

**DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN DE CONDUCTORES  
DE COBRE EN CONTACTO CON MUESTRAS DE SUELO USADAS EN  
SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA**

**MARIO ANDRÉS MARTÍNEZ TAPIAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2017**

**DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN DE CONDUCTORES  
DE COBRE EN CONTACTO CON MUESTRAS DE SUELO USADAS EN  
SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA**

**MARIO ANDRÉS MARTÍNEZ TAPIAS**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniero  
Metalúrgico**

**Director**

**DARÍO YESID PEÑA BALLESTEROS  
Ingeniero Metalúrgico, PhD**

**Codirector**

**ANDERSON SANDOVAL  
Físico, M.Ing.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2017**

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi hijo que es el motor de mi vida, mi inspiración y mi motivo más grande para triunfar, a mis padres y mis hermanos por el apoyo incondicional, gracias a ellos he podido llegar hasta acá y al Doctor Darío y al Profesor Anderson por ayudarme en la culminación de este proyecto.

***Mario Andrés Martínez Tapias***

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	10
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	11
2. OBJETIVOS.....	12
2.1. OBJETIVO GENERAL .....	12
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	12
3. ESTADO DEL ARTE.....	13
4. METODOLOGÍA .....	15
4.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS DE SUELO Y LAS MUESTRAS DE COBRE.....	15
4.2. EVALUACIÓN DE LA RESISTIVIDAD DE LAS MUESTRAS DE SUELO EN SOLUCIONES ACUOSAS .....	17
4.3. PH DE LAS MUESTRAS DEL SUELO EN SOLUCIÓN ACUOSA.....	18
4.4. REALIZACIÓN DE ENSAYOS ELECTROQUÍMICOS, LPR Y CURVAS TAFEL.....	19
4.5. REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS ELECTROQUÍMICOS .....	19
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	21

5.1. ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS MUESTRAS Y EL ELECTRODO DE TRABAJO.....	21
5.2. DETERMINACIÓN DE LA RESISTIVIDAD .....	23
5.3. MEDICIÓN DE pH DE LAS MUESTRAS DE SUELO.....	25
5.4. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN .....	26
5.5. DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN .....	27
6. CONCLUSIONES .....	33
7. RECOMENDACIONES .....	34
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35
BIBLIOGRAFÍA.....	38
ANEXOS.....	42

## RESUMEN

**TÍTULO:** DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN DE CONDUCTORES DE COBRE EN CONTACTO CON MUESTRAS DE SUELO USADAS EN SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA \*

**Autor:** MARIO ANDRÉS MARTÍNEZ \*\*

**Palabras clave:** Puestas a tierra, cobre, bentonita, velocidad de corrosión.

### Descripción:

Se evaluó el comportamiento electroquímico de conductores de cobre tradicionalmente empleados en sistemas de puestas a tierra (SPAT). Para ello se utilizaron 5 diferentes muestras de suelos con potencial aplicación como conductores eléctricos para Sistemas de Puesta a Tierra. Cuatro de estas muestras fueron bentonitas dopadas con aditivos salinos y semiconductores y la quinta muestra utilizada en el estudio fue un cemento conductor. El comportamiento frente a la corrosión de los electrodos de cobre se evaluó empleando una celda de tres electrodos, usando  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  como electrodo de referencia y una barra grafito de alta pureza como contra electrodo y como electrolito se prepararon todos con cada una de las muestras de suelo. Los resultados obtenidos mostraron que las muestras de suelos presentaron una buena conductividad cuando se humectaron con agua y unas velocidades de corrosión consideradas como bajas. Según estos resultados el electrodo de cobre presenta la menor velocidad de corrosión cuando está expuesto a la bentonita con bajo contenido de sales y la mayor velocidad de corrosión se encontró al dopar la bentonita con sales, por lo que dopar la bentonita con sales es muy eficiente cuando se requiere mejorar la conductividad, pero esto aumento la velocidad de corrosión, por lo tanto la bentonita con bajo contenido de sales se convierte en una muy buena alternativa para aumentar la vida útil de los Sistemas de Puesta a Tierra.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de ingenierías Físico Químicas. Escuela Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director Darío Yesid Peña Ballesteros Ingeniero Metalúrgico Ph.D en corrosión; Codirector Anderson Sandoval Amador Físico Magister en Ingeniería de Materiales.

## ABSTRACT

**TITLE:** DETERMINATION OF COPPER CONDUCTOR CORROSION RATE IN CONTACT WITH SOIL SAMPLES USED IN EARTHING SYSTEMS \*

**AUTHOR:** MARIO ANDRÉS MARTÍNEZ TAPIAS \*\*

**KEY WORDS:** Earthing systems, copper, Bentonite, Corrosion Rate

### **Description:**

The electrochemical behavior of copper conductors traditionally used in Earthing Systems (SPAT) was evaluated. For this, 5 different soil samples with potential application as electrical conductors for Earthing Systems were used. Four of these samples were doped bentonites with saline additives and semiconductors and the fifth sample used in the study was a conductive cement. The corrosion behavior of the copper electrodes was evaluated using a three electrode cell using Cu/CuSO<sub>4</sub> as the reference electrode and a high purity graphite bar as an electrode and as the electrolyte, sludge was prepared with each of the soil samples. The results obtained showed that the soil samples presented a good conductivity behavior when it was moistened with water and a corrosion rates considered as low. The results obtained showed that the copper electrode presents the lowest corrosion rate when it is exposed to the bentonite with low content of salts and the higher corrosion rate was found when the bentonite was doped with salts, so doped the bentonite with salts is very efficient when is necessary to improve the conductivity but this cause an increase in the corrosion rates, so that the conductive cement becomes a very good alternative for Increase the service life of Earthing Systems.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty Physicochemical Engineering, School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director Darío Yesid Peña Ballesteros Metallurgical Engineer Corrosion Ph. D.; Codirector Anderson Sandoval Amador Physicist, Magister in materials engineering.

## INTRODUCCIÓN

Un sistema de puesta a tierra es un arreglo geométrico o topológico de conductores que se entierra en el subsuelo, con la finalidad de transferir las corrientes de fallas hacia éste [1,2]. Los conductores son rodeados de un relleno el cual cumple con la función transferir las corrientes de falla hacia los conductores, tanto el relleno como los conductores deben cumplir con una serie de requerimientos para que se puedan aplicar en un sistema de puesta a tierra, estos rellenos deben tener una buena conductividad y no ser tan corrosivos con los conductores eléctricos.

Por esto el objetivo de este trabajo es evaluar cinco potenciales muestras de suelo que podrían ser usadas en los sistemas de puestas a tierra determinando el efecto de estas muestras en la vida útil de conductores de cobre. Para ello se determinará cuál de las muestras de suelo es más corrosiva y genera un impacto de forma negativa en el tiempo de vida útil de los conductores de cobre mediante la determinación de la velocidad de corrosión a partir de curvas Tafel.

## 1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Los metales en contacto directo con el suelo o con algún otro electrolito se pueden corroer por causa de corrientes parasitas, suelos corrosivos agresivos y la formación de celdas electrolíticas. Los Sistemas de Puesta a Tierra están compuestos por conductores metálicos con un tamaño y geometría específica para cada sistema estos están rodeados de un suelo que se crea artificialmente para reducir su resistencia eléctrica y su resistividad.

En la industria donde se trabaja con los Sistemas de Puesta a Tierra se requiere que los rellenos o suelos de puesta a tierra sean muy conductivos y no ocasionen daños severos de corrosión en los conductores metálicos, por esto se investiga la funcionalidad de los suelos de puesta a tierra continuamente para mejorar las propiedades de los suelos cuando entren en contacto con los conductores eléctricos o los electrodos de puesta tierra.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la corrosión de conductores de cobre en muestras de suelos usadas en sistemas de puesta a tierra mediante análisis de resistencia a la polarización y velocidad de corrosión.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- \* Determinar la resistividad de 5 muestras de suelo y así saber cuál podría presentar menor resistencia en el sistema de puesta a tierra.
- \* Determinar la velocidad de corrosión en el conductor de cobre en las mezclas de suelo usadas en los sistemas e puesta a tierra mediante curvas Tafel.

### 3. ESTADO DEL ARTE

**G.E. Matamala y colaboradores [2001]:** “Control de conductores de cobre en suelos dopados con aditivos semiconductores y salinos, para el mejoramiento de los sistemas de puesta a tierra”. Analizaron el comportamiento de conductores de cobre ASTM 11000 los cuales se usan en sistemas puestas a tierra frente a un suelo simulado en laboratorio al cual se le agregaron 4 aditivos como lo son la bentonita, sulfato de calcio, gel y un semiconductor. Se realizaron estudios de la resistividad eléctrica, la medición del pH y la medición de potencial y corriente de corrosión. También se varió el porcentaje de humedad y se determinó la variación de la resistividad eléctrica, de esta forma se dieron cuenta que los aditivos deben estar húmedos para poder disminuir la resistividad eléctrica del sistema de puesta a tierra. Encontraron que el gel ocasiona un aumento en la conductividad y que el electrodo de cobre se corroe al contacto con este aditivo disminuyendo su vida útil en comparación con los otros aditivos que presentaron una buena vida útil para el electrodo de cobre. [9]

**G. Tres y E. Saborio [2004]:** “Evaluación de la velocidad de corrosión de cables de cobre usados en sistemas de puesta a tierra en el ICE – Costa Rica”. Este estudio se hizo en el Instituto Costarricense de Electricidad en los sistemas de puesta a tierra de pararrayos se evaluó la velocidad de corrosión. Se usaron dos métodos, la resistencia a la polarización lineal y el método de pérdida de peso. Para la investigación se usaron dos tipos de muestras la muestra A que fue un producto a base carbono, cementos hidráulicos y silicatos de aluminio hidratados y la muestra B que fue una bentonita mezclada con un cloruro de sodio al 5% m/m. Para ambas muestras se hicieron pruebas de campo y de laboratorio además se les agrego agua para formar un lodo. Los investigadores pudieron concluir que la velocidad de corrosión en la muestra a base de carbono y cementos hidráulicos fue al menos 10 veces mayor que en la bentonita, esto muestra que es mejor

utilizar la bentonita como relleno puesto que en la muestra A también se presentó picado mientras que en B no aparece picadura y la corrosión general es menor. [20]

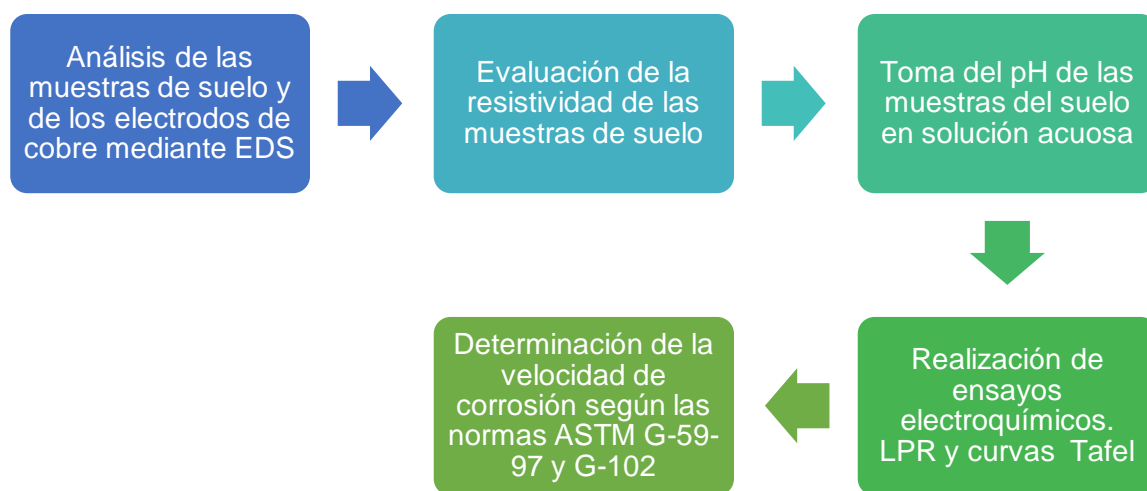
**Bo Rosborg y colaboradores [2005]:** “Pendientes de Tafel usadas en el monitoreo de la corrosión del cobre en bentonita/ambiente de aguas subterráneas”. En este trabajo para monitorear la corrosión que ocurre en el cobre en un ambiente de aguas subterráneas se usaron métodos como análisis armónico, la resistencia a la polarización y el método de la resistencia al ruido. Con estas técnicas y las pendientes de Tafel hallaron un estimado de la velocidad de corrosión aunque el estudio fue realizado durante varios años se pudo concluir que las velocidades de corrosión disminuyen y los valores de  $R_p$  aumentan con los días de exposición. Las velocidades de corrosión obtenidas a partir de las curvas Tafel y los métodos anteriores se compararon con la velocidad de corrosión obtenida con el método de pérdida de peso y estas difieren un poco ya que el método de pérdida de peso es más exacto pero en ambos casos son velocidades de corrosión bajas. [14]

**B. Rosborg y colaboradores [2011]:** “Un estudio de espectroscopia de impedancia electroquímica de cobre puro expuesto en bentonita bajo condiciones oxidantes”. Para este trabajo se usaron probetas de cobre las cuales han sido expuestas por más de 3 años en el ambiente de muestra agresivo, la duración de este experimento otorga más exactitud y un ambiente más real, la corrosión se monitoreo con los datos de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica ya que los valores de  $R_p$  los hallaron con los valores más bajos de impedancia, con estos valores y la norma ASTM G-102 se determinó la velocidad de corrosión. Los valores de  $R_p$  aumentaron a medida que transcurría el tiempo y las velocidades de corrosión disminuyeron. Los valores de corrosión se compararon con otras técnicas y estos fueron similares pues las velocidades de corrosión fueron muy bajas. [17]

## 4. METODOLOGÍA

En la figura 1 se presenta un esquema del proceso llevado a cabo para el desarrollo de este proyecto

**Figura 1.** . Diagrama de flujo de la metodología experimental para el desarrollo del proyecto.



### 4.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS DE SUELO Y LAS MUESTRAS DE COBRE

Se recibieron en total 5 muestras de suelo diferentes con un peso de 3 Kg cada una, a las cuales se les practicó un análisis de composición elemental mediante EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy) como se observa en la tabla 1. Las muestras se secaron en un horno durante 12 horas y luego con un mortero fueron pulverizadas. La caracterización se hizo en un Microscopio electrónico de barrido FEI Quanta 650 FEG.

**Tabla 1.** Descripción de las muestras de suelo.

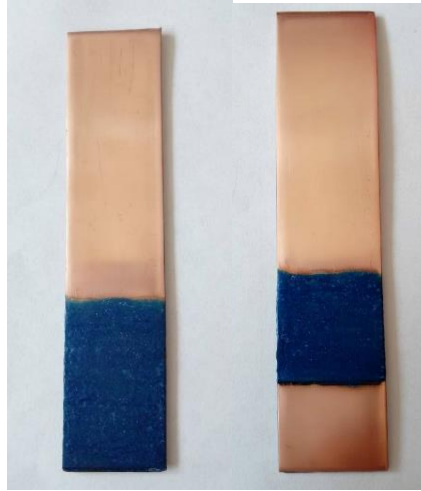
<b>Muestra</b>	<b>Característica</b>
FG	Bentonita con bajo contenido de sales
ES	Bentonita, carbonato de calcio y fibras con sales
HD	Bentonita, óxidos de metales y sales
M2	Bentonita sódica y sales
RC	Cemento conductivo con grafito y coque

Se recibieron también 15 cupones de cobre los cuales fueron usados como electrodos de trabajo, estos cupones tienen aproximadamente 110 mm de longitud, 25 mm de ancho y 1,8 mm de grosor.

En la figura 2 se observa los cupones de cobre los cuales para realizar los ensayos fueron lijados con papel de desbaste marca Carborundum de numeración 80, 120, 240, 320, 400, 600 y 1200 para dejar la superficie limpia y lista para las pruebas. Además del lijado las muestras se pintaron con un esmalte protector para delimitar el área de trabajo y dejar expuesta un área de 5 cm<sup>2</sup> con la cual se realizaron las pruebas electroquímicas.

Por ultimo un cupón de cobre se cortó con una cortadora de disco BUEHLER para obtener una pequeña muestra de la probeta y poder realizar el análisis de composición elemental mediante EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy) en un Microscopio electrónico de barrido FEI Quanta 650 FEG.

**Figura 2.** Cupón de cobre (electrodo de trabajo) pintado para asegurar un área expuesta de 5 cm<sup>2</sup>

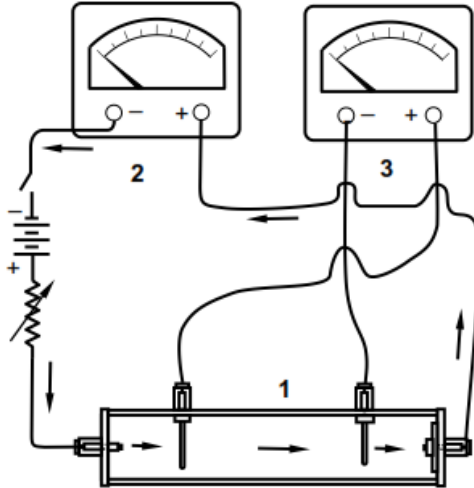


#### **4.2. EVALUACIÓN DE LA RESISTIVIDAD DE LAS MUESTRAS DE SUELO**

Para la realización de esta prueba se construyó una caja de suelo en madera la cual tenía un área transversal perpendicular al flujo de corriente de 28,91 cm<sup>2</sup> y un espaciamiento interno entre electrodos de 1,2 cm.

Se determinó la resistividad de las muestras de suelo con un porcentaje de agua mínimo del 40%. Todas las muestras de suelo se probaron en la caja de suelo siguiendo el método de los 4 electrodos como se describe en la norma ASTM-G57-06 y se observa en la figura 3. Con el método de los 4 electrodos un voltaje es impreso desde una fuente en los electrodos exteriores lo cual causa un flujo de corriente a través de la caja de suelo.

**Figura 3.** Configuración de los 4 electrodos y la caja de suelo. 1 Caja de suelo. 2 Amperímetro. 3 Voltímetro.



**Fuente:** Norma IEC 62561-7

El voltaje en los electrodos internos se midió con el voltímetro y la resistencia resultante fue calculada. Luego el valor de resistencia fue convertido a resistividad usando la fórmula:

$$\rho = \frac{R \times A}{a}$$

Donde  $\rho$  es la resistividad ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ),  $R$  la resistencia de las muestras de suelo ( $\Omega$ ),  $A$  es el área de la sección transversal de la caja de suelo perpendicular al flujo de corriente ( $\text{cm}^2$ ) y  $a$  es la separación interna de los electrodos ( $\text{cm}$ ).

### 4.3. PH DE LAS MUESTRAS DEL SUELO EN SOLUCIÓN ACUOSA

La medición del pH se realizó a cada muestra de suelo en solución acuosa con distinta concentración de las muestras de suelo en peso, a una temperatura

constante de 22°C Lo anterior se logró manteniendo la solución acuosa en constante agitación, agregando el aditivo a la solución hasta que el pH de estas no variara más allá de un 1% respecto a la medición anterior. Para estas pruebas se utilizó un pH-metro marca HACH Sension 3 y un agitador Schott Gerate GMBH.

#### **4.4. REALIZACIÓN DE ENSAYOS ELECTROQUÍMICOS, LPR Y CURVAS TAFEL**

Las mediciones y los ensayos electroquímicos fueron realizados en un potencióstato Gamry 750 PCI 4, con una celda de tres electrodos. El electrodo de referencia utilizado fue un electrodo de Cu/CuSO<sub>4</sub> (saturado), el contra electrodo fue una barra de grafito y el electrodo de trabajo fueron los cupones de cobre.

A cada muestra del suelo se le realizó la respectiva medición del potencial de circuito abierto la cual se registró durante 3600 s. Luego se realizaron las pruebas de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL) con un rango de potencial entre -10 mV hasta 10 mV y aplicando una velocidad de barrido de 1.66 mV/s. Finalmente las mediciones de las curvas de polarización potenciodinámica de Tafel se realizaron con un rango de potencial entre -300 mV hasta 500 mV con una velocidad de barrido de 1 mV/s.

#### **4.5. DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN SEGUN LAS NORMAS ASTM G-59-97/G-102-89.**

Con los datos obtenidos en las pruebas electroquímicas y siguiendo las normas ASTM se calculó la velocidad de corrosión como se indica a continuación:

Con las curvas de Tafel se pudo determinar la corriente de corrosión  $i_{corr}$  ( $\mu A$ ) y conociendo el área expuesta anteriormente especificada en el numeral 4.1 se pudo determinar la densidad de corriente de corrosión  $J_{corr}$  ( $\mu A/cm^2$ ) con la ecuación:

$$J_{corr} = \frac{i_{corr}}{A}$$

También se determinó el peso equivalente (EW) de los cupones de cobre, considerándolos cupones de cobre puro el peso equivalente es igual al peso atómico sobre la valencia que es el número de electrones necesarios para oxidar un átomo del elemento en el proceso de corrosión.

Siguiendo las normas ASTM G-59-97 y G-102-89 la velocidad de corrosión (CR) es dada por la siguiente ecuación siendo  $\rho$  la densidad del cupón de cobre en  $g/cm^3$ . La norma ASTM G-102-89 considera el termino EW como adimensional para estos cálculos.

$$CR = 3,27 \times 10^{-3} \frac{J_{corr}.EW}{\rho}$$

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

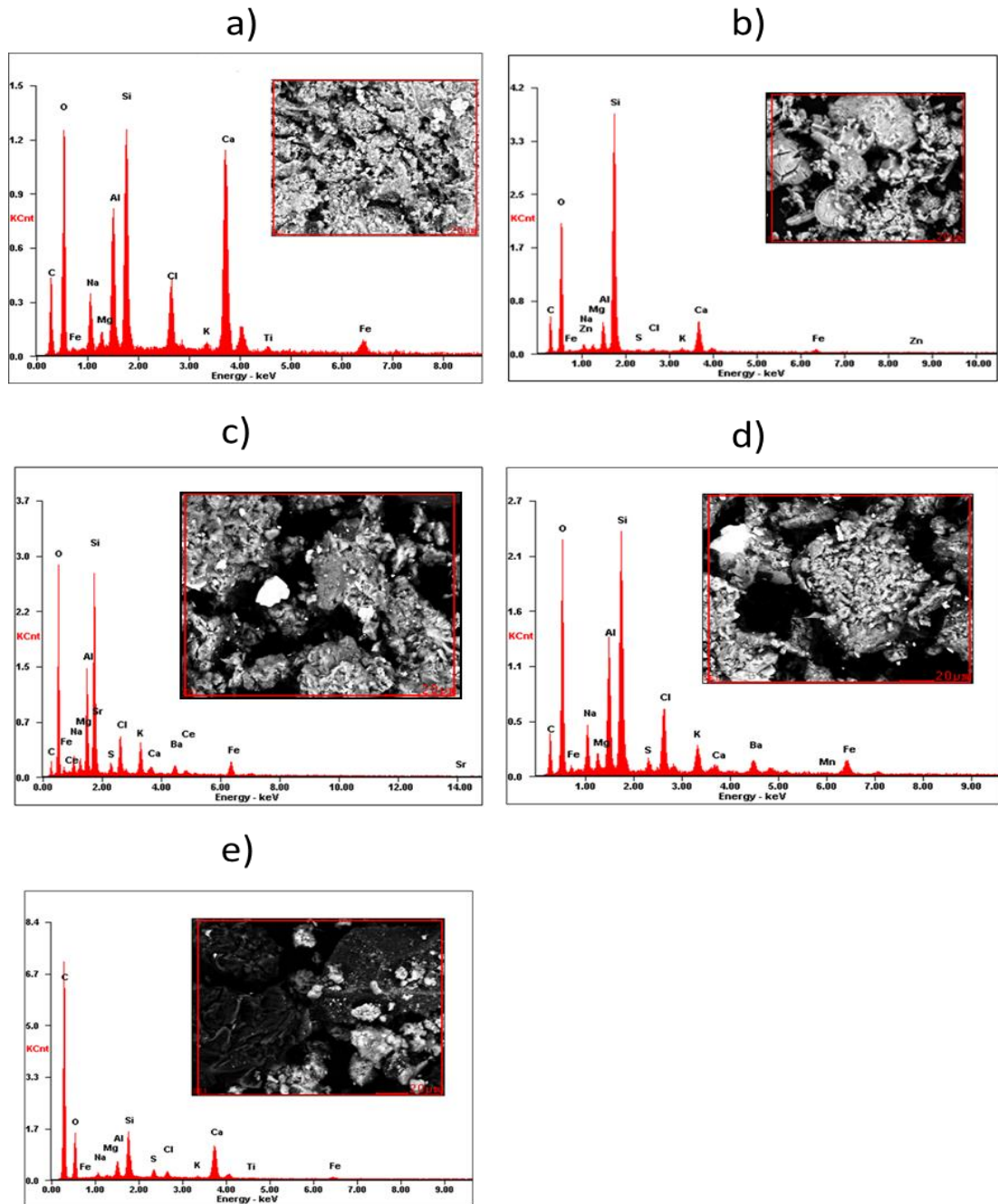
### 5.1. ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN DE LAS MUESTRAS Y EL ELECTRODO

En la Figura 4 se presentan los espectros EDS de las muestras de suelo. Como se puede observar los espectros a, b, c y d muestran una composición común de una bentonita ya que la composición química general de una bentonita contiene compuestos de la forma  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  y  $H_2O$ . Además generalmente contiene óxidos como el óxido de calcio, magnesio, sodio, potasio y férrico además de un alto contenido de carbono.

En los espectros EDS se puede observar que la muestra ES en el espectro a presenta un alto contenido de Ca y Cl que determinan que es una bentonita cálcica con adiciones de sales. Para la muestra FG en el espectro b se muestra una bentonita regular con un porcentaje de sales muy bajo, también presenta un porcentaje considerable de Ca lo que muestra presencia de carbonato de calcio que en contacto con agua ayuda a mejorar su conductividad. La muestra HD es una bentonita con adición de óxidos de metales, esto se puede ver en la Figura 4 en el espectro c donde hay presencia notable de algunos metales como el Na, Mg, Sr, K, Ca, Ba y Fe, también se evidencia la presencia de un contenido de Cl alto que indica presencia de sales.

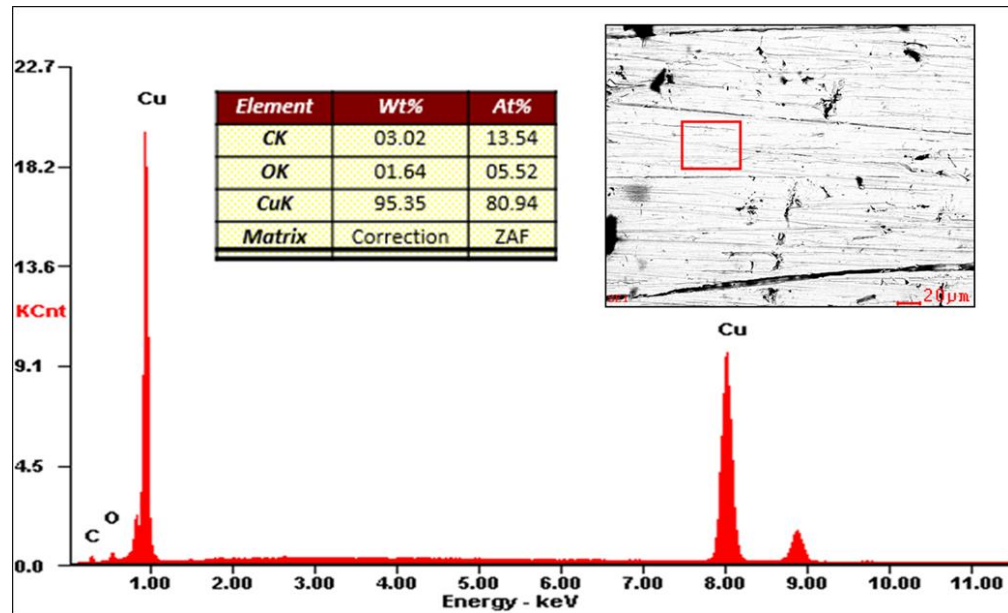
La muestra M2 muestra presencia de óxidos de metales y un alto contenido de Cl y Na lo que muestra que es una bentonita sódica con adición de sales. La muestra RC como muestra el espectro e, presenta un alto contenido de carbono y oxígeno debido a que es un cemento al que se le agregó coque y grafito.

**Figura 4.** Espectros EDS de las muestras de suelo. a) Muestra ES, b) Muestra FG, c) Muestra HD, d) Muestra M2 y e) Muestra RC.



Como se observa en la Figura 5, el electrodo de trabajo fue un electrodo de cobre de alta pureza ya que en su análisis de composición elemental se presenta un 95.35% en peso de cobre.

**Figura 5.** Espectro EDS del electrodo de trabajo



## 5.2. RESISTIVIDAD DE LAS MUESTRAS DE SUELO

La Figura 6 presenta la resistividad promedio de las muestras de suelo, para ello se tomaron 10 medidas en cada muestra de estudio para corroborar los resultados y asegurar mayor exactitud.

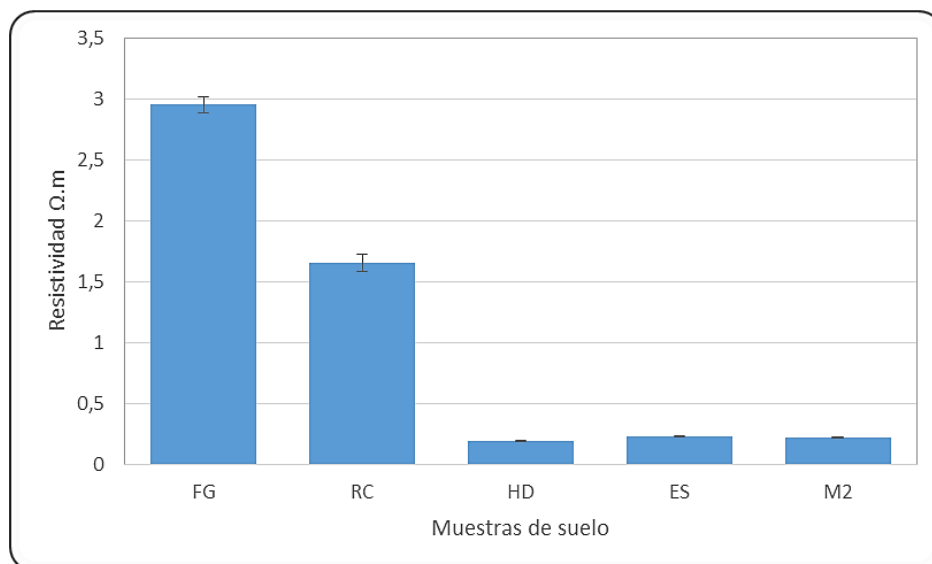
Las muestras de suelo ES, HD y M2 presentan bajos valores de resistividad, con un contenido de humedad del 40%, pues la bentonita está formada por láminas cargadas eléctricamente que facilitan la conducción de corriente [9]. Al agregarles agua a estas muestras su resistividad eléctrica disminuye ya que debido a su

composición química estas muestras generan iones en presencia del agua que generan este efecto en la resistividad.

La muestra FG presenta también bajos valores de resistividad (2.95  $\Omega$ .m) debido a que como las anteriores muestras es una bentonita y está formada de láminas cargadas eléctricamente, es la muestra con mayor resistividad eléctrica como lo indica la Figura 6 y esto se debe a un porcentaje de sales muy bajo comparado al de las muestras anteriores.

La muestra RC presenta una baja resistividad (1.75  $\Omega$ .m) puesto que esta muestra es un cemento conductor debido a la adición de coque metalúrgico y grafito los cuales ayudan a reducir su resistividad. Su resistividad no es tan baja como las de las muestras HD, ES y M2 debido a su composición química y a su muy bajo contenido de sales contrario a las demás muestras a las cuales se les agregó sales para optimizar su conductividad.

**Figura 6.** Resistividad promedio de las muestras de suelo.

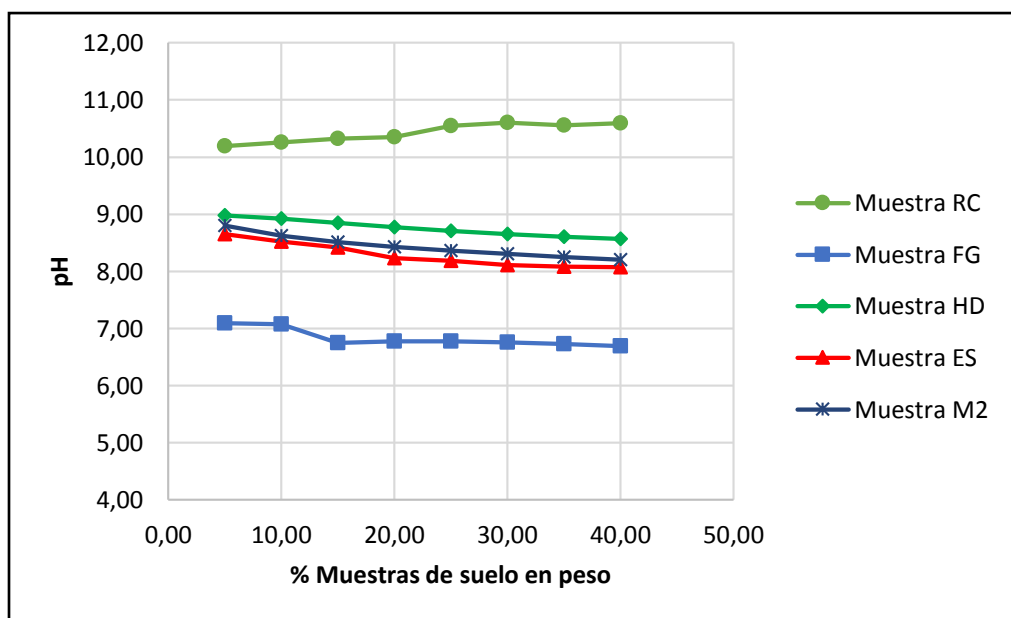


### 5.3. MEDICIÓN DE pH DE LAS MUESTRAS DE SUELO

Las mediciones del pH tuvieron la finalidad de observar su evolución en soluciones acuosas y determinar si el pH variaba en soluciones saturadas de las muestras de suelo. Esto permitió determinar que las pruebas electroquímicas se podían hacer en soluciones con altos contenidos de las muestras de suelo.

La Figura 7 permite observar la variación del pH para diferentes concentraciones de las muestras de suelo en soluciones acuosas. Se evidencia que el pH no varía en gran medida para soluciones acuosas con concentraciones mayores al 30% en peso de las muestras de suelo y se podrá trabajar con soluciones sobresaturadas de las muestras de suelo.

**Figura 7.** Evolución del pH en las muestras de suelos en soluciones acuosas en función de sus concentraciones.



#### 5.4. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN

La Figura 8 presenta los valores promedio de Resistencia a la polarización ( $R_p$ ). Los valores de  $R_p$  se midieron en el potenciostato Gamry 750. Los datos mostrados en la Figura 8 fueron analizados según el criterio de aprobación de la norma internacional de suelos IEC 62561-7 para los valores de  $R_p$  en un Sistema de Puesta a Tierra.

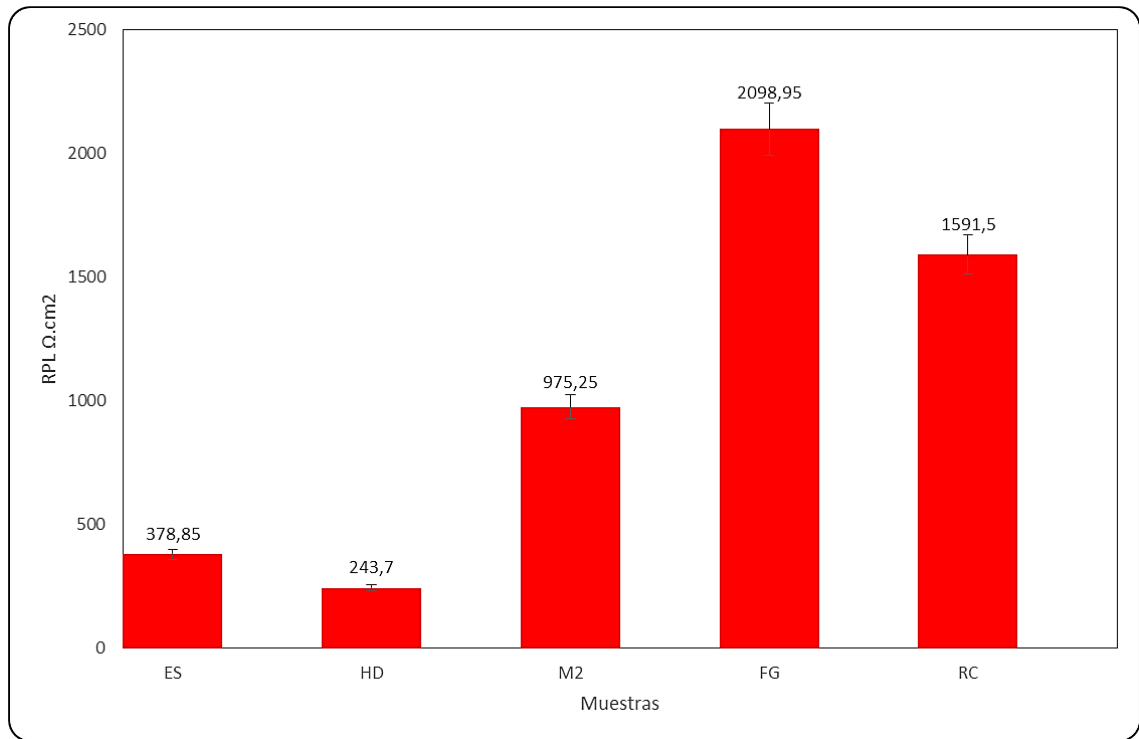
Según la norma IEC 62561-7 el criterio de aprobación para electrodos de acero revestidos con cobre (copper-plated electrodes) trabajando en un Sistema de Puesta a Tierra es el siguiente:

- $R_p > 4 \Omega.m^2$  -  $40000 \Omega.cm^2$  para ambientes no agresivos
- $R_p > 8 \Omega.m^2$  -  $80000 \Omega.cm^2$  para ambientes agresivos

Como se puede observar en la Figura 8 estos valores no alcanzan el criterio de aprobación, y aunque los electrodos de trabajo usados eran de cobre puro como se evidencia en la Figura 5 más no de acero recubierto con cobre como lo dicta la norma internacional de suelos IEC 62561-7, los resultados deberían ser similares ya que en ambos casos es el cobre el que está en contacto con las muestras de suelo.

Los bajos valores de  $R_p$  pueden deberse a el corto tiempo de exposición que tuvieron las muestras pues en investigaciones anteriores se ha demostrado que los valores de  $R_p$  aumentan con el tiempo de exposición. [9,17]

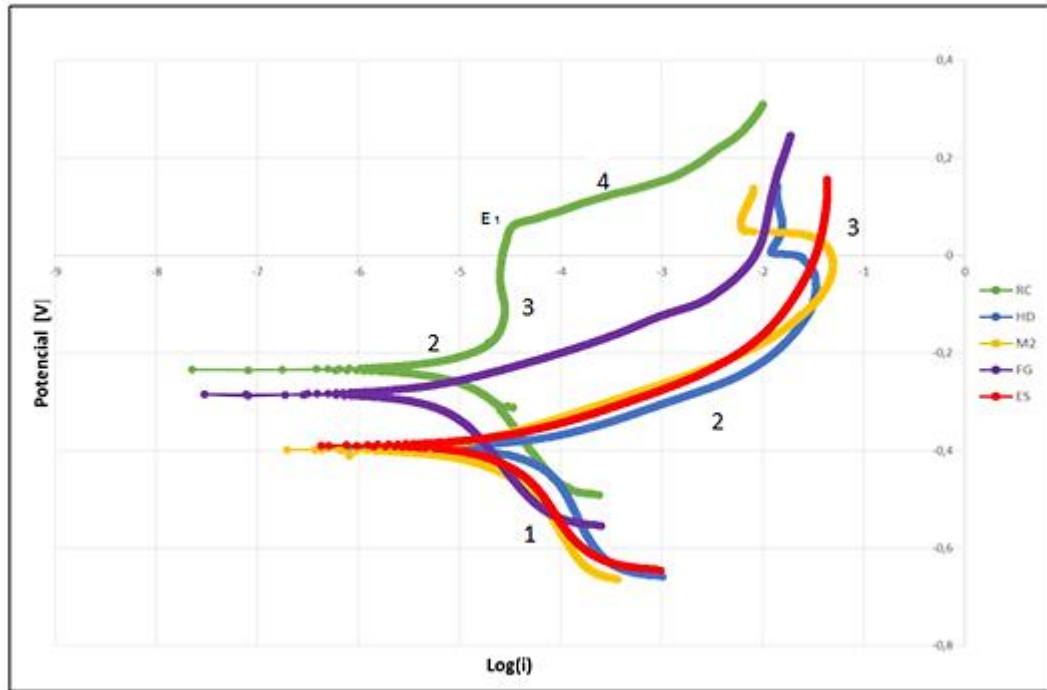
**Figura 8.** Valores promedio de Resistencia a la Polarización de las muestras de suelo.



## 5.5. DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN

Para la medición de la velocidad de corrosión se comenzó con el ensayo de polarización potenciodinámica de Tafel, el cual se realizó en el potenciostato Gamry 750. Con estas curvas se identificó el potencial de corrosión en la zona media de la curva de Tafel debido a que se presenta un control por difusión en la zona catódica y esta curva decae rápidamente y no se puede obtener una recta catódica precisa. La recta anódica y su respectiva ecuación se pudo obtener tomando como potencial de corrosión  $-0.387$  V y trabajando  $50$  mV hacia arriba en la zona anódica demarcada en un ovalo rojo en la gráfica del Anexo G. Con la ecuación anódica sabiendo que Y es potencial y X corriente se pudo obtener la corriente de corrosión.

**Figura 9.** Curvas Tafel para todas las muestras de suelo analizadas



La Figura 9 comienza en la zona 1 donde se muestra la zona catódica de las gráficas y las posibles reacciones catódicas mostradas a continuación:

- $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$
- $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$

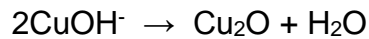
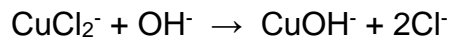
En la zona 2 empieza la disolución del metal cuando el Cu pasa a  $\text{Cu}^{2+}$  y a  $\text{CuCl}_2^-$  según el electrolito donde se encuentre. Cuando el cobre está en presencia del cemento conductivo (muestra RC) la posible reacción anódica es la siguiente:



En la muestra FG el mecanismo de la corrosión es diferente pues el Cu se disuelve en  $\text{CuCl}_2^-$  el cual se va fuera de la superficie del cobre. Luego el  $\text{Cu}^+$  es oxidado a  $\text{Cu}^{2+}$  por el oxígeno:  $4\text{Cu}^+ + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{Cu}^{2+} + 4\text{OH}^-$  y parte del  $\text{Cu}^{2+}$

se reduce a  $\text{CuCl}_2^-$ . En las otras muestras la reacción anódica varía por la presencia del ion  $\text{Cl}^-$  y queda de la siguiente forma:  $\text{Cu} + 2\text{Cl}^- \rightarrow \text{CuCl}_2^- + \text{e}^-$ . [14,15]

Cuando hay poca presencia de  $\text{Cl}^-$  la ecuación anódica es dada por las especies de  $\text{CuOH}^-$  donde el  $\text{CuCl}_2^-$  reacciona con los  $\text{OH}^-$  para producirlo y posteriormente el  $\text{Cu}_2\text{O}$  capa de óxido la cual puede proteger al cobre se podría formar.



En la zona 3 para la muestra RC se presenta la pasivación donde la corriente no varía en gran medida al aumentar el potencial. Esta zona es muy importante para la resistencia a la corrosión pues si se trabaja en este rango de potenciales el electrodo quedara protegido y prácticamente inerte a las reacciones de disolución del metal y no se corroerá. Por el comportamiento de la gráfica para las demás muestras se puede decir que las demás muestras se podrían pasivar también si el potencial se hace más positivo.

La zona 4 solo se muestra para la muestra ES la cual fue la única en presentar el rompimiento de la capa pasiva para comenzar con la picadura donde con pequeños aumentos de potencial la corriente varía bastante.

En la literatura y en investigaciones anteriores se ha demostrado que para los valores mayores de  $R_p$  la velocidad de corrosión es menor, esto se evidencia en los resultados obtenidos y mostrados en la Tabla 2, donde se observa que la menor velocidad de corrosión la tiene la muestra FG, y ésta muestra también presenta los valores de  $R_p$  más altos en el estudio, como se ve en la Figura 8.

Además en la Figura 5 de resistividad se puede observar que esta muestra de suelo no es la más conductiva debido a que es una bentonita con un contenido muy bajo de sales, por lo tanto, no es la muestra de suelo más agresiva.

En la Tabla 2 se muestran las velocidades de corrosión de todas las muestras de suelo estudiadas. Como se evidencia todas las muestras presentan velocidades de corrosión bajas.

**Tabla 2.** Potencial de corrosión (Cu/CuSO<sub>4</sub> y ENH), corriente de corrosión y velocidad de corrosión con un porcentaje de humedad del 40%.

<b>Muestra</b>	<b>Potencial Corrosión Vs Cu/CuSO<sub>4</sub> [V]</b>	<b>Potencial Corrosión Vs ENH [V]</b>	<b>Corriente Corrosión [μA]</b>	<b>Velocidad de corrosión [mmy]</b>
<b>ES</b>	<b>-0.230</b>	<b>+0.088</b>	<b>18,035</b>	<b>0,042</b>
<b>HD</b>	<b>-0.284</b>	<b>+0.034</b>	<b>43,351</b>	<b>0,101</b>
<b>M2</b>	<b>-0.402</b>	<b>-0.084</b>	<b>7,568</b>	<b>0,018</b>
<b>FG</b>	<b>-0.400</b>	<b>-0.082</b>	<b>3,221</b>	<b>0,007</b>
<b>RC</b>	<b>-0.388</b>	<b>-0.070</b>	<b>4, 875</b>	<b>0,011</b>

La muestra con mayor velocidad de corrosión fue la muestra HD la cual fue la muestra más conductiva pues presenta la resistividad más baja, también presenta los valores de Resistencia a la Polarización más bajos

Como se observa en la figura 10 las velocidades de corrosión encontradas según la norma NACE son velocidades consideradas leves y moderadas lo cual es

aceptable para trabajar en los sistemas SPAT ya que no son velocidades de corrosión altas ni severas.

**Figura 10.** Parámetros de interpretación de la velocidad de corrosión según la norma NACE RP 0775

CONDICIÓN	VEL. DE CORROSIÓN [mpy]	VEL. DE CORROSIÓN [mmy]
Leve	< 1.0	< 0,025
Moderada	1.0 - 4.9	0,025 – 0,124
Alta	5.0 - 10	0,127 – 0,254
Severa	> 10	> 0,254

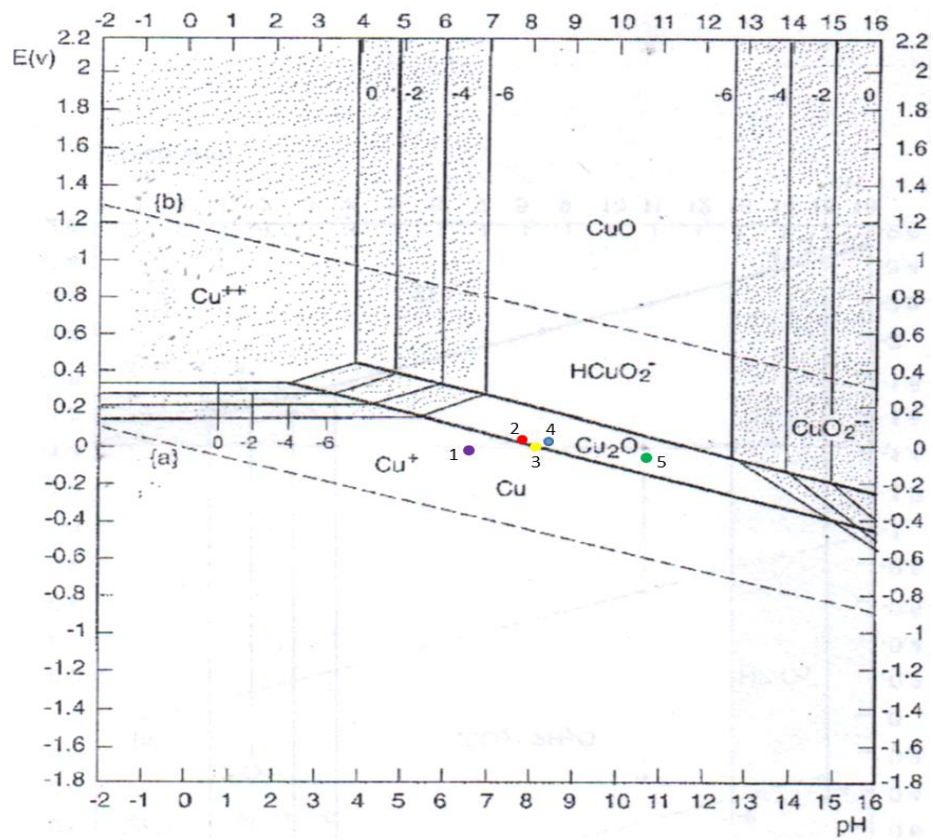
En la Figura 11 se observa el diagrama termodinámico de Pourbaix. Los resultados obtenidos en las pruebas de pH y los potenciales de corrosión hallados en los diagramas de Tafel ya están ubicados pero llevadas al potencial del electrodo normal (EHN) de hidrógeno.

Las áreas sombreadas muestran estabilidad de los productos de disolución donde el metal está sujeto a corrosión, las áreas que no están sombreadas muestran inmunidad termodinámica a la corrosión o la resistencia a la corrosión debido a la estabilidad de una capa de óxidos. [8]

La Figura 11 muestra que el cobre para las muestras ES, HD, M2 y RC podría formar una capa de óxidos protectores estables como el  $\text{Cu}_2\text{O}$ , el cual podrá ayudar a la resistencia a la corrosión del electrodo de cobre y evitara que este se

corroa en gran medida. El cobre en la muestra FG estará en la zona donde puede producirse Cu o Cu<sup>+</sup> y al igual que las demás no estará en las zonas activas de la corrosión

**Figura 11.** Posición de las muestras de suelo en el diagrama de Pourbaix del cobre. Muestras 1 FG, 2 ES, 3 M2, 4 HD y 5 RC.



**Fuente:** Principles and prevention of corrosión [9]

## 6. CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos las muestras de suelo deben ser humectadas con agua para que cumplan con el propósito de aumentar su conductividad de manera efectiva en los Sistemas de Puesta a Tierra, la resistividad de las muestras de suelo fueron buenas, ya que la muestra FG presenta una resistividad promedio por debajo de  $3 \Omega.m$ , y las demás muestras tienen resistividades menores lo que indica que todas las muestras tienen buenas resistividades y cumplen con su objetivo en los SPAT.

Las muestras de suelo según el criterio de aprobación de la norma de suelos internacional IEC 62561-7 no pasan el criterio de aprobación según los valores de  $R_p$  ya que están muy por debajo de lo exigido en la norma, aunque las muestras de suelo presentaron un muy buen comportamiento con los electrodos de trabajo de cobre.

Las muestras con mayor contenido de sales presentaron una conductividad mejor que las otras muestras pero a la vez presentaron unas velocidades de corrosión mayores

Las muestras con un mejor comportamiento para la aplicación en los SPAT son las muestras FG, RC y M2 pues sus velocidades de corrosión según la norma NACE RP 0775 son aceptables ya que se encuentran el rango de velocidad de corrosión leve.

## 7. RECOMENDACIONES

Se recomienda trabajar con los electrodos de Acero revestido de cobre o de acero galvanizado como lo indica la norma IEC 62561-7 para poder saber si estas muestras de suelo pasan el criterio de aprobación de esta norma.

Se recomienda trabajar con un mayor tiempo de permanencia o de exposición del electrodo de cobre en las muestras de suelo en un ámbito real y con diferentes porcentajes de humedad ya que los productos de corrosión del cobre formados in situ deberían proporcionar una mayor resistencia al sistema y posiblemente las muestras HD, ES y M2 puedan presentar corrosión por picadura también por su contenido de sales.

Se recomienda realizar un ensayo de Difracción de Rayos X (DRX) a las muestras de suelo para saber con cuales compuestos se doparon.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. SHAUGHNESSY, T. Grounding: A historical Perspective, Today, 3 (1), 1997.
- [2]. CURDTS, E.B. Grounding Principles and Practices as Applied to Industrial Plant, James Biddle Co., Bulletin N25T4, 1962.
- [3]. OSBURN, John. Integration of Facilities Ground Systems with user Electronic Systems, EMC Technology, 1986, p 29-54.
- [4]. AMES N.D.; MONTGOMERY E.F. y LEAK J.S. An Integrated Grounding Practice for Digital Systems, IEEE Trans. Industrial applications, 1993 p 29 (2), 459-467.
- [5]. LINDSEY, Travis. Grounding Electrode Study One- Year Summary, IAEI News, Jan.-Feb., 1995.
- [6] ZAKI Ahmad. Principles of corrosion engineering and corrosion control. Reino Unido: Butterworth-Heinemann, 2006 p 2, 12-13.
- [7] FRITZ Todt, Muños Francisco. Corrosión y protección edición española. Madrid: Aguilar, 1959 p 19, 240-245.
- [8] JONES Denny A. Principles and Prevention of Corrosion. Reno: Prentice Hall, 1996 p 78-79, 519 - 521.
- [9] MATAMALA. Guillermo; CARRANZA J.A. y JARA S.E. Corrosión de conductores de cobre en suelos dopados con aditivos semiconductores y salinos, para el mejoramiento de los sistemas de puesta a tierra. CONGRESO

INTERNACIONAL DE METALURGIA Y MATERIALES SAM-CONAMET. (12-14, OCTUBRE, 2001: Posadas, Argentina). Memorias. Posadas: Universidad Nacional de Misiones, 2001.

[10] REYNA Ángel. Corrosión de electrodos de puesta a tierra. [En línea]. Lightning protection guide: DEHN protects. 2ª edición, 2007. Disponible en: [http://www.maintprog.com.co/wpcontent/uploads/2014/11/Corrosion\\_de\\_Electrodos\\_de\\_puesta\\_a\\_tierra.pdf](http://www.maintprog.com.co/wpcontent/uploads/2014/11/Corrosion_de_Electrodos_de_puesta_a_tierra.pdf).

[11] MORENO Jorge; COMÍN Pascual y ASENSIO Gabriel. Sistemas de puesta a tierra en instalaciones de alta tensión, Diseño calculo y verificación. Madrid: Garceta, 2015. P 177-178.

[12] GARNACHO Fernando; SIMÓN Pascual y MORENO Jorge. Reglamento de Instalaciones Eléctricas de Alta Tensión y sus fundamentos Técnicos. Madrid: Garceta 2014.

[13] GARCÍA Rogelio. La puesta a tierra de instalaciones eléctricas y el R.A.T. Barcelona: Marcombo Boixareu Editores, 1991. p. 103.

[14] ROSBORG, Bo; PAN, Jinshan y LEYGRAF Christofer. Tafel slopes used in monitoring of copper corrosion in a bentonite/groundwater environment. En: Corrosion Science. 2005 vol 47, p. 3267-3279.

[15] KOSEC, Tadeja; QIN, Z; CHEN, J; LEGAT, Andraz y SHOESMITH, D.W. Copper corrosion in bentonite/saline groundwater solution: Effects of solution and bentonite chemistry. En: Corrosion Science. 2015 vol. 90, p. 248-258.

[16] ROSBORG, Bo y PAN, JINSHAN. An electrochemical impedance spectroscopy study of copper in a bentonite/saline groundwater environment. En: *Electrochimica Acta*. 2008 vol. 53, p. 7556-7564.

[17] ROSBORG, Bo; KOSEC, Tadeja; KRANJC, Andrej; PAN, Jinshan y LEGAT, Andraz. Electrochemical impedance spectroscopy of pure copper exposed in bentonite under oxic conditions. En: *Electrochimica Acta*. 2011 vol. 56, p. 7862-7870.

[18] ZHANG, X.-L.; ZHAO, X.-H.; WANG, Y.-G. y MO, N. Development of an Electrochemical in Situ Detection Sensor for Grounding Grid Corrosion. En: *Corrosion*. 2010, vol. 66(7), p. 076001-076001-7.

[19] CHEN, Wenguang; RUYU, Bi; WANG, Jian y CHEN Houngui. Review of grounding grids corrosion diagnosis. En: *International Journal of Computer and Electrical Engineering*. 2013, vol. 5, p. 309-312.

[20] TRES, G; SABORIO, E. Corrosion rate evaluation of the copper cable used in grounding systems at the ICE – Costa Rica. En: *Portugaliae Electrochimica Acta*. 2004, vol. 22, p. 345-360.

[21] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC) 62561-7. Lightning protection system components, part 7: Requirements for earthing enhancing compounds.

## BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Method for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements. ASTM G102. West Conshohocken, PA. 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standard Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method. ASTM G57. West Conshohocken, PA. 2012.

AMES N.D.; MONTGOMERY E.F. y LEAK J.S. An Integrated Grounding Practice for Digital Systems, IEEE Trans. Industrial applications, 1993 p 29 (2), 459-467.

CHEN, Wenguang; RUYU, Bi; WANG, Jian y CHEN Houngui. Review of grounding grids corrosion diagnosis. En: International Journal of Computer and Electrical Engineering. 2013, vol. 5, p. 309-312.

CURDTS, E.B. Grounding Principles and Practices as Applied to Industrial Plant, James Biddle Co., Bulletin N25T4, 1962.

FRITZ Todt, Muños Francisco. Corrosión y protección edición española. Madrid: Aguilar, 1959 p 19, 240-245.

GARCÍA Rogelio. La puesta a tierra de instalaciones eléctricas y el R.A.T. Barcelona: Marcombo Boixareu Editores, 1991. p. 103.

GARNACHO Fernando; SIMÓN Pascual y MORENO Jorge. Reglamento de Instalaciones Eléctricas de Alta Tensión y sus fundamentos Técnicos. Madrid: Garceta 2014.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC) 62561-7. Lightning protection system components, part 7: Requirements for earthing enhancing compounds.

JONES Denny A. Principles and Prevention of Corrosion. Reno: Prentice Hall, 1996 p 78-79, 519 - 521.

KOSEC, Tadeja; QIN, Z; CHEN, J; LEGAT, Andraz y SHOESMITH, D.W. Copper corrosion in bentonite/saline groundwater solution: Effects of solution and bentonite chemistry. En: Corrosion Science. 2015 vol. 90, p. 248-258.

LINDSEY, Travis. Grounding Electrode Study One- Year Summary, IAEI News, Jan.-Feb., 1995.

MATAMALA. Guillermo; CARRANZA J.A. y JARA S.E. Corrosión de conductores de cobre en suelos dopados con aditivos semiconductores y salinos, para el mejoramiento de los sistemas de puesta a tierra. CONGRESO INTERNACIONAL DE METALURGIA Y MATERIALES SAM-CONAMET. (12-14, OCTUBRE, 2001: Posadas, Argentina). Memorias. Posadas: Universidad Nacional de Misiones, 2001.

MORENO Jorge; COMÍN Pascual y ASENSIO Gabriel. Sistemas de puesta a tierra en instalaciones de alta tensión, Diseño calculo y verificación. Madrid: Garceta, 2015. P 177-178.

OSBURN, John. Integration of Facilities Ground Systems with user Electronic Systems, EMC Technology, 1986, p 29-54.

REYNA Ángel. Corrosión de electrodos de puesta a tierra. [En línea]. Lightning protection guide: DEHN protects. 2a edición, 2007. Disponible en: [http://www.maintprog.com.co/wpcontent/uploads/2014/11/Corrosion\\_de\\_Electrodos\\_de\\_puesta\\_a\\_tierra.pdf](http://www.maintprog.com.co/wpcontent/uploads/2014/11/Corrosion_de_Electrodos_de_puesta_a_tierra.pdf).

ROSBORG, Bo y PAN, JINSHAN. An electrochemical impedance spectroscopy study of copper in a bentonite/saline groundwater environment. En: *Electrochimica Acta*. 2008 vol. 53, p. 7556-7564.

ROSBORG, Bo; KOSEC, Tadeja; KRANJC, Andrej; PAN, Jinshan y LEGAT, Andraz. Electrochemical impedance spectroscopy of pure copper exposed in bentonite under oxic conditions. En: *Electrochimica Acta*. 2011 vol. 56, p. 7862-7870.

ROSBORG, Bo; PAN, Jinshan y LEYGRAF Christofer. Tafel slopes used in monitoring of copper corrosion in a bentonite/groundwater environment. En: *Corrosion Science*. 2005 vol 47, p. 3267-3279.

SHAUGHNESSY, T. Grounding: A historical Perspective, *Today*, 3 (1), 1997.

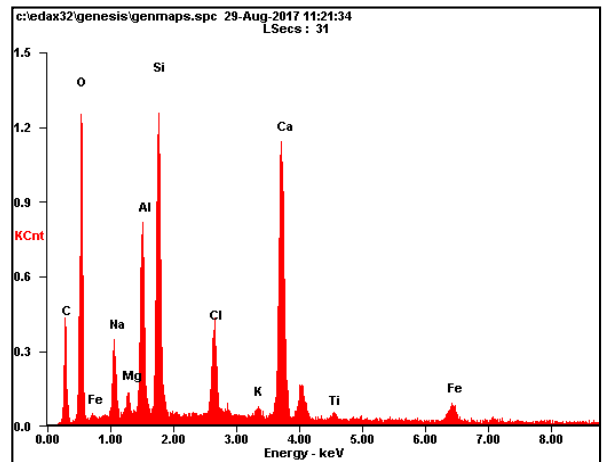
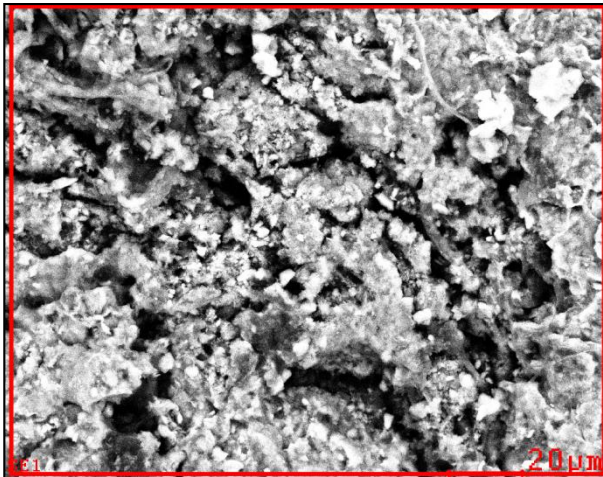
TRES, G; SABORIO, E. Corrosion rate evaluation of the copper cable used in grounding systems at the ICE – Costa Rica. En: Portugaliae Electrochimica Acta. 2004, vol. 22, p. 345-360.

ZAKI Ahmad. Principles of corrosion engineering and corrosion control. Reino Unido: Butterworth-Heinemann, 2006 p 2, 12-13.

ZHANG, X.-L; ZHAO, X.-H; WANG, Y.-G. y MO, N. Development of an Electrochemical in Situ Detection Sensor for Grounding Grid Corrosion. En: Corrosion. 2010, vol. 66(7), p. 076001-076001-7.

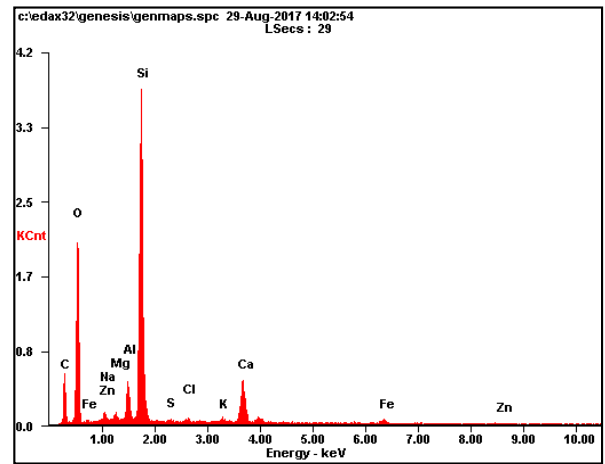
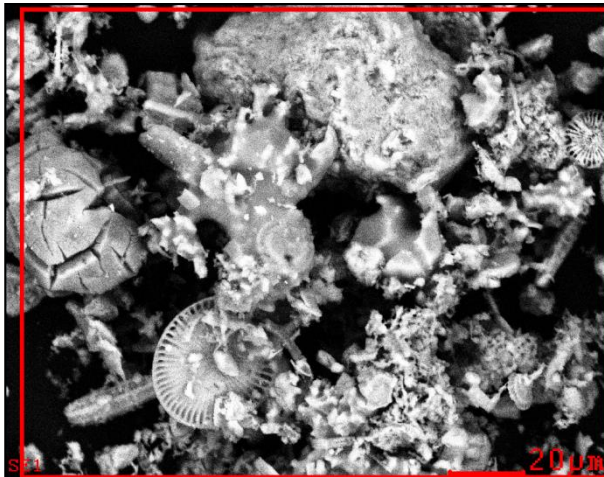
## ANEXOS

**ANEXO A.** Micrografía de la muestra ES y análisis de composición elemental por EDS tomadas en el laboratorio de microscopia de Guatiguará UIS.



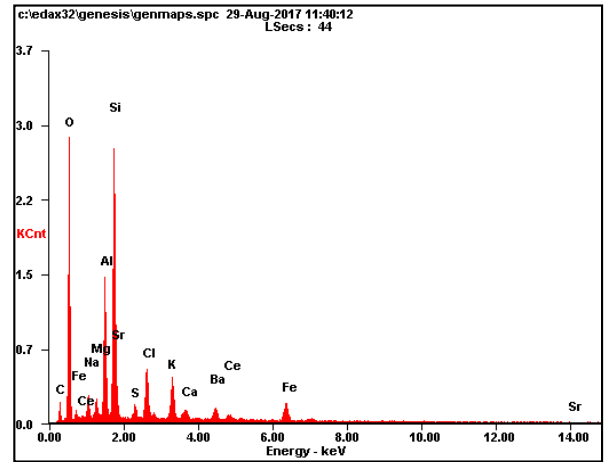
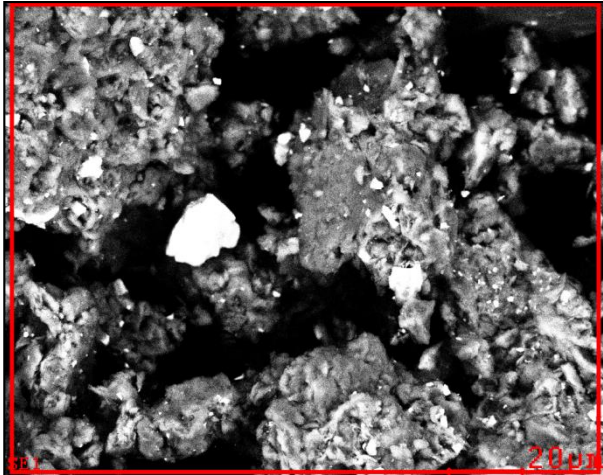
<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	19.39	31.02
<i>OK</i>	34.53	41.47
<i>NaK</i>	03.93	03.28
<i>MgK</i>	00.88	00.70
<i>AlK</i>	06.85	04.88
<i>SiK</i>	11.37	07.78
<i>ClK</i>	04.02	02.18
<i>KK</i>	00.51	00.25
<i>CaK</i>	15.00	07.19
<i>TiK</i>	00.57	00.23
<i>FeK</i>	02.96	01.02
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

**ANEXO B.** Micrografía de la muestra FG y análisis de composición elemental por EDS tomadas en el laboratorio de microscopia de Guatiguará UIS.



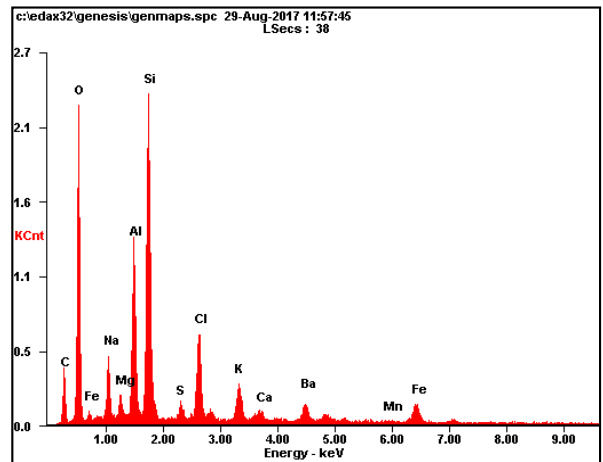
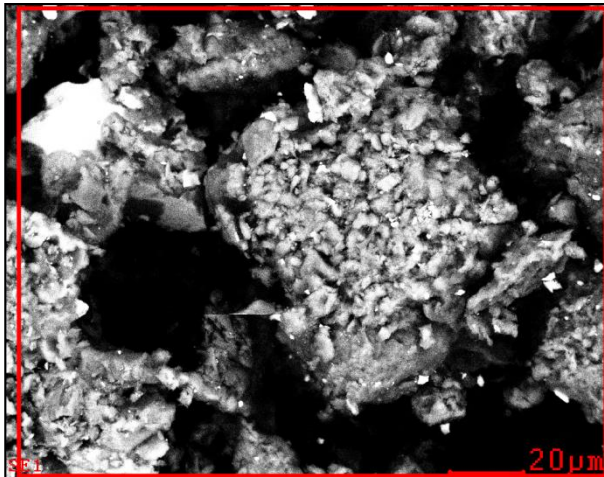
<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	22.55	33.54
<i>OK</i>	39.30	43.87
<i>NaK</i>	00.76	00.59
<i>MgK</i>	00.57	00.42
<i>AlK</i>	02.84	01.88
<i>SiK</i>	25.39	16.15
<i>SK</i>	00.15	00.09
<i>ClK</i>	00.21	00.10
<i>KK</i>	00.42	00.19
<i>CaK</i>	05.60	02.50
<i>FeK</i>	01.46	00.47
<i>ZnK</i>	00.74	00.20
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

**ANEXO C.** Micrografía de la muestra HD y análisis de composición elemental por EDS tomadas en el laboratorio de microscopia de Guatiguara UIS.



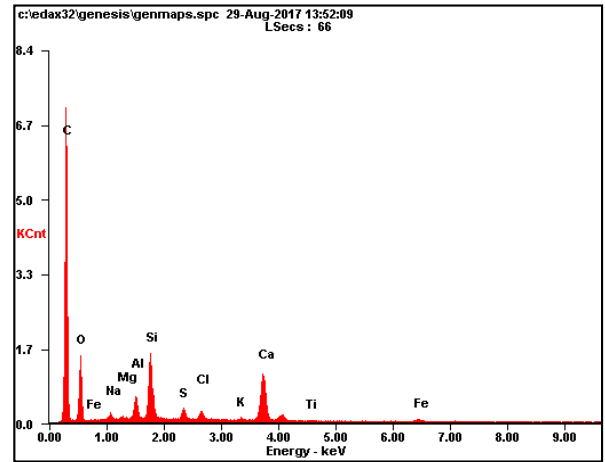
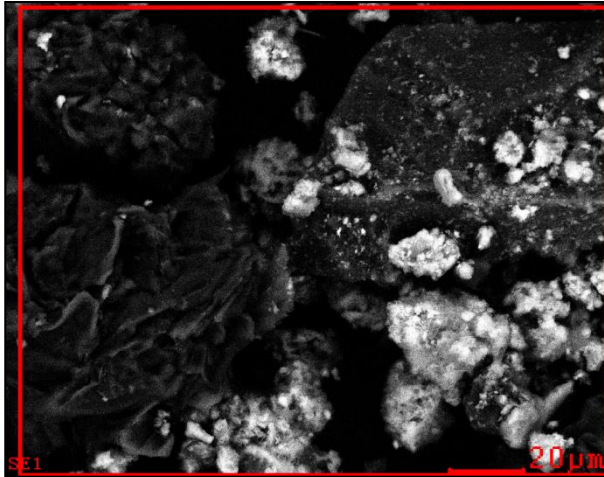
<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	07.54	13.69
<i>OK</i>	37.11	50.57
<i>NaK</i>	02.26	02.14
<i>MgK</i>	01.35	01.21
<i>AlK</i>	09.39	07.59
<i>SiK</i>	19.68	15.28
<i>SrL</i>	01.45	00.36
<i>SK</i>	00.99	00.67
<i>ClK</i>	04.56	02.80
<i>KK</i>	04.00	02.23
<i>CaK</i>	01.00	00.54
<i>BaL</i>	05.41	00.86
<i>CeL</i>	00.00	00.00
<i>FeK</i>	05.28	02.06
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

**ANEXO D.** Micrografía de la muestra M2 y análisis de composición elemental por EDS tomadas en el laboratorio de microscopia de Guatiguará UIS.



<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	15.80	26.72
<i>OK</i>	32.60	41.38
<i>NaK</i>	04.02	03.55
<i>MgK</i>	01.30	01.08
<i>AlK</i>	08.70	06.55
<i>SiK</i>	17.38	12.57
<i>SK</i>	00.89	00.56
<i>ClK</i>	05.53	03.17
<i>KK</i>	02.72	01.41
<i>CaK</i>	00.89	00.45
<i>BaL</i>	05.25	00.78
<i>MnK</i>	00.37	00.14
<i>FeK</i>	04.54	01.65
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

**ANEXO E.** Micrografía de la muestra RC y análisis de composición elemental por EDS tomadas en el laboratorio de microscopia de Guatiguara UIS.



<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	64.28	75.76
<i>OK</i>	19.65	17.38
<i>NaK</i>	00.64	00.40
<i>MgK</i>	00.16	00.10
<i>AlK</i>	01.51	00.79
<i>SiK</i>	04.66	02.35
<i>SK</i>	00.80	00.35
<i>ClK</i>	00.78	00.31
<i>KK</i>	00.19	00.07
<i>CaK</i>	06.29	02.22
<i>TiK</i>	00.14	00.04
<i>FeK</i>	00.90	00.23
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

**ANEXO F.** Datos tomados de las pruebas de resistividad de las muestras de suelo.

<b>Muestra FG</b>		
<b>Corriente aplicada [A]</b>	<b>Potencial [V]</b>	<b>Resistencia [<math>\mu</math>]</b>
0,136	1,683	12,393
0,137	1,694	12,410
0,121	1,506	12,426
0,106	1,313	12,410
0,090	1,120	12,389
0,075	0,929	12,354
0,060	0,741	12,309
0,046	0,558	12,237
0,032	0,382	12,089
0,019	0,218	11,474
	Rprom	12,249
<b>RESISTIVIDAD</b>		
	$\Omega$ .cm	$\Omega$ .m
$\rho$	295,100	2,951

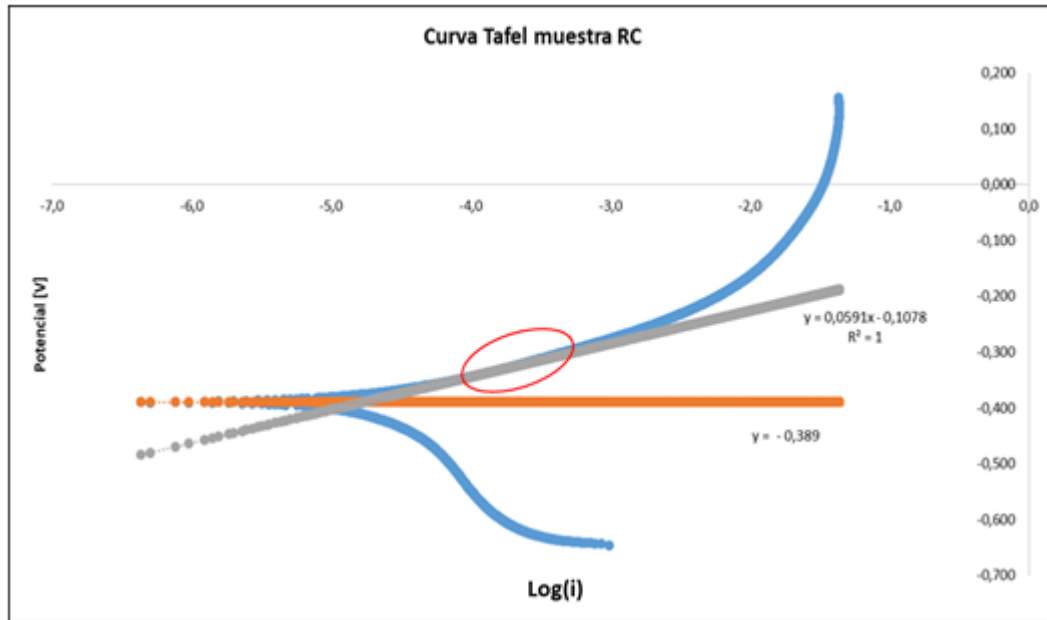
Muestra RC		
Corriente aplicada [A]	Potencial [V]	Resistencia [ $\mu$ ]
0,308	2,170	7,057
0,197	1,377	7,001
0,173	1,206	6,971
0,150	1,042	6,956
0,127	0,886	6,998
0,104	0,721	6,953
0,081	0,553	6,836
0,059	0,388	6,554
0,037	0,232	6,220
0,016	0,116	7,205
	Rprom	6,875
RESISTIVIDAD		
	$\Omega$ .cm	$\Omega$ .m
$\rho$	165,630	1,656

Muestra ES		
Corriente aplicada [A]	Potencial [V]	Resistencia [ $\mu$ ]
0,358	0,350	0,978
0,334	0,325	0,975
0,313	0,305	0,974
0,298	0,290	0,972
0,218	0,210	0,964
0,382	0,377	0,988
0,257	0,250	0,972
0,202	0,196	0,970
0,158	0,151	0,954
0,122	0,112	0,920
	Rprom	0,967
RESISTIVIDAD		
	$\Omega$ .cm	$\Omega$ .m
$\rho$	23,290	0,233

Muestra M2		
Corriente aplicada [A]	Potencial [V]	Resistencia [ $\mu$ ]
0,101	0,094	0,929
0,234	0,210	0,897
0,374	0,335	0,895
0,223	0,202	0,904
0,275	0,249	0,907
0,177	0,164	0,929
0,180	0,169	0,938
0,166	0,157	0,944
0,159	0,151	0,951
0,150	0,143	0,957
	Rprom	0,925
RESISTIVIDAD		
	$\Omega$ .cm	$\Omega$ .m
$\rho$	22,284	0,223

Muestra HD		
Corriente aplicada [A]	Potencial [V]	Resistencia [ $\mu$ ]
0,2926	0,242	0,827067669
0,2574	0,212	0,823620824
0,2427	0,198	0,815822002
0,2325	0,19	0,817204301
0,2372	0,193	0,813659359
0,287	0,235	0,818815331
0,1741	0,14	0,804135554
0,1458	0,115	0,788751715
0,1594	0,125	0,784190715
0,0644	0,05	0,776397516
	Rprom	0,806966499
RESISTIVIDAD		
	$\Omega$ .cm	$\Omega$ .m
$\rho$	19,4411679	0,194411679

**ANEXO G.** Cálculo ejemplo de la muestra ES según la norma ASTM G-102-89 y ASTM G-59-97.



Con el logaritmo de la corriente de corrosión, se determina la corriente de corrosión

$\text{Log}(i) = -4.744$  luego la  $i_{corr}$  es 18.035 A, ya teniendo la corriente de corrosión la densidad de corriente se calcula:

$$J_{corr} = \frac{i_{corr}}{A} = \frac{18.035}{5} = 3.607 \mu A/cm^2$$

Como el peso equivalente del cobre es 31.773 [8] (se considera adimensional para estos cálculos según la norma ASTM G-102) y la densidad del cobre es 8.96  $g/cm^3$  la velocidad de corrosión en milímetros por año [mm/y] para esta muestra es dada por la fórmula:

$$CR = 3,27 \times 10^{-3} \frac{J_{corr} \cdot EW}{\rho}$$

$$CR = 3,27 \times 10^{-3} \frac{3.607 \times 31.773}{8.96} = 0.042 \text{ mmy}$$