

# Digital processing of geoelectrics data using the ridge regression in the parroquia Coquivacoa of the municipio Maracaibo, estate of Zulia

**Wilmer Márquez, Nola Fernández, María Cardozo y Gerson Villasmil**

*Departamento de Geofísica, Escuela de Ingeniería Geodésica, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Maracaibo (4001), Venezuela. E-mail: wmarquez@luz.ve*

## Abstract

The main objective in the present investigation is to apply a statistical analysis of geoelectric field data, based on the Ridge Regression method during the processing phase of vertical electric profile. These data were collected during the field acquisition phase applying the Schlumberger configuration, in the Parroquia Coquivacoa of the Municipio Maracaibo, State of Zulia. Then, the data were processed using the Ghosh method applying lineal models in apparent resistivity curves. This statistical analysis generates such variables as the half error and the residual variance, among other, which indicate the deviations of the residual values, the estimate range and the data noise level. This noise level is defined in 5%, as a product of the relationship between the half percentage error and the standard deviation, which allows guaranteeing confident levels in the interpretation phase of the geoelectric profiles. From the interpretation phase the presence of salt water aquifer at 30 m of depth, with a flow rate of 25 lt/seg is inferred for the studied area.

**Key words:** Ridge regression, method of ghosh, configuration schlumberger, vertical electric sound, iso-resistivity.

# Procesamiento digital de datos geoelectrónicos mediante la aplicación de la regresión anidada en la parroquia Coquivacoa del municipio Maracaibo, estado Zulia

## Resumen

El presente Trabajo de Investigación, tiene como objetivo principal aplicar un análisis estadístico de datos geoelectrónicos, basado en el método de Regresión Anidada, durante la fase de procesamiento en 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 5%, 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. De esta última fase se infiere la presencia de acuíferos de agua salada, a 30m de profundidad, con un caudal de 25 lt/seg para el área estudiada.

**Palabras clave:** Regresión anidada, método de ghosh, configuración schlumberger, sondeo eléctrico vertical, iso-resistividad.

## Introducción

El Trabajo de Investigación denominado: "Procesamiento digital de datos geoelectricos mediante la aplicación de la Regresión Anidada en la Parroquia Coquivacoa del Municipio Maracaibo, Estado Zulia", tiene como objetivo fundamental, la implementación del algoritmo matemático conocido como la Regresión Anidada, para el procesamiento digital de datos geoelectricos en el área de estudio.

En este trabajo se discuten aspectos relativos con la recolección, procesamiento, optimización e interpretación de la información recopilada en campo, mediante la prospección geoelectrica.

El mismo está conformado por dos fases:

La primera fase, enfoca 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 electródica tipo Schlumberger.

La segunda fase, está básicamente conformado por el procesamiento y la optimización de la información, mediante la implementación 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 aplicación de la Regresión Anidada, para la inversión de valores de resistividad en el área de estudio.

## Procedimientos Perativo

### Ubicación geográfica

- Estado: Zulia
- Municipio: Maracaibo
- Parroquia: Coquivacoa

### Adquisición de datos geoelectricos

Consiste en registrar información geoelectrica en la superficie de la zona a estudiar. Para tal fin, se efectuaron mediciones de campo para dieciséis (16) Sondeos Eléctricos Verticales pertenecientes a un mallado distribuido uniformemente en la parroquia Coquivacoa (Figura 1), alcanzando una profundidad de investigación de 200 metros aproximadamente.



Figura 1. Plano de ubicación del Municipio Maracaibo.

La ejecución de los sondeos eléctricos verticales implicó un tendido de las líneas de emisión simétricas con respecto al centro del sondeo, para una configuración electródica tipo Schlumberger. Las coordenadas del centro del arreglo para cada sondeo están referidas al sistema Catedral de Maracaibo, las cuales, se muestran en la Tabla 1.

Adicionalmente, se utilizó un par de perforaciones existentes en el área de estudio, específicamente en el Barrio La Lucha, razón por la cual, fue considerado como la zona piloto (Figura 2) para la aplicación del método de la regresión anidada en el procesamiento de datos geoelectricos. Las coordenadas de las perforaciones (Tabla 2) se muestran a continuación:

### Procesamiento y ajuste

El procesamiento de la información se realizó en forma simultánea al trabajo de campo. Consiste básicamente 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 logarítmica 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 linea-

**Tabla 1**  
Coordenadas 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

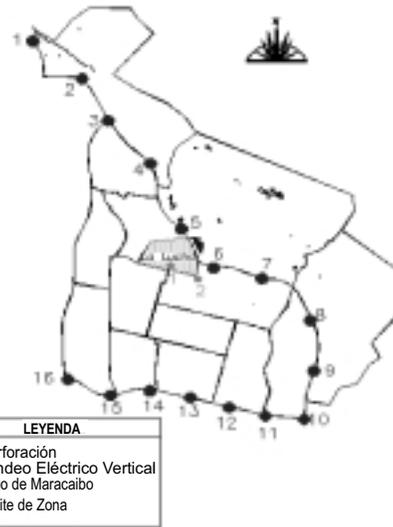
les discretos, donde la curva de resistividad aparente de un sondeo puede ser representada como la salida o respuesta de un proceso de convolución entre una señal de entrada, definida como la transformada de resistividad del modelo geoelectrico y la función de transferencia del sistema, definido como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

En este 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:

$$K_{J-1} = \frac{\rho_{J-1} - \rho_J}{\rho_{J-1} + \rho_J} \quad (1)$$

$\rho$ : resistividad real de la capa.

Ki: coeficientes de reflexión resistiva.



**Figura 2.** Plano de ubicación de los sondeos eléctricos verticales y perforaciones, en la parroquia Coquivacoa.

**Tabla 2**  
Coordenadas de las Perforaciones

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

De esta forma, la transformada de la resistividad para un subsuelo estratificado, puede ser calculada en forma recursiva (Johansen, 1975) a partir de la expresión:

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

$$W_j = \rho_j \frac{1 - e^{-2i\lambda h_j}}{1 + e^{-2i\lambda h_j}} \quad (3)$$

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

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

$\rho_m$ : valores digitales de resistividad aparente.

$b_j$ : valores digitales del filtro de convolución.

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 (16) sondeos de configuración electrónica 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.

El procesamiento de la información, se realizó mediante el apoyo de un modelo geológico teórico inicial (Figura 3), el cual, se introdujo en el programa de cálculo Geosev, diseñado por el Departamento de Geofísica de la Universidad del Zulia (LUZ), para iniciar el proceso de iteración, y de esta forma obtener los valores definitivos de espesores y resistividades que serán utilizados para inferir desde el punto de vista geológico el tipo de litología o mineralogía en el área de estudio.

Los resultados obtenidos en esta fase, son representados por un conjunto de curvas y son clasificadas de acuerdo a la etapa del procesamiento, es decir, la primera etapa corresponde a la representación gráfica de los datos crudos obtenidos en campo, definiendo con ello, un conjunto de curvas denominadas curvas preprocesadas (Figuras 4 y 5). La segunda etapa, está basada en el ajuste de los datos, mediante la aplicación de la interpolación cúbica y el método de los mínimos cuadrados, con la finalidad de suavizar las curvas y obtener valores filtrados de resistividad; en esta etapa las curvas se denominan curvas procesadas (Figuras 6 y 7) [4].

A continuación, se muestran los gráficos obtenidos en la fase de procesamiento en sus diversas etapas:

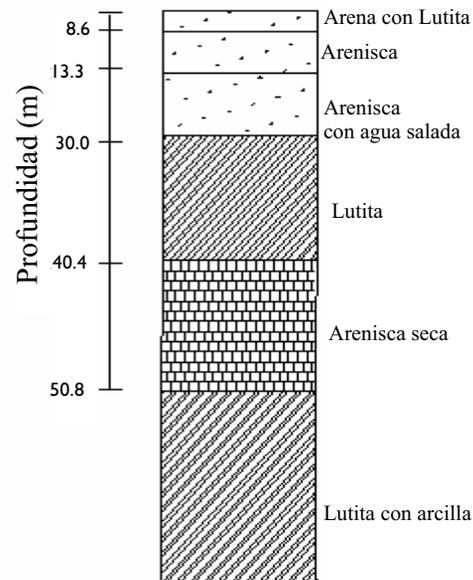


Figura 3. Modelo geológico teórico inicial.

### Optimización de los Resultados

Los resultados obtenidos con el Método Geoelectrico Digital Resistivo, han sido optimizados con el Método de la Regresión Anidada (Figura 8), cuyo fundamento se basa en comparar las curvas de campo con un conjunto de curvas patrones, incorporando variables estadísticas de control. Esto tiene como objeto, determinar, mediante un proceso de interpolación las características geoelectricas de las curvas de campo, 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 [5].

El modelo matemático que describe este método es el siguiente:

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

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

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

**Curvas de campo pre-procesadas**

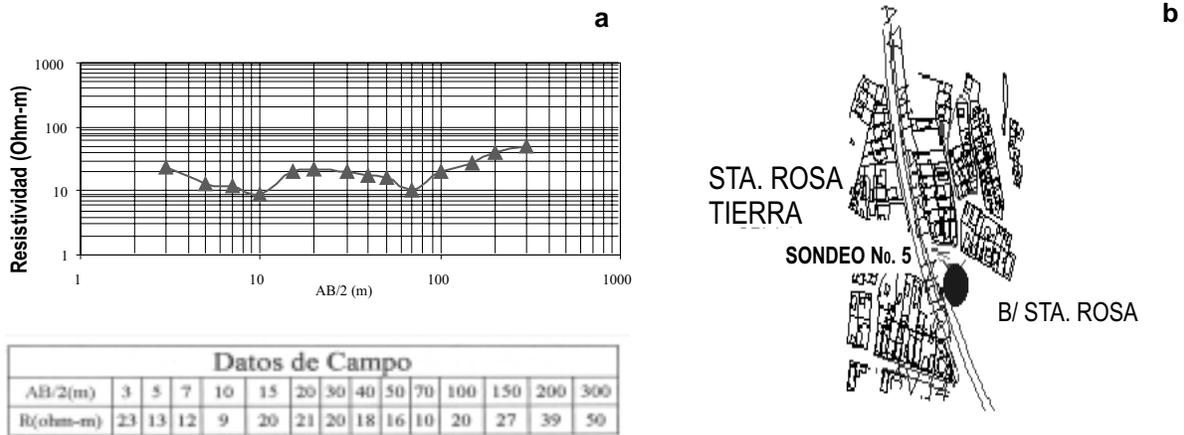


Figura 4. (a) Datos de Campo y Curva pre-procesada del Sondaje Eléctrico Vertical N° 5. (b) Ubicación Geográfica del Sondaje Eléctrico Vertical N° 5.

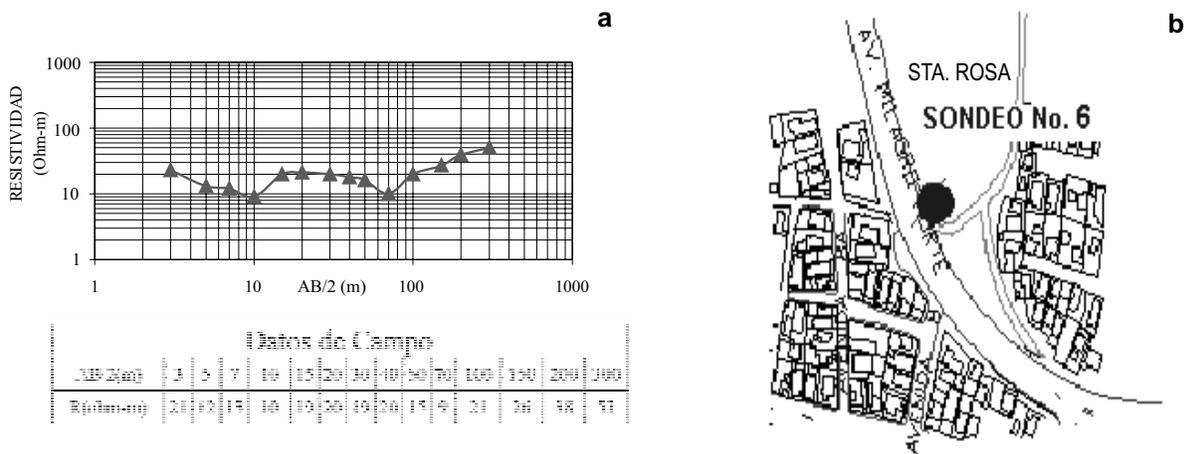


Figura 5. (a) Datos de Campo y Curva pre-procesada del Sondaje Eléctrico Vertical N° 6 (b) Ubicación Geográfica del Sondaje Eléctrico Vertical N° 6.

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

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

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

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

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

- $\rho_1$ : resistividad en la capa 1
- $\rho_n$ : resistividad aparente Schlumberger
- P: vector de parámetros desconocidos
- G(P, x): resistividad aparente medida
- cor: matriz de correlación
- cov: matriz de covarianza
- $\sigma^2$ : Varianza residual

En la Tabla 3, se muestran los resultados obtenidos con la Regresión Anidada:

Los resultados obtenidos con el método de la Regresión Anidada (Tabla 3), indican que el nivel de

**Curvas de campo procesadas y ajustadas**

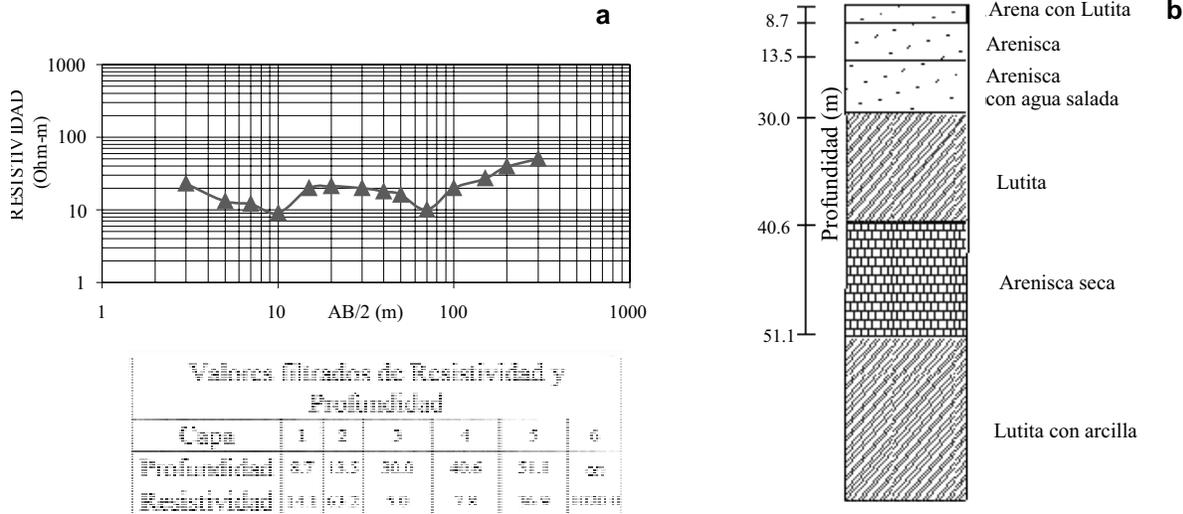


Figura 6. (a)Curva Ajustada del Sondeo Eléctrico Vertical N° 5 y datos de campo filtrados y ajustados por mínimos cuadrados (b) Columna Estratigráfica del Sondeo Eléctrico Vertical N° 5.

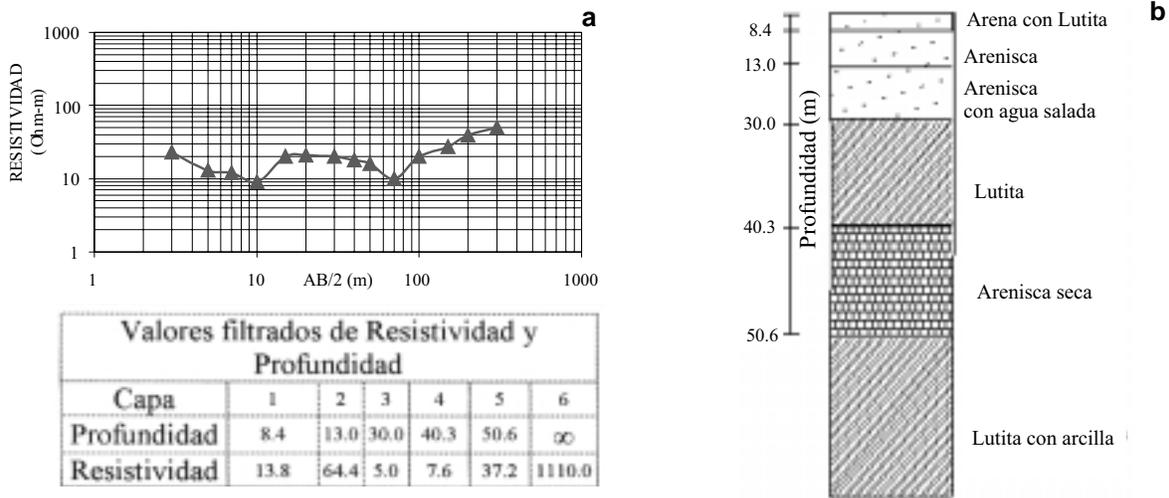


Figura 7. (a)Curva Ajustada del Sondeo Eléctrico Vertical N° 6 y datos de campo filtrados y ajustados por mínimos cuadrados (b) Columna Estratigráfica del Sondeo Eléctrico Vertical N° 6.

ruido en la muestra es de 5%, ya que las variables estadísticas: error medio, está en el intervalo de valores de  $2.132 \cdot 10^{-15}$  a  $7.105 \cdot 10^{-16}$ , el error medio porcentual, entre -121.308% y -124.738% y la matriz de correlación (que garantiza la dependencia lineal entre las variables generando sistemas matriciales singulares ideales para ser resueltos por este Método) [6], generando modelo de datos de Regresión, que permite controlar la calidad de los resul-

tados indicando una buena posición para el modelo hipotético de datos.

**Interpretación**

En la fase de interpretación de los dieciséis (16) Sondeos Eléctricos Verticales para la determinación de acuíferos explotables, se definieron seis (6) unidades geoelectricas. Así mismo se ob-

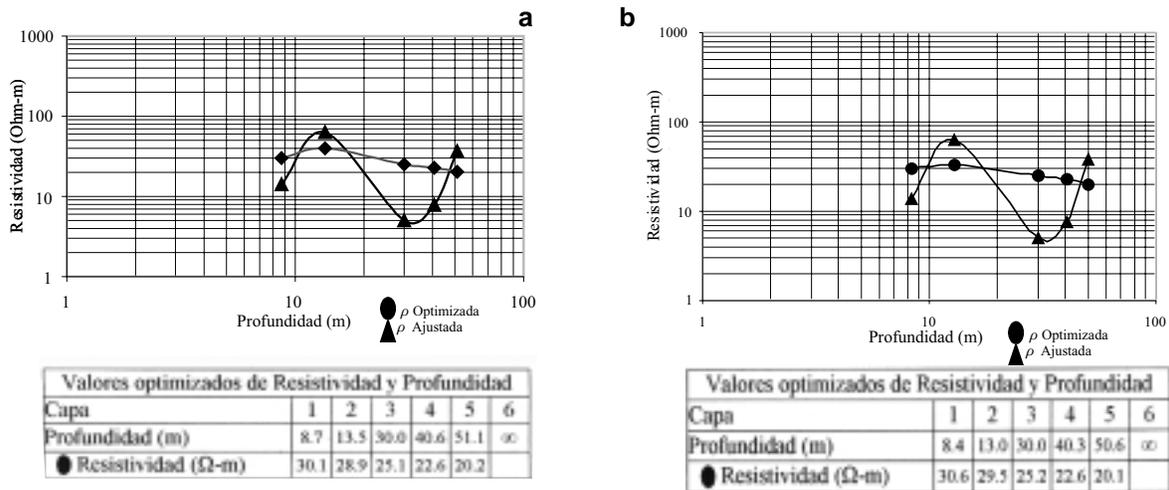


Figura 8. (a) Curva Optimizada del S E V N° 5. (b) Curva Optimizada del S E V N° 6.

Tabla 3

Parámetros de la Regresión Anidada				
Sondeo Eléctrico Vertical	4		5	
	$\rho$ (Ω-m)	Prof (m)	$\rho$ (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%			
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)	-121,308%		-124,738%	
Matriz de Correlación	1,000	-0,8743	1,000	-0,8722
	-0,8743	1,000	-0,8722	1,000
Modelo Ajustado de la Regresión Anidada (Ω-m)	$\rho = 32,10 - 0,23 \cdot \text{Prof}$		$\rho = 32,73 - 0,25 \cdot \text{Prof}$	

tuvo un perfil geoelectrico definido por la correlación de los pozos con los sondeos eléctricos verticales, correspondiente a la esquematización de las características geoelectricas del subsuelo. Estas 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. A continuación se indican las características de las unidades geoelectricas, en la Tabla 4.

De acuerdo a estos resultados, no se recomienda la perforación de pozo alguno, ya que, el único acuífero existente, se encuentra aproximadamente a unos 30m, pero con alta concentración de cloruros y un caudal de 25 lt/seg.

A continuación se muestran los mapas de iso-resistividades obtenidos (Figura 9).

## Conclusiones

Los resultados obtenidos en esta investigación indican que la Regresión Anidada es un pode-

Tabla 4

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

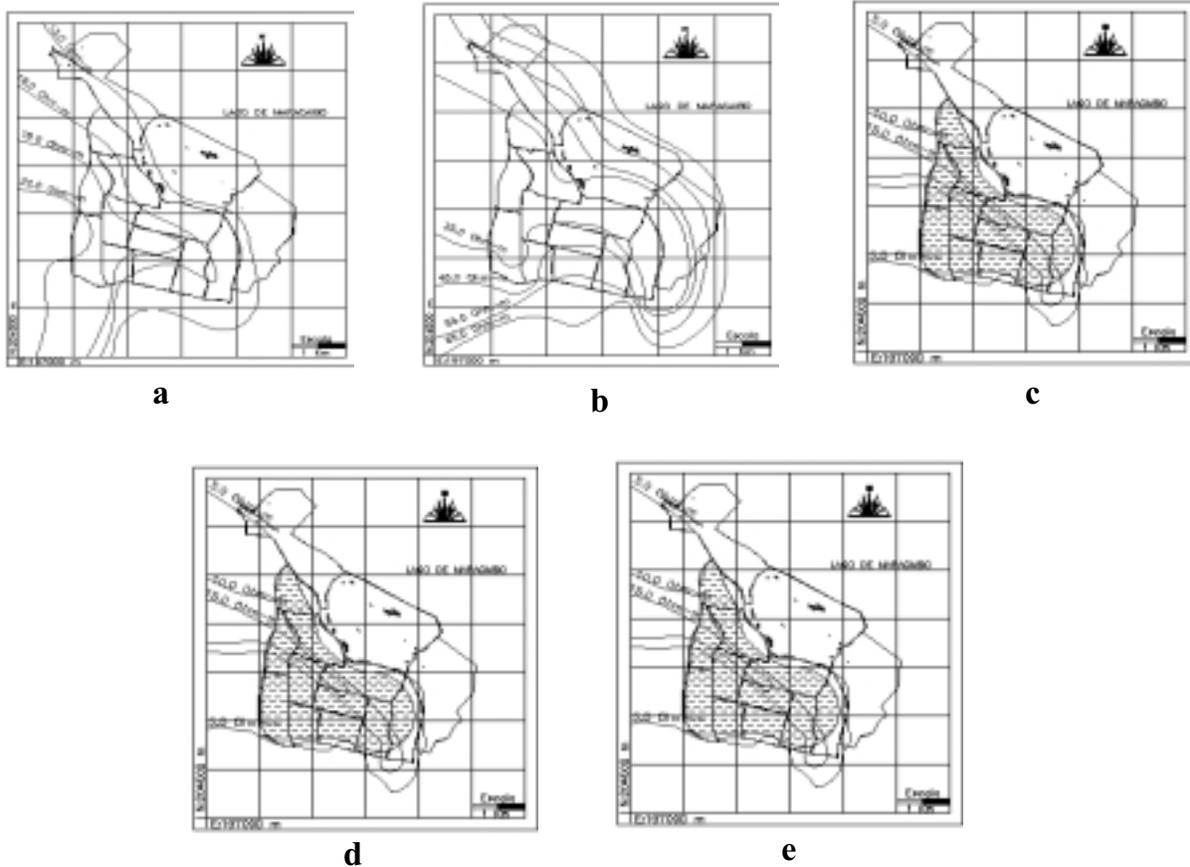


Figura 9. Mapa de Isoresistividades de las siguientes capas: (a) capa 1,(b) capa 2,(c) capa 3, (d) capa 4, (e) capa 5.

roso método para el procesamiento e interpretación de datos geoelectricos, ya que define un modelo de datos que permite predecir la exactitud con la cual se estimarán los parámetros de resistividad y profundidad. Esto se logra mediante la combinación del modelo lineal de Ghosh con el modelo de la Regresión Anidada, el cual, permite evaluar y estudiar el subsuelo, así como también, la distribución de los estratos, y sus potenciales de acuíferos, a través del procesamiento e interpretación de secciones geoelectricas. Estos modelos de datos, definen estimadores estadísticos que permiten controlar la calidad de los mismos.

En este caso particular, se obtuvieron valores del error medio, enmarcados en un intervalo de  $2.132 \cdot 10^{-15}$  y  $7.105 \cdot 10^{-16}$ , lo que indica una muestra plenamente controlada y con un mínimo de ruido igual a 5%, así como también, definir un modelo de regresión para establecer los nuevos valores de resistividad, e inferir con ello, las unidades geoelectricas y su representación en mapas de isoresistividades para la parroquia Coquivacoa. Estos modelos permitieron indicar las características litológicas y la presencia de acuíferos a una profundidad de 30m aproximadamente con un caudal de 25 lt/seg, pero con alta presencia de cloruros.

### 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. páginas: 35-40, 1991.
2. Jöhansen H.K.: An interactive computer/graphic-display-terminal system for interpretation of resistivity soundings. *Geophysical Prospecting*, 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. páginas: 70-76, 1991.
4. Zohdy A.: The use of Schlumberger and equatorial soundings in groundwater investigations near El Paso, Texas. *Geophysics*, 34: 713-728. *problems*, v.12 (1969), páginas: 55-67.
5. Joseph R.I.: Resistivity Inversion with Ridge Regression, *Society of Exploration Geophysicists*, páginas: 798-817. Vol. 40, N°5 (1975).
6. Hoerl A.E. and Kennard R.W.: Ridge Regression: biased estimation for nonorthogonal problems, v.12, 1970.

Recibido el 02 de Noviembre 2002  
en forma revisada el 23 de Junio de 2003