

Caracterización de mantos acuíferos mediante la aplicación de la regresión anidada en la Parroquia Coquivacoa del Municipio Maracaibo, Estado Zulia

Wilmer Márquez¹, Nola Fernández¹ y Williams Cerón¹

¹Departamento de Geofísica, Escuela de Ingeniería Geodésica, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Maracaibo (4001), Venezuela.

Recibido: 26-01-04 Aceptado: 15-03-06

Resumen

El presente trabajo de investigación, tiene como objetivo principal aplicar un análisis estadístico de datos geoelectrónicos, así como, de las propiedades físico-químicas de los mantos acuíferos, basado en el método de Regresión Anidada, en la fase de procesamiento de Sondeos Eléctricos Verticales. Estos datos fueron obtenidos durante la fase de adquisición aplicando la configuración tipo Schlumberger, en la Parroquia Coquivacoa del Municipio Maracaibo, del Estado Zulia, los cuales, fueron posteriormente procesados mediante el uso del método de Ghosh, aplicando modelos lineales de curvas de resistividad aparente. Este análisis estadístico, genera variables tales como el error medio y la varianza residual, entre otros, que indican la desviación de los residuales, el rango de estimación y el nivel de ruido en la data. Este último quedó definido en 4%, producto de la relación entre el error medio porcentual y la desviación, lo cual, permite garantizar niveles de confiabilidad en la fase de interpretación de los perfiles geoelectrónicos e indicar la calidad del acuífero obtenido en función de sus propiedades físico-químicas. De esta última fase se infiere la presencia de acuíferos de agua salada con alta concentración de cloruros (mol/L), con 100 mol de sodio, 0,2 mol de platino, 12 mol de calcio, 240 g de alcalinidad a 30 m de profundidad, y con un caudal de 25 L/seg para el área estudiada.

Palabras clave: Configuración Schlumberger; isoresistividad; propiedades físico-químicas; regresión anidada; sondeo eléctrico vertical.

Characterization of aquifer mantels by means of the application of the ridge regression in the Parish Coquivacoa of the Municipality Maracaibo, Zulia State

Abstract

The present investigation work, has as main objective to apply a statistical analysis of data geoelectrónicos, as well as, of the physical-chemical estates of the aquifer mantels, based on the method of Nested Regression, in the phase of prosecution of Vertical Electric Polls. These data were obtained during the phase of acquisition applying the configuration type Schlumberger, in the Parish Coquivacoa of the Municipality Maracaibo, of the State Zulia, those which, they were

* Autor para la correspondencia. E-mail: wmarquez@luz.edu.ve

processed later on by means of the use of the method of Ghosh, applying lineal models of curved of apparent resistivity. This statistical analysis, generates such variables as the half error and the residual variance, among other that indicate the deviation of the residual ones, the estimate range and the level of noise in it dates it. This last one is defined in 4%, product of the relationship between the half percentage error and the deviation, that which, it allows to guarantee levels of dependability in the phase of interpretation of the profiles geoelectricos and to indicate the quality of the aquifer obtained in function of their physical-chemical estates. Of this last phase the presence is inferred of aquifer of salted water with high concentration of chlorides (mol/L), with 100 mol of sodium, 0.2 platinum mol, 12 mol of calcium, 240 gr of alkalinity to 30 m of depth, and with a flow of 25 L/seg for the studied area.

Key words: Configuration Schlumberger; ridge iso-resistivity; physical-chemical estate; regression; vertical electric sound.

Introducción

El Proyecto desarrollado, denominado: "Caracterización de Mantos Acuíferos mediante la aplicación de la Regresión Anidada en la Parroquia Coquivacoa del Municipio Maracaibo, Estado Zulia", tiene como objetivo, la aplicación del algoritmo matemático conocido como Regresión Anidada, para el procesamiento e interpretación digital de datos geoelectricos e inferir acerca de las características fisico-químicas de las aguas subterráneas en el área de estudio, empleando para tal fin, un modelo lineal múltiple y controlado estadísticamente a través de la desviación estándar, kurtosis, valor sesgado y otros parámetros.

En este Proyecto se analizan aspectos relativos al procesamiento, optimización e interpretación de la información recopilada en campo, mediante la prospección geoelectrica, lo que permitió en combinación con la Regresión Anidada generar para cada parámetro asociado a las propiedades fisico-químicas de los mantos acuíferos un modelo ajustado de estimación.

En la primera parte del proyecto, enfocamos todo lo referente a la recolección de la información en campo, incluyendo lo relativo a la adquisición de datos geoelectricos, a través del Método del Sondeo Eléctrico Vertical, mediante la configuración electrónica tipo Schlumberger, utilizando los valores de

resistividades y profundidades obtenidos a partir de los dieciséis Sondeos Eléctricos Verticales recolectados en la parroquia antes mencionada.

La segunda parte, está conformada fundamentalmente por el procesamiento y optimización de la información, mediante la aplicación de sistemas lineales discretos en función de un modelo convolucional, por medio del ensamblaje de la teoría algorítmica del modelo de Ghosh utilizando el Método Geoelectrico Resistivo Digital y la implementación de la Regresión Anidada, para la inversión de valores de resistividad y estimar las características fisico-químicas de los mantos acuíferos, para la parroquia estudiada.

Procedimientos de Campo

Ubicación geográfica

La Figura 1 muestra la ubicación geográfica del área de estudio, la cual, se encuentra en el Municipio Maracaibo, específicamente en la Parroquia Coquivacoa, donde se ubicaron uniformemente los Sondeos Eléctricos Verticales de acuerdo a la Topografía, urbanismo y vialidad.

Adquisición de datos geoelectricos

Consiste en registrar información geoelectrica de campo en la zona a estudiar.

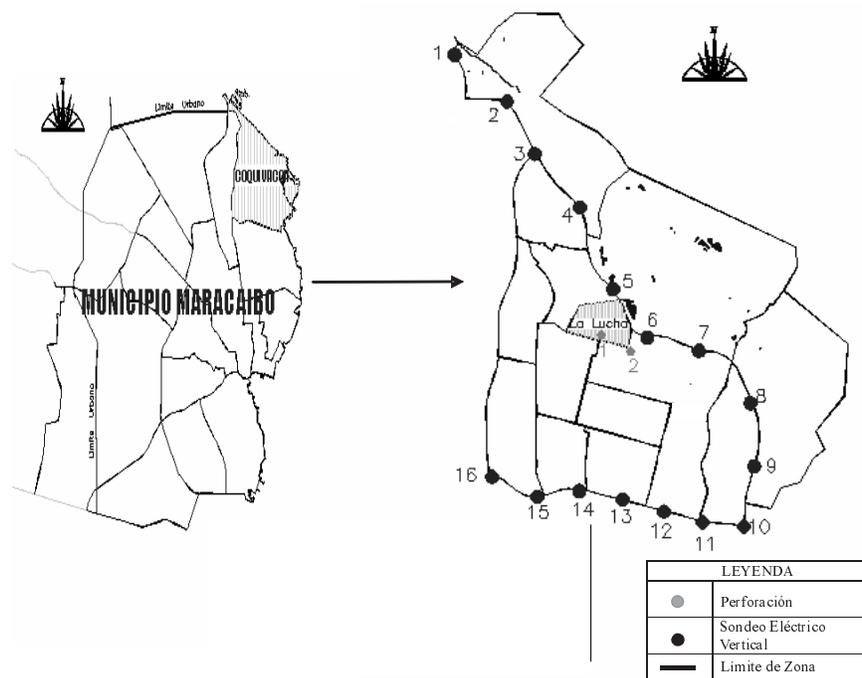


Figura 1. Ubicación geográfica de los Sondeos Eléctricos Verticales y perforaciones en el Barrio La Lucha.

Para tal fin, se efectuaron mediciones de campo para dieciséis Sondeos Eléctricos Verticales pertenecientes a un mallado distribuido uniformemente en la parroquia Coquivacoa como puede observarse en la Figura 1, para una profundidad de estudio de 200 metros aproximadamente, durante los días 12, 13 y 14 de Marzo de 2003.

La ejecución de los sondeos eléctricos verticales implicó un tendido de las líneas de emisión simétricas con respecto al centro del sondeo, bajo la configuración tipo Schlumberger. Así mismo, en la Tabla 1 mostramos las coordenadas del centro del arreglo para cada sondeo, referidas al sistema Catedral de Maracaibo.

Adicionalmente, se utilizó un par de perforaciones existentes en el área de estudio, específicamente en el Barrio La Lucha realizadas entre el 15 y 18 de Enero de 2003, por lo que fue considerado como zona piloto (Figura 1) para la aplicación del método de la regresión anidada en el procesamiento e in-

terpretación de datos geoelectrónicos, por otra parte, en las Tablas 2 y 3 observamos las coordenadas de las perforaciones, así como, las propiedades físico-químicas, las cuales, fueron obtenidas empleando el Espectrofotómetro de Absorción Atómica y Standard Methods For The Examination of Water and Wasterwater (1998).

Procesamiento y ajuste

El procesamiento de la información se realizó en forma simultánea al trabajo de campo y consistió en tomar los valores de resistividad vs. distancia ($AB/2$), en los diferentes puntos del arreglo donde se colocaron los electrodos de corriente para hacer la medición. Estos valores son representados posteriormente en forma gráfica por curvas expresadas en escala bilogarítmica en función de los espesores de las capas (1) e interpretadas mediante procedimientos de igualación de curvas. Esto se realizó utilizando un compendio de curvas teóricas con el método del punto auxiliar, generando sistemas

Tabla 1
Coordenadas planas de los Sondeos Eléctricos
Verticales

SEV	Norte (m)	Este(m)
1	205190	200423
2	205336	199897
3	205457	199390
4	205547	198911
5	205469	198425
6	205701	197964
7	209307	198471
8	208815	198873
9	208577	199081
10	207997	199199
11	207357	199613
12	207147	200242
13	206977	200756
14	206474	201028
15	205954	201036
16	205153	200902

Tabla 2
Coordenadas de las Perforaciones

Perforación	Norte (m)	Este(m)
1	207279	199226
2	207317	199281

lineales discretos, donde la curva de resistividad aparente de un sondeo puede ser representada como la salida o respuesta de un proceso de convolución entre una señal de entrada, definida como la transformada de resistividad del modelo geoelectrico y la función de transferencia del sistema, definido como una función de Bessel de primer orden y en primera clase.

En tal sentido, se puede establecer que un modelo geológico definido en función de los parámetros de espesor y resistividad para un número finito de capas, puede ser expresado en término de su transformada de resistividad, tomando en consideración, que en cada interfase geoelectrica se puede definir un coeficiente de reflexión resistivo (2) según la siguiente ecuación:

$$K_{J-1} = \frac{\rho_{J-1} - \rho_J}{\rho_{J-1} + \rho_J} [1]$$

ρ : resistividad real de la capa y K_i : coeficientes de reflexión resistiva.

De esta forma, la transformada de la resistividad para un subsuelo estratificado, puede ser calculada en forma recursiva (2) a partir de la expresión:

$$T_j(\lambda) = \frac{W_j(\lambda) + T_{j+1}(\lambda)}{1 + W_j(\lambda) * T_{j+1}(\lambda) / \rho^2 \rho} \quad [2]$$

Tabla 3

Propiedades Físico-Químicas de los mantos acuíferos, empleando el Espectrofotómetro de Absorción Atómica y Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater (1998) a las perforaciones del Barrio La Lucha

Perforación	Temp (°C)	Conduc ($\Omega\text{-m}$) ⁻¹	Alc (mol)	Cl ⁻ (mol)	SO ₄ ⁻² (mol)	F (mol)	SiO ₂ (mol)	HCO ₃ (mol)
1	30	460	270	4	4	0,2	19,2	329
2	28	380	215	5	0	0,5	25,7	262
Perforación	Mn (mol)	Ca (mol)	Mg (mol)	Na (mol)	K (mol)			
1	2	14	0,5	105	0,5			
2	0,5	10	2	93	05			

$$w_j = \rho_j \frac{I - e^{-2\theta_j \lambda}}{I + e^{-2\theta_j \lambda}} \quad [3]$$

Si se conoce la transformada de la resistividad del modelo geoelectrico (T), y de la resistividad aparente ρ_m , se puede definir el modelo convolucional expresado como:

$$\rho_m = \sum_j^m b_j * T_{m-j} \quad [4]$$

ρ_m : valores digitales de resistividad aparente; b_j : valores digitales del filtro de convolución y T: valores digitales de la transformada de resistividad.

Luego, se procede a convolucionar los valores de la serie digital de la transformada de la resistividad con el filtro digital para obtener los valores de resistividad (3).

En forma general, los datos geoelectricos fueron procesados aplicando el método geoelectrico digital resistivo, el cual, efectúa un ensamblaje optimizado de la teoría algorítmica de los modelos convolucionales de Ghosh, mediante un tratamiento de los parámetros específicos de Johansen. Este método fue aplicado a los dieciséis sondeos de configuración eléctrica Schlumberger realizados en la Parroquia Coquivacoa, con la finalidad de estudiar las características hidrogeológicas del subsuelo y la posibilidad de detectar acuíferos que permitan la recomendación de sitios óptimos para la perforación de pozos y la explotación de los mismos en la Parroquia Coquivacoa, así como, establecer las propiedades físico-químicas de las aguas subterráneas presentes en el área estudiada.

El procesamiento de la información, se realizó mediante el apoyo de un modelo geológico teórico inicial que se presenta en la Figura 2, el cual, se introdujo en el programa de cálculo SUELOS, diseñado por el Departamento de Geofísica de la Universidad del Zulia (LUZ), para iniciar el proceso de iteración, y de esta forma obtener los valo-

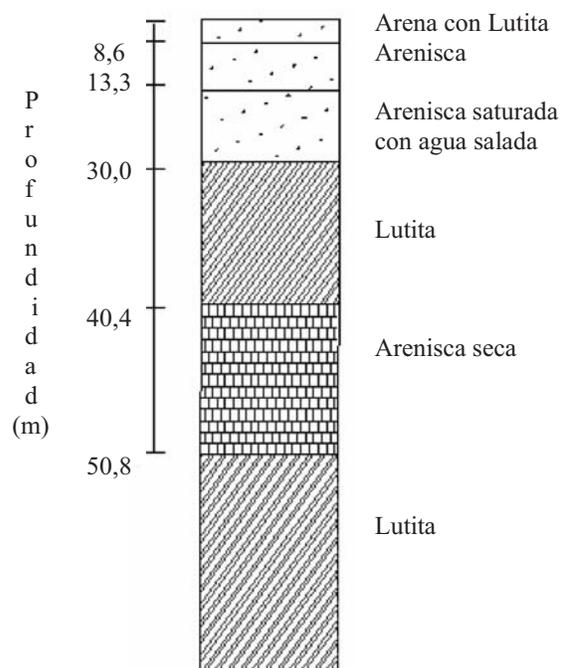
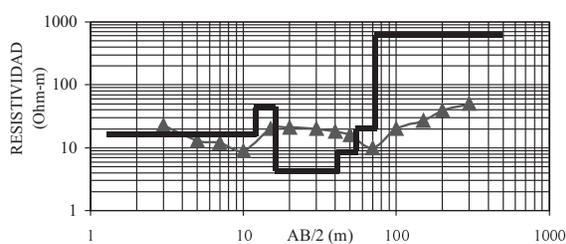


Figura 2. Modelo geológico teórico inicial.

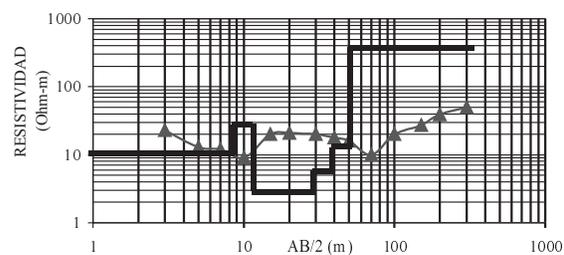
res definitivos de espesores, resistividades y propiedades físico-químicas de los mantos acuíferos que serán utilizados para inferir desde el punto de vista geológico el tipo de litología o mineralogía en el área de estudio (4).

Los resultados obtenidos en esta fase, son representados en las Figuras 3 y 4 por un conjunto de curvas y clasificadas de acuerdo a la etapa del procesamiento (5), es decir, la primera etapa corresponde a la representación gráfica de los datos sin procesar obtenidos en campo y representados en las Figuras 3 y 4, definiendo con ello, un conjunto de curvas denominadas curvas preprocesadas. La segunda etapa, mostrada en la Figura 5, está basada en el ajuste de los datos, mediante la aplicación de la interpolación cúbica y el método de mínimos cuadrados, con la finalidad de suavizar las curvas y obtener valores filtrados de resistividad; en esta etapa las curvas se denominan curvas procesadas (6).



Capa	1	2	3	4	5	6
Profundidad (m)	8,7	13,5	30,0	40,6	51,1	∞
Resistividad (Ω-m)	14,1	63,2	5,0	7,8	36,9	1020,0

Figura 3a. Curva Ajustada del Sondeo Eléctrico Vertical N° 5 y datos de campo filtrados y ajustados por mínimos cuadrados.



Capa	1	2	3	4	5	6
Profundidad (m)	8.4	13.0	30.0	40.3	50.6	∞
Resistividad (Ω-m)	13.8	64.4	5.0	7.6	37.2	1110.0

Figura 4a. Curva Ajustada del Sondeo Eléctrico Vertical N° 6 y datos de campo filtrados y ajustados por mínimos cuadrados.

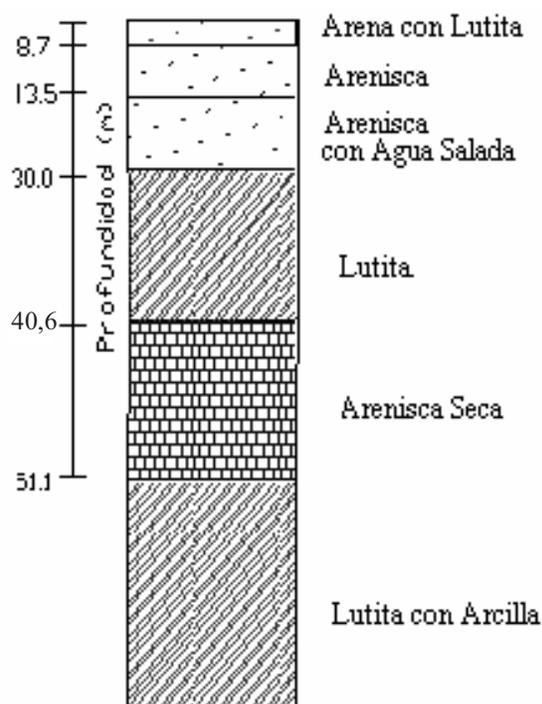


Figura 3b. Columna Estratigráfica del Sondeo Eléctrico Vertical N° 5.

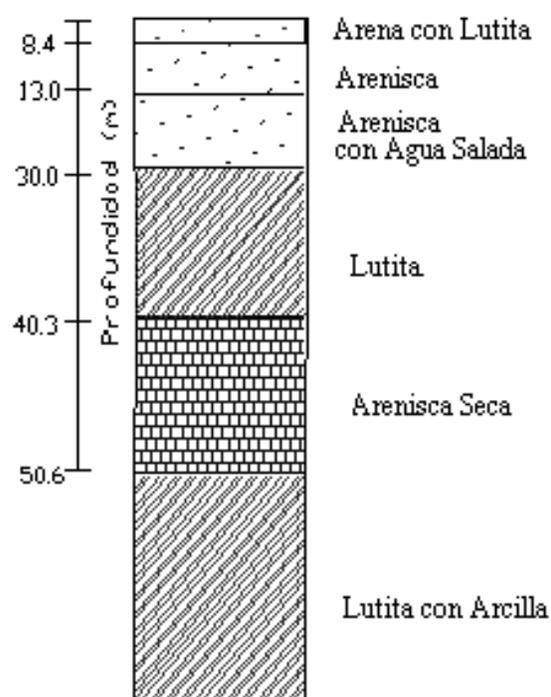
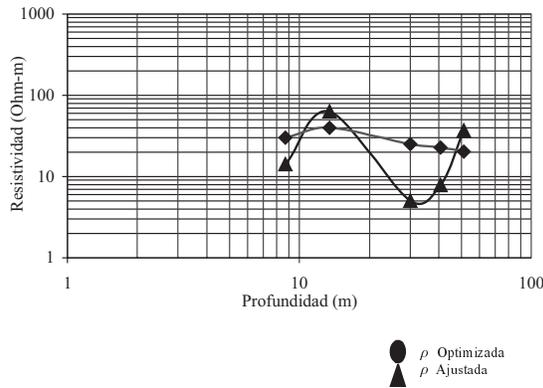
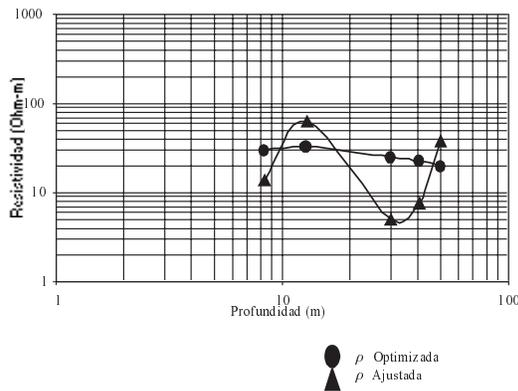


Figura 4b. Columna Estratigráfica del Sondeo Eléctrico Vertical N° 6.



Valores optimizados de Resistividad y Profundidad						
Capa	1	2	3	4	5	6
Profundidad (m)	8,7	13,5	30,0	40,6	51,1	∞
Resistividad (Ω-m)	30,1	28,9	25,1	22,6	20,2	18,4

Figura 5a. Curva Optimizada del S E V N° 5.



Valores optimizados de Resistividad y Profundidad						
Capa	1	2	3	4	5	6
Profundidad (m)	8,4	13,0	30,0	40,3	50,6	∞
Resistividad (Ω-m)	30,6	29,5	25,2	22,6	20,1	17,9

Figura 5b. Curva Optimizada del S E V N° 6.

Optimización de los resultados

Los resultados obtenidos con el Método Geoeléctrico Digital Resistivo (7), han sido optimizados con el Método de la Regresión Anidada, tal y como, se muestra en la Figura 5, cuyo fundamento se basa en comparar las curvas de campo con un conjunto de curvas patrones, incorporando variables estadísticas de control. Esto tiene como obje-

to, determinar mediante un proceso de interpolación las características geoeléctricas de las curvas de campo y las propiedades físico-químicas de los mantos acuíferos, definiendo con ello, un modelo inicial de datos que permite indicar el nivel de ruido en los datos y predecir la exactitud con la cual se estimarán los parámetros para sistemas linealmente dependientes (8).

El modelo matemático que describe este método es el siguiente:

$$A = \frac{\partial G(P, x)}{\partial P_i} \tag{5}$$

$$N = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \rho_{12}\sigma_1\sigma_2 & \rho_{1n}\sigma_1\sigma_n \\ \rho_{12}\sigma_1\sigma_2 & \sigma_2^2 & \rho_{2n}\sigma_2\sigma_n \\ \rho_{1n}\sigma_1\sigma_n & \rho_{2n}\sigma_2\sigma_n & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$M = \sigma^2 N \tag{7}$$

$$\Delta G = A \Delta P \tag{8}$$

$$\Delta P = \rho_i - \rho_n \tag{9}$$

$$\sigma^2 = \frac{(\Delta G)^t N^{-1} \Delta G}{N - M} \tag{10}$$

$$\text{cov}(P) = \sigma^2 (A^t N^{-1} A)^{-1} \tag{11}$$

$$[\text{cor}(P)]_{ij} = \frac{[\text{cov}(P)]_{ij}}{\sqrt{[\text{cov}(P)]_{ii} * [\text{cov}(P)]_{jj}}} \tag{12}$$

donde ρ_1 : resistividad en la capa 1; ρ_n : resistividad aparente Schlumberger; P: vector de parámetros desconocidos; G(P,x): resistividad aparente medida; cor: matriz de correlación; cov: matriz de covarianza; y σ^2 : varianza residual.

La Tabla 4 presenta los resultados obtenidos con el método de la Regresión Anidada para el procesamiento de datos geoeléctricos, así como también para la estimación de la calidad del agua (9), definen el nivel de

Tabla 4
Parámetros de la Regresión Anidada para los Sondeos N° 5 y N° 6

Sondeo Eléctrico Vertical	Datos Geoeléctricos			
	5		6	
	ρ (Ω -m)	Prof (m)	ρ (Ω -m)	Prof (m)
Desviación Estándar	17,861	24,570	17,848	25,376
Kurtosis	0,074	1,029	0,050	1,048
Valor Sesgado	-0,934	0,019	-0,958	0,048
R-square (Ω -m)	3,153%		3,481%	
Error Absoluto Medio (Ω -m)	20,376		28,830	
Error Medio (Ω -m)	$2,132 \cdot 10^{-15}$		$7,105 \cdot 10^{-16}$	
Error Medio Porcentual (Ω -m)	-12,308%		-21,738%	
Modelo Ajustado de la Regresión Anidada(Ω -m)	$\rho = 32,10 - 0,23 \cdot \text{Prof}$		$\rho = 32,73 - 0,25 \cdot \text{Prof}$	
Propiedades físico-químicas de los mantos acuíferos				
Parámetros	Alc, B, Ca, Cl Γ , COND, F, HCO $_3$, K, Mg, Mn, Na, SO $_2$, SO $_4^{-2}$, TEMP, Zn,			
Desviación Estándar (mol)	1,50			
Kurtosis (mol)	0,05			
Valor Sesgado (mol)	0,39			
R-square (mol)	3,63%			
Error Absoluto Medio (mol)	1,21			
Error Medio (mol)	$-4,98 \cdot 10^{-17}$			
Error Medio Porcentual (mol)	-3,8%			
Modelo Ajustado de la Regresión Anidada para cada parámetro	Alc* = 3,57162 - 0,000513412*Alc B* = 3,57162 + 0,00633188*B Ca* = 3,57162 - 0,0222643*Ca Cl* = 3,57162 - 0,0000705953*Cl COND* = 3,57162 + 0,0000840001*COND F* = 3,57162 - 0,0407327*F HCO $_3$ * = 3,57162 - 0,223895*HCO $_3$ K* = 3,57162 - 0,000329895*K Mg* = 3,57162 - 0,0264643*Mg Mn* = 3,57162 + 0,000782623*Mn Na* = 3,57162 + 2,01836*Na SO $_2$ * = 3,57162 - 0,142806*SO $_2$ SO $_4^{-2}$ * = 3,57162 + 0,0000674154*SO $_4^{-2}$ TEMP* = 3,57162 - 0,000402146*TEMP Zn* = 3,57162 - 0,00288611*Zn			

ruido en la muestra en 4%, ya que, las variables estadísticas: error medio, está en el intervalo de valores de $2,132 \times 10^{-15}$ a $7,105 \times 10^{-16}$ para los datos geoelectrónicos, mientras que para las propiedades físico-químicas de los mantos acuíferos es de $-4,98 \times 10^{-17}$ el error medio y de $-3,8\%$ el error medio porcentual para la calidad del agua, generando un modelo de datos de Regresión, que permite controlar la calidad de los resultados indicando una buena estimación para el modelo hipotético de datos (10).

Resultados y Discusión

Interpretación

En la fase de interpretación de los dieciséis Sondeos Eléctricos Verticales para la determinación de acuíferos explotables obtenidos en campo, mediante la aplicación de la técnica de Sondeos Eléctricos Verticales, bajo la configuración tipo Schlumberger, se definieron seis unidades geoelectrónicas producto de la correlación geológica de los datos de campo con las dos perforaciones del Barrio La Lucha y optimizados a través de la Regresión Anidada, es decir, se obtuvo un perfil geoelectrónico definido por la correlación de los pozos con los sondeos eléctricos verticales, correspondiente a la esquematización de las características geoelectrónicas del subsuelo.

Estas secciones geoelectrónicas fueron agrupadas en unidades que corresponden a un conjunto de capas geológicas de propiedades físicas predominantes dentro de los espesores correspondientes a cada una de las unidades definidas, tal y como, observamos en la Tabla 5 las características de profundidades y material de cada una de las unidades geoelectrónicas, derivadas de la interpretación y la optimización, aplicando los algoritmos de la Regresión Anidada y el modelo convolucional de Ghosh.

Cabe destacar, que a partir de la Figura 6 donde se muestran los mapas de isoresistividades, los cuales, fueron derivados a partir de los modelos lineales ajustados obtenidos en la Tabla 4, los cuales, fueron optimizados con

Tabla 5
Interpretación de los resultados

Capa	Litología	Profundidad
1	Arena con Lutita	8,5 m
2	Arenisca	13,2 m
3	Arenisca con agua salada	30,0 m
4	Lutita	40,4 m
5	Arenisca seca	50,7 m
6	Lutita con arcilla	85,3 m

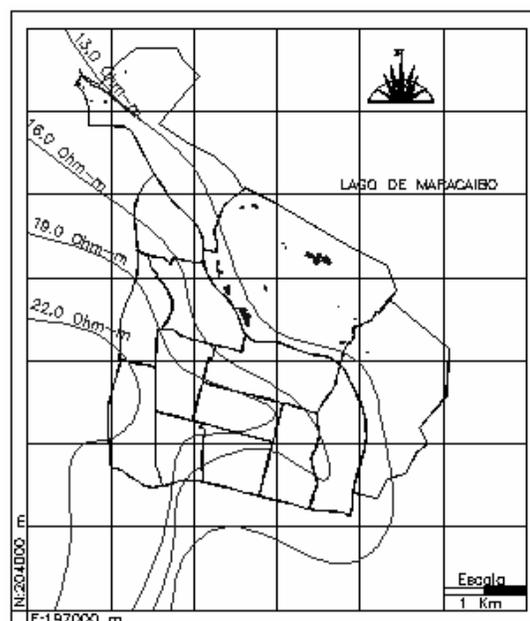


Figura 6a. Mapa de Isoresistividades de la capa 1 del modelo geológico interpretado.

los algoritmos de la Regresión Anidada, que permitieron obtener los modelos ajustados para cada parámetro físico-químico asociado a las aguas subterráneas, así mismo, podemos inferir que no se recomienda la perforación de pozo alguno, ya que, el acuífero existente, se encuentra aproximadamente a unos 30 m de profundidad, pero con alta concentración de cloruros (mol/L) con 100

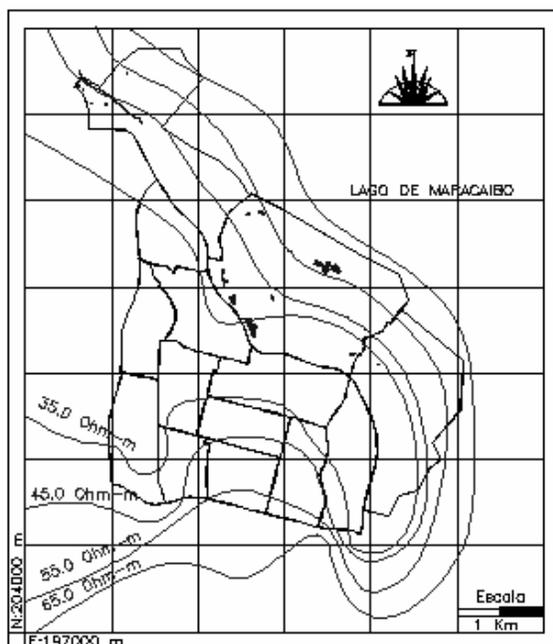


Figura 6b. Mapa de Isorresistividades de la capa 2 del modelo geológico interpretado.

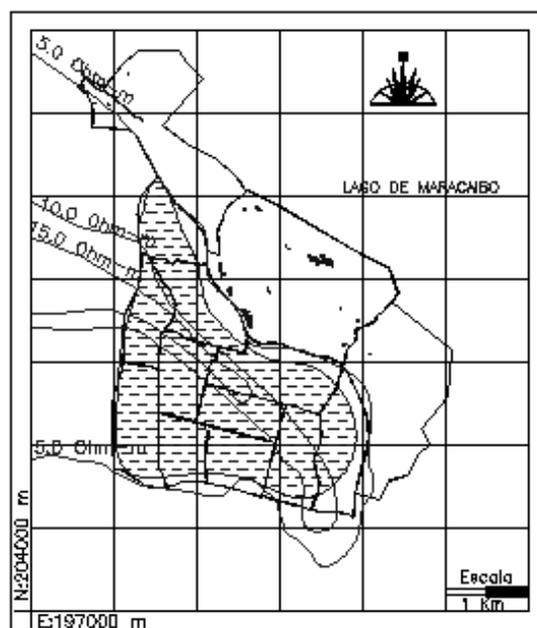


Figura 6c. Mapa de Isoresistividades de la capa 3 del modelo geológico interpretado.

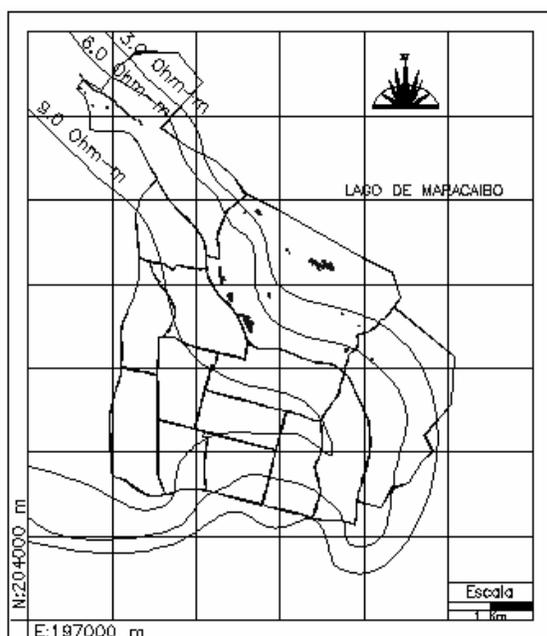


Figura 6d. Mapa de Isorresistividades de la capa 4 del modelo geológico interpretado.

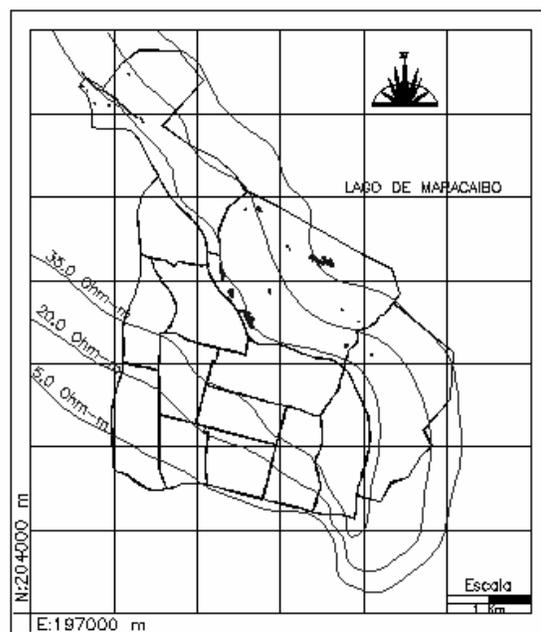


Figura 6e. Mapa de Isoresistividades de la capa 5 del modelo geológico interpretado.

mol de sodio, 12 mol de calcio, 270 de alcalinidad y un caudal de 25 L/seg.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en este proyecto indican que la Regresión Anidada es un importante método para el procesamiento e interpretación de datos geoelectrónicos, así como, para el establecimiento de la calidad del agua en función de sus propiedades físico-químicas, ya que, define un modelo geodinámico que permite predecir la exactitud con la cual se estimarán los parámetros de resistividad, profundidad, caudal y calidad del acuífero. Esto se logra mediante la combinación del modelo lineal de Ghosh con el modelo de la Regresión Anidada, lo que facilita evaluar y estudiar el subsuelo, además de la distribución de los estratos y sus potenciales acuíferos con sus respectivas propiedades físico-químicas, a través, del procesamiento e interpretación de secciones geoelectrónicas. Estos modelos de datos, definen estimadores estadísticos que permiten controlar la calidad de los mismos. En este caso particular, se obtuvieron en la Parroquia Coquivacoa, valores de error medio, enmarcados en un intervalo de $2,132 \times 10^{-15}$ a $7,105 \times 10^{-16} \Omega\text{-m}$ para los datos geoelectrónicos, correspondientes a los sondeos N° 5 y N° 6, mientras que un error medio de $-4,98 \times 10^{-17}$ mol y un error medio porcentual de $-3,8\%$ mol para las propiedades físico-químicas del agua según podemos observar en la Tabla 4, lo que indica una muestra controlada y con un mínimo de ruido, equivalente a 4%, al mismo tiempo, se determinaron los modelos de regresión para estimar los nuevos valores de resistividad y propiedades físico-químicas del manto acuífero, e inferir con ello, las unidades geoelectrónicas de la zona estudiada. Estos modelos permitieron señalar las características litológicas y la presencia de aguas subterráneas a una profundidad de 30m aproximadamente con un caudal de 25 L/seg, pero con alta concentración de cloruros (mol/L) con 100 mol

de sodio, 12 mol de calcio y 240 de alcalinidad, además de predecir empleando los modelos ajustados de la Tabla 4 el comportamiento de cada una de las variables físico-químicas asociadas a los mantos acuíferos.

Referencias Bibliográficas

1. BALZAN L Y VIELMA D. Estudios de Sondeos Eléctricos Verticales Paramétricos para la definición de Acuíferos en la zona de Mara (Trabajo Especial de Grado), Universidad del Zulia, Maracaibo (Venezuela), pp. 36-49, 1991.
2. JÖHANSEN H.K. **Geophysical Prospecting**. An interactive computer/graphic-display-terminal system for interpretation of resistivity soundings. Mobil R&D Corp., Dallas (USA), pp. 23, 449-458, 1975.
3. GUILLERMO B.M. Sistema Computarizado para la Interpretación Selectiva de curvas de Sondeo Eléctrico Vertical en la configuración tipo Schlumberger (Trabajo de Ascenso), Universidad del Zulia, Maracaibo (Venezuela), pp. 70-76, 1991.
4. ZOHDY A. **Geophysics**. The use of Schlumberger and equatorial soundings in ground-water investigations near El Paso, Texas. Problems, v.12, pp. 55-67, 1969.
5. JOSEPH R.I. **Resistivity Inversion with Ridge Regression** 40(5): 798-817, 1975.
6. HOERL A.E., KENNARD R.W. **Ridge Regression: biased estimation for nonorthogonal problems**, v.12, pp. 25-31, 1970.
7. GUTIÉRREZ M.A. Estudios Comparativos del Método Eléctrico prospectivo con los Métodos Tradicionales en los estudios de suelos para obras civiles (Trabajo Especial de Grado), Universidad del Zulia, Maracaibo (Venezuela), pp. 98-102, 1982.
8. KELLY W.E. **Ground Water** 15: 420-425, 1977.
9. KROT E.M. **Soil-Sci Soc** 27-34, 1946.
10. MALAN J. Aspectos geohidrológicos más salientes de la provincial de la Pampa. **Primeras Jornadas Geológicas de la Provincia de la Pampa**, fascículo 5, Editorial Limusa (Argentina), pp. 67-90, 1981.