

Análisis estadístico de los factores que intervienen en la corrosión de tuberías enterradas

*Jorge Andrés Calderón**, *Juan Delgado**, *Sergio Peñaranda**,
*Alex Restrepo**

(Recibido el 31 de septiembre de 2004. Aceptado el 23 de junio de 2005)

Resumen

La corrosión de tuberías enterradas es un fenómeno que depende más de la corrosividad del suelo que de la naturaleza del metal. La evaluación de la corrosividad del suelo es una actividad compleja debido a la cantidad de variables que interactúan entre sí. En este trabajo se hace un análisis multivariado de los principales factores que intervienen en la corrosión de estructuras enterradas. El análisis permite clasificar factorialmente y transformar un conjunto de variables correlacionadas en un nuevo conjunto de menor dimensión de nuevas variables no correlacionadas, permitiendo mejor comprensión de los datos de las unidades experimentales y la detección de las variables de mayor peso en la variable respuesta, lo que permite disminuir el número de variables por medir. En este artículo se describen las técnicas experimentales empleadas y el análisis estadístico realizado sobre 6 variables medidas en las unidades experimentales. A partir del análisis multivariado y la clasificación por grupos pudo obtenerse un conjunto de 3 variables, las cuales permiten realizar una clasificación de los diferentes tipos de suelo según su corrosividad, con confiabilidad del 90% y error del 20%.

----- *Palabras clave:* corrosión en suelos, corrosión en tuberías, hierro gris, análisis multivariado, resistividad.

Statistic assessment of the factors that take part in the corrosion on buried pipe

Abstract

Corrosion of buried pipes is a phenomenon that depends more on the corrosivity of the ground than on the nature of the metal. The evaluation of the corrosivity of the ground is a complex activity because there are many variables influencing the process. In this work a multivariate analysis of the main factors taking part in corrosion of buried structures was carried out. This analysis allows a factorial

* Grupo de Corrosión y Protección. Sede de Investigación Universitaria. Universidad de Antioquia. Calle 62 N.° 52-59, torre 2, laboratorio 330-331. Teléfono: ++ 574 210 66 17, fax: ++574 210 65 65.

classification and permits the transformations of a set of correlated variables into a smaller set of not correlated variables. This study gives a better understanding of data of the experimental units and determines the variables of major influence over the variable response. With this information a smaller number of variables could to be measured. This paper describes the experimental techniques used and the statistics analysis realized of the 6 variables measured in the experimental units. A new set of 3 variables is obtained, which allows a classification of the soils according to corrosivity with a confidence of 90% and an error of 20%.

----- *Key words:* soil corrosion, buried pipes corrosion, cast iron, multivariate analysis, soil resistivity.

Introducción

Son numerosas las estructuras que se hallan enterradas en el suelo, como tuberías de agua, gas, petróleo y sus derivados, cables eléctricos, anclajes, postes, tanques, etc. La mayor parte de dichas estructuras son construidas en materiales metálicos por lo que la corrosión es un problema con el cual los ingenieros de obra y mantenimiento se enfrentan regularmente. Teniendo en cuenta que muchas de las estructuras enterradas transportan bienes de servicio como combustible, energía, comunicación, agua, entre otros, la importancia del control de la corrosión en este sector se debe no solo a su impacto económico sino también al carácter social, enmarcado en la calidad y regularidad del servicio que se debe prestar. En un reciente estudio realizado en los Estados Unidos, los costos directos de la corrosión en tuberías de gas y transporte de líquidos fueron estimados en US\$7.000 millones al año y para el transporte y distribución de agua potable y alcantarillado, en US\$5.000 millones [1].

La corrosión de tuberías enterradas es un fenómeno electroquímico, en el cual la reacción anódica es la oxidación del metal, mientras que la reacción catódica es la reducción de oxígeno. Para que el proceso corrosivo se prolongue en el tiempo, ambas reacciones deben suceder de manera simultánea, aunque normalmente se dan en puntos y áreas diferentes de la estructura. Debido a la alta heterogeneidad del suelo, la permeación del oxígeno desde la atmósfera hasta el metal es diferente y suelen presentarse celdas de aireación diferencial, estableciéndose un proceso corrosivo localizado, en el cual las regiones de la estructura metálica en contacto con suelo de baja permeación, como la arcilla, se constituyen en zonas anódicas y aquellas regiones de la estructura en contacto con suelo de mayor permeación de oxígeno, como la arena o material de relleno seleccionado, son las zonas catódicas [2]. En una gran estructura enterrada, como es el caso de la tubería, la corrosión del metal se da en ambas zonas, anódica y catódica, sin embargo, la corrosión en las zonas anódicas es limitada por la difusión del oxígeno en el

terreno arcilloso saturado de agua, mientras que en el terreno arenoso la corrosión es limitada por la precipitación de productos de corrosión sobre la superficie del metal [2].

La relación entre las áreas anódicas y catódicas es fundamental en la estimación del daño que puede sufrir una tubería. Debido a la formación de celdas de aireación diferencial, la corrosión se da de manera localizada, presentándose el picado del material. La relación ánodo/cátodo tiende a aumentar con el tiempo por la formación de productos de corrosión en las áreas catódicas y por la imposibilidad de formar capas de productos de corrosión en las zonas anódicas de menor concentración de oxígeno y mayor conductividad eléctrica. Esta situación conlleva al aumento progresivo de la densidad de corriente de corrosión en dichas áreas y a la profundización del picado [3].

La heterogeneidad del suelo hace que el proceso corrosivo en estructuras enterradas sea un fenómeno complejo, en el cual un gran número de variables intervienen e interactúan entre sí. La difusión de oxígeno hacia el metal depende de la estructura y composición del suelo, estas propiedades, a su vez, definen otros factores importantes para el proceso corrosivo, como la resistividad, la población bacteriana, la presencia de sales de sulfato o cloruros, la temperatura y el contenido de humedad, entre otros. Todos estos factores determinan la corrosividad del suelo y en la actualidad es posible clasificar los diferentes tipos de terreno según su corrosividad, evaluando dichos factores [4]. Para las tuberías de acero, hierro nodular o hierro gris su durabilidad depende más de la corrosividad del terreno que de la naturaleza misma del metal [5]. Esto hace que sea importante evaluar anticipadamente los riesgos de corrosión en una tubería y hacer uso de los métodos recomendados para su control [6].

Debido a la complejidad del fenómeno corrosivo en estructuras enterradas, las técnicas estadísticas se han convertido en una herramienta útil para su estudio. Recientemente se han planteado modelos

de regresión lineal que correlacionan la profundidad del picado con los factores del terreno directamente relacionados con la corrosión [7]. Sin embargo, no siempre es posible medir todas las variables que definen la intensidad del ataque corrosivo y para propósitos prácticos es más útil determinar cuáles de dichas variables son las que mayor incidencia tienen en la determinación de la corrosividad del terreno y el tipo de interacción que poseen, de tal manera que con la medición de un número mínimo de variables pueda evaluarse los riesgos de corrosión con adecuada confiabilidad.

Procedimiento experimental

Técnicas experimentales empleadas

En la corrosión de estructuras enterradas son diferentes las variables que intervienen en la intensidad del ataque, sin embargo cada variable influye de manera diferente en el grado de corrosividad del terreno. Para el presente estudio se escogieron las 4 variables de mayor incidencia en la estimación de la agresividad del suelo, según la norma AWWA C-105 [4]: resistividad, potencial redox, pH y temperatura. Igualmente se realizaron medidas de potencial estructura-suelo y de espesor de pared de tubería como parámetros inherentes al estado de la tubería. La resistividad del terreno se midió de acuerdo con la norma ASTM G-57, utilizando un equipo marca Amprobe y el método de los cuatro electrodos. Para la determinación del tamaño muestral (cantidad de apiques) se midió la resistividad de cada una de las cuadras que constituyen la población para analizar tomando una separación de 2 m entre cada electrodo. De esta manera la resistividad medida es representativa de toda la cuadra hasta una profundidad de 2 m, en la cual se espera encontrar la tubería. Para la medición de la resistividad en los apiques, los electrodos se ubicaron con una distancia de 0,5 m, obteniendo así la resistividad representativa del apique.

Las medidas de temperatura, pH y potencial redox se realizaron de acuerdo con la norma ASTM

G5-95(53). Se tomaron cuatro medidas en cada uno de los extremos del apique, realizando un barrido rectangular alrededor del tubo. La temperatura se midió con un termómetro de punta. El pH y potencial redox se midieron utilizando un pH-metro portátil HANNA Instrument, equipado con un electrodo de membrana de vidrio.

Se utilizó un multímetro digital para medir el potencial estructura-suelo y como electrodo de referencia se usó un electrodo de cobre-sulfato de cobre. Se tomaron 2 medidas en cada extremo del apique y a ambos lados de la tubería. Las medidas de espesor de pared se tomaron utilizando un palpador de ultrasonido para metales ferrosos. Adicionalmente, el espesor de la tubería se midió con un calibrador, en aquellas partes en las que pudo cortarse tramos de la misma.

Determinación del tamaño muestral (número de apiques)

El presente estudio fue realizado en una zona residencial de la ciudad de Medellín, en la cual se encuentra enterrada una tubería para la distribución de agua potable. La zona tiene un área de 2,24 km² aproximadamente y 281 cuadras, cada cuadra considerada como la distancia entre dos cruzamientos contiguos de calles o avenidas. Las tuberías en la zona de estudio están construidas de diferentes materiales como PVC, asbesto-cemento, hierro gris, hierro nodular y acero; sin embargo, la mayor parte de la tubería está construida con hierro gris y el tiempo de servicio es de 50 años, aproximadamente.

Teniendo en cuenta que la velocidad de corrosión para estructuras construidas de hierro o sus aleaciones depende principalmente de la corrosividad del medio y no tanto del tipo de hierro o acero [6], para el estudio fueron consideradas únicamente las tuberías construidas con hierro gris. De esta manera, el número de cuadras para evaluar se redujo a 193. Por otro lado, las tuberías construidas con asbesto cemento y PVC no sufren corrosión, pues el deterioro de dichas estructuras es de naturaleza diferente al de los materiales metálicos.

Para la determinación del número de apiques por realizar, el cual constituye el tamaño muestral del estudio, se definió hacer un muestreo estratificado y por proporciones. Los estratos o subpoblaciones fueron escogidos de acuerdo con el nivel de corrosividad del suelo en cada cuadra según su respectiva resistividad y al estado de la tubería según su tasa umbral de rotura. Se tomaron medidas de resistividad en las 193 cuadras de la población y la tasa umbral de rotura de la tubería en cada cuadra fue definida por el número de daños reportados, de acuerdo con el historial de reparaciones efectuadas durante los últimos diez años. Los niveles de corrosividad del suelo de acuerdo con la resistividad del terreno para cada cuadra fueron definidos como lo sugiere la literatura [4, 6]: muy corrosivo para cuadras con resistividad igual o inferior a 900 Ω cm, corrosivo para resistividades entre 901 y 2.300 Ω cm, moderadamente corrosivo para resistividades entre 2.301 y 10.000 Ω cm y poco corrosivo para resistividades mayores de 10.000 Ω cm. Los niveles de estado de la tubería según el historial de daños reportados fueron: tubería próxima a ser reemplazada a corto plazo, tubería que debe ser reemplazada a mediano plazo y tubería que no será reemplazada. De esta manera se obtiene 4 niveles de corrosividad y 3 niveles de estado de la tubería, que definen una matriz de 12 subpoblaciones en las cuales deben ser clasificadas las 193 cuadras de la zona.

Análisis multivariado

Se definieron los apiques como las unidades experimentales sobre los cuales se realizó la clasificación usando el análisis de cluster o agrupamiento que permite dividir las unidades experimentales en clases o grupos, de modo que las unidades que estén en cada clase o grupo sean semejantes entre sí, mientras que aquellos que pertenezcan a otras clases o grupos distintos, no sean semejantes a las de los otros grupos.

Una vez determinado el número de grupos se procede al análisis de las características de cada uno de ellos de acuerdo con el grado de agresi-

vidad, sobre la base de las variables respuesta pH, resistividad, potencial redox, temperatura, potencial tubería suelo y espesor de pared. Se compararon los grupos por análisis de varianza con cada variable respuesta y también con las variables subyacentes obtenidas del análisis de factores. Dichos factores conforman un conjunto más pequeño de variables con la propiedad de estar no correlacionadas y explican las relaciones que existen entre las variables originales. La conformación de los grupos o análisis de cluster también se hizo con base en las variables subyacentes.

En el análisis de factores el vector aleatorio observable X , con P componentes, tiene media μ y matriz de covarianzas Σ . El modelo de factores supone que X es linealmente dependiente de m factores subyacentes F_1, F_2, \dots, F_m , llamados también factores comunes (obviamente se desea que $m < p$), y una fuente de variación adicional E_1, E_2, \dots, E_p llamado error o factores específicos, tales que:

$$X_1 - \mu_1 = l_{11}F_1 + l_{12}F_2 + \dots + l_{1m}F_m + E_1 \quad (1)$$

$$X_2 - \mu_2 = l_{21}F_1 + l_{22}F_2 + \dots + l_{2m}F_m + E_2 \quad (2)$$

$$X_p - \mu_p = l_{p1}F_1 + l_{p2}F_2 + \dots + l_{pm}F_m + E_m \quad (3)$$

Que matricialmente sería:

$$X - \mu_{(px1)} = L_{(pxm)}F_{(mx1)} + E_{(px1)} \quad (4)$$

La proporción de la variabilidad de cada una de las variables (varianza de X_j) que se explica por los m factores comunes o subyacentes es llamada "comunalidad". A través de los métodos de estimación, el de componente principal y el de máxima verosimilitud se puede estimar Σ y así obtener la proporción de la variabilidad total debido al j -ésimo factor, las comunalidades y determinar el número de factores comunes. Como la matriz de cargas de los factores para $m > 1$ no es única. Cuando las cargas originales no son de fácil interpretación permite multiplicar la matriz de carga original de los factores por una matriz ortogonal, lo cual equivale a rotar los ejes y cambiar las correlaciones que las variables origi-

nales tienen con cada uno de los factores girados y de esta manera darle sentido a los factores. Uno de los métodos más usados es el método de rotación Varimax, el cual fue utilizado en este estudio.

Resultados y análisis

Determinación del tamaño muestral

El número de unidades experimentales (apiques) y la ubicación de cada una de ellas fueron definidas después de haber sido medidas las resistividades en las cuadras de la zona de estudio. Las cuadras fueron clasificadas en la matriz de subpoblaciones de acuerdo con la agresividad del terreno y estado de la tubería. En la tabla 1 se presenta el número de cuadras pertenecientes a cada subpoblación h_i .

El tamaño muestral para asignación proporcional (n) fue determinado como:

$$n = \frac{n_0}{1 + n_0 / N} \quad (5)$$

Donde N es el número de cuadras de toda la población y n_0 es la primera aproximación al tamaño muestral ignorando la corrección por población finita. Este último se calculó considerando la mayor variabilidad posible, como:

$$n_0 = \frac{Z^2_{(\alpha/2)} p_h q_h}{d^2} = \frac{p_h q_h}{V} \quad (6)$$

Donde V es la varianza deseada en la estimación de la proporción en la población total, p_h es la proporción de apiques en la subpoblación h_i , q_h

$= 1 - p_h$, $Z_{(\alpha/2)}$ es el percentil de la distribución normal (0,1) que deja un área de $\alpha/2$ a su derecha, como consecuencia de determinar una confiabilidad de $(1 - \alpha)$ y d es el error de muestreo.

El número de apiques (tamaño muestral) está determinado por la varianza, el error de muestreo (d) y la confiabilidad $(1 - \alpha)$. Como se decidió trabajar con la mayor variabilidad posible, de manera que $p_h = q_h = 0,5$, el tamaño muestral se define de acuerdo con los valores de α y d . Debido a limitaciones económicas se definió el tamaño muestral de 15 apiques, en los cuales se midieron las variables por estudiar. Para dicho tamaño muestral, el estudio tiene confiabilidad del 90% y error estimado de 20%. No obstante, el procedimiento recomendado es la definición del tamaño muestral de acuerdo con un valor de confiabilidad y de error previamente definidos, contrariamente a como fue establecido en este estudio, donde las limitaciones económicas prevalecieron. El número de apiques por realizar (n_h) en cada subpoblación (h_i) es calculado como:

$$n_h = \frac{N h_i * n}{N} \quad (7)$$

En la tabla 2 se presenta el número de apiques o puntos de muestro por realizar en cada subpoblación h_i , calculado a partir de la ecuación (7).

Como se observa en la tabla 2, al no haber ninguna cuadra clasificada en la subpoblación 1, el resultado de la formula (7) para la realización de apiques en dicha subpoblación es igualmente 0. Se consideró importante realizar más de un api-

Tabla 1 Número de cuadras por subpoblación h_i

Corrosividad del terreno*	Estado de la tubería		
	Próxima a ser reemplazada (corto plazo)	Debe ser reemplazada (mediano plazo)	No será reemplazada
Muy corrosivo	$h_1 / 0$	$h_5 / 7$	$h_9 / 2$
Corrosivo	$h_2 / 11$	$h_6 / 16$	$h_{10} / 16$
Moderadamente corrosivo	$h_3 / 18$	$h_7 / 37$	$h_{11} / 60$
Poco corrosivo	$h_4 / 7$	$h_8 / 4$	$h_{12} / 15$

* De acuerdo con el valor de resistividad.

Tabla 2 Número de apiques para realizar por subpoblación

<i>Subpoblación (h)</i>	<i>Número de cuadras por subpoblación (N_h)</i>	<i>Número de apiques por realizar (n_h)</i>
1	0	0
2	11	1
3	18	1
4	7	1
5	7	1
6	16	1
7	37	2
8	4	1
9	2	1
10	16	1
11	60	4
12	15	1

que en el sustrato 10, dado el número de cuadras presentes y a que dicho sustrato está inicialmente clasificado como corrosivo y no está previsto realizar sustitución de tubería, por lo menos a mediano plazo. Por tal motivo se decidió hacer dos apiques en el sustrato 10 y en compensación 3 en el sustrato 11. Después de asignar el número de apiques por realizar en cada sustrato, se efectuó un muestreo aleatorio para definir los puntos exactos en los cuales abrir los apiques. En dichos apiques se tomaron medidas de pH, potencial redox, resistividad, temperatura, potencial estructura suelo y espesor de tubería.

Análisis multivariado

Las variables que se tienen en cuenta para este análisis son las medidas tomadas en los apiques: temperatura, pH, potencial redox, resistividad, potencial tubería-suelo y reducción de espesor.

En la tabla 3 se observan los valores propios o raíces características, donde se destacan aquellas que tienen valor mayor que uno. El número de estas variables determina el número de factores o variables subyacentes. La tercera columna indica el porcentaje de variabilidad explicada por el factor subyacente de la variabilidad total,

Tabla 3 Valores propios dados por el análisis de factores

<i>Factor</i>	<i>Valor propio</i>	<i>Porcentaje de varianza</i>	<i>Porcentaje acumulativo</i>
1	2,6336700	57,599	57,599
2	1,2992600	28,415	86,014
3	0,5987250	13,094	99,108
4	0,0407903	0,892	100,000
5	0,0000000	0,000	100,000
6	0,0000000	0,000	100,000

y la cuarta columna el porcentaje acumulado de dicha variabilidad, que para el caso debe entenderse que el 86,014% de ella es explicado por los dos primeros factores. Estos factores poseen los correspondientes valores propios mayores que uno. El hecho de que haya dos factores con valores propios mayores que uno, indica que estos pueden, en cierta medida, hacer una clasificación adecuada de las unidades experimentales.

En la tabla 4 se presentan las correspondientes correlaciones o “pesos” de cada variable original con los respectivos factores adyacentes, donde deben destacarse las variables que con los factores presentan valores mayores que 0,4 en valor absoluto, puesto que estas variables son las que determinan los factores. Por ejemplo en el factor 1 sobresalen el pH, el potencial redox, la resistividad y en menor grado la reducción de espesor, esto quiere decir que el primer factor trata de recoger de manera conjunta las propiedades de agresividad del suelo, mientras que el segundo factor, en el cual el potencial tubería-suelo tiene

mayor valor, recoge información relacionada con la actividad del material, ya que este posee mayor peso en el factor.

En la figura 1 se ilustra la evaluación de cada factor de acuerdo con los pesos de cada variable con el correspondiente valor de la variable en cada apique. Por ejemplo, el factor 1 está compuesto por la reducción de espesor, la resistividad, el pH y el potencial redox. Los tres primeros con un peso positivo sobre el factor, mientras que el último posee carga negativa. Las variables que se ubiquen en el centro respecto al factor se consideran que no tienen peso en ese factor. Puede observarse que el pH, el potencial redox y la resistividad en su orden, son las variables de mayor peso para el factor 1. Mientras que la temperatura y el potencial estructura-suelo no ejercen ningún peso. Por otro lado, se observa cómo la temperatura y potencial tubería-suelo son las variables con mayor peso positivo sobre el factor 2 y por lo tanto son las que lo determinan.

Tabla 4 Matriz de peso de los factores

<i>Variable</i>	<i>Factor 1</i>	<i>Factor 2</i>
Temperatura	-0,0939623	0,726722
pH	0,9740590	-0,158187
Potencial redox	-0,9768690	0,117245
Resistividad	0,6562920	0,184411
Potencial tubería	0,1991370	0,806469
Reducción de espesor	0,4989860	0,224450

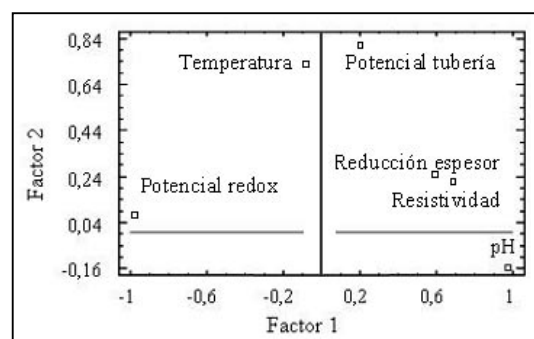


Figura 1 Peso de las diferentes variables en los dos primeros factores

Análisis de agrupamiento

En la tabla 5 se presenta el análisis de agrupamiento de los apiques. Debe indicarse que el análisis de agrupamiento de semejanza entre los apiques se hizo con los factores como variables de entrada con el método de Ward y utilizando la distancia euclidiana de los apiques respecto a los centroides (medias muestrales).

En la figura 2 se muestran los grupos de apiques más semejantes entre sí. El grupo uno lo conforman los apiques 1, 12, 5, 3 y 15 que corresponden a apiques con características muy semejantes. Los demás apiques conforman el segundo grupo. El primer grupo de 5 miembros reúne los apiques que presentan mayor corrosividad del terreno, de acuerdo con el análisis estadístico de los factores. Es importante resaltar que esta clasificación concuerda perfectamente con la de la corrosividad del terreno según la norma AWWA [4] en estos apiques. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que los apiques representan en realidad un estrato o subpoblación y la corrosividad del terreno que ellos representan, en algunos casos como

Tabla 5 Método de Ward para análisis de los cluster

Cluster	Miembros	Porcentaje	Centroides	
			Puntuación 1	Puntuación 2
1	5	33,33	-2,96154	-0,493678
2	10	66,67	1,48077	0,246840

el de los apiques 5 y 1, debe ser ponderada con otros apiques de menor corrosividad, pudiendo en última instancia dar un resultado distinto. Otro resultado interesante que se deriva de la clasificación por grupos mostrada en la figura 2, es que dependiendo de la distancia euclidiana tomada pueden verse otros subgrupos, en los cuales los apiques tienen todavía mayor similitud.

En la tabla 6 se presenta el análisis de varianza (Anova) del sistema para los factores 1 y 2. En ella se prueba si existe diferencia significativa entre los dos grupos, determinados de acuerdo con el factor 1 como respuesta que lleva consigo la carga de las variables pH, potencial redox, resistividad y reducción de espesor. Como es sabido, un P-valor de 0,0003 indica que existe

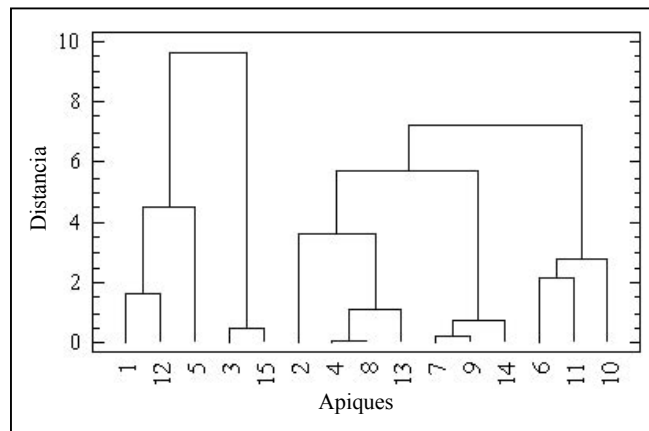


Figura 2 Dendrograma que muestra la formación de grupos según el método de Wards de distancias euclidianas

Tabla 6 Análisis de varianza para los factores 1 y 2

Fuente	Suma de cuadrados		Df		Medios		F-Relación		P-Valor	
	Fact. 1	Fact. 2	Fact. 1	Fact. 2	Fact. 1	Fact. 2	Fact. 1	Fact. 2	Fact. 1	Fact. 2
Entre grupos	65,78	1,828	1	1	65,78	1,83	23,8	0,84	0,0003	0,375
En los grupos	35,91	28,200	13	13	2,76	2,17				
Total (corr.)	101,70	30,030	14	14						

diferencia significativa entre los dos grupos. Esto quiere decir que la población de apiques debe estudiarse mediante el análisis de los dos grupos o subpoblaciones que son diferentes entre sí. El análisis de varianza para los dos grupos de acuerdo con el factor 2, indica que no hay diferencia significativa entre ellos, de acuerdo con su P-valor de 0,3754. En la figura 3 se presentan los diagramas de caja y bigote (“box and whisker plot”) que permiten comparar la distribución de la variable respuesta para cada factor en los dos grupos, dejando ver la magnitud de los cuartiles, la mediana y la dispersión de los datos. En la figura 3 a puede visualizarse con mayor facilidad que existe diferencia significativa en los dos grupos de acuerdo con el factor 1. Mientras que

para el factor 2 no se observa ninguna diferencia significativa entre los grupos, figura 3 b.

El análisis de varianza de los factores para los grupos muestra que el factor uno es el que mejor puede clasificar las unidades experimentales (apiques). Esto sugiere que son las características del terreno más que el estado de actividad de la tubería, quien mejor puede agrupar y determinar la estratificación de la población, es decir del conjunto de cuadras del circuito.

En las figuras 4, 5 y 6 se presentan los diagramas de caja y bigote para las variables medidas en las unidades experimentales. En dichos diagramas se muestra la posible diferencia significativa entre los grupos. Así, por ejemplo, las relaciones varia-

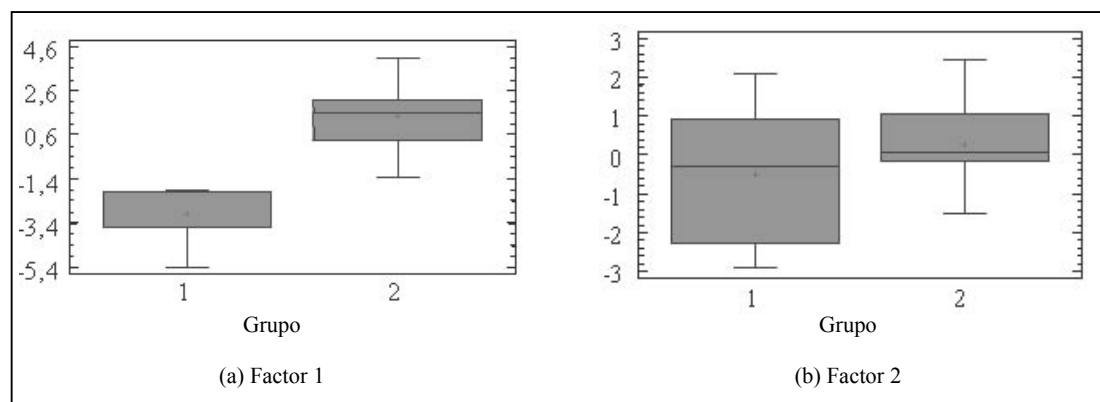


Figura 3 Diagrama de caja y bigote para los factores

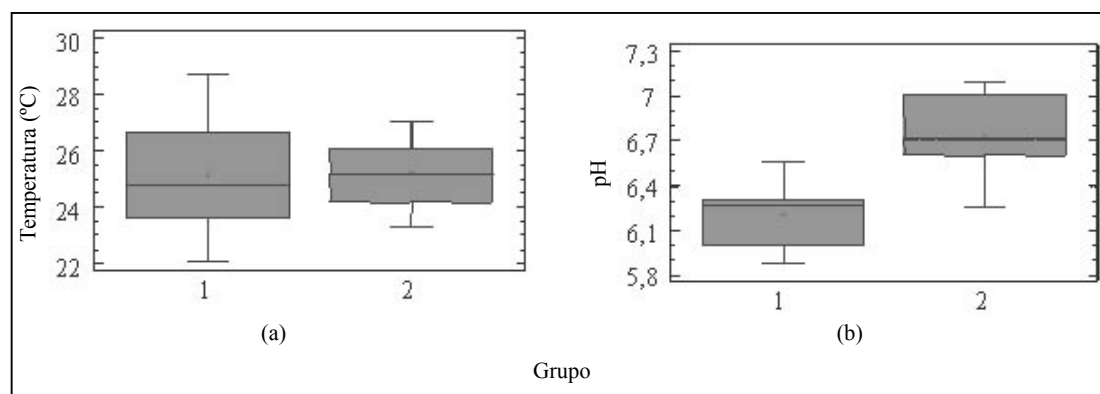


Figura 4 Diagrama de caja y bigote para (a) temperatura y (b) pH, para los grupos

bles pH *versus* grupo figura 4b, potencial redox *versus* grupo figura 5a y resistividad *versus* grupo figura 5b son las que más diferencia muestran. Mientras que las de temperatura *versus* grupo figura 4a; potencial tubería-suelo *versus* grupo figura 6a y reducción de espesor figura 6b no presentan mayores diferencias.

Del análisis de varianza realizado y según lo mostrado en las figuras 4, 5 y 6, puede decirse que la resistividad, el pH y el potencial redox, en su orden, son las variables que mejor pueden explicar la variabilidad de los grupos y son ellas las que mejor pueden realizar una clasificación de los estratos. De la misma manera, disminuye

su importancia el potencial tubería-suelo y la reducción de espesor. Por otro lado, todo el suelo del circuito batallón posee la misma temperatura, pues no se observa diferencia ninguna entre los grupos.

Es importante resaltar que el análisis estadístico concuerda bastante bien con el análisis de corrosividad realizado y que fue basado en las tablas reportadas en la literatura. Adicionalmente, se confirma la validez de la estratificación inicial del circuito batallón, la cual se hizo de acuerdo con las medidas de resistividad del terreno en todas las cuadras del circuito.

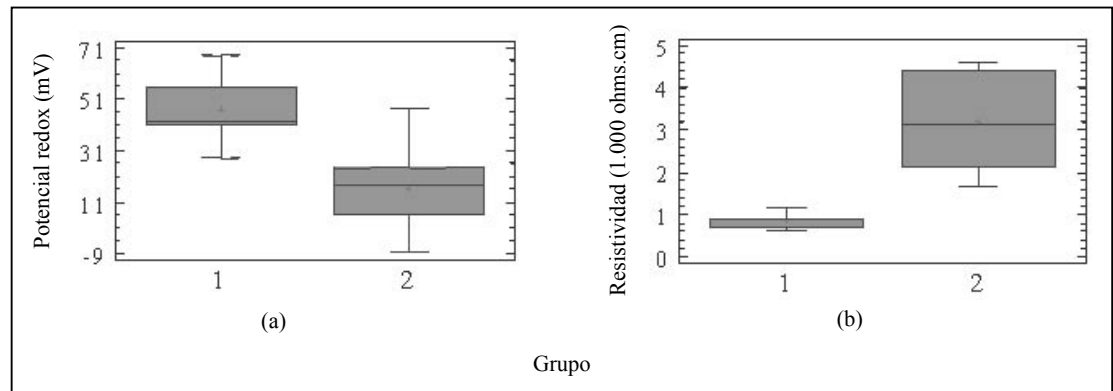


Figura 5 Diagrama de caja y bigote para (a) potencial redox y (b) resistividad para los grupos

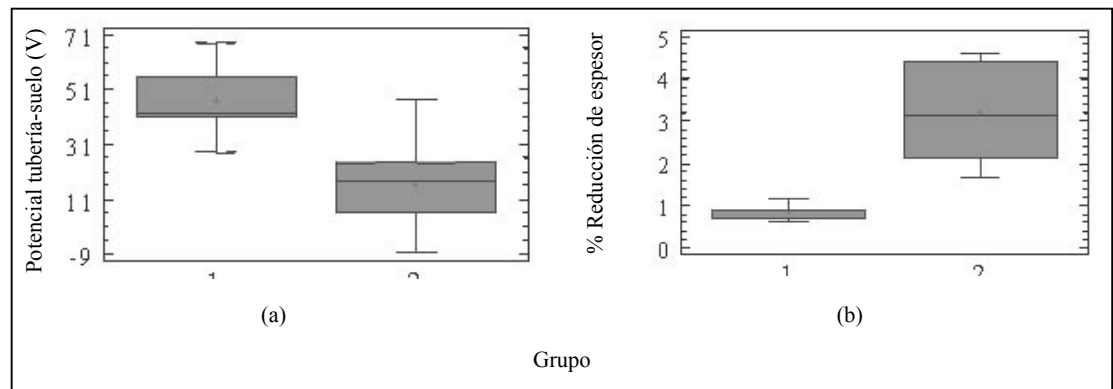


Figura 6 Diagrama de caja y bigote para (a) potencial tubería-suelo y (b) reducción de espesor para los grupos

Conclusiones

La evaluación de la de resistividad en todas las cuadras del circuito, permitió obtener la primera aproximación a la evaluación de la corrosividad de la zona y clasificar de manera adecuada los tramos de tubería pertenecientes a cada subpoblación, de acuerdo con la corrosividad del terreno y estado de la tubería. Los suelos de la zona evaluada en esta primera aproximación, van desde muy corrosivos hasta poco corrosivos. Con la información obtenida, pudo realizarse un muestreo estratificado y por proporciones para la estimación del tamaño muestral, el error y la confiabilidad del estudio, los cuales fueron de 15, 20 y 90% respectivamente, y se determinó el número de puntos de muestreo por cada subpoblación.

Las características del suelo evaluadas en este estudio permiten hacer la adecuada clasificación de su corrosividad. Mediante el análisis de varianza pudo hacerse una clasificación de las unidades experimentales a través de la obtención de factores subyacentes. De estos, el factor 1 que reúne las características del suelo de acuerdo con la resistividad, pH y potencial redox, es el que mejor puede explicar la variabilidad existente entre un suelo y otro, y por lo tanto es el que mejor pueden clasificar los diferentes tipos de suelo según su corrosividad. Todo esto debe asumirse considerando la confiabilidad y el error estimados en este estudio. Estos resultados son coherentes con la información suministrada en normas y textos de referencia.

Este trabajo constituye un estudio piloto que será la base para próximos estudios en otras zonas

y permitirá definir con mejores argumentos la metodología que se debe seguir y tamaños muestrales más representativos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a las Empresas Públicas de Medellín por la financiación del presente estudio. De manera especial, a la subdirección de distribución de acueducto y al ingeniero Santiago Wilches por su colaboración durante la realización del trabajo.

Referencias

1. G. H. Koch et al. "Corrosion costs and preventive strategies in the United States". *Report by CC Technologies Laboratories, Inc. to Federal Highway Administration (FHWA), Office of Infrastructure Research and Development, Report FHWA-RD-01-156*. September, 2001.
2. E. Levlin, T-G. Vinka. "Corrosion in an urban soil profile-aeration cell experiment in situ in the soil". *Oral Presentation at Erocorr*. September, 10-14. 2000. London UK.
3. E. Levlin. *Corros. Sci.* N.º 38. 1996. pp. 2083-2090.
4. ANSI/AWWA C105. *American Water Works Association*. Denver, Colorado.
5. M. Romanoff. "Results of National Bureau of Standards Corrosion Investigation in Disturbed and Undisturbed Soils". *12th Annual Appalachian Underground Corrosion Short Course. Technical Bulletin*. N.º 86. 1967.
6. B. Spickelmire. *Materials Performance*. N.º 41. 2002. pp. 16-23.
7. Y. Katano et al. *Corrosion*. N.º 59. 2003. pp. 155-161.