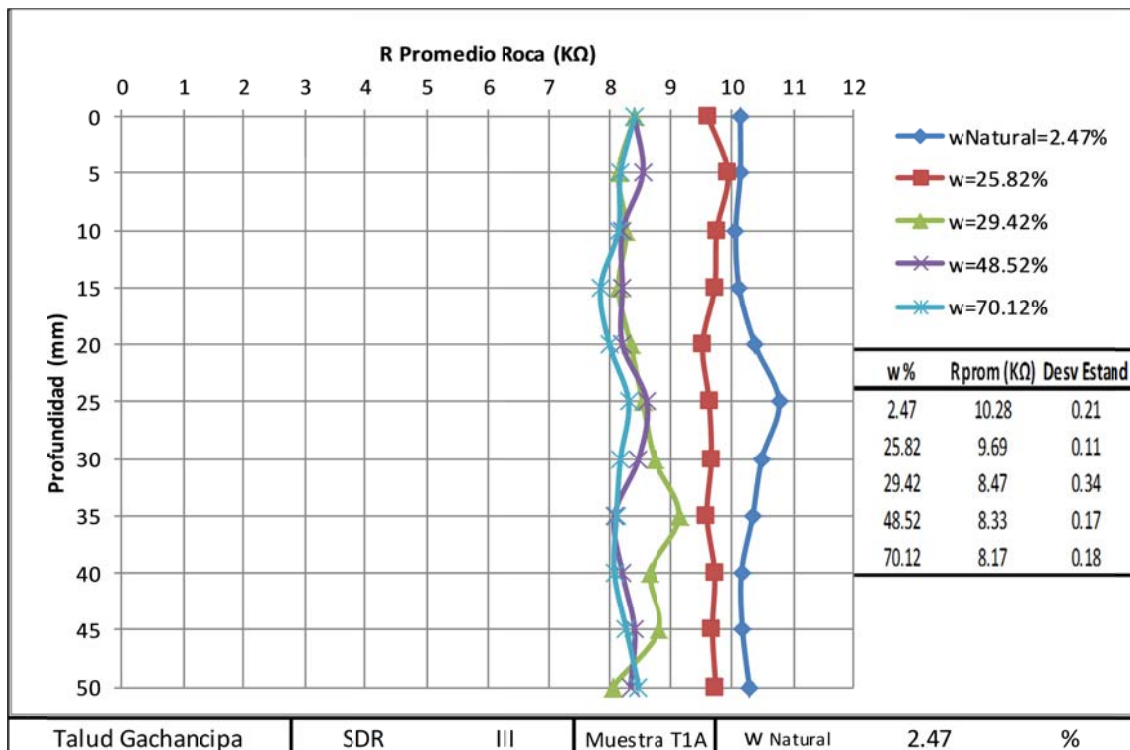


Figura 4-7 Tendencia de resistividad. Talud No 1 Gachancipa parte alta SDR III

Se observa que en la Figura 4-8, el proceso del Jar Slake no degrada significativamente la muestra, la roca rompe lentamente y forma pocas fisuras además conserva unas condiciones iniciales bajo el efecto del agua.

La muestra presenta una baja humedad natural debido al ambiente donde se encuentra este es un indicador cualitativo de baja porosidad.



Figura 4-8 Perfil muestra Talud No 1 Alto.



Figura 4-9 Perfil 2 muestra Talud No 1 Alto.

La Figura 4-10 no presenta posibles tendencias estables, se observa grandes variaciones por la variabilidad interna de la misma, existen grandes cambios en la porosidad y consistencia de la muestra como apreciamos en la Figura 4-12. Estos cambios de porosidad y consistencia fueron analizados por observación de los macro poros a medida que la muestra se fue degradando formando granos gruesos y finos, inicialmente la muestra estaba más compacta y a medida que se degradó las partículas se fueron separando entre sí.

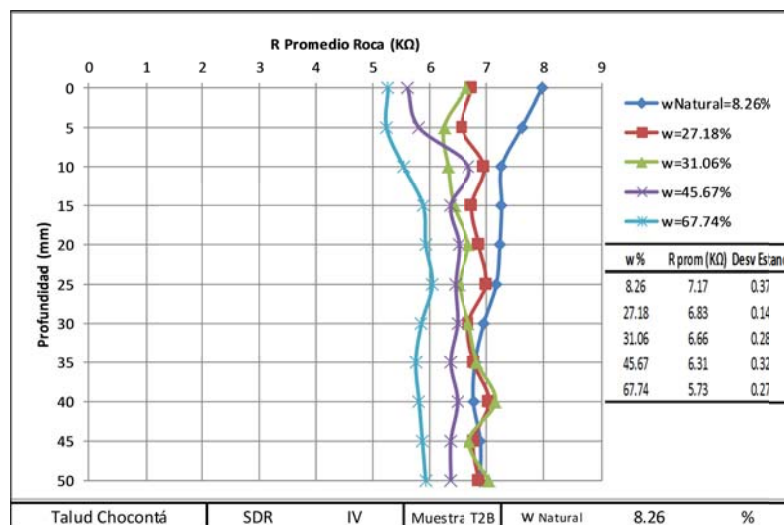


Figura 4-10 Tendencia de resistividad talud No 2 Chocontá parte baja SDR IV

Relacionando las figuras 4-10 y 4-11 respectivamente se evidencian variaciones significativas en los cambios de resistividad porque la muestra tiene una degradación fuerte, se observan varias discontinuidades en la composición de la muestra, a medida que la aguja entra en la muestra detecta los cambios locales de resistividad pasando por condiciones donde los vacíos de la muestra tienen suelo saturado y/o en donde los vacíos están llenos por aire. Sin embargo se observa que las variaciones en los cambios de resistividad eléctrica se encuentran en un rango que no superan la unidad de 1 kΩ para humedades entre el 27% y el 46% aproximadamente, conservando cambios muy pequeños a medida que se realiza la penetración de la muestra. En la muestra de la Figura 4-11, la afectación causada por el método “Jar Slake” no fue tan fuerte como tras muestras, ya que se degradó lentamente formando algunos grumos.

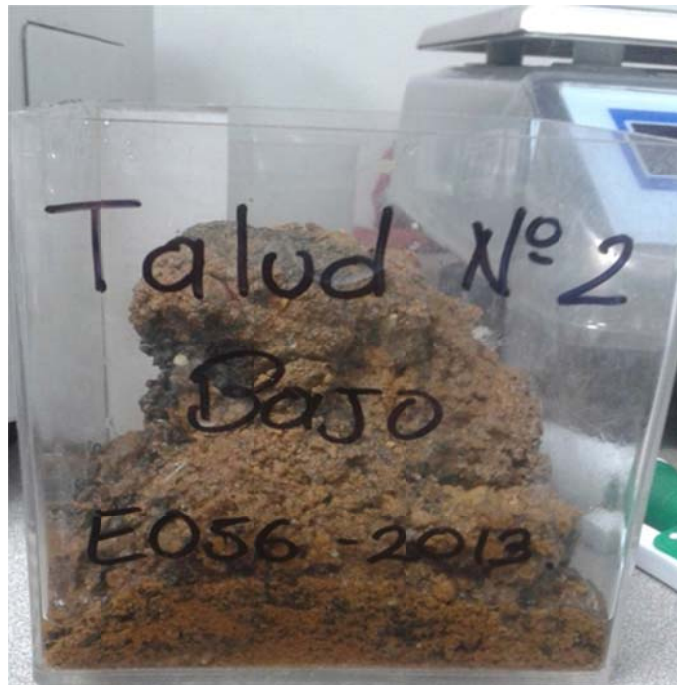


Figura 4-11 Perfil muestra Talud No 2 Bajo.



Figura 4-12 Planta muestra Talud No 2 Bajo.

La Figura 4-13 presenta valores de resistividad altos para la humedad natural, a los 3 cm se detecta un pequeño salto en la resistividad causado por un grano interno de consistencia dura causado por el contacto del conductor interno con él grano, la penetración de la aguja se dificultó en esta muestra para la humedad natural por el nivel de degradación (roca con solidez alta). Se observa que los valores cambian porque la muestra presenta fisuras internas. Ver Figura 4-14.

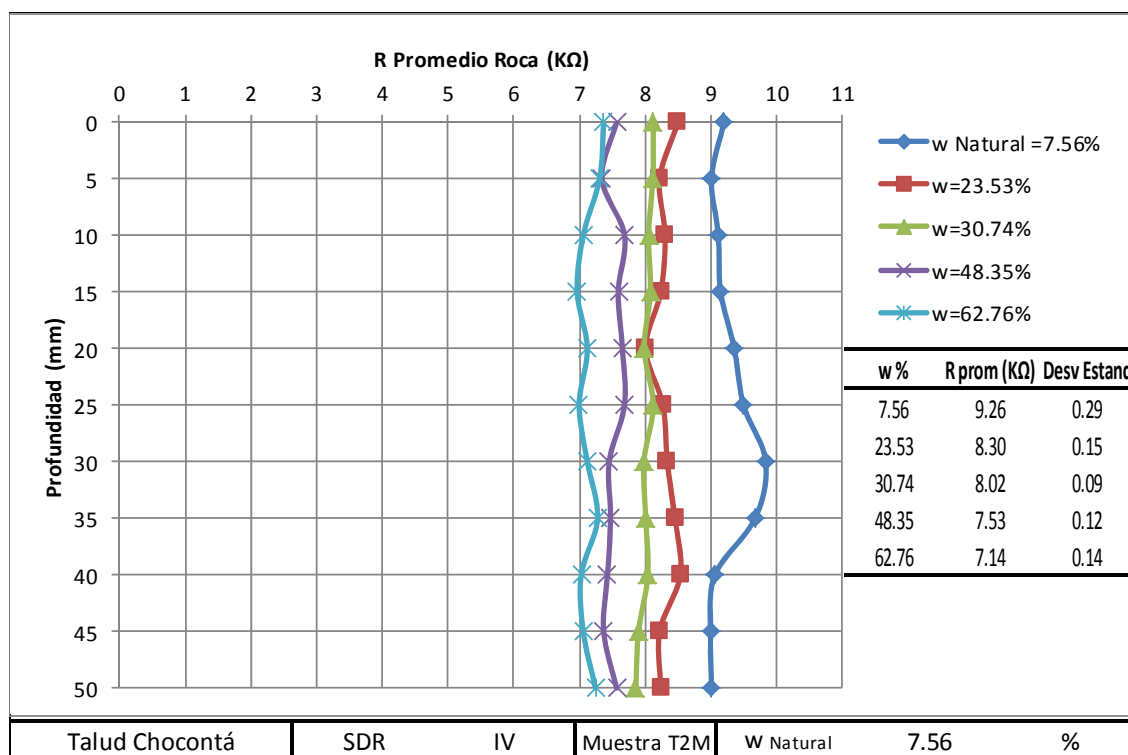


Figura 4-13 Tendencia de resistividad talud No 2 Choconta parte media SDR IV.

Los ensayos realizados que se aprecian en la Figura 4-13 pertenecen a la muestra de roca que apreciamos en la Figura 4-14, si observamos la tendencia de las resistividades miramos que existe un aumento de  $1\Omega$  a  $2\text{ k}\Omega$  para profundidades de 25 mm a 35 mm, estas variaciones son producidas por que la muestra tiene discontinuidades abiertas sin ningún tipo de sellante interno generado por las mismas partículas de la muestra. Cuando existen están discontinuidades vemos los saltos de la resistividad.



Figura 4-14 Perfil muestra Talud No 2 Medio.



Figura 4-15 Planta muestra Talud No 2 Medio.

La disposición granulométrica de la muestra del talud No 2 Chocontá parte alta es homogénea ver (Figura 4-18), se observa un nivel de degradación mayor en los 3 cm y 5 cm respectivamente, las mediciones de resistividad son más estables cuando se inicia el ensayo en los primeros centímetros, se aprecia en las mediciones que la muestra más degradada se comporta de forma variable mientras que la parte sana de la roca se comporta de forma uniforme.

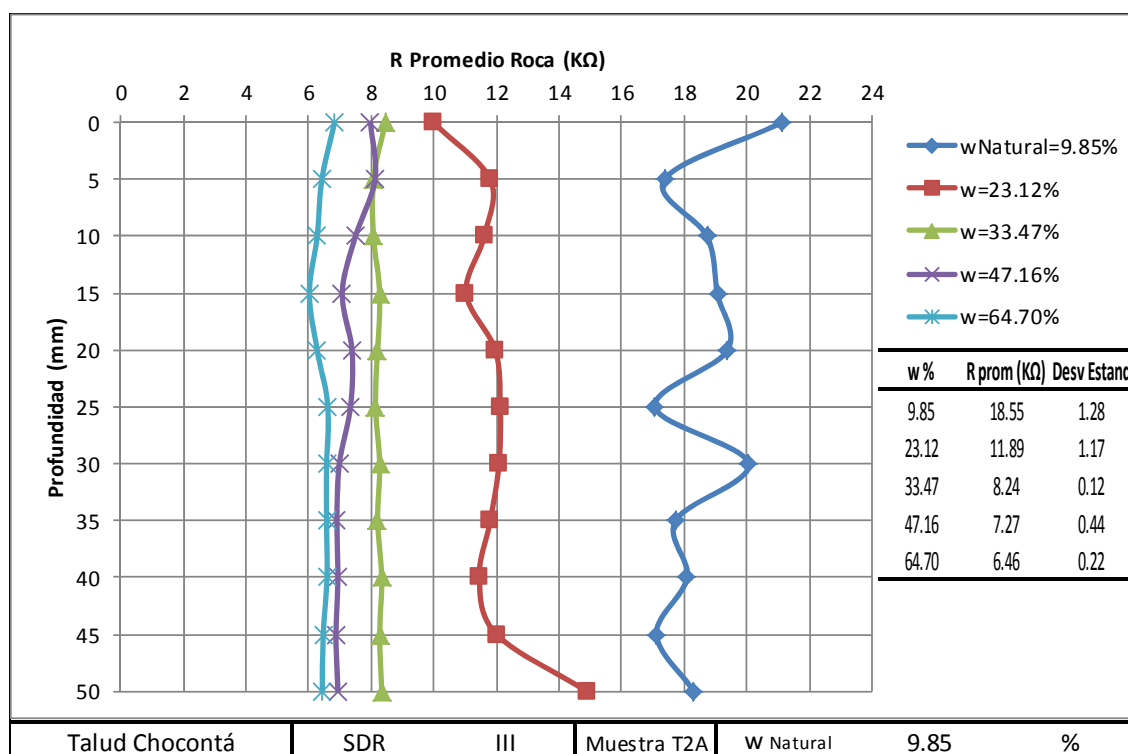


Figura 4-16 Tendencia de resistividad talud No 2 Choconta parte alta SDR III

La Figura 4-16 presenta variaciones iniciales en su resistividad para una muestra con humedad natural. Se puede observar que la resistividad es uniforme en los primeros 3 cm, a partir de ahí la muestra comienza a presentar cambios en la resistividad por su composición interna. La muestra de roca se encuentra degradada en forma significativa en el punto de los 3 cm.

La heterogeneidad en la composición de la muestra es un factor que incide de manera considerable en los cambios de resistividad, ya que contiene cambios muy significativos en sus mediciones en condiciones de humedad natural.



Figura 4-17 Perfil muestra Talud No 2 Alto.



Figura 4-18 Planta muestra Talud No 2 Medio.



La variabilidad espacial de la muestra Figura 4-20, tiende a ser homogénea, no se observa cambios significativos en la relación de vacíos porque la muestra es compactada uniformemente debido a la naturaleza de sus granos, es una muestra arenosa poco variable, en estado sano la roca presenta un cambio en su composición por variaciones internas pero a medida que se humedeció la muestra y se dejó secar se presentó remoldeo de partículas internas en la muestra ensayada.

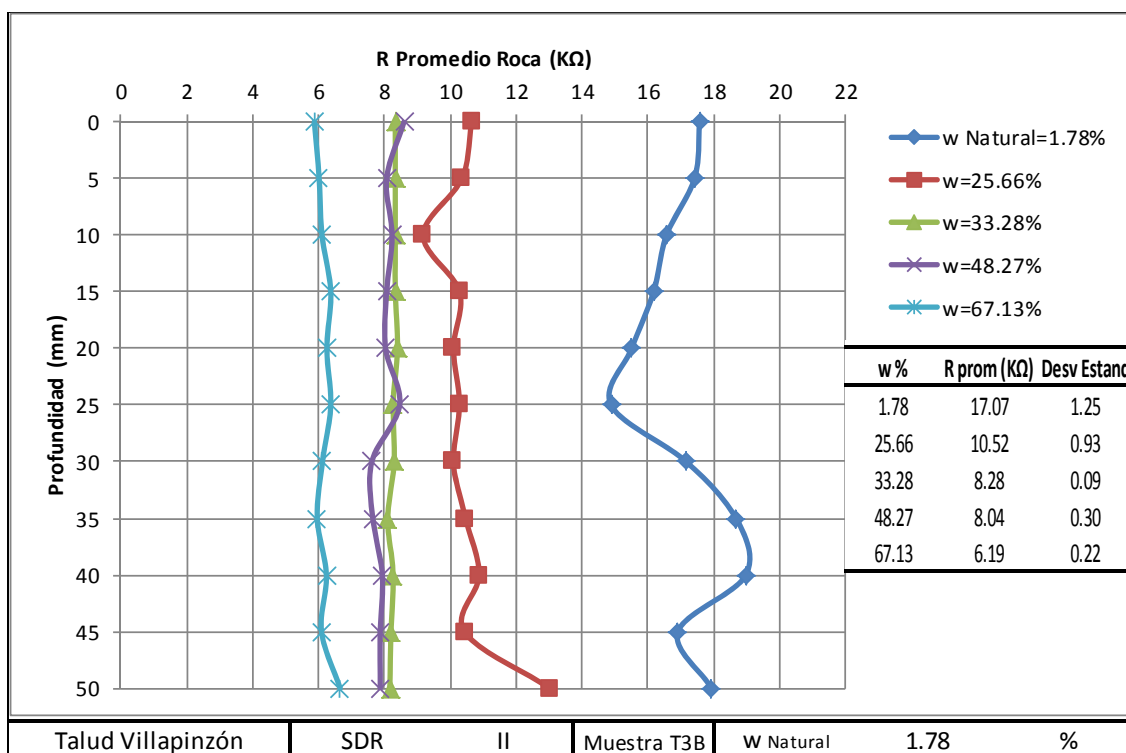


Figura 4-19 Tendencia de resistividad talud No 3 Villa Pinzón parte baja SDR II

La consistencia de la muestra en estado natural presentó una baja degradación SDR II, siendo esta una roca relativamente dura, lo cual pudo ocasionar que al entrar en contacto directo con la punta de sonda eléctrica tomara medidas de forma directa con algunos granos internos.

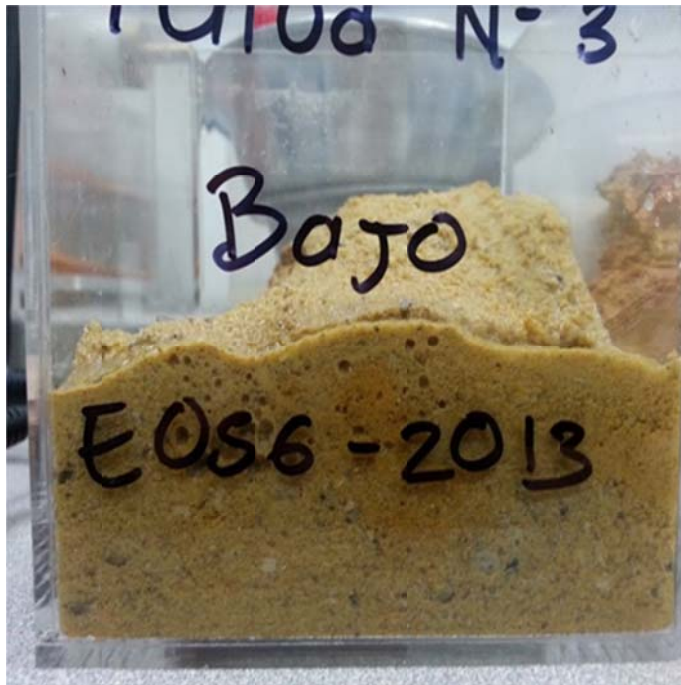


Figura 4-20 Perfil muestra Talud No 3 Bajo.



Figura 4-21 Planta muestra Talud No 3 Bajo.

La muestra de la Figura 4-23, tiene granos gruesos. Desde que se inicia el ensayo los cambios de resistividad se hacen notar cuando la roca está sana, la degradación no es muy fuerte y cambia a medida que se inserta la aguja. Cuando la muestra es más homogénea los cambios de humedad no alteran de forma significativa la resistividad.

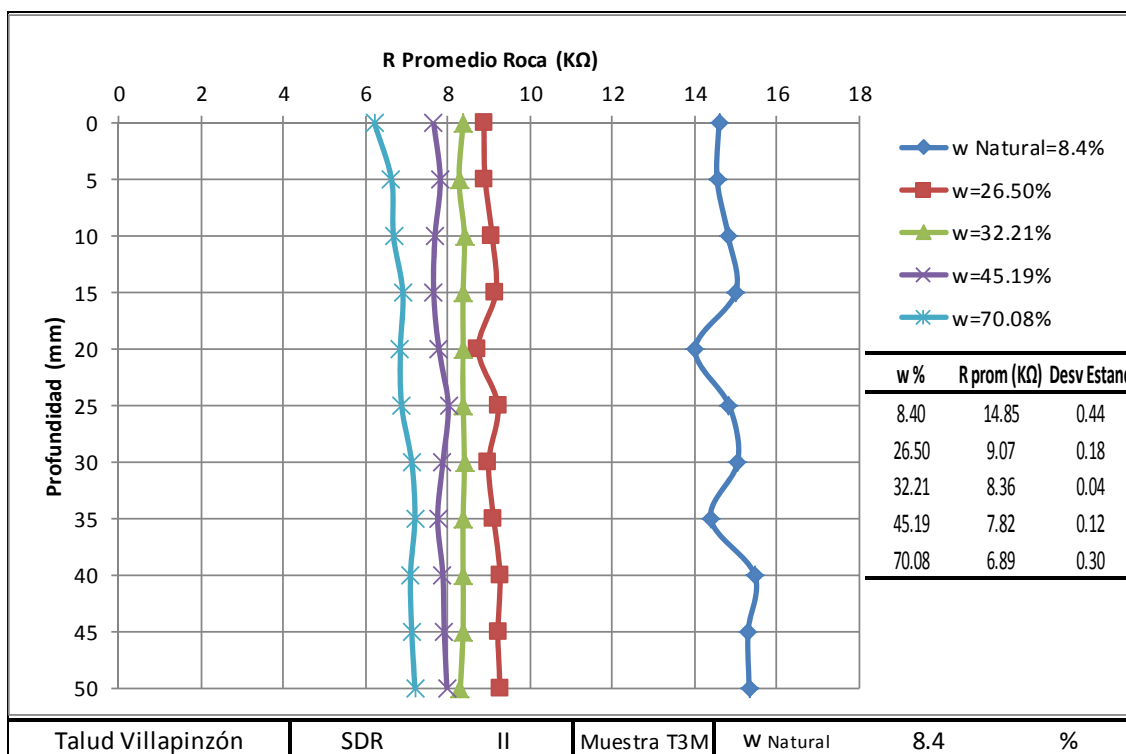


Figura 4-22 Tendencia de resistividad talud No 3 Villa Pinzón parte media SDR II

La muestra de Villapinzón correspondiente al Talud No 3 parte media, presenta degradación baja y cuando se realiza los ensayos en condiciones naturales de humedad se aprecia valores altos de resistividad pero las tendencias son variables, cuando la muestra esta degradada su composición interna cambia y la muestra es más blanda por ende las variaciones se comportan de manera uniforme.

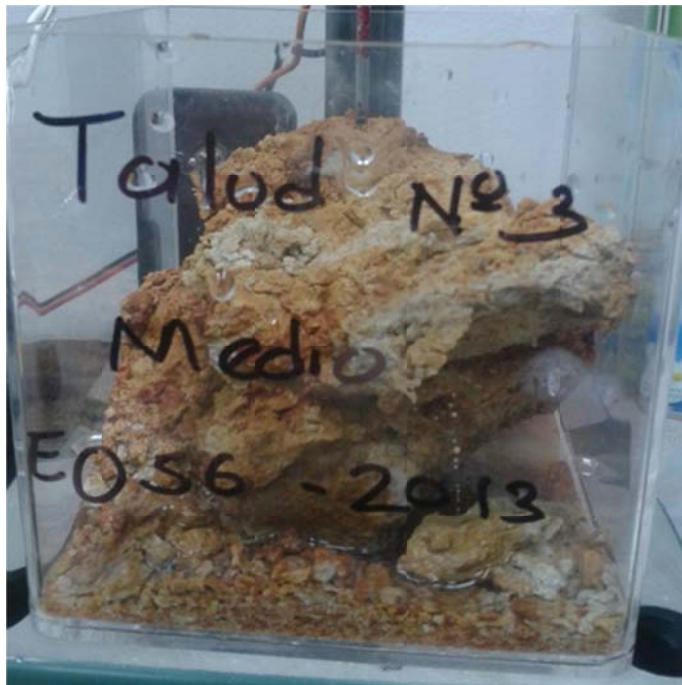


Figura 4-23 Perfil muestra Talud No 3 Medio.



Figura 4-24 Planta muestra Talud No 3 Medio.

La Figura 4-26, es una roca arcillosa blanda, su variabilidad espacial es afectada significativamente con los cambios de humedad la roca se degrada fácilmente y con los constante cambios por humedecimiento y secado las tendencias de la gráfica son muy variables. Cuando se realizan las mediciones la variabilidad interna de la muestra es alta, la roca está muy micro fisurada internamente lo que hace variar bastante las mediciones, no es homogénea y la absorción de agua es bastante grande por lo que las mediciones son tan variables.

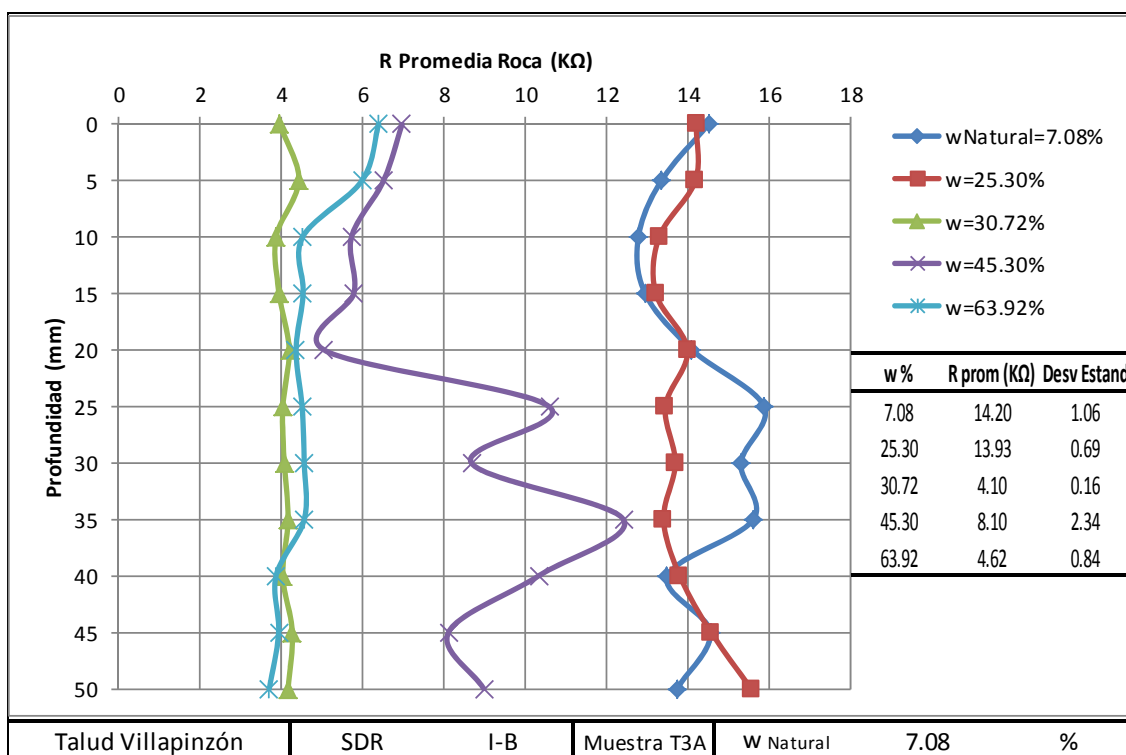


Figura 4-25 Tendencia de resistividad talud No 3 Villa Pinzón parte alta SDR I – B.

Es interesante apreciar que en la Figura 4-25 existen cambios considerables a partir de los 2 cm de profundidad, la muestra cambia totalmente no es homogénea y por ende los valores de resistividad se ven tan fluctuantes para ciertos niveles de humedad.

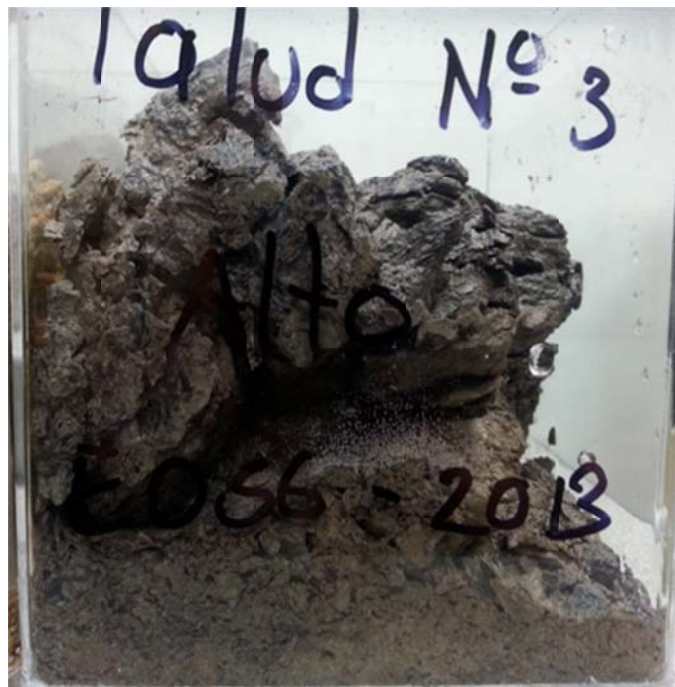


Figura 4-26 Perfil muestra Talud No 3 Alto.



Figura 4-27 Planta muestra Talud No 3 Alto.

En la Tabla 4-1, se muestra los valores de resistividad promedio para cada una de las humedades tanto natural como inducida y en ella se estudian los casos típicos para cada nivel de degradación.

Tabla 4-1 Resumen valores promedio de resistividad para cada uno de los taludes estudiados.

LOCALIZACION GEOGRAFICA TALUD	UBICACIÓN	NIVEL DE DEGRADACION	SDR	RESTIVIDAD PROMEDIO (KΩ)	HUMEDAD NATURAL (W %)	RESTIVIDAD PROMEDIO (KΩ)	HUMEDAD (W %)	RESTIVIDAD PROMEDIO (KΩ)	HUMEDAD (W %)	RESTIVIDAD PROMEDIO (KΩ)	HUMEDAD (W %)	RESTIVIDAD PROMEDIO (KΩ)	HUMEDAD (W %)
Gachancipá	T1B	SDR II	3	30.6	8.8	9.8	26.3	8.2	30.2	7.8	42.2	7.0	65.4
	T1M	SDR II	3	18.5	11.0	9.5	25.2	8.6	29.2	8.2	43.4	7.9	68.9
	T1A	SDR III	4	10.3	2.5	9.7	25.8	8.5	29.4	8.3	48.5	8.2	70.1
Chocontá	T2B	SDR IV	5	7.2	8.3	6.8	27.2	6.7	31.1	6.3	45.7	5.7	67.7
	T2M	SDR IV	5	9.3	7.6	8.3	23.5	8.0	30.7	7.5	48.4	7.1	62.8
	T2A	SDR III	4	18.5	9.9	11.9	23.1	8.2	33.5	7.3	47.2	6.5	64.7
Villa Pinzón	T3B	SDR II	3	17.1	1.8	10.5	25.7	8.3	33.3	8.0	48.3	6.2	67.1
	T3M	SDR II	3	14.8	8.4	9.1	26.5	8.4	32.2	7.8	45.2	6.9	70.1
	T3A	SDR I-B	2	14.2	7.1	13.9	25.3	4.1	30.7	8.1	45.3	4.6	63.9

#### 4.1 Resultados SDR vs Resistividad eléctrica con diferentes contenidos de humedad

La Tabla 4-2 presenta los resultados obtenidos para un degradación SDR I-B con las resistividades promedio para diferentes grados de humedad, dicho grado de degradación solo se presentó en el talud No 3 alto localizado en Villapinzón.

Tabla 4-2 Valores de Resistividad para Degradación SDR I-B

<b>T3A SDR I-B</b>	
<b>Humedad</b>	<b>Resistividad</b>
<b>%</b>	<b>k<math>\Omega</math></b>
7.1	14.2
25.3	13.9
30.7	4.1
45.3	8.1
63.9	4.6

La Figura 4-28, indica como la resistividad disminuye para un material SDR I-B a medida que la humedad va aumentando; se puede ver un cambio significativo después del 30% de humedad debido a la desintegración de la roca por el cambio de humedad y a mayor conductividad electrolítica.



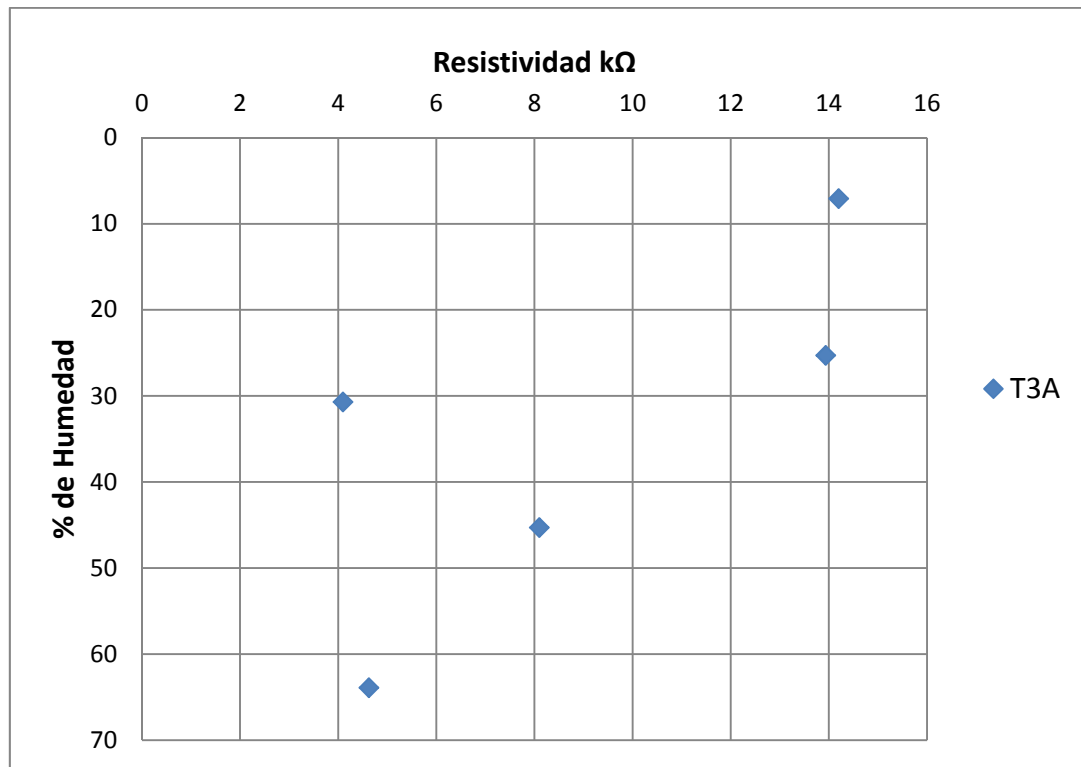


Figura 4-28 Tendencia de resistividad promedio SDR I-B. Talud Villa Pinzón parte alta para diferentes grados de humedad

En la Tabla 4-3, se presentan los valores correspondientes para un grado de degradación SDR II encontrados en los taludes localizados en Gachancipá (T1B y T1M) y Chocontá (T3B y T3A), con diferentes grados de humedad mostrando la tendencia promedio de resistividades observados en la Figura 4-29, donde se aprecia que la resistividad tiene una tendencia a 6 kΩ para una humedades mayores a 30%

Tabla 4-3 Valores de Resistividad para degradación SDR II

T1B SDR II		T1M SDR II		T3B SDR II		T3A SDR II	
Humedad %	Resistividad kΩ	Humedad %	Resistividad kΩ	Humedad %	Resistividad kΩ	Humedad %	Resistividad kΩ
8.8	30.6	11.0	18.5	1.8	17.1	7.1	14.8
26.3	9.8	25.2	9.5	25.7	10.5	25.3	9.1
30.2	8.2	29.2	8.6	33.3	8.3	30.7	8.4
42.2	7.8	43.4	8.2	48.3	8.0	45.3	7.8
65.4	7.0	68.9	7.9	67.1	6.2	63.9	6.9

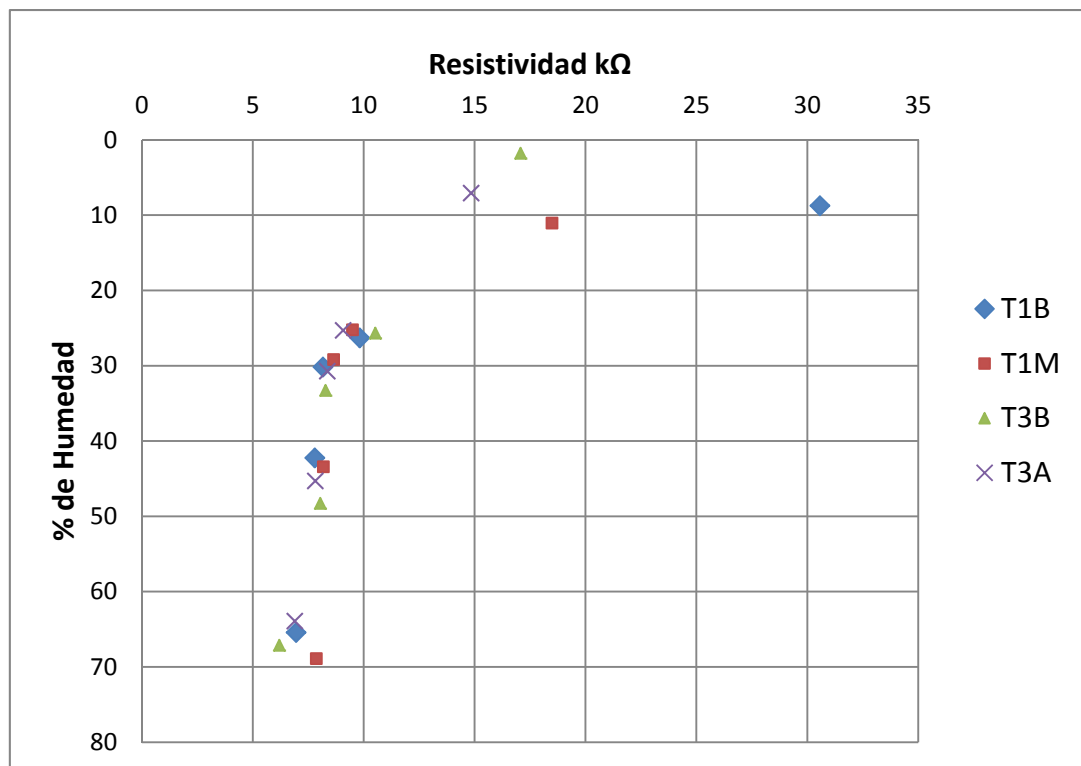


Figura 4-29 Tendencia de resistividad promedio SDR II

En la Tabla 4-4, se presentan los valores de resistividad promedio para la degradación SDR III. Para los taludes de Gachancipá y Chocontá respectivamente.

Tabla 4-4 Valores de resistividad para SDR III

T1A SDR III		T2A SDR III	
Humedad %	Resistividad kΩ	Humedad %	Resistividad kΩ
10.3	10.3	9.9	18.5
25.8	9.7	23.1	11.9
29.4	8.5	33.5	8.2
48.5	8.3	47.2	7.3
70.1	8.2	64.7	6.5

La Figura 4-30, indica que la resistividad aproximada para una degradación SDR III tiene una tendencia de 7 kΩ a 10 kΩ, para humedades superiores al 25%. Se aprecia que a menor humedad existe mayor resistividad.

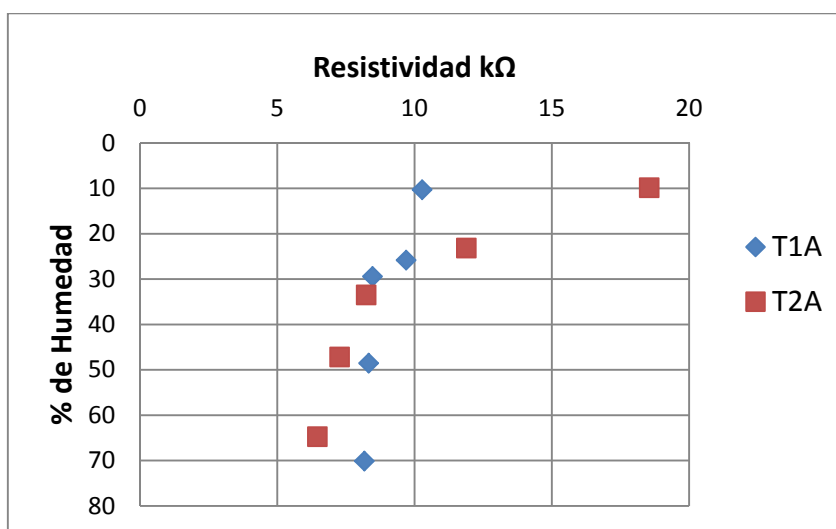


Figura 4-30 Tendencia de resistividad promedio SDR III

En la Tabla 4-5, se presentan los valores de resistividad promedio para la degradación SDR IV para el talud de Chocontá.

Tabla 4-5 Valores de resistividad para degradacion SDR IV

T2B SDR IV		T2M SDR IV	
Humedad %	Resistividad kΩ	Humedad %	Resistividad kΩ
7.2	7.2	7.6	9.3
27.2	6.8	23.5	8.3
31.1	6.7	30.7	8.0
45.7	6.3	48.4	7.5
67.7	5.7	62.8	7.1

En la Figura 4-31, a pesar que las dos muestras se encuentran dentro de un mismo grado de degradación y el mismo talud en estudio, se observa un aumento leve en el nivel resistividad de la muestras, en condiciones similares de humedad.

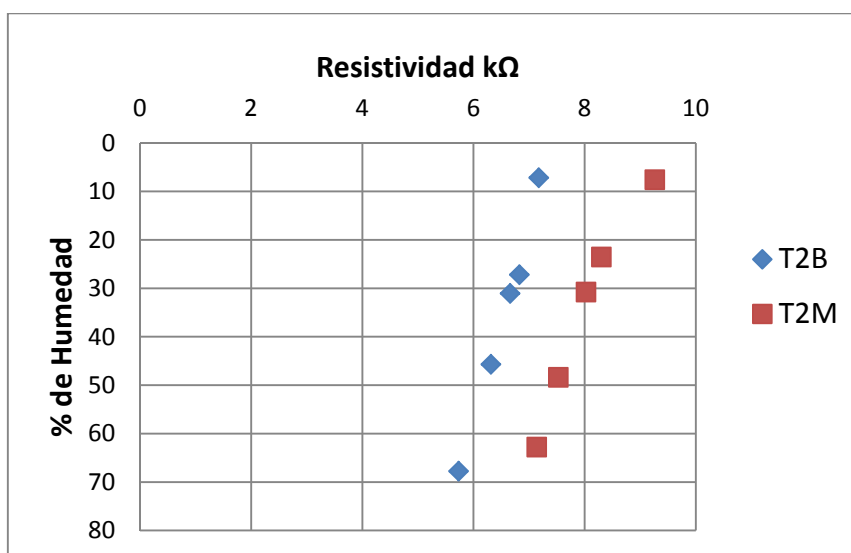


Figura 4-31 Tendencia de resistividad promedio SDR IV

En la gráfica anterior se aprecia que las gráficas tienen una pendiente similar entre sí están casi paralelas para el mismo nivel de degradación SDR IV. Estas muestran provienen de la misma fabrica a pesar que son tomadas en dos sitios diferentes del mismo talud.

#### 4.2 Degradación SDR Vs Resistividad eléctrica para humedad natural

En la Figura 4-32, se analizó los datos de resistividad eléctrica para humedades naturales de las muestras extraídas de los taludes en este estudio, se llegó mediante herramientas computacionales como (Microsoft Excel 2013) a un análisis estadístico y se encontró ecuaciones de tipo polinomial que son las que más se ajustan a los resultados obtenidos en laboratorio.

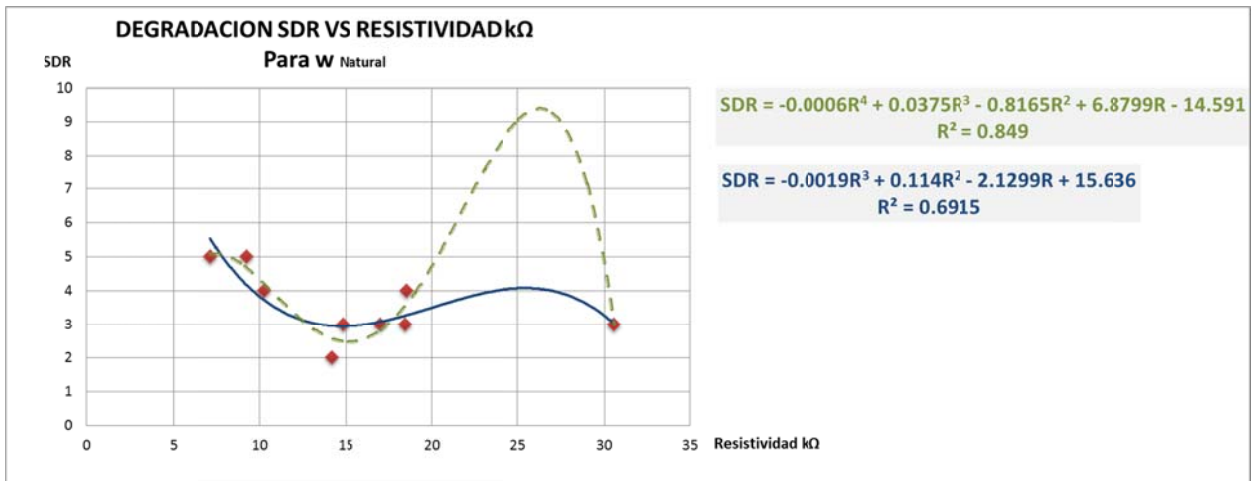


Figura 4-32 Curva de regresión SDR Vs Resistividad eléctrica para humedad natural

La ecuación que más se aproxima es una ecuación polinomial de grado 4 con un coeficiente de correlación  $R^2=84.90\%$  que se presenta a continuación.

$$SDR = -0.0006R^4 + 0.0375R^3 - 0.8165R^2 + 6.8799R - 14.591 \quad \text{Ecuación 15}$$

Dónde:

SDR= Nivel de clasificación Slake Durability Rating entre (1 a 7) según la Tabla 4-6

Clasificación SDR

R= Resistividad medida de las muestras en  $k\Omega$

Tabla 4-6 Clasificación SDR

CLASE	SDR
IA	1
IB	2
II	3
III	4
IV	5
V	6
VI	7

### 4.3 Análisis Estadístico Multivariado

Con el fin de obtener la contribución de los factores analizados en este estudio se desarrolló un análisis multivariado relacionando los niveles de degradación Slake Durability Rating (SDR) con los diferentes contenidos de humedad y los ensayos realizados en laboratorio para las resistividades promedio, ver (Tabla 4-7).

Con estos análisis estadísticos se estableció una relación lineal entre las variables estudiadas, que nos permiten inferir de forma aproximada el valor SDR conociendo los valores de resistividad eléctrica y contenidos de humedad.

Tabla 4-7 Mediciones Promedio de Resistividad y Humedades

NIVEL DE DEGRADACION	SDR	HUMEDAD (%)	RESTIVIDAD PROMEDIO KΩ
SDR II	3	8.8	30.6
SDR II	3	11.0	18.5
SDR III	4	2.5	10.3
SDR IV	5	8.3	7.2
SDR IV	5	7.6	9.3
SDR III	4	9.9	18.5
SDR II	3	1.8	17.1
SDR II	3	8.4	14.8
SDR I-B	2	7.1	14.2
SDR VI	7	26.3	9.8
SDR V	6	25.2	9.5
SDR III	4	25.8	9.7
SDR IV	5	27.2	6.8
SDR II	3	23.5	8.3
SDR IV	5	23.1	11.9
SDR V	6	25.7	10.5
SDR IV	5	26.5	9.1
SDR III	4	25.3	13.9
SDT VI	7	30.2	8.2
SDR V	6	29.2	8.6
SDR II	3	29.4	8.5
SDR III	4	31.1	6.7
SDR I-B	2	30.7	8.0
SDR III	4	33.5	8.2
SDR V	6	33.3	8.3
SDR IV	5	32.2	8.4
SDR III	4	30.7	4.1
SDT VI	7	42.2	7.8
SDR V	6	43.4	8.2
SDR II	3	48.5	8.3
SDR II	3	45.7	6.3
SDR I-B	2	48.4	7.5
SDR IV	5	47.2	7.3
SDR V	6	48.3	8.0
SDR IV	5	45.2	7.8
SDR III	4	45.3	8.1
SDR II	3	65.4	7.0
SDR III	4	68.9	7.9
SDR I-B	2	70.1	8.2
SDR III	4	67.7	5.7
SDR II	3	62.8	7.1
SDR II	3	64.7	6.5
SDR IV	5	67.1	6.2
SDR III	4	70.1	6.9
SDR III	4	63.9	4.6

Con los datos mostrados de la anterior tabla y ayuda de la herramienta computacional (Microsoft Excel 2013) se realizó el análisis multivariado encontrando los siguientes resultados.

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.31
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.09
R <sup>2</sup> ajustado	0.05

$$SDR = -0.019w(\%) - 0.113R(K\Omega) + 6.003 \quad \text{Ecuación 16}$$

Dónde:

SDR= Nivel de clasificación Slake Durability Rating entre (1 a 7) según la Tabla 4-6  
Clasificación SDR

w= Humedad de la muestra en %

R= Resistividad medida de las muestras en kΩ

La Ecuación 16, tiene un coeficiente de correlación bajo ya que la regresión fue calculada de manera lineal y podemos apreciar en la Figura 4-33, que los datos obtenidos no se comportan de forma lineal.

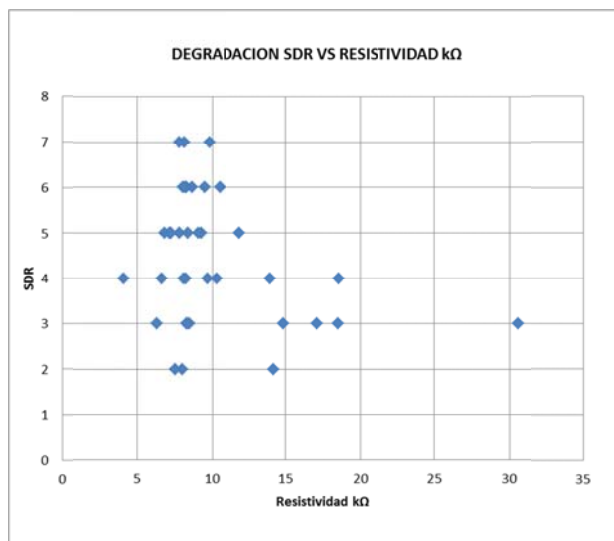


Figura 4-33 Nube de puntos con las resistividades promedio y el nivel SDR



Como se observa en la ecuación planteada (ver Ecuación 16), para los niveles SDR con distintos contenidos de humedad, se dificulta encontrar una ecuación característica que represente adecuadamente la relación entre los datos de resistividad eléctrica y los niveles SDR, debido a que los datos no se comportan de forma lineal por causa de los diferentes contenidos de humedad. Además el comportamiento de degradación de la muestra fue variable con el transcurso del tiempo factor por el cual no se pudo establecer una relación totalmente controlada cambiando los niveles de humedad a pesar que se realizó múltiples análisis con ecuaciones polinomiales de orden 2 a hasta orden 6 no se llegó a una ecuación característica para ensayos con humedades diferentes a la natural.

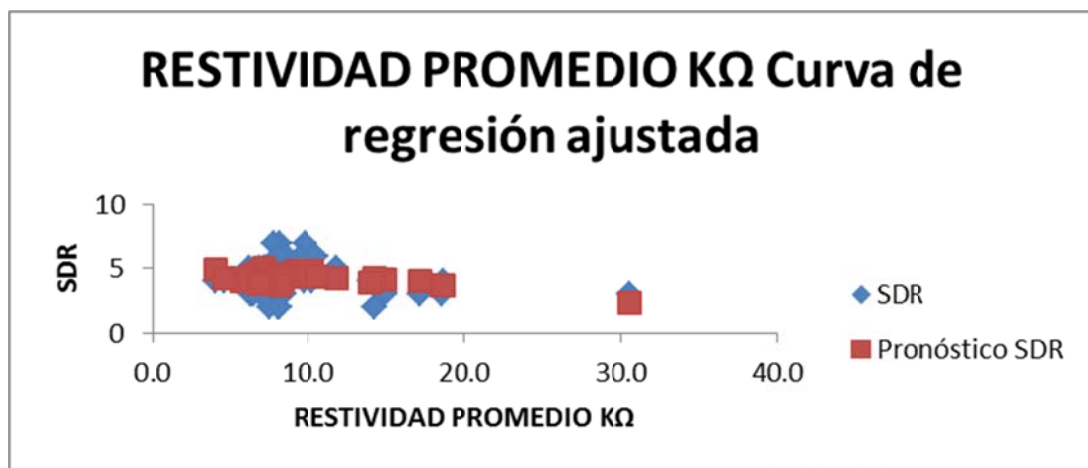


Figura 4-34 Curva característica con Análisis Multivariado Lineal

## 5. CONCLUSIONES

- ✓ En cuanto al montaje del equipo de sonda de variabilidad espacial, fue posible replicar el equipo propuesto por Cho, Lee y Santamarina (2004), para ser usado en la identificación de niveles de degradación de rocas blandas y/o geo materiales intermedios sobre muestras de laboratorio.
- ✓ Un parámetro importante para medir variabilidad espacial de las muestras es la desviación estándar de los resultados, cuando la desviación estándar es alta se detectan los cambios locales en la muestra porque los datos se alejan del promedio donde la muestra es homogénea.
- ✓ Al analizar las propiedades eléctricas de las muestras ensayadas, y al contrastarlas con los niveles de SDR, se observó una tendencia entre la resistividad media y los niveles de degradación de los materiales, lo que está acorde con lo reportado por Erguler (2009) respecto a propiedades mecánicas y niveles de meteorización de arcillolitas en Indonesia.
- ✓ Se observó un cambio importante en la resistividad promedio entre los ensayos iniciales de las diferentes muestras con una humedad natural (entre 2 y 12%), respecto a las muestras degradadas con humedades inducidas (entre 25 y 70%). Lo anterior se explica debido al incremento de vacíos interconectados con agua debido al proceso de degradación del material
- ✓ La determinación del SDR, de acuerdo a la metodología de Erguler (2009), requiere de un alto nivel de experticia del evaluador, ya que si no se cuenta con la experiencia adecuada se pueden afectar los resultados de la evaluación del material, ya que el valor que se determina en campo puede ser diferente al que se determine en el laboratorio de acuerdo como se haya efectuado el muestreo del material degradado. Por lo anterior, se requiere la aplicación de técnicas más exactas como la de visión artificial, para poder tener una menor incertidumbre en el valor determinado y mejorar las correlaciones de las gráficas.
- ✓ Para el nivel de degradación SDR I-B, donde la muestra es una roca arcillosa que se degrada fácilmente (Talud de Villa Pinzón T3A), la resistividad decae de un valor

inicial de 14 k $\Omega$  en estado natural y con humedad del 7.08% a 4 k $\Omega$  para humedades del 65%. Este es un material muy inestable, ya que presenta tendencias de resistividades altas (8 k $\Omega$ ) para humedades comprendidas del 45%, y vuelve a decaer a 4 k $\Omega$ .

- ✓ La resistividad promedio para una roca degradada con SDR II se encuentra entre 6 k $\Omega$  y 9 k $\Omega$ , para humedades comprendidas entre el 25% al 65%. En este intervalo, la resistividad tiende a valores decrecientes para los ensayos realizados, disminuyendo su valor a medida que se aumenta la humedad.
- ✓ Se observa que la muestra de Gachancipa, perteneciente al talud 1 parte baja, comienza con un valor alto de 30 k $\Omega$  cuando las muestras tiene propiedades mecánicas altas de dureza los valores de resistividad son altos.
- ✓ Las muestras de los taludes con degradación SDR II (talud 1 bajo Gachancipa, talud 1 medio Gachancipa, talud 3 medio Villa Pinzón), y para humedades entre el 25% y 30 %, tienden a valores de resistividad de 8k $\Omega$ . Es un valor promedio para este tipo de degradación.
- ✓ Las muestras de los taludes con degradación clase SDR III tienen valores de resistividad comprendidos entre 6 k $\Omega$  y 10 k $\Omega$ , respectivamente. Sin embargo, para estas mismas muestras se tiene un valor típico de 8.24 k $\Omega$  para la humedad aproximada del 30%. Las muestras del talud 2 en su parte alta presentan valores altos de resistividad, del orden de 18.36 k $\Omega$  aproximadamente, debido a que la naturaleza de su composición es una roca dura.
- ✓ La degradación SDR IV representativa de los taludes 2 bajo y talud 2 medio pertenecientes a Choconta confirman que la resistividad disminuye con el aumento en la humedad tenemos valores comprendidos entre 5.73 k $\Omega$  y 9.25 k $\Omega$ .

## 6. RECOMENDACIONES

- ✓ Una desventaja del método es que preferiblemente se deben tomar muestras las cuales contengan un nivel avanzado de degradación, con el fin de poder realizar la penetración de estas con el equipo de sonda de aguja eléctrica; rocas duras dificultan la penetración de la sonda
- ✓ Una vez se transporte las muestras al laboratorio deben ser almacenadas en un cuarto húmedo, con el fin de garantizar las condiciones iniciales de la muestra.
- ✓ La conexión principal del sistema electrónico debe ser lo más limpia posible, es decir debe ser directa a los elementos dispuesto para su conexión sin emplear ganchos o caimanes adicionales, ya que estos son causantes de ruido en el sistema, proporcionando mediciones erróneas.
- ✓ Después de cada medición empleando la sonda de aguja eléctrica, es necesario dejar pasar alrededor de 2 minutos, ya que por la penetración en cada muestra es cargada eléctricamente, mostrando variaciones representativas en los resultados.
- ✓ Cada vez que se realice un ensayo se debe limpiar la sonda con un trapo seco y limpio para retirar los residuos de la muestra para la próxima medición.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- A. Samouelian., I. C. (2004). Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil & Tillage Research* 83.
- Banton, O., Seguin, M., & Cimon, M. (1997). Mapping field scale physical properties of soil with electrical resistivity. *Soil Sci*, 1010-1017.
- C. Aggelopoulos., P. K. (2005). Large-scale effects on resistivity index of porous media. *Journal of Contaminant Hydrology* 77.
- Cho, & Eun, S. (2007). Effects of spatial variability of soil properties on slope stability. *Engineering Geology* 92.
- Cho, G. C., Lee, J.-S., & Santamarina, J. C. (2004). Spatial Variability in Soils: High Resolution Assessment with Electrical Needle Probe. *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*.
- Cho., S. E. (2007). Effects of spatial variability of soil properties on slope stability. *Engineering Geology* 92.
- Crespi., A. G. (1978). Protección y estabilizaciones en roca. *Revista de obras publicas. Anthos S.A.*
- D. Gómez-Ortiz., S. M.-V.-C.-G. (2007). Joint application of ground penetrating radar and electrical resistivity imaging to investigate volcanic materials and structures in Tenerife (Canary Islands, Spain). *Journal Of Applied Geophysics* 62.
- D'Andrea, R. (2001). Discussion of “Search algorithm for minimum reliability index of earth slopes” by Hassan and Wolff. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE* 127 (2), 195-197.
- Epm. (2008). *NORMA TÉCNICA RA6-014 MEDIDA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUELO*. MEDILLIN.
- Erguler, Z., & Ulusay, R. (2009). Assessment of physical disintegration characteristics of clay-bearing rocks: Disintegration index test and a new durability classification chart. *Engineering Geology*.

- Erguler, Z., & Ulusay, R. (2009). Assessment of physical disintegration characteristics of clay-bearing rocks: Disintegration index test and a new durability classification chart. *Engineering Geology*.
- Fieldman, A. (2012). *MANUAL OF FIELD SAMPLING AND TESTING PROCEDURES*. ARKANSAS: ARKANSAS HIGHWAY AND TRANSPORTATION DEPARTMENT MATERIALS DIVISION.
- Fuenkajorn, K. (2011). Experimental assessment of long-term durability of some weak rocks. *Bull Eng Geol Environ*.
- G. Calamita., L. B. (2012). Electrical resistivity and TDR methods for soil moisture estimation in central Italy test-sites. *Journal of Hydrology*, 454 - 455.
- Ganesh Dhakal, T. Y. (2002). Slake durability and mineralogical properties of some pyroclastic and sedimentary rocks. *Engineering Geology*.
- Griffiths, D., & G.A, F. (1993). Seepage beneath water retaining structures founded on spatially random soil. *Geotechnique* , 43(4), 577-587.
- Hossam. M. Abuel-Naga, D. T. (2009). Thermal conductivity of soft Bangkok clay from laboratory and field measurements. *Engineering Geology*.
- Hudec, P. (1982). Statistical analysis of shale durability factors. . *Transportation Research Record* 873, 28–35.
- Joan Martinez-Bofill, A. S. (2011). Influencia de la Mineralogía en la Durabilidad de las Rocas Blandas: Aplicación a Taludes en Gipuzkoa. *Revista de la Sociedad Espanola de Minerología*.
- Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). An introduction to geophysical exploration. *Blackwell Science*.
- Kokusho, T. (1999). Water film in liquefied sand and its effect on lateral spread. *J. Geotech. Geoenviron. Eng* 125 (10), 817-826.
- Kumari Sudha., M. I. (2009). Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigations. *Journal of Applied Geophysics* 67, 74-79.
- Lacasse, S., & Nadim, F. .. (1996). Uncertainties in characterizing soil properties. *Uncertainty in the Geologic Environment: From Theory to Practice. ASCE Geotechnical Special Publication, vol. 58, 49-75.*

- Ladd, R. (1974). Specimen preparation and cyclic stability of sands. *J. Geotech. Eng. Division 100 (10)*, 1180-1184.
- Lee., J.-S. (2003). *High Resolucion Geophysical Techniques for small-scale soil model testing*. Georgia.
- M. Royo-Ochoa, R. C.-A.-M.-Á.-V.-A.-D.-C.-F.-V. (2010). *El intemperismo y las rocas en la construcción*. Veracruz, Mexico: Cuarto congreso Nacional Alconpat.
- Mirco Rodeghiero., A. C. (2008). Spatial variability and optimal sampling strategy of soil respiration. *Forest Ecology and Management 255*.
- Mulilis, J. P., Chan, C. K., & Seed, H. B. (1975). The effects of method of sample preparation on the cyclic stress strain behavior of sands. *Environmental Engineering Research Council*, 75-118.
- Mulilis, J. P., Seed, H. B., Chan, C. K., Mitchell, J. K., & Arulanandan, K. (1977). Effects of sample preparation on sand liquefaction. *J. Geotech. Eng. Div., Am. Soc. Civ. Eng*, 91-108.
- Mulilis, J., Seed, H., Chan, C., Mitchell, J., & Arulanandan, K. (1977). Effects of sample preparation on sand liquefaction. *J. Geotech Eng. 103 (2)*, 91-108.
- Phoon, K., & Kulhawy, F. (1999). Characterizacion of geotechnical variability. *Can. Geotech. J. 36(4)*, 612-624.
- Popescu, & Prevost, J. (1996). Influence of spatial Variability of soil properties on seismically induced soil liquefaction. *Geotech. Spec. Publ. No 58*, 1098-1112.
- Sabine Kruschwitz., U. Y. (2004). Detection and characterization of the disturbed rock zone in claystone with the complex resistivity method. *Journal of Applied Geophysics 57*.
- Santamarina, G. A. (2005). CLASIFICACIÓN DE SUELOS: FUNDAMENTO FÍSICO, PRÁCTICAS ACTUALES Y RECOMENDACIONES . *Georgia Institute of Technology. 790 Atlantic Dr.*, 1-18.
- Seyfried., M. (1998). Spatial variability constraints to modeling soil wáter at different scales. *Geoderma 85*, 231-254.

- Simon, L. d. (5 de Octubre de 2012). <http://www.gt.umss.edu.bo/ensayos/desleimiento.html>. Recuperado el 5 de 2012, de <http://www.gt.umss.edu.bo/ensayos/desleimiento.html>: <http://www.gt.umss.edu.bo>
- Strength., H. K. (2005). Spatial Variability In Soils: Stiffness And Strength. *Georgia Institute of Technology*, 1-210.
- T.N. Singh., A. V. (2004). *Slake durability study of shaly rock and its predictions*. Mumbai, India: Departament of Earth Sciences.
- Tonon, F., Bernardini, A., & And Mammino, A. (2000). Reability analysus of rock mass response by means of ramdom set theory. *Reliability Eng. and System Safety* 70(3), 263-282.
- Townsend, F. (1978). A review of factors affecting cyclic triaxial tests. *Dynamic Geotech. Testing, ASTM STP 654*, 356-383.
- Yong, R., Alonso, E., & Tabba, M. (1977). Application of risk analysis to the prediction of slope stability. *Can. Geotech. J.* 14 (14), 540-553.
- Z.A. Erguler, A. S. (2009). Relative contribution of various climatic processes in disintegration of clay-bearing rocks. *Engineering Geology*.



## **8. ANEXOS**