CORROSIÓN DEL COBRE EN SUELOS CON DIFERENTES GRADOS DE AGRESIVIDAD

Maryory Gómez Botero [1,2], Sergio Peñaranda[1], Didier Estrada [1]*

- ✓ Este artículo forma parte del "Volumen Suplemento" **S1** de *la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales* (*RLMM*). Los suplementos de la RLMM son números especiales de la revista dedicados a publicar memorias de congresos.
- ✓ Este suplemento constituye las memorias del congreso "*X Iberoamericano de Metalurgia y Materiales (X IBEROMET)*" celebrado en Cartagena, Colombia, del 13 al 17 de Octubre de 2008.
- ✓ La selección y arbitraje de los trabajos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*, quien nombró una comisión *ad-hoc* para este fin (véase editorial de este suplemento).
- ✓ La *RLMM* no sometió estos artículos al proceso regular de arbitraje que utiliza la revista para los números regulares de la misma.
- ✓ Se recomendó el uso de las "Instrucciones para Autores" establecidas por la *RLMM* para la elaboración de los artículos. No obstante, la revisión principal del formato de los artículos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*.

Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales 2009; **S1** (2): 801-807

CORROSIÓN DEL COBRE EN SUELOS CON DIFERENTES GRADOS DE AGRESIVIDAD

Maryory Gómez Botero [1,2], Sergio Peñaranda[1], Didier Estrada [1]*

1: Grupo de Corrosión y Protección, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia
2: Grupo de Ciencia e Ingeniería de Materiales Compuestos, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia

* *E-mail:mgomezb@udea.edu.co*

Trabajos presentados en el X CONGRESO IBEROAMERICANO DE METALURGIA Y MATERIALES IBEROMET
Cartagena de Indias (Colombia), 13 al 17 de Octubre de 2008

Selección de trabajos a cargo de los organizadores del evento

Publicado On-Line el 29-Jul-2009
Disponible en: *www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html*

Resumen

El estudio del comportamiento de los materiales en el suelo es de gran importancia debido al gran capital que tienen muchas empresas invertido en estructuras enterradas en este medio y a la importancia que representa el buen estado de las mismas para la seguridad de las personas. En el presente trabajo se estudió el estado de muestras de cobre después de 5 años de exposición en diferentes suelos, se caracterizaron los productos que se encontraron adheridos a la superficie metálica mediante microscopía óptica, DRX y FTIR. También se estudió la corrosividad de los suelos utilizados mediante medidas in-situ de resistividad, pH, potencial redox y temperatura, además, medidas en laboratorio de contenido de sulfatos, cloruros, sulfuros, materia orgánica y humedad. En las superficies metálicas se encontraron productos de corrosión del cobre, principalmente malaquita con constituyentes del suelo adheridos, como dolomita y calcita, además de pequeñas trazas de oxihidróxido de hierro y cuprita. Los suelos se clasificaron en moderadamente y poco corrosivos. Las muestras de cobre mostraron muy buen estado después de 5 años de inmersión en suelos de la ciudad de Medellín.

Palabras Claves: *Estructuras enterradas, Corrosión del cobre, Corrosividad del suelo, Corrosión en suelos*

Abstract

The study of the behavior of the materials in the soil is of very much importance due to the great capital that have many companies invested in underground structures in this medium and to the importance that the good state of the same ones represents for the safety of the people. In the present work, we studied the state of samples of copper after 5 years of underground in different soils, the products adhered to the metallic surface were characterized by means of optical microscopy, DRX and FTIR. Also, the corrosivity of the soils used was studied by means of measurements in-situ of resistivity, pH, redox potential and temperature, additionally, measurements in laboratory of sulphates, chlorides, sulphides, organic matter and moisture content. In the metallic surfaces products of copper corrosion were found, principally, malachite with constituents of the soil adhered, like dolomite and calcite, in addition to small touches of iron oxihydroxide and cuprite. The soils were classified in moderately and slightly corrosive. The samples of copper showed very good state after 5 years of immersion in soils of the city of Medellín.

Keywords*: Underground structures, Copper corrosion, Soil Corrosivity, Soil corrosion*

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los primeros metales usados inteligentemente para aplicaciones prácticas es el cobre. El cobre y las aleaciones base cobre tienen aplicaciones en arquitectura, decoración, en la industria marina y de electrónicos. Otro uso importante del cobre es para tanques de almacenamiento de desechos nucleares bajo tierra. El cobre, eventualmente forma una delgada capa de corrosión llamada pátina, generalmente, de color café-verde o verde-azul (Srivastava y Balasubramaniam [1]). Los productos de corrosión del cobre tienen un efecto protector contra la corrosión, sin embargo su comportamiento puede ser diferente en presencia de contaminantes como cloruros, sulfuros, etc. (Mendoza et al. [2]).

En condiciones de pH neutro o cercano a neutro se pueden formar óxidos e hidróxidos de cobre altamente protectores sobre la superficie del metal, sin embargo, cuando ocurre corrosión inducida microbiológicamente en superficies de cobre, los microorganismos causan una disminución del pH

en la interfase cobre/solución, aumentando la disolución de la película protectora y este es el principal factor que controla la corrosión microbiológica en el sistema (Reyes et al [3]).

La cuprita (Cu_2O) juega un papel decisivo en la naturaleza protectora de películas de corrosión sobre cobre, este óxido presenta mayor estabilidad en condiciones de baja hidratación que cuando está completamente hidratado (Mendoza et al, Milasev y Meticos-Hucovic [2,4]).

Los suelos varían considerablemente en sus características químicas y físicas que influencian su agresividad. Las características físicas del suelo con importancia en la corrosión son aquellas que determinan la permeabilidad del suelo al aire y al agua, mientras que las sustancias químicas que influencian la corrosión son aquellas solubles en agua. La presencia de algunas aumenta y de otras disminuye la agresividad del medio, por ejemplo, la resistividad iónica del suelo es determinada por la naturaleza y concentración de los iones conductores como por el porcentaje de humedad, entre otras (Otero [5]).

La corrosión en el suelo, entonces es influenciada por variables como la aireación, la humedad, el pH, el potencial redox, las heterogeneidades del suelo y la presencia de sales y agua, e incluso condiciones climáticas, pues en épocas de lluvia la humedad es mayor que en épocas secas. El oxígeno por ejemplo, sufriendo reducción en el área catódica tendría una acción aceleradora, lo que podría inducir a que los suelos poco aireados tengan una acción menos agresiva siempre y cuando no ocurra la formación de pilas de aireación diferencial.

Actualmente se encuentra disponible literatura sobre corrosión del cobre en la atmósfera y en medios marinos, pero aún es limitado el conocimiento que se tiene sobre la corrosión de este metal en el suelo (Kilinççeker y Galip, Barrena et al, Zhang et al, Robbiola et al, Zhang, Allam y Ashour, Gallese et al, Vera et al, Mariaca et al. [3, 6-13]). Debido a las aplicaciones del cobre, muchas empresas en el mundo tienen gran capital invertido en estructuras de cobre enterradas en el suelo (transmisión y distribución de energía eléctrica, telecomunicaciones, puestas a tierra, etc.), por lo que toma fuerza el interés en estudiar el comportamiento de este material en dicho medio.

En el presente trabajo se estudió la corrosión de muestras de cobre sumergidas durante cinco años en diferentes tipos de suelos, se presenta el análisis de agresividad de los suelos, los resultados del análisis al microscopio óptico de las superficies metálicas y la caracterización de los productos de corrosión formados.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 Estudio de los productos de corrosión formados

Con el fin de adelantar el estudio se enterraron en el suelo muestras de cobre de forma cilíndrica en tres ubicaciones (suelos) diferentes y se dejaron reposar allí durante un período de cinco años. Las muestras se sumergieron en suelos del Valle de Aburrá expuestos a la intemperie, razón por la que son influenciados por las condiciones climáticas del lugar.

Una vez cumplido el período de exposición las muestras fueron extraídas y su superficie fue observada minuciosamente mediante microscopía óptica (Nikon eclipse E200), además los productos de corrosión formados sobre la superficie de las muestras fueron recolectados y se sometieron a análisis de difracción de rayos X (DRX) (Panalytical MDP Expert pro) y espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) en un equipo Nicolet Avatar 330 FT-IR.

2.2 Estudio de la agresividad del suelo

Cuando se extrajeron las varillas del suelo se realizaron medidas in-situ de algunas variables del suelo como la temperatura, pH, potencial redox y resistividad.

La medición de la temperatura se realizó con un termómetro de mercurio convencional en cuatro puntos cercanos a la ubicación de la muestra de cobre. Debido a que la temperatura del suelo influye en la medida del pH, uno de los propósitos de esta medida es poder ajustar la medida de pH a estas condiciones reales, en caso de ser necesario; además, puede indicar o no la presencia de actividad microbiológica en el suelo. Cuando las temperaturas son iguales o superiores a los 35 ºC, existe una gran posibilidad de que haya actividad microbiológica.

Las medidas de pH y potencial redox se realizaron con un pH-metro Hanna instruments HI 9023, estas medidas también se realizaron por cuadriplicado sumergiendo el electrodo en el suelo en la zona cercana a donde se encontraba la muestra metálica. La resistividad del suelo se midió por el método

WENNER bajo la norma ASTM G57-06 [14].

Además, se recolectaron muestras de suelo en campo para someterlas a diferentes análisis en laboratorio, las cuales fueron almacenadas y transportadas de acuerdo a la norma ASTM D4220-95 [15]. A estas muestras de suelo se les realizaron análisis de contenido de humedad bajo la norma ASTM 2216-05 [16] utilizando una balanza analítica (Mettler Toledo AB204) y una estufa Heraus Instruments UT6, contenido de sulfatos (SO_4^{2-}) y cloruros (Cl^-) mediante cromatografía iónica (Metrohm 761 Compact IC) con una sensibilidad de 0,01 ppm, contenido de materia orgánica utilizando el método Walkley y Black y análisis de sulfuros (S^{2-}) de acuerdo al método descrito US EPA Test Method 9031.

A continuación se presenta la descripción geológica de los tres tipos de suelos en los que se enterraron las muestras metálicas. Suelo 1: constituido por una matriz de color naranja claro, la cual es arcillosa debido al caolín, además presenta minerales de hornblenda, biotita y feldespato meteorizados. Suelo 2: flujo de lodo residual de color gris verde claro, de alta plasticidad y contiene vetas rojas de oxidación. Suelo 3: Lleno antrópico con diferentes tipos de basuras, fragmentos de rocas y escombros. Se seleccionaron tres suelos de diferente naturaleza con el fin de estudiar la incidencia de los mismos sobre las muestras metálicas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización de los productos de corrosión formados

Una vez las muestras de cobre fueron extraídas después de cinco años de exposición, se observaron a simple vista mostrando formación de productos de corrosión de diferente aspecto en cuento a su color, textura y adhesión a la superficie metálica. Sin embargo, a pesar de la presencia de productos de corrosión, se observó un buen estado de las muestras en lo que se refiere a dimensiones y ausencia de ataque localizado, tampoco se evidencian procesos de corrosión acelerados, como se puede observar en la Figura 1. Esta Figura muestra imágenes de la superficie de las muestras de cobre, después de haber retirado los residuos de suelo. Las Figuras 1a y 1b presentan el aspecto de los productos de corrosión formados en diferentes zonas de una muestra enterrada en el suelo 1. En la Fig. 1a se observan productos de color verde principalmente, acompañados de puntos de metal descubierto; mientras que en la Fig. 1b se aprecia una mezcla de productos color verde y café claro. La fig. 1c muestra productos de corrosión de color café principalmente y en menor proporción de color verde claro. La Fig. 1d presenta productos de corrosión de color negro y pequeños puntos de color verde.

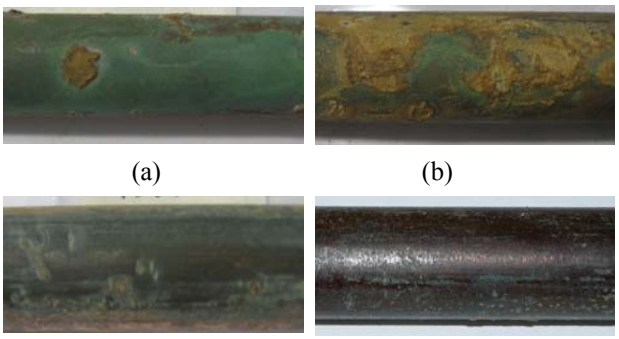


Figura 1. Aspecto superficial de las muestras a simple vista después de concluido el período de exposición: (a) y (b) productos de corrosión formados en una muestra sumergida en el suelo 1, (c) productos de corrosión formados en una muestra enterrada en el suelo 2 y (d) productos de corrosión formados en una muestra enterrada en el suelo 3.

En la Figura 2 se presentan los difractogramas que corresponden a los productos mostrados en la Fig. 1. Las cuatro muestras recolectadas presentan un alto grado de cristalinidad, con picos coincidentes que revelan la existencia de malaquita ($CuCO_3.Cu(OH)_2$), dolomita ($(Mg,Ca)CO_3$), calcita ($CaCO_3$), cuprita (Cu_2O), cobre puro (Cu), oxihidróxido de hierro (FeOOH) y otras fases complejas de difícil identificación que revelaron picos con 2Θ igual a 19,2 º; 21,1 º y 33,4 º El difractograma presentado en la Fig. 2a corresponde a productos de corrosión formados en el suelo 1 su aspecto se muestra en la Fig. 1a, se puede observar que el principal constituyente de los productos de cobre formados es la malaquita que es un carbonato de cobre hidratado, los picos más intensos se presentan a 18 º, 24,4 º, 31,7 º, 15,1 º y 35,8 º respectivamente, además de picos con baja intensidad en 41,7 º, 42,6 º y 46 º. Otros compuestos que revelaron alta intensidad en esta muestra son la calcita y/o dolomita mostrando mayor intensidad a 29,7 º, estos compuestos provienen de la misma composición del suelo, también se encontraron picos de cuprita a 36,3 º el más intenso, 54,7 º y a 61,5 º de menor intensidad. Se halló un pico de oxihidróxido de hierro con muy

baja intensidad a 26,6 º, este compuesto puede tener su origen en los mismos constituyentes del suelo.

El difractograma de la Fig. 2b corresponde a los productos formados en el suelo 1, los cuales se muestran en la Fig. 1b. Este difractograma presenta intensidades superiores a las mostradas en los otros difractogramas, el pico más intenso corresponde a calcita y/o dolomita a 29,7 º, además exhibe el pico de mayor intensidad de oxihidróxido de hierro junto con otros picos de baja intensidad de calcita y/o dolomita y cobre puro.

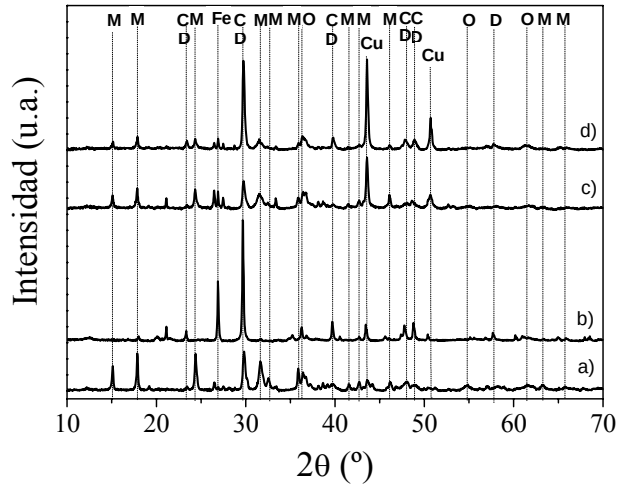


Figura 2. Difractogramas de los productos de corrosión extraidos de las varillas sumergidas en los diferentes suelos: a) y b) productos formados en el suelo 1, c) productos formados en el suelo 2 y d) productos formados en el suelo 3. (M) malaquita $CuCO_3.Cu(OH)_2$, (D) dolomita (Mg, Ca)CO_3, (C) calcita $CaCO_3$, (O) cuprita Cu_2O, (Cu) cobre puro, (Fe) oxihidróxido de hierro FeOOH.

El difractograma de la Fig. 2c corresponde a los productos formados en el suelo 2, mostrados en la Fig. 1c. En esta muestra se detectó la presencia de Cu metálico con una intensidad de pico superior a la de los productos formados, debido a que la cantidad de productos fue poca, accidentalmente también se extrajo parte de la muestra metálica, en esta muestra también se encontró dolomita y/o calcita en mayor proporción y en menor cantidad malaquita, oxihidróxido de hierro y cuprita.

La Figura 2d muestra el difractograma de los productos formados en el suelo 3, se observa un pico muy intenso de calcita y/o dolomita a 29,7 º, acompañado de picos de menor intensidad que dejan en evidencia la presencia de malaquita, cuprita y oxihidróxido de hierro.

Los espectros infrarrojos de los productos de corrosión formados se pueden observar en la Figura 3. De forma análoga como se presentaron los difractogramas los espectros infrarrojos corresponden a las mismas muestras presentadas en la Figura 2 en su respectivo orden. Los resultados obtenidos mediante microscopía infrarroja complementan y son congruentes con los resultados obtenidos mediante difracción de rayos X. La Figura 3 muestra las principales bandas de la malaquita en todas las muestras, acompañadas de dolomita la cual se encuentra en mayor proporción en los productos formados en los suelos 1 (correspondiente a la Fig. 1b) y 3 que en el suelo 2. Los análisis infrarrojo también permitieron detectar la presencia de calcita en todas las muestras, mostrando bandas más intensas en los productos formados en el suelo 1 (Fig. 1b) (Kodama, Nyquist y Kagel [17, 18].

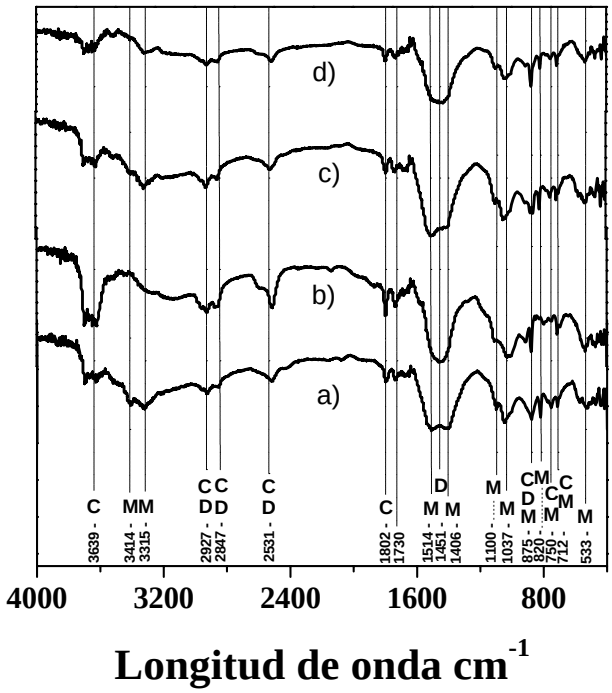


Figura 3. Espectros infrarrojos de los productos de corrosión extraidos de las varillas sumergidas en los diferentes suelos: a) y b) productos formados en el suelo 1, c) productos formados en el suelo 2 y d) productos formados en el suelo 3. (M) malaquita $CuCO_3.Cu(OH)_2$, (D) dolomita (Mg, Ca)CO_3, (C) calcita $CaCO_3$

Las dos técnicas empleadas para el análisis de la composición de los productos encontrados sobre la superficie metálica de las muestras de cobre permitieron determinar la presencia de malaquita en todas las muestras, presentando el mayor contenido de este compuesto los productos formados en el suelo 1 (Fig. 1a), igualmente en este suelo en otra superficie de la muestra se encontró la mayor presencia de calcita y dolomita (Fig. 1b) minerales que pueden ser procedentes del mismo suelo y presentaron gran adhesión a la superficie de la muestra metálica. Los productos encontrados sobre la superficie metálica que se expuso a los suelos 2 y 3, están básicamente constituidos por dolomita, calcita y pequeñas trazas de malaquita y cuprita (Figs. 1c y 1d).

3.2 Análisis de la agresividad del suelo

En la Tabla 1 se presentan algunos parámetros que dan información sobre la agresividad de los suelos utilizados en el presente estudio. Se puede observar que el contenido de cloruros es muy similar en los suelos 1 y 2, mientras que en el suelo 3 aumenta considerablemente. Los iones sulfato por el contrario se detectaron en mayor concentración en el suelo 1 que en los suelos 2 y 3, el contenido de materia orgánica es igual en los suelos 1 y 3, mientras que en el suelo 2 constituido por lodo residual disminuye; nótese que el suelo 3 presenta un contenido de materia orgánica igual al suelo 1 que es natural del lugar. Los contenidos de materia orgánica encontrados no son altos, por lo que no comprometen un estado de descomposición que pueda llevar los suelos a valores de pH muy ácidos. Como lo muestra la Tabla 1, la temperatura medida in-situ inmediatamente se retiró la muestra metálica, fue muy similar en los tres tipos de suelo, mostrando valores inferiores a 35 ºC lo que sugiere ausencia de actividad microbiológica en el suelo. El cobre es un metal que no es atacado por estas especies, por lo que es indicado para aplicaciones en el suelo, por el contrario se estudia su uso para proteger contra la corrosión microbiológica estructuras de acero (Braithwaite et al, Pérez et al, Douglas-Helders et al. [19-21]). No se detectó contenido de sulfuros (S^{2-}) en ninguna de las muestras analizadas con un límite de detección de 0,1 mg/kg, lo que corrobora lo que se ha afirmado.

En la Figura 4 se muestran los valores de resistividad y contenido de humedad encontrados en las muestras de los suelos. El suelo 1 exhibió el mayor contenido de humedad y a la vez el más alto valor de resistividad, mientras que el suelo 3 con el menor contenido de humedad mostró una resistividad intermedia, mientras que el suelo 2 con un contenido de humedad intermedio presentó el menor valor de resistividad, esto aparentemente contradictorio se debe a que los suelos son de diferente naturaleza y los valores de resistividad, posiblemente, fueron más influenciados por el contenido de iones cloruro, en el caso de los suelos 1 y 3, los cuales contribuyen a la conductividad del suelo. Cuando se tiene un mismo suelo, sí se espera que cuanto mayor humedad contenga menor será su resistividad.

Tabla 1. Algunas variables de agresividad de los suelos.

Suelo	*Cl^- (ppm)*	*SO_4^{2-} (ppm)*	*Materia Orgánica (%)*	*T^a (ºC)*
1	18,68	59,58	13,30	22,1
2	18,14	43,40	9,46	22,5
3	26,58	42,30	13,29	22,0

a: Temperatura medida in-situ.

De acuerdo a los rangos propuestos por la AWWA (American Water Works Association) los valores de resistividad mostrados por los suelos en estudio clasificarían el suelo 1 en poco corrosivo, el suelo 2 en muy corrosivo y el suelo 3 en corrosivo para estructuras de acero enterradas, esto permite corroborar la nobleza del cobre, ya que en ninguno de los suelos presentó ataque corrosivo severo después de 5 años de exposición en el medio (Royuela [22]) De otro lado, el contenido de humedad encontrado también favorecería procesos corrosivos que se puedan desencadenar, o sea, es una humedad alta para enterrar estructuras de acero.

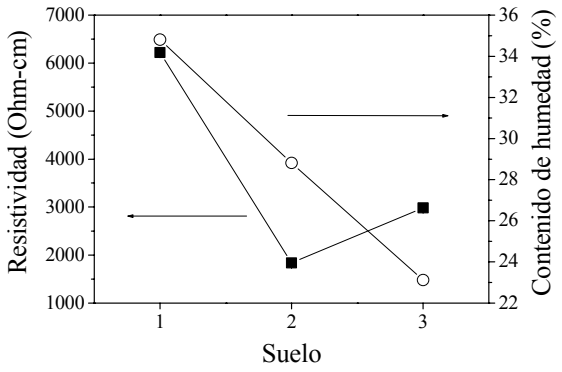


Figura 4. Valores de resistividad y humedad encontrados en los diferentes suelos.

El potencial redox indica esencialmente el grado de aireación del suelo, presentando valores altos cuando está presente un alto grado de oxígeno. En la Figura 5 se presentan los valores de potencial redox y pH medidos en los diferentes suelos, se puede observar que los valores de potencial redox encontrados están por debajo de 100 mV indicando una pobre aireación del suelo y por lo tanto condiciones propicias para la proliferación de bacterias anaeróbicas por lo que estos suelos se consideran como muy agresivos para estructuras de acero, algo que no sucedió con las muestras de cobre (Starkey [23]). La pobre aireación encontrada en el suelo, explica los valores de humedad encontrados.

De acuerdo al diagrama de Pourbaix del cobre, este metal puede sufrir corrosión con valores de pH inferiores a 8 y superiores a 13, dependiendo del potencial electroquímico del material en el medio que lo rodea, por lo que los valores de pH encontrados podrían contribuir al ataque corrosivo del material, pero los potenciales electroquímicos que se generaron, posiblemente, no contribuyeron para que ocurriera la corrosión de las muestras. En particular, el cobre puede sufrir corrosión, en suelos con valores de pH elevado, conjugado con un alto contenido de materia orgánica, en el presente estudio no se presentaron ninguna de las dos condiciones (Otero y AWWA [6, 24]).

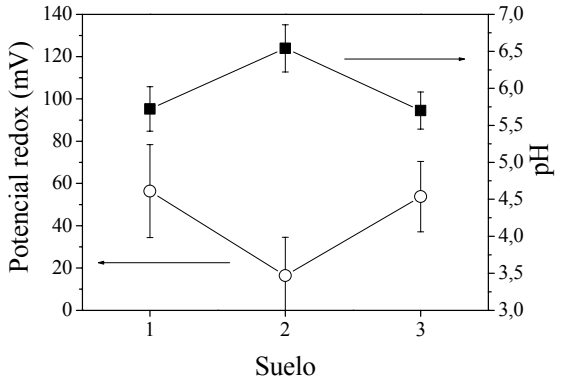


Figura 5. Valores de potencial redox y pH de los diferentes suelos.

De acuerdo a la norma AWWA C-105 los suelos 1 y 2 estudiados en el presente trabajo, se clasificarían en moderadamente corrosivos y el suelo 3 en poco corrosivo, influenciando principalmente la agresividad de estos suelos las medidas de potencial redox realizadas [25].

4. CONCLUSIONES

El presente estudio ratifica la excelente estabilidad del cobre en un medio tan complejo como el suelo. Después de 5 años de inmersión en este medio, las muestras de cobre extraídas mostraron muy buen estado a pesar de los productos de corrosión o constituyentes del mismo suelo adheridos a la superficie.

En un suelo de matriz naranja con presencia de caolín, y minerales meteorizados de hornblenda, biotita y feldespato, sobre la superficie de las muestras se formaron películas de malaquita altamente estables mezcladas con calcita y dolomita.

En un suelo constituido por lodo residual se encontraron trazas de malaquita y cuprita dispersas en una fase continua de dolomita y calcita fuertemente adheridas a la superficie metálica. Estos mismos productos se encontraron cuando la muestra fue expuesta a un suelo constituido por diferentes tipos de basuras y fragmentos de rocas.

De acuerdo a las medidas realizadas in-situ y en laboratorio a las muestras de suelos, los suelos 1 y 2 estudiados se clasifican en moderadamente corrosivos, mientras que el suelo 3 se clasifica en poco corrosivo, el estado de las muestras de cobre permiten corroborar esta clasificación.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Srivastava A, Balasubramaniam R. Mater Charact. 2005; **55**: 127-125.

[2] Mendoza A.R, Corvo F, Gómez A, Gómez J. Corros. Sci. 2004; **46**: 1189-1200.

[3] Reyes A, Letelier MV, De la Iglesia R, González B, Lagos G. Int Biodeterioration Biodegradation. 2008; **61**: 135-141.

[4] Milasev I, Meticos-Hucovic. J Electrochem Soc. 1991; **132**: 61-67.

[5] Otero E, "Corrosión y degradación de materiales". Mdrid (España): Síntesis, 1997.

[6] Barrena M.I, Gómez de Salazar J.M, Soria A. Mat Letters. 2008, **62**: 3944-3946.

[7] Zhang Y.N, Zi J.L, Zheng M.S, Zhu J.W. J. alloys Compd. 2008; **462**: 240-243.

[8] Robbiola L, Tran T.T.M, Dubot P, Majerus O, Rahmouni K. Corros Sci. 2008; **50**: 2205-2215.

[9] Zhang D-Q, Cai Q-R, He X-M, Gao L-X, Zhou G-D. Mater Chem Phys. 2008; article in

press. [On line]; Citado [2-Sep-2008]. Disponible en la web: < http://www.sciencedirect.com/science?_ob=PublicationURL&_tockey=%23TOC%235580%239999%23999999999%2399999%23FLA%23&_cdi=5580&_pubType=J&_auth=y&_acct=C000025027&_version=1&_urlVersion=0&_userid=506061&md5=8e566c4f5c02c5763958a31c8512834f>.

[10] Allam N.K, Ashour E.A. Appl Surf Sci. 2008; **254**: 5007-5011.

[11] Gallese F, Laguzzi G, Luvidi L, Ferrari V. Takacs S, Pagani Cesa G.V. Corros Sci. 2008; **50**: 954-961.

[12] Vera R, Delgado D, Rosales B.M. Corros Sci. 2008; **50**: 1080-1098.

[13] Mariaca L, de la Fuente D, Feliu Jr. S, Simancas J, Gonzáles J.A, Morcillo M. J Phys Chem Solids. 2008; **69**: 895-904.

[14] Norma ASTM G 57-06, Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method, Filadelfia (EEUU): American Society for Testing and Materials, 2006.

[15] Norma ASTM D 4220-95, Standard Practices for Preserving and Transporting Soil Samples, Filadelfia (EEUU): American Society for Testing and Materials, 1995.

[16] Norma ASTM D 2216-05, Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, Filadelfia (EEUU): American Society for Testing and Materials, 2005.

[17] Kodama H. "Infrared spectra of minerals". Ottawa (Canadá): Research program service, 1985.

[18] Nyquist RA, Kagel RO. "Infrared spectra of inorganic compounds". New York (EEUU): Academic press, 1971.

[19] Braithwaite RA, Cadavid Carrascosa MC, McEvoy LA. Aquaculture. 2007, **262**: 219-226.

[20] Pérez M, Blustein G, García M, Del Amo B, Stupak M. Prog org coat. 2006, **55**: 311-315.

[21] Douglas-Helders GM, Tan C, Carson J, Nowak BF. Aquaculture. 2003, **221**: 13-22.

[22] Royuela JJ. Teoría y práctica de la lucha contra la corrosion, La Plata (Argentina): Cidepint, 1984, p. 156-159.

[23] Starkey RL. Anaerobic corrosion of iron in soils, New York (EEUU): Amer. Gas. Assoc, 1945.

[24] Manual M27-AWWA, Evaluating the potential for corrosion. External corrosion-Introduction chemistry and control, Denver (EEUU): American Water Works Association, 2004, p. 23-40.

[25] Norma AWWA C-105, American National Standard for Polyethylene encasement for Ductile-Iron Pipe System, Denver (EEUU): American Water Works Association.