

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA POROSIDAD EFECTIVA EN EL HORIZONTE TOBAS FINAS DEL YACIMIENTO PINA, CIEGO DE AVILA

STRUCTURAL ANALYSIS OF EFFECTIVE POROSITY IN A FINE TUFF LAYER OF PINA OILFIELD, CIEGO DE AVILA

ARELYS QUINTERO SILVERIO

Departamento de Matemática. Universidad de Pinar del Río.
E-mail: arelys@tele.upr.edu.cu

JOSE QUINTIN CUADOR GIL

Departamento de Computación. Universidad de Pinar del Río.

RESUMEN: El análisis del comportamiento espacial de los parámetros que intervienen en el cálculo de reservas en un yacimiento petrolífero es de particular importancia para la aplicación de los métodos geoestadísticos. Estos métodos recién han sido introducidos en la industria del petróleo, lo cual ha reportado resultados exitosos; sin embargo, en Cuba no son ampliamente usados. Ellos tienen como objetivo revelar las características de variabilidad y correlación espacial del fenómeno y, a partir de éstas, predecirlo en todo su dominio.

Mediante el empleo de la estadística descriptiva se realiza el análisis estructural de la porosidad efectiva en el horizonte productivo de Tobas Finas del yacimiento Pina, el cual incluye las pruebas de bondad de ajuste para chequear la normalidad. La estadística descriptiva reveló un comportamiento homogéneo y los semivariogramas calculados presentan estructuras definidas, lo que refleja un comportamiento anisotrópico en las direcciones 155° y 65° (considerando 0° al este y girando en contra de las manecillas del reloj). Se obtiene el modelo que describe la continuidad espacial del atributo, el cual muestra correspondencia con la geología del área estudiada.

Palabras claves: geoestadística, análisis estructural, semivariograma, anisotropía.

ABSTRACT: The analysis of the spatial structure of those parameters involved in oil reserve estimation is of particular importance for the application of geostatistical methods. These methods have been recently introduced in the oil industry with great success, however, they are not widely applied in Cuba. The main objective of geostatistics is to reveal the variability characteristics and spatial correlation of phenomena and from this to predict them.

In this paper by means of descriptive statistical analysis is performed the structural analysis for effective porosity in Fine Tuff layer, this analysis includes goodness of fit test to check for normality, the results show that the parameter has an homogeneous behaviour in the study layer. The structural analysis is made making use of experimental variograms, anisotropy studies and fitting theoretical models, the result is a model which describes the attribute's spatial behaviour. This model shows a very good agreement with the known geology of the area.

Key words: Geostatistics, Structural Analysis, Semivariogram, Anisotropy.

INTRODUCCIÓN

El análisis del comportamiento espacial de los parámetros que intervienen en el cálculo de reservas en un yacimiento gasopetrolífero es de particular importancia para la aplicación de los métodos geoestadísticos, los cuales aportan los elementos necesarios que permiten realizar la estimación de los parámetros a partir de sus características de continuidad espacial. Estos métodos han sido introducidos recientemente en la industria del petróleo, lo que ha reportado resultados exitosos; sin embargo, en Cuba no son usados ampliamente. El objetivo de su aplicación es revelar las características de variabilidad y correlación espacial del fenómeno y, a partir de éstas, predecirlo en todo su dominio.

El yacimiento Pina, localizado en el municipio de Majagua, provincia de Ciego de Ávila, es uno de los descubrimientos más recientes en la esfera de la exploración petrolera en Cuba. Abarca un área de 5 255 km², es de origen vulcanógeno-sedimentario y está formado por pliegues sobrecorridos divididos en bloques por fallas normales de desplazamiento y fallas inversas (Álvarez Castro y otros, 1996), lo que hace más difícil su estudio. El reservorio es de tipo fracturado-poroso y en ocasiones fracturado, donde los poros de la matriz son fundamentalmente por lixiviación y por microfracturas, y son estas últimas las que presentan mayor comunicación con las macrofracturas. En este caso, la porosidad tiene un carácter secundario y son las fracturas precisamente las que poseen mayor capacidad de almacenaje, y las que

aportan toda la porosidad y permeabilidad al reservorio. La porosidad efectiva es la fracción de volumen de roca que está saturada de fluido o la capacidad de almacenaje de la roca que tiene en cuenta la interconexión entre los granos (Austin & Lamb, 1994).

Durante la construcción del mapa de contorno se asume que la entidad mapeada varía continuamente a través del área de estudio, excepto en la presencia de fallas y discontinuidades. Dos pozos que estén próximos uno del otro deben tener la misma probabilidad de éxito y nivel de producción, pero ¿es cierta esta aseveración? ¿Cómo puede ser caracterizada la relación que existe entre los atributos medidos en dos pozos? ¿Son suficientes los puntos de control disponibles? En el pasado, los geólogos carecían de las herramientas estadísticas para responder estas cuestiones (Hohn, 1988). En la actualidad se ha incrementado el uso de modelos estocásticos en la caracterización de reservorios (Galli & Beucher, 1997), lo cual ha reportado buenos resultados para la industria del petróleo.

El objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento espacial del atributo porosidad efectiva en la zona correspondiente al horizonte productivo Tobas Finas, mediante el empleo de la estadística descriptiva y el cálculo de los semivariogramas.

EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL

El análisis del comportamiento espacial de un atributo (análisis estructural) permite medir su autocorrelación espacial, lo cual significa la correlación de una variable con ella misma trasladada en el espacio a una distancia determinada y, por tanto, permite describir la naturaleza espacial y la calidad de la matriz de datos originales para posteriormente describir el comportamiento de la variable en el espacio. El semivariograma es la herramienta geoestadística básica para visualizar, modelar y explorar la autocorrelación espacial de una variable regionalizada. Como su nombre lo indica es una medida de la semivarianza entre los pares de datos separados a una distancia *h*, la cual puede ser analizada de forma global o en una dirección particular (Armstrong & Carignan, 1997).

La filosofía básica para el desarrollo del análisis estructural es obtener primero la variabilidad a escala global y, posteriormente, concentrarse en las direcciones que presentan comportamientos diferentes de la continuidad espacial, todo esto sucedido del ajuste de modelos teóricos de variogramas autorizados teniendo en cuenta elementos como: el incremento y la tolerancia lineal en el cálculo de los semivariogramas experimentales, las direcciones en que son calculados con sus correspondientes tolerancias, que la cantidad de valores calculados sea tal que permita el análisis de la variabilidad hasta aproximadamente la mitad de la distancia máxima entre los datos. Otro elemento importante es la cantidad de pares que intervienen en cada valor calculado del semivariograma, con relación a lo cual Journel and Juijbregts (1978) sugieren que debe ser mayor de treinta para que sean significativos; esta sugerencia es difícil de seguir en investigaciones con un pequeño número de muestras disponibles, como ocurre con frecuencia en los trabajos relacionados con la

Tabla 1. Resultados de la estadística descriptiva de la porosidad (%)

N	Media	Mediana	X _{min}	X _{máx}	Varianza	Desv. Típica	Simetría	Curtosis
40	4,76	4,41	1,45	11,49	4,92	2,22	1,6	1,68

actividad petrolera, donde en ocasiones un número de treinta muestras es suficiente (Honh, 1988; Rhea et al., 1994) para obtener resultados aceptables.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se analizaron los datos de porosidad en cuarenta pozos situados de forma bastante regular en una red de 200 x 200 m. La porosidad efectiva se determinó a partir de la interpretación de los registros geofísicos (neutrón y eléctricos); la misma mostró fuertes correlaciones con los análisis de núcleos en los laboratorios de petrofísica (Mateo y otros, 1998).

Inicialmente se realizó un análisis exploratorio de datos, que consistió en la detección de valores anómalos, el estudio de la estadística descriptiva (Tabla 1) y el chequeo de la normalidad a través de las pruebas estadísticas de bondad de ajuste. Esto es debido a que la Geoestadística exige estacionaridad en la información que procesa, la cual se puede reflejar mediante la homogeneidad en la misma y una de las formas de chequearla es la comprobación de la normalidad en el comportamiento de las variables que intervienen en el fenómeno.

Con posterioridad se desarrolló el análisis estructural, consistente en el estudio de los semivariogramas en las diferentes direcciones y el análisis de anisotropía. A partir del mapa base (Fig. 1) se puede obtener la distancia de máxima separación entre los valores observados, que en nuestro caso es de 2 616,90 m en la dirección noroeste y 1 494,59 m en la dirección noreste. Los semivariogramas se calcularon hasta aproximadamente la mitad de la mayor de estas distancias, y fue de interés sólo hasta la mitad de la distancia máxima según la dirección que se analice, ya que a partir de ésta la cantidad de pares comienza a disminuir y los valores del semivariograma dejan de ser significativos. Debe quedar claro que dependiendo de la configuración espacial de los datos, ellos pueden ser calculados hasta una distancia superior, si se tiene en cuenta que los pares sean suficientes

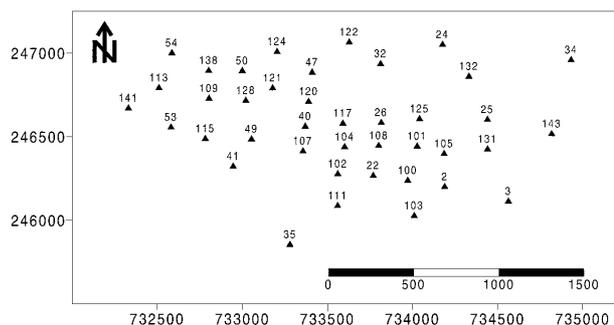


Figura 1. Mapa base.

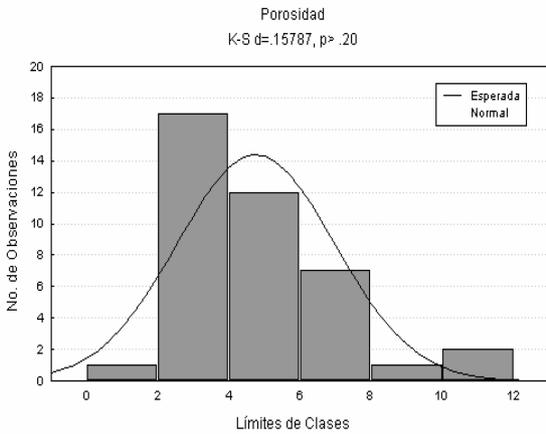


Figura 2. Histograma y prueba de bondad de ajuste para la porosidad.

y comparables con los valores calculados del semivariograma en puntos anteriores.

El paso o incremento utilizado fue de 218 m, que coincide aproximadamente con el promedio de las distancias entre las muestras contiguas. Se calcularon 6 puntos en el semivariograma, lo que hace que la variabilidad sea analizada hasta 1 308 m (alrededor de la mitad de la distancia máxima entre los datos), distancia dentro de la cual la información aportada es significativa.

Con el objetivo de obtener la variabilidad en las distintas direcciones se desarrolló el análisis de anisotropía, para lo cual se calculó el mapa del variograma, cuyo aspecto no permite determinar fácilmente direcciones con diferente comportamiento espacial. Se procedió entonces a calcular los semivariogramas en distintas direcciones, separados a 22,5° con tolerancia angular de 45°, usando siempre el mismo incremento y cantidad de puntos. Por último, se efectuó el ajuste de modelos teóricos autorizados (Armstrong & Carignan, 1997) que mejor reflejaban el comportamiento de la variabilidad espacial del atributo en el área estudiada.

RESULTADOS

El análisis de la estadística descriptiva de la porosidad efectiva no reportó valores anómalos y puede apreciarse que tanto la media como la mediana tienen valores bastante cercanos. Se observa un comportamiento asimétrico muy débil y una leve leptocurtosis en la distribución de los datos que no difiere mucho de la distribución normal (ver Tabla 1). Como se aprecia en la figura 2, la prueba Kolmogorov-Smirnov no es significativa para un $\alpha=0,05$, y se puede aseverar de esta forma que la porosidad efectiva sigue una distribución normal y es posible entonces partir del supuesto de homogeneidad en la zona para acometer el análisis estructural.

La figura 3 muestra que no en todas direcciones se alcanza la varianza de los datos a igual distancia. Obsérvese que en las direcciones 157,5° y 67,5° se obtienen la mayor y menor continuidad, respectivamente, es decir, la menor y mayor variación del parámetro estudiado a través del espacio. Un análisis exhaustivo alrededor de estas direcciones permitió obtener finalmente los semivariogramas (Fig. 4) en las direcciones 155° (D1) y 65° (D2),

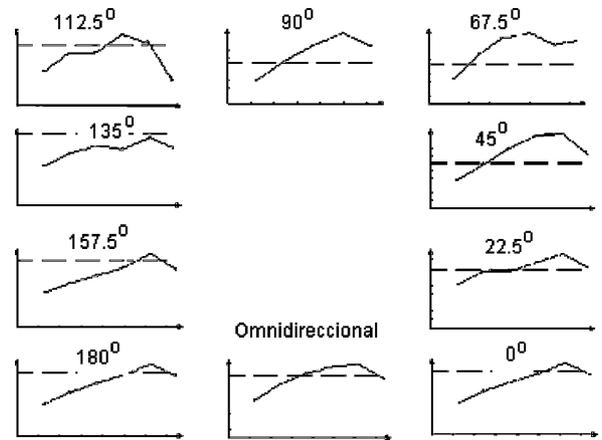


Figura 3. Semivariogramas en diferentes direcciones.

los cuales describen de forma experimental el comportamiento anisotrópico del atributo estudiado.

El hecho de que los semivariogramas tiendan a cortar el origen de coordenadas hace pensar en la presencia de un fenómeno continuo. Con el objetivo de explicar esto se calcularon semivariogramas para distancias inferiores a la predominante entre las muestras contiguas, y se manifestó igual tendencia.

En la figura 4 se aprecian estructuras definidas en las direcciones analizadas; la apariencia general es de que ambas estructuras se estabilizan para una misma distancia con diferentes contribuciones, y se presenta una anisotropía zonal, la cual definen Journel & Juijbregts (1978). Se realizó el ajuste de un modelo anidado como se presenta en Deutsch & Journel (1998), constituido por la suma de dos modelos esféricos para cada dirección (ver Fig. 4), que se describe a través de la expresión siguiente:

$$\gamma(h)_{xy} = 3,2 \text{ Sph}(10000,900) + 4 \text{ Sph}(560,440)$$

En la expresión, Sph significa esférico, y sus argumentos el alcance en las direcciones de mayor (10 000 y 560) y de menor (900 y 440) continuidad. Los coeficientes 3,2 y 4 son las mesetas de los modelos.

Note que en semivariograma D2 las distancias mayores que la mitad de las dimensiones del área de estudio en esta dirección no se consideran por varias razones:

- El número de pares decrece.

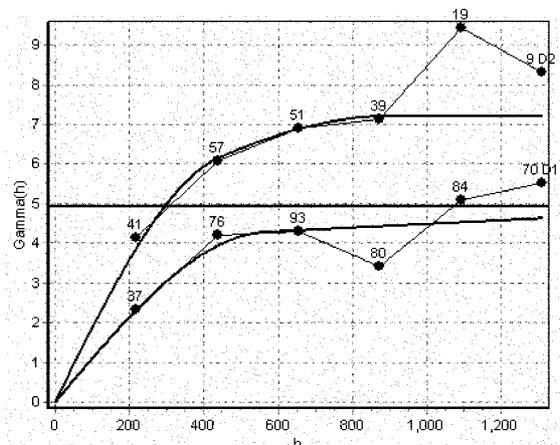


Figura 4. Semivariogramas en las direcciones D1 (155°) y D2 (65°). Modelo anidado ajustado.

- La información que se exhibe deja de ser significativa.
- La mayoría de las aplicaciones de mapeo, según la Geostatística, no utilizan la información del semivariograma más allá de la distancia a la cual los valores observados no se encuentran correlacionados espacialmente.

El modelo propuesto fue validado según el procedimiento de la validación cruzada, donde cada dato original observado es sucesivamente omitido de forma temporal y su valor reestimado a partir del resto, por lo que se obtiene un error en cada localización dado por las diferencias entre valores observados y estimados. Dentro de los criterios más utilizados que prueban la bondad del ajuste se encuentran la media de los errores de estimación ($E[Z^* - Z]$), la media de los errores de estimación estandarizados ($E[(Z^* - Z) / S^*]$) y la varianza de los errores estandarizados ($\text{Var}[(Z^* - Z) / S^*]$). En este caso se obtuvieron los valores siguientes:

$$E[Z^* - Z] = 0,06 \quad E[(Z^* - Z) / S^*] = 0,03$$

$$\text{Var}[(Z^* - Z) / S^*] = 1,38$$

Los resultados anteriores muestran que el modelo seleccionado describe correctamente las características de variabilidad espacial del fenómeno. La dirección de máxima continuidad, obtenida a partir del análisis estructural para la porosidad efectiva, coincide con la dirección de máxima fracturación detectada en estudios geológicos recientes (Sosa, 2000), es decir, el comportamiento del parámetro bajo estudio está muy ligado a la tectónica del yacimiento. Este modelo será utilizado posteriormente en el proceso de estimación de la porosidad efectiva mediante el procedimiento Kriging que, como describe la literatura (Armstrong & Carignan, 1997; Journel & Juijbrechts, 1978), es clasificado como el mejor estimador lineal insesgado, cuyo sesgo depende en gran medida de la calidad del análisis estructural realizado. También es posible obtener un estimado de las varianzas de krigeage como medida del error de estimación, que constituye un indicador fundamental de la calidad de las estimaciones realizadas y es el que a su vez propone la necesidad o no de densificar la red de muestreo utilizada.

CONCLUSIONES

Mediante el estudio realizado se probó la existencia de homogeneidad estadística de la porosidad efectiva en el horizonte productivo Tobas Finas del yacimiento Pina, demostrada a través de las pruebas de bondad de ajuste y la estadística descriptiva. En el análisis de anisotropía desarrollado, los semivariogramas experimentales muestran estructuras definidas en las direcciones 155° - 65° , y se presenta una anisotropía zonal, que ha sido tenida en cuenta en la modelación espacial del fenómeno estudiado, para lograr como resultado fundamental, la obtención de un modelo que describe fielmente las características de variabilidad y correlación espacial del atributo porosidad efectiva. El modelo obtenido está formado por una estructura imbricada, compuesta por la suma de dos modelos esféricos para las direcciones de mayor y menor

continuidad, el cual fue validado y arrojó valores aceptables de los criterios de calidad según el método de la validación cruzada. Los resultados serán utilizados en la estimación de la porosidad efectiva en el área de interés del yacimiento, con el empleo del procedimiento Kriging, el cual tiene su base en la correcta determinación de las características de continuidad espacial del fenómeno estudiado.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible por la cooperación del Departamento de Exploración Producción de Cuba Petróleo (CUPET), especialmente guiado por el Dr. Rafael Álvarez y los compañeros de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo de Majagua. El desarrollo de las ideas aquí presentadas ha sido enriquecido por la valiosa colaboración de las ingenieras Odalys Reyes Paredes y Maritza Rodríguez Viera, del Centro de Investigaciones del Petróleo (CEINPET).

BIBLIOGRAFÍA

- ÁLVAREZ CASTRO, J. y otros: "Modelo geológico del yacimiento Pina", CEINPET, 1996.
- AUSTIN, B. & C.F. LAMB: "Determination of Oil and Gas Reserves", Petroleum Society Monograph no. 1, Petroleum Society of the Canadian Institute of Mining Metallurgy and Petroleum, Calgary, Section 5.4, 1994.
- HOHN, M. E.: Geostatistics and Petroleum Geology, Van Nostrand Reinhold, New York, 1988.
- JOURNEL, A. G. & C. J. JUIJBREGTS: Mining Geostatistics, Academic Press, New York, 1978.
- MATEO, J. A. y otros: "Cálculo de reservas del yacimiento Pina" Proyecto 2121, CEINPET, 1998.
- ARMSTRONG, M. & J. CARIGNAN: Géostatistique Linéaire, Application au Domaine Minier, École des Mines de Paris, Fontainebleau, France, 1997.
- CHRISTAKOS, G. & V. R. RAGHU: "Dynamic Stochastic Estimation of Physical Variables" Mathematical Geology 28 (3): 34-365, 1996.
- DE FOUQUET, C.: Quelques Rappels Sur les Méthodes Géostatistiques, Centre de Géostatistique, École des Mines de Paris, Fontainebleau, France, 1996.
- DEUTSCH, C. V. & A. G. JOURNEL: GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide, Second Edition, Oxford University Press, 1998.
- GALLI, A. & H. BEUCHER: "Stochastics Models for Reservoir Characterization: A user Friendly Review", 7 pp., Fifth Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference and Exhibition held in Rio de Janeiro, Brazil, 30 August- 3 September, 1997.
- LAJAUNIE, C.: Iterative Cross Validation, 8 pp., Centre de Géostatistique, École des Mines de Paris, France, 1997.
- MATHERON, G.: "La Théorie des Variables Regionalisées et ses Applications", Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, Fascicule 5, École des Mines de Paris, 1970.
- MOULIÈRE, D.: "Integration D'Information Sismique pour la Simulation de Réservoirs", [Thèse de Docteur en Géostatistique], Centre de Géostatistique, École des Mines de Paris, France, 1998.
- PAWLOWSKY, V., R. A. OLEA & J. C. DAVIS: "Estimation of Regionalized Composition: A Comparison of Three Methods", Mathematical Geology 27 (1): 105-127, 1995.
- RHEA, L., M. PERSON, G. DE MARSILY: "Geostatistical models of secondary oil migration within heterogeneous carrier beds: a theoretical example", AAPG Bulletin 78 (11): 1679-1691, 1994.
- SOSA, C.: "Modelo hidrodinámico del yacimiento Pina", Memorias del V Congreso Cubano de Geofísica, Ciudad de La Habana, 2000.
- WACKERNAGEL, H.: Multivariate Geostatistic, an Introduction with application, Berlin Springer, 1995.