

Analysis geostatistics of earthquake-proof parameters and of construction in a road sector of high vertical growing

José Andrés Zabala Rosales

*Escuela de Ingeniería de Petróleo, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia.
Maracaibo, Venezuela. Tele-Fax: 0261-7365913, jzabalar@luz.edu.ve.*

Abstract

The purpose of this work is to relate through geostatistics functions (Kriging and Cokriging), the elastic parameters of the ground and the Standard Penetration Testing (SPT). And of this way it will allow the first densification, with the knowledge of the second, in the area located between the Panamericana highway and the Americas avenue of Merida city. The geostatistics analysis allows the estimation of a variable point in an unknown sample space. Therefore, in the case of a defined sector in this study, which has a higher dense vertical growing area in Merida city and where the ground testing has been done for specific purpose, such as the construction of multifamiliar houses, it is isolated in its context geographic, with the intention of establishing the grade of correlation space between them as well as correlation function that allows it to identify elastic-earthquake-proof parameters of the ground with relation to the information obtained from the SPT. That is to say the sample space information, where the common points involved with geophysic information and the SPT, you can determine the possible lateral variations of the ground at a lower cost, from a view point of the area covered with the quantity of the penetration done.

Key words: Earthquake-proof parameters, standard penetration testing (SPT) and cokriging.

Análisis geoestadístico de parámetros antisísmicos y de construcción en un sector vial de elevado crecimiento vertical

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo el relacionar, mediante funciones geoestadísticas (Kriging y Cokriging), los parámetros elásticos del suelo y las Pruebas de Penetración Estándar (SPT). Y de esta forma, obtener los primeros, con el conocimiento de los segundos, para puntos muestreados en un sector ubicado entre la carretera Panamericana y la avenida Las Américas de la ciudad de Mérida. El análisis geoestadístico permite la estimación de una variable para un punto en un espacio muestral desconocido, que para el sector definido en este estudio, involucra la zona de mayor crecimiento vertical de la ciudad de Mérida, en donde los ensayos de suelos realizados, a los fines específicos de construcción de viviendas multifamiliares, se encuentran aislados en su contexto geográfico, con la intención de establecer el grado de correlación espacial entre los mismos, así como la función de correlación que permite obtener los parámetros elásticos-antisísmicos de aquellos puntos del suelo a los que se les desconocen, con respecto a la información extraída de los ensayos SPT. Es decir, que con la información espacial muestreada, donde se involucran puntos comunes con información geofísica y de SPT, se obtuvieron parámetros elásticos que llegaron a detectar las variaciones laterales del suelo a un menor costo, desde el punto de vista del área cubierta con la cantidad de sondeos realizados.

Palabras clave: Parámetros antisísmicos, ensayos de penetración estándar (SPT) y cokriging.

Introducción

Actualmente, son pocos los ingenieros geotécnicos que desconocen la importancia vital que tiene un adecuado estudio del subsuelo en aquellas áreas seleccionadas para soportar cargas de considerable magnitud, y saben sobre lo conveniente que resulta basar dichos estudios en dos o más métodos de investigación; por lo que es importante reconocer, la amplitud de los aportes de la Geofísica Prospectiva dentro de la Mecánica de Suelos, en el conocimiento de la litología y propiedades físico-mecánicas de las estructuras de interés en el subsuelo [1].

La Geofísica no ha recibido el apoyo definitivo como prueba científicamente validada en el campo de la Ingeniería Civil para el análisis de las características elástico-dinámicas del suelo [2]; motivo por el cual, es más común realizar los Ensayos de Penetración Estándar (SPT, siglas en inglés), y en algunas ocasiones, acompañados por otros métodos geotécnicos.

Recientemente, la técnica de determinación de parámetros elásticos por métodos geofísicos y geostatísticos, constituye una herramienta poderosa, económica y confiable, que puede ser implementada para resolver, aun los problemas más engorrosos en el comportamiento elástico-dinámico de los suelos [2, 3]. En los últimos años, la Geoestadística ha sido reconocida como una de las herramientas más poderosas para el análisis de datos espacialmente distribuidos [4]. No obstante, todo estudio de microzonificación

sísmica de una ciudad, es visto como un proceso complejo, debido a que requiere de la aplicación de diversas técnicas, bien sea Geofísicas, Geológicas y Sismológicas, con la finalidad de conocer la variación de las velocidades de las ondas compresionales y de corte a una profundidad específica, así como también, la variación de los módulos de Corte, Poisson y de Elásticidad de un estrato en particular [2]; parámetros de fundamental importancia para el estudio de la respuesta de los suelos bajo excitación sísmica, y en función de éstos, surgen o mejoran reglamentaciones u ordenanzas sobre normativas sismorresistentes en una región en particular. De aquí que, la Geostatística podría ayudar a mejorar la estimación de los mismos.

Parte experimental

Ubicación del área de estudio

El área estudiada se encuentra en la ciudad de Mérida (Figura 1), perteneciente a los Andes Centrales Venezolanos y está constituida por una franja norte de la meseta de Mérida, en el sector comprendido entre la carretera Panamericana y la avenida Las Américas de dicha ciudad (Figura 2). La franja abarca una extensión aproximada de 20 Km² y constituye una zona de gran crecimiento vertical para el desarrollo urbano de la ciudad.

La zona muestreada está formada por un conjunto de conos de deyección, constituidos principalmente por material aluvional poco con-

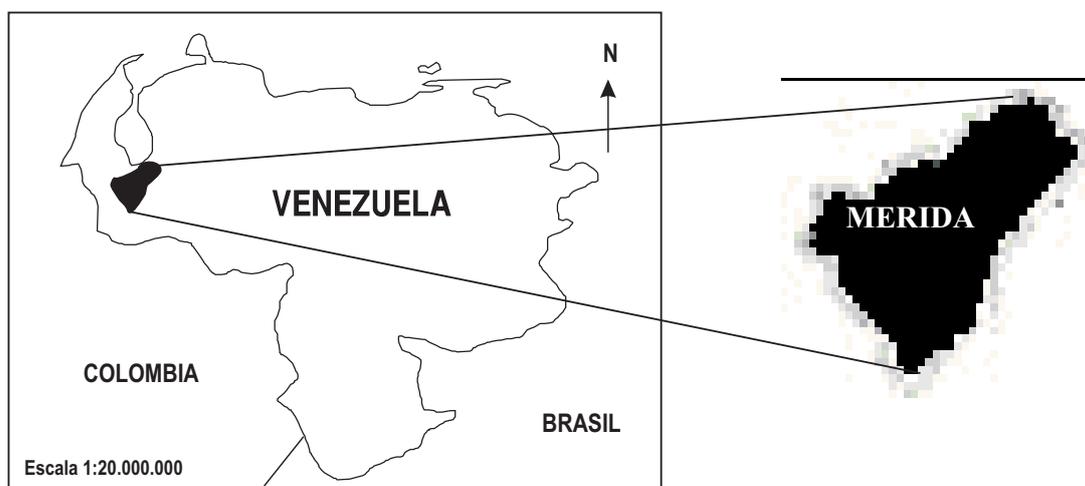


Figura 1. Ubicación relativa nacional.

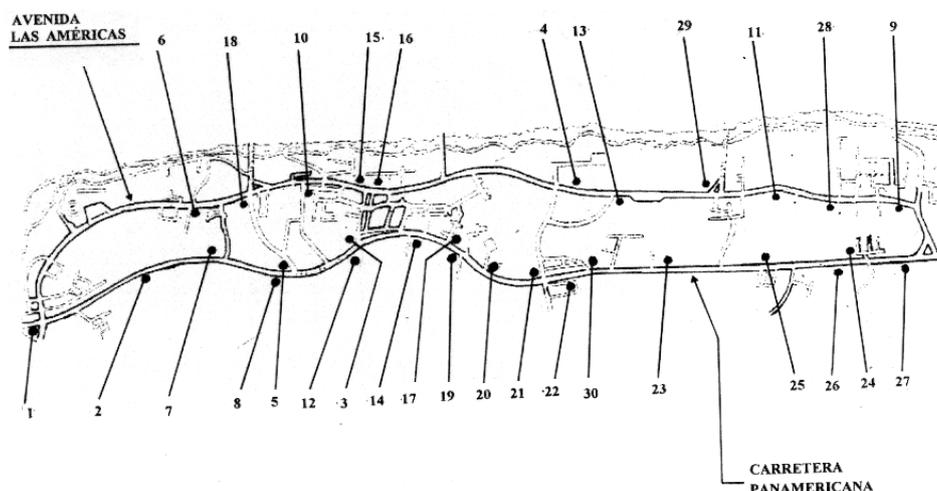


Figura 2. Ubicación de los puntos muestreados (30 ensayos SPT ejecutados) dentro del área de estudio en la ciudad de Mérida.

solidado con abundancia de fragmentos de arenisca cuarcititas, pizarras y lutitas propias de la Formación Sabaneta de edad Paleozoica [5]. Estas características, le imparten a la zona un alto grado de inestabilidad al suelo, desde el punto de vista del riesgo sísmico que habrá de considerarse en la zona [6].

Objetivo de la investigación

Aplicar técnicas geoestadísticas espaciales de Kriging y Cokriging para la estimación de parámetros sismorresistentes en función de los Ensayos de Penetración Estándar, a objeto de relacionar, mediante una función geoestadística, los parámetros involucrados y contribuir a la certeza de los valores en el conocimiento de los parámetros sismorresistentes del sector en estudio.

Planteamiento del problema

En términos generales, el problema que se desea resolver es la apreciación local de la variable que mejor evalué el valor de otra, por lo que se requiere para ello, encontrar el mejor estimador estadístico del valor medio de una variable, definida como regionalizada, sobre una determinada zona, la cual es pequeña en comparación con las dimensiones totales del área de estudio. Es por esto, que toda la información que se ha recopilado y generado (ensayos SPT) para la determinación de un valor, consistió generalmente en el conjunto de valores asociados a las posibles rea-

lizaciones de la variable regionalizada y la información estructural asociada al variograma que caracteriza la variabilidad espacial del parámetro en estudio [3]. De allí que los valores determinados, se expresen como promedios ponderados de los valores experimentales o medidos, vecinos al punto donde la estimación se desea realizar, es decir:

$$Z_k^* = \sum_i \lambda_i Z_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

donde, Z_k^* es el valor definido para la coordenada X_k y Z es el valor experimental. Los n factores de ponderación λ , se calculan de forma tal, que aseguren un error medio nulo en el estimador y que la varianza sea mínima. En razón de lo anterior, se dice entonces que el valor Z_k^* es el mejor estimador lineal insesgado del fenómeno en estudio. Estas dos condiciones producen un sistema de $(n + 1)$ ecuaciones lineales con $(n + 1)$ incógnitas, que constituyen las ecuaciones del sistema de Krigado [3].

En el caso de esta investigación, se consideró la variable como estacionaria del tipo intrínseca, cuya varianza de estimación sea mínima, y el variograma seleccionado se hizo sobre la base de los datos y la estructura del fenómeno que se estudió, es decir, que se basó exclusivamente en las medidas de la variable a estudiar; por lo que el variograma es del tipo experimental. Debido a que cuando la variable presenta fluctuaciones aleatorias no predecibles y de escalas aparentemente

no acotadas, lo más común es adoptar la hipótesis de variable intrínseca; además, por ser estacionaria, su valor debe fluctuar en torno a la media [3].

Marco metodológico de la investigación

El procedimiento seguido en la presente investigación comprende el uso de datos publicados [7], y obtenidos directamente de las compañías que ejecutan estudios de suelo en la ciudad de Mérida, sobre datos de ensayos SPT realizados en el sector de estudio (Figura 2) y sobre el análisis de los sondeos sísmicos de refracción, así como los sondeos geoelectrónicos verticales. La Tabla 1 indica el número de ensayos recopilados.

Una vez recopilada la información, se procedió al análisis de los estudios de suelo (30 ensayos SPT realizados por distintas compañías, bajo un mismo procedimiento estandarizado) que se efectuaron en el sector de estudio, lo cual permitió conformar el cuadro geológico resistente del suelo en función de los parámetros de cons-

trucción civil, especialmente el de la resistencia a la penetración (N) del suelo. Para esto, fue necesario recopilar (Tabla 2) toda la información posible sobre los parámetros elásticos (resistencia última (Qa), resistencia al Corte (Corte) y resistencia elástica (Young)) del subsuelo, evaluado en los 30 puntos con información SPT, debido a sus importancias significativas, ya que aportan información sobre los posibles efectos que pudieran presentarse durante un sismo en función de la seguridad para las construcciones. Quedando los puntos muestreados del 12 al 30 para su estimación, debido al desconocimiento de sus parámetros elásticos Corte y Young.

Es a partir de estos valores de constante elástica, de donde surge cualquier reglamentación u ordenanza sobre las normas a cumplir en la ejecución de construcciones o edificaciones en toda el área de estudio. A tal efecto, se calcularon parámetros como: velocidades de ondas compresional y cortante, resistencias al corte y compresiva elástica y relación de Poisson. Parámetros

Tabla 1
Puntos muestreados en el área de estudio (Figura 2) y sus ensayos SPT por puntos

Pto.	Ubicación	No. SPT	Pto.	Ubicación	No. SPT
1	Res. estudiantil ULA, Av. Los Próceres y Av. Las Américas.	2	16	Res. El Parque 2, Av. Las Américas.	2
2	Qta. el Parral, Av. Los Próceres.	22	17	Vivienda, Av. Los Próceres.	2
3	Vivienda, Av. Los Próceres.	2	18	C.C. El Viaducto, Av. Las Américas.	8
4	Res. Río Arriba, Av. Las Américas.	6	19	Clínica, Av. Los Próceres.	3
5	Res. cardenal Quintero, Av. Los Próceres.	2	20	Res. Alborada, Av. Los Próceres.	4
6	Edif., Av. Las Américas.	2	21	Urb. Los Sausales, Av. Los Próceres.	6
7	Res. Rosa, Av. Los Próceres.	4	22	Vivienda, Av. Los Próceres.	2
8	Res. Don Alberto, Av. Los Próceres.	6	23	Modulo, Av. Los Próceres.	4
9	Clínica, Av. Las Américas.	2	24	Edif. Lomgimar, Av. Los Próceres.	3
10	Res. Los Geradios, Av. Las Américas.	2	25	C.C. Bugan Villas, Av. Los Próceres.	4
11	Res. San Hipólito, Av. Las Américas.	2	26	Galpón, Av. Los Próceres.	2
12	C.C. Alto Prado, Av. Los Próceres.	6	27	Iglesia Inmaculada Av. Los Próceres.	4
13	Res. Independencia, Av. Las Américas.	2	28	C.C. Plaza Las Américas.	8
14	Vivienda, Av. Los Próceres.	2	29	Res. Don José, Av. Las Américas.	3
15	Res. El Parque 1, Av. Las Américas.	2	30	Res. San Luis, Av. Los Próceres.	2

Tabla 2
Distribución de datos de las variables muestreadas para el análisis geoestadístico

N°	Norte	Este	N	Qa (Kg/cm ²)	Corte (Kg/cm ²)	Young (Kg/cm ²)
1	21040	52230	65	0,76	9.957	30.828
2	20457,14	51927,14	65	1	10.214	29.784
3	19325,71	51007,14	51	1	4.564	13.529
4	18251,43	49938,57	58	0,6	10.094	29.232
5	19760	51270	53	1,5	3.263	9.671
6	19805,71	51841,43	80	3	12.021	32.975
7	20045,71	51704,28	58	0,7	4,669	13.526
8	19908,57	51304,28	75	1,2	7.211	21.190
9	17188,57	48207,14	55	1,8	6.108	18.055
10	19314,28	51378,57	80	2,05	5.450	16.237
11	17548,57	48835,71	80	1,5	14.147	36.330
12	19508,57	50904,28	80	1,5	A estimar	A estimar
13	18194,28	49704,28	80	2	A estimar	A estimar
14	19142,86	50630	80	1,7	A estimar	A estimar
15	19040	50087,14	75	3	A estimar	A estimar
16	18982,86	50995,71	80	3	A estimar	A estimar
17	18948,47	50424,29	80	2	A estimar	A estimar
18	19634,26	51624,29	65	3,5	A estimar	A estimar
19	19051,43	50321,43	70	1,8	A estimar	A estimar
20	18971,43	50104,29	75	1,75	A estimar	A estimar
21	18891,43	49898,57	80	3	A estimar	A estimar
22	18754,29	49652,86	70	1,5	A estimar	A estimar
23	18320	49224,28	47	0,7	A estimar	A estimar
24	17520	48218,57	65	2	A estimar	A estimar
25	17908,57	48675,71	55	2,5	A estimar	A estimar
26	17731,43	48355,71	58	2,1	A estimar	A estimar
27	17462,86	48007,14	63	2,6	A estimar	A estimar
28	17405,71	48527,14	63	3	A estimar	A estimar
29	17771,43	49235,71	80	2	A estimar	A estimar
30	18628,57	49647,14	80	1,5	A estimar	A estimar

N: Parámetro adimensional.

sísmicos que aportan información sobre las propiedades dinámicas del subsuelo [2].

Otros datos sobre los cuales está soportada esta investigación, corresponden a la determinación de los parámetros dinámicos del subsuelo, a través del método sísmico de refracción, cuyos valores medidos en las 12 estaciones que se ubicaron alrededor del área de estudios, se muestra en la Tabla 3.

A partir de estudios de Física de Rocas se sabe que conocidos V_p y V_s , se puede reducir la incertidumbre en la determinación de los parámetros elásticos [8].

Ensayo sísmico-geoelectrico integrado

Se tomaron valores paramétricos directos en el campo de las estaciones que se conocen, entre las que destacan las resistividades y las velocidades compresionales de las interfaces del suelo. Luego, los valores de resistividades son convertidos a valores de velocidad sísmica a través de una metodología particular, entre las cuales se incluye el cálculo de las velocidades de Faust, las cuales requieren ser ajustadas y corregidas en función de las velocidades sísmicas medidas y las profundidades sísmicas geoelectricas alcan-

zadas [9], con el propósito de obtener las velocidades integradas que se muestran en la Tabla 4.

El hecho de que las velocidades integradas sean casi siempre menores que las velocidades sísmicas medidas en las estaciones, sugieren que los ensayos SPT se acercan más a la realidad geológica del área [10].

Análisis geoestadístico de los datos

El empleo de las técnicas geoestadística requirió un análisis previo de los datos y de la estructura espacial de la información disponible, así como también un cálculo de las estadísticas básicas a fin de conocer el comportamiento de las variables [3]. Los datos a analizar estadísticamente corresponden a las coordenadas Norte y Este, el número de golpes (N) del ensayo SPT, la resistencia última (Q_u) del suelo y las resistencias al corte y elástica (Young) de los 30 puntos muestreados en el área de estudio, cuyos resultados estadísticos se muestran en la Tabla 5.

A partir de los valores obtenidos en la Tabla 5, se puede deducir que los valores que representan las medidas de tendencia central de los datos muestreados, indican que el tipo de distribución de éstos es asimétrico, tanto hacia la izquierda como a la derecha.

Tabla 3
Ubicación y parámetros sísmicos de estaciones medidas alrededor del área de estudio

Estación (Ubicación)	V_p (m/seg)	V_s (m/seg)	E (Kg/cm ²)	μ (Kg/cm ²)	σ
ULA (Av. Las Américas)	4265	2142	30828	9957	0,440
Albalago (Av. Las Américas)	2436	698	29784	10214	0,458
Casa Tía (Av. Las Américas)	2437	453	13529	4564	0,482
Albarregas (Av. Las Américas)	222	682	29232	10094	0,448
Tenera Grill (Av. Las Américas)	2956	150	*	*	*
San Luis (Av. Los Próceres)	2080	391	9671	3263	0,481
Araguaney (Av. Las Américas)	1701	769	32975	12021	0,371
El Garzo (Av. Los Próceres)	1581	484	13526	4669	0,448
Santa Anita (Av. Los Próceres)	2375	571	21190	7211	0,469
Don Quijote (Av. Intersección)	2533	522	18055	6108	0,477
Inavi (Av. Intersección)	3333	476	16237	5450	0,489
Santo Domingo (Av. Las Américas)	1538	521	36330	14147	0,284

V_p : Velocidad sísmica compresional. E: Resistencia elástica (Young). σ : Relación de Poisson (adimensional). V_s : Velocidad sísmica transversal. μ : Resistencia al corte (Corte). * No se registró medida.

Tabla 4
Valores de resistividades por estratos y velocidades sísmicas integradas calculadas

Esesor del estrato (m)	Resistividad (Ωm)	Velocidad integral (m/seg)	Esesor del estrato (m)	Resistividad (Ωm)	Velocidad integral (m/seg)
Estación	Araguaney	(Av. Las Américas)	Estación	Casa Tía	(Av. Las Américas)
7	198	116	12	439	176
33	437	741	22	238	604
53	541	1776	80	162	2460
100	315	1444	> 100	296	901
> 100	180	1339			
Esesor del estrato (m)	Resistividad (Ωm)	Velocidad integral (m/seg)	Esesor del estrato (m)	Resistividad (Ωm)	Velocidad integral (m/seg)
Estación	San Luis	(Av. Los Próceres)	Estación	ULA	(Av. Las Américas)
6	93	220	24	71	172
32	34	996	84	313	1565
32	81	1286	79	239	2839
98	179	1677	> 100	612	3306
> 100	134	1666			
Esesor del estrato (m)	Resistividad (Ωm)	Velocidad integral (m/seg)	Esesor del estrato (m)	Resistividad (Ωm)	Velocidad integral (m/seg)
Estación	Tenera Grill	(Av. Las Américas)	Estación	Don Quijote	(Av. Intersección)
2	20	7	10	86	226
9	30	208	10	23	412
8	18	205	23	139	1340
110	232	3391	84	221	2148
> 150	51	2183	> 100	53	1869
Esesor del estrato (m)	Resistividad (Ωm)	Velocidad integral (m/seg)	Esesor del estrato (m)	Resistividad (Ωm)	Velocidad integral (m/seg)
Estación	Albarregas	(Av. Las Américas)	Estación	Santa Anita	(Av. Los Próceres)
10	161	139	10	126	56
34	422	1034	10	53	161
20	144	1310	29	86	1000
100	500	1849	132	248	2577
> 100	100	1486	> 150	19	1756

Tabla 4 (Continuación)

Espesor del estrato (m)	Resistividad (Ωm)	Velocidad integral (m/seg)	Espesor del estrato (m)	Resistividad (Ωm)	Velocidad integral (m/seg)
Estación	El Garzo	(Av. Los Próceres)	Estación	Santo Domingo	(Av. Las Américas)
30	129	192	14	150	520
20	49	389	38	1662	1635
8	120	555	114	333	1540
> 100	546	1696	56	142	1405
			> 100	1253	2022

Espesor del estrato (m)	Resistividad (Ωm)	Velocidad integral (m/seg)	Espesor del estrato (m)	Resistividad (Ωm)	Velocidad integral (m/seg)
Estación	Inavi	(Av. Intersección)	Estación:	Albalago	(Av. Las Américas)
10	198	34	7	54	53
17	689	393	8	112	123
40	450	1191	28	523	601
100	1300	3100	120	237	2704
> 100	309	2574	> 100	208	2032

Las pruebas de distribución normal ejecutadas a cada variable (N, Qa, Corte y Young) refieren un comportamiento aceptable de los datos sobre la tendencia normal, con un grado de confianza mínimo de 90%, y los resultados del análisis de Boxplot, sugieren que no existen valores extremos significativos que requieran de una depuración.

Finalmente, el análisis de variación (ANOVA) para el modelo de regresión lineal, entre el número de golpes (N), como variable dependiente y el factor Qa (resistencia última), como variable independiente, arrojó un valor de P de 0,067, lo que demuestra que existe una relación estadísticamente significativa entre las variables N y Qa, con un nivel de confianza de 90%. Luego, el estudio geoestadístico del área de investigación requirió la determinación de los ejes de anisotropía, tanto para verificar si la malla de análisis es la más indicada, como para calcular el variograma, el cual debía ser adaptado a un modelo teórico [11].

Resultados

El análisis geoestadístico se realizó a través del empleo de un software especializado para este fin, el Variowin 2.2 desarrollado por Y. Pannatier [12] del Instituto de Mineralogía de la Universidad de Lausanne, con el cual se seleccionó el variograma teórico, resultando uno del tipo esférico. También, se ejecutó un análisis interactivo del modelado geométrico y la anisotropía zonal. No obstante, el efecto de anisotropía no fue considerado en este estudio, debido a que los variogramas teóricos tipo esférico de las variables N y Qa no son marcadamente distintos en cualquier dirección, de igual forma para las variables Corte y Young (Figura 3).

Debido a que se emplean varias variables o parámetros en el proceso de correlación, la técnica geoestadística apropiada es el Cokriging, la cual determina las variables conjuntamente, utilizando estimadores lineales insesgados óptimos, considerándose las correcciones espaciales entre dichas variables. Razón por la cual, esta técnica

Tabla 5
Resumen estadístico de las variables muestreadas

Variable	N	Qa (Kg/cm ²)	Corte (Kg/cm ²)	Young (Kg/cm ²)
Nº de datos	30	30	11	11
Media	68,7	1,87	7,97	22,851
Mediana	70	1,8	7,21	21,19
Moda	80	3	6,11	18,055
Media geométrica	67,99	1,69	7,25	21,017
Varianza	117,08	0,63	12,31	85,367
Desviación estándar	10,82	0,8	3,51	9,239
Error estándar	1,97	0,14	1,05	2,786
Mínimo	47	0,6	3,26	9,671
Máximo	80	3,5	14,15	36,33
Rango	33	2,9	10,88	26,659
Cuartil menor	58	1,5	4,67	13,529
Cuartil mayor	80	2,5	10,21	30,828
Rango intercuartil	22	1	5,54	17,299
Asimetría	-0,41	0,25	0,36	0,042
Asimetría estandarizada	-0,92	0,56	0,48	0,057
Curtosis	-1,21	-0,71	-1,04	-1,669
Curtosis estandarizada	-1,36	-0,8	-0,71	-1,130
Coefficiente de variación	15,71	42,48	44,01	40,434

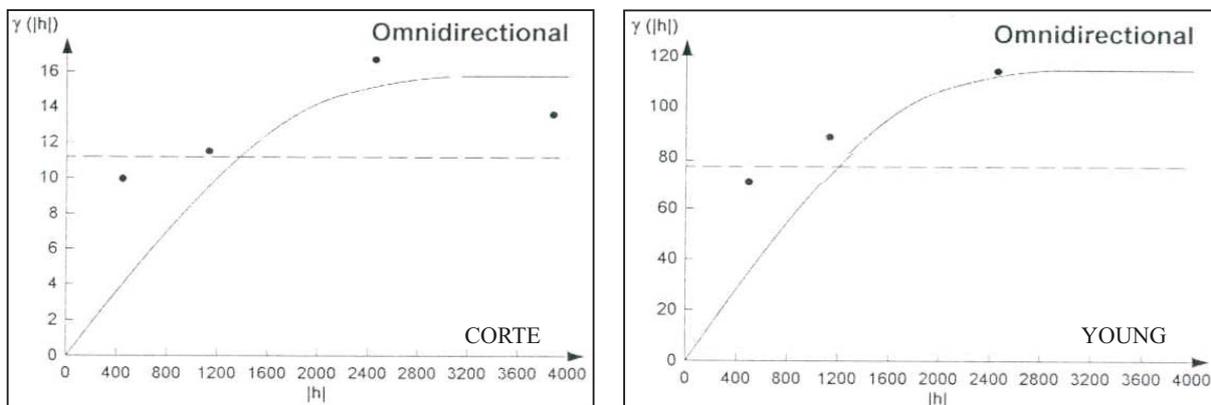


Figura 3. Variograma teórico (tipo esférico) de las variables a estimar.

proporciona una mejor estimación, cuando una de las variables a considerar presenta un menor número de muestras que la otra correlacionada con ella. Constituyendo el Cokriging, una técnica de estimación lineal que explota la relación cruzada entre distintas variables [3]. Además, la recomendación es usar el Cokriging cuando la variable secundaria está muestreada en todos los puntos donde se pretende estimar la variable primaria, para reducir así el tamaño de los sistemas de ecuaciones a resolver [13].

El análisis Cokriging se llevó a cabo a través del software geoestadístico Toolbox, desarrollado por Roland Froidevaux de FSS Internacional, con el cual se realizó la estimación de los valores faltantes de las variables Corte y Young, ejecutándose con los datos indicados en la Tabla 6, los cuales se obtienen a partir de los variogramas teóricos de las variables N, Qa, Corte y Young.

Estos datos, junto con las coordenadas de los 30 puntos muestreados, la definición de la elipse de investigación, el número de cuadrículas y el ángulo entre el eje mayor de la elipse y el eje X, son procesados por el Toolbox para la estima-

ción de otros datos e inferir un valor en función de la relación existente entre las variables N y Qa.

Discusión de Resultados

Los valores estimados de Corte y Young por el programa Toolbox en los puntos del 12 al 30, están basados en el análisis geoestadístico Cokriging, cuyos resultados se muestran en la Tabla 7.

No obstante, se considera que el Cokriging presenta algunas dificultades prácticas, por la falta de modelos teóricos para representar la covarianza o el semivariograma entre variables [3]. Sin embargo, empleándose un modelo lineal, la varianza de estimación con Cokriging, no es menor que la varianza obtenida con el Kriging por separado de cada una de las variables [11], como lo muestran las Figuras 4 y 5, construidas con los valores estimados.

Con el objetivo de validar los valores obtenidos a través del análisis de Cokriging, se compara los valores determinados en la Tabla 7, con los calculados por medio de los programas estadísti-

Tabla 6
Parámetros medidos a partir de los variogramas teóricos (Tipo esférico)

N	1ra. estructura	2da. estructura
Dirección	331,8	317,6
Rango	2352,9	2902
Meseta	84,71	176,25
Qa	1ra. estructura	2da. estructura
Dirección	218,8	254,1
Rango	2588,2	2274,5
Meseta	0,3235	0,628
Corte	1ra. estructura	2da. estructura
Dirección	204,7	310,6
Rango	2509,8	3058,8
Meseta	9,65	15,890
Young	1ra. estructura	2da. estructura
Dirección	289,4	268,2
Rango	2980,4	2039,2
Meseta	58,12	116,59

Tabla 7
Distribución de datos de las variables muestreadas y estimadas geoestadísticamente para los puntos cuyas variables Corte y Young eran desconocidos

N°	Norte	Este	N	Qa (Kg/cm ²)	Corte (Kg/cm ²)	Young (Kg/cm ²)
12	19508,57	50904,28	80	1,5	11.023	30.741
13	18194,28	49704,28	80	2	10.478	28.984
14	19142,86	50630	80	1,7	10.805	30.038
15	19040	50087,14	75	3	8.294	22.606
16	18982,86	50995,71	80	3	9.390	25.471
17	18948,47	50424,29	80	2	10.478	28.984
18	19634,26	51624,29	65	3,5	5.558	15.120
19	19051,43	50321,43	70	1,8	8.505	23.657
20	18971,43	50104,29	75	1,75	9.655	26.998
21	18891,43	49898,57	80	3	9.390	25.471
22	18754,29	49652,86	70	1,5	8.831	25.011
23	18320	49224,28	47	0,7	4.661	14.643
24	17520	48218,57	65	2	7.191	20.390
25	17908,57	48675,71	55	2,5	4.456	12.903
26	17731,43	48355,71	58	2,1	5.548	16.027
27	17462,86	48007,14	63	2,6	6.099	17.136
28	17405,71	48527,14	63	3	5.664	15.731
29	17771,43	49235,71	80	2	10.478	28.984
30	18628,57	49647,14	80	1,5	11.023	30.741

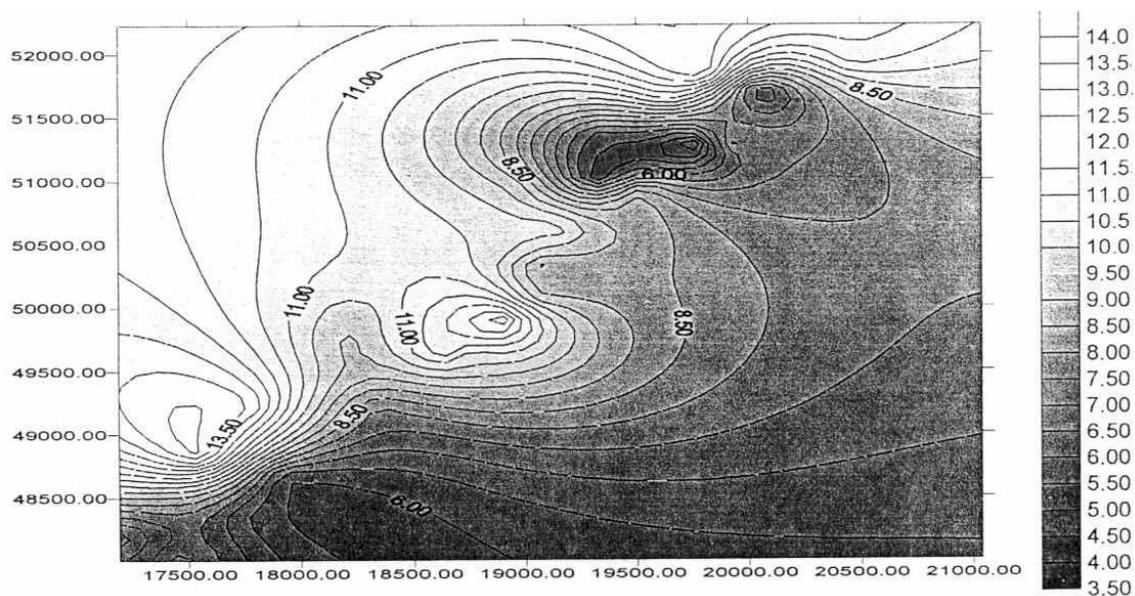


Figura 4. Resultado del Kriging de la variable Corte.

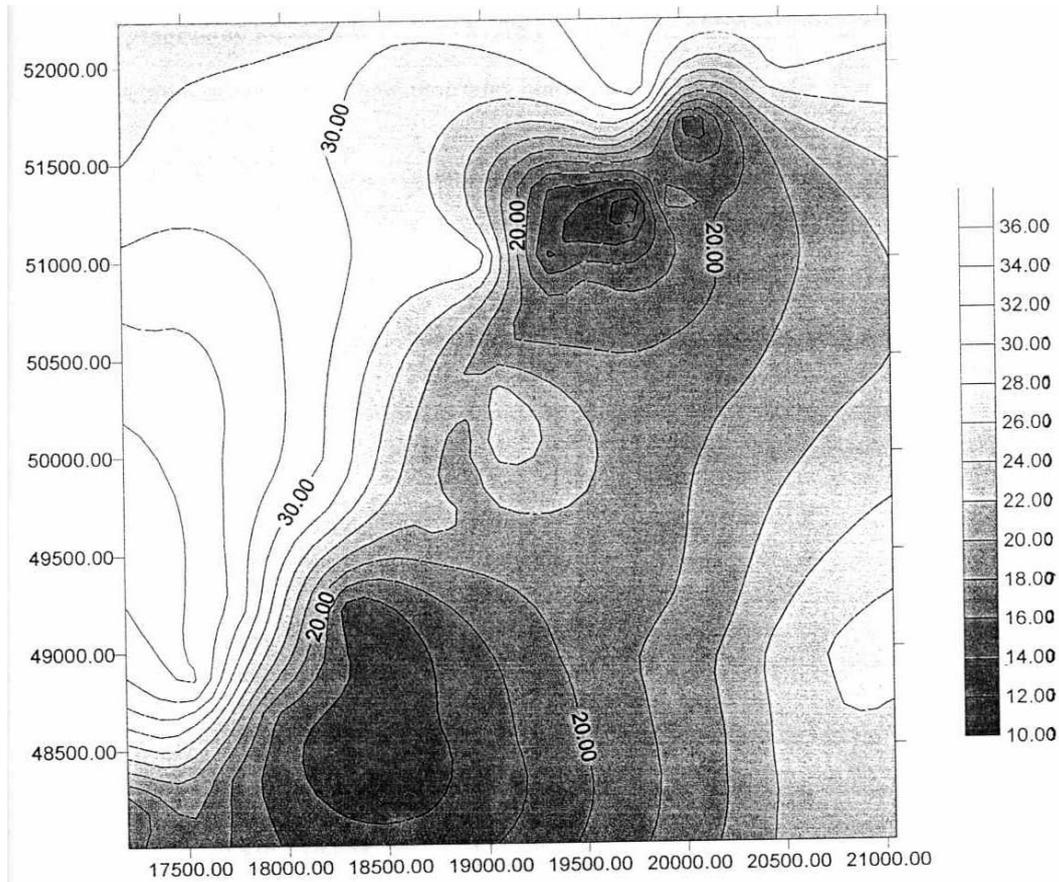


Figura 5. Resultado del Kriging de la variable Young.

co y matemático, Statgraphics® y MatLab®, respectivamente. Y por medio del MatLab se calculó el siguiente sistema matricial:

$$Y_p = X_p * B \tag{2}$$

donde Y_p es la matriz de los valores estimados para los puntos 12 al 30; X_p es la matriz conformada por los valores de N y Q_a de los puntos a estimar; y B es la matriz constituida con los coeficientes obtenidos a partir de la corrida del programa Statgraphics.

Por lo que, una vez desarrollada la multiplicación matricial se obtienen los coeficientes de la matriz Y_p , es decir:

$$Y_p = \begin{bmatrix} 11023 & 30.741 \\ 10.478 & 29.984 \\ 10.805 & 30.038 \\ 8.294 & 22.606 \\ 9.290 & 25.471 \\ 10.478 & 28.984 \\ 5.558 & 15.120 \\ 8.505 & 23.657 \\ 9.655 & 26.998 \\ 9.390 & 25.471 \\ 8.831 & 25.011 \\ 4.661 & 14.643 \\ 7.191 & 20.390 \\ 4.456 & 12.903 \\ 5.548 & 16.027 \\ 6.099 & 17.136 \\ 5.664 & 15.731 \\ 10.478 & 28.984 \\ 11023 & 30.741 \end{bmatrix}$$

Los valores de la matriz Y_p corresponden a los mismos valores obtenidos por el análisis de Cokriging y mostrados en la Tabla 7, lográndose

la validación del mismo. Por lo que se puede expresar una función de estimación

$$\text{Corte} = 0,219146*(N) - 1,088388*(Qa) - 4,876478 \quad (3)$$

$$\text{Young} = 0,572988*(N) - 3,513149*(Qa) - 9,828265 \quad (4)$$

para las variables Corte y Young, y por medio de ésta, obtener estos parámetros en los puntos faltantes dentro del área de estudio [14].

Conclusiones

La Geoestadística, permitió inferir los valores de las variables geotécnicas Corte y Young de 19 puntos a los cuales se les desconocía, en función de las medidas conocidas de un conjunto suficiente de otros puntos. Comprobando, que la técnica de correlación Kriging, puede generar un número arbitrario de realizaciones que son estadísticamente confiables dentro del campo aleatorio real y constituir, representaciones igualmente verosímiles de la variable estudiada, concibiéndose esta como un integrador de datos [11].

Conjugando la información geofísica (refracción sísmica o resistividad) y geotécnica (ensayos SPT), con rapidez, eficiencia y economía en las labores de estudio de suelo, se puede obtener un cálculo de parámetros elásticos más confiables, que permiten una mayor exactitud en la modelación sísmológica de un área en particular.

Referencias Bibliográficas

- Hernández G. "Estudio geofísico de suelo en la construcción civil". Rev. Boletín Cartografía y Geodesia, Vol. 3, No. 12, (1990), 23-25.
- Bowles J. "Propiedades geofísicas de los suelos". Mc Graw Hill, Bogotá-Colombia (1982).
- Isaaks E. y Srivastava R. "An introduction to applied Geostatistics". Oxford University, New York, (1989).
- Deponte J., Paz A., Tabeada M. y Viera s. "Variabilidad espacial de la conductividad hidráulica saturada de campo medida con permémetro Guelp". Mem, V Jornadas sobre investigación en zona no saturada, España, (2001).
- Herrera J. "Estabilidad relativa de los taludes de la terraza de Mérida". Mem. II Congreso Venezolano de Geografía, Mérida, (1990).
- Alonso J. "Microzonificación sísmica de Mérida". Inf. Mindur, Caracas, (1977).
- Fimlay C. "Estudio microsísmico del sector comprendido entre la carretera Panamericana y la avenida Las Américas de la ciudad de Mérida". Tesis de Maestría en Ingeniería Geofísica, División de Postgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Maracaibo, (1990).
- Gentoiu M., Acosta J., Hernández J. y Lavaut W. "Geostatística aplicada a la integración de los métodos geoelectricos en el cálculo de reservas de yacimientos lateríticos". Mem. XII Congreso Venezolano de Geofísica, Caracas, (2004).
- Fimlay C. "Construcción de una curva sintética SPT a partir de datos Geofísicos". Rev. Boletín Cartografía y Geodesia, Vol. 2, No. 3-89, (1989), 37-42.
- González E., Mukerj T., Takahashi I., Avseth P. y Mauro G. "Combinando Física de Rocas, reconocimiento de patrones, sísmica y Geostatística para reducir la incertidumbre en la caracterización de yacimientos". Mem. X Congreso Venezolano de Geofísica, Caracas (2000).
- Hernández T. "Simulación de yacimientos mediante técnicas geoestadísticas, yacimiento eoceno B inferior VLG-3659, área 7, campo Ceuta". Inf. Maraven, Gerencia de Exploración, Caracas (1995).
- Pannatier Y. "Variowin. Statistics and computing". Springer, New York, (1996).
- Deutsch C. y Journel A. "GSLIB. Geostatistical software library and User's Guide". Second Edition, Oxford University Press, New York, (1977).
- Zabala J. "Análisis geoestadístico espacial de parámetros antisísmicos y de construcción civil en un sector vial de la ciudad de Mérida". Tesis de Maestría en Ingeniería Geofísica, División de Postgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Maracaibo, (1999).

Recibido el 22 de Enero de 2007

En forma revisada el 21 de Abril de 2008