



APLICACIÓN DEL SOFTWARE "SGEMS" PARA LA MODELACIÓN GEOESTADÍSTICA Y LA ESTIMACIÓN DE LOS RECURSOS MINERALES. CASO DE ESTUDIO, DEPÓSITO ARCILLAS "MOJA HUEVA"

José Alberto Arias del Toro, Mabel Alejandra Pérez Campos

ONRM, Calzada 852 e/ 4 y 6. Vedado, Municipio Plaza de la Revolución., Cuba, jose@onrm.minem.cu

RESUMEN

El yacimiento "Moja Hueva" es desde el punto de vista geológico un depósito areno-arcilloso y gravoso de génesis aluvial (E. Barrios, 1986) de edad Cuaternario (Holoceno), el cual posee una estructura, potencia y calidad de la materia prima variable debido a frecuentes cambios faciales horizontales y verticales de las litologías presentes.

A pesar de estar constituido litológicamente por las variedades tales como: arcillas plásticas, arcillas, arcillas arenosas, arenas arcillosas y arenas; en el yacimiento desde el punto de vista lito-tecnológico históricamente se han venido extrayendo dos tipos de materiales: las arcillas plásticas y arcillas que constituye el tipo lito-tecnológico I y las arcillas arenosas que constituyen el tipo II, excluyéndose las arenas arcillosas y arenas que constituye el material estéril que no presenta interés industrial.

Debido a la problemática anteriormente descrita, cuyo origen se vincula a los frecuentes cambios faciales entre las litologías existentes, ocasionan que la modelización espacial tridimensional del yacimiento resulte muy engorrosa por la vía tradicional, esto es, mediante la construcción de las envolturas ("Wireframes") a partir de la interpretación y digitalización manual.

Con la aplicación del software SGeMS (Remy y colaboradores, 2009), más específicamente del algoritmo geoestadístico de la Simulación Secuencial de Indicadores (SISIM), que es una técnica que permite la obtención de modelos simulados equi-probables para variables categóricas (o denominadas discretas desde el punto de vista numérico) basado en una óptica probabilística, fue posible modelar los tipos lito-tecnológicos presentes el yacimiento en una densa red de nodos de 5m x 5m x 1m por la vía de la simulación estocástica.

Como resultado final del trabajo se presenta el modelo lito-tecnológico tridimensional (3D) del yacimiento "Moja Hueva" en una red de puntos de 5m x 5m x 1m como producto de la composición de 20 escenarios equi-probables simulados.

ABSTRACT

The "Moja Hueva" is from the geological point of view, a sandy-clayish and gravel ore alluvial deposit (E. Barrios, 1986), formed in Quaternary period (Holocene), it has a structure, thickness and variable raw material quality due to the horizontal and vertical frequent facial changes.

Historically, two ores has been mined from litho-technological viewpoint, the "plastic clays ore" or litho-technological type I and the "clays sandy ore" or litho-technological type II, excluding the sandy clays and sands, due to that types, they have not industrial importance, being waste material.

The frequent facial lithological changes has been the cause of very difficult tridimensional ore body modeling by traditional style, that is, by means of the envelopes ("Wireframes") resulting from interpretation and manual digitalization.

Applying SGeMS (Remy and colleagues, 2004), more specifically from geostatistical algorithm of Sequential Indicator Simulation for categorical variables (discrete variables from numerical perspective), which allows to obtain equi-probables images, was possible modeling litho-technological types in a more dense gridded nodes of 5m x 5m x 1m by via stochastic simulation in a probabilistic framework.

The tridimensional (3D) "Moja Hueva" litho-technological model estimated is presented finally in a grid of points of 5m x 5m x 1m as result of present work, which has been obtained due to compositing 20 equi-probables simulated scenarios.



INTRODUCCIÓN

El yacimiento “Moja Hueva” es desde el punto de vista geológico un depósito areno-arcilloso y gravoso de génesis aluvial (Barrios y Linares, 1985) de edad Cuaternario (Holoceno), perteneciente a la formación Guevara (Q_{1-2} h), el cual posee una estructura, potencia y calidad de la materia prima variable debido a frecuentes cambios faciales tanto horizontales como verticales de las litologías presentes; donde la presencia de intercalaciones estériles dentro de la materia prima útil no obedece a determinada regla, sino, que la forma de ocurrencia es totalmente casual dentro de las arcillas (Vargas, 2014), es por esta causa que la modelización geológica espacial tridimensional del mismo resulta engorrosa y subjetiva por la vía tradicional, esto es, mediante la construcción de envolturas o “Wireframes” a partir de la interpretación y digitalización manual.

En el yacimiento desde el punto de vista lito-tecnológico históricamente se han venido extrayendo dos tipos de materiales: el tipo lito-tecnológico I (arcillas), que agrupa a las arcillas plásticas y arcillas, y el tipo lito-tecnológico II (desgrasante) que son las arcillas arenosas. Las arenas arcillosas y arenas constituyen el material estéril que no presenta interés industrial en el presente trabajo han sido agrupadas bajo la denominación de arenas.

Debido a la problemática anteriormente enunciada y a la necesidad de modelar los diferentes lito tipos como base para la estimación de los recursos minerales presentes, fue necesario aplicar una técnica probabilística que permitiera la construcción del modelo litológico del yacimiento “Moja Hueva”. Con el empleo y aplicación del software SGeMS (Remy y colaboradores, 2004), más específicamente del algoritmo geoestadístico de la Simulación Secuencial de Indicadores, se logró obtener tal modelo a partir de la composición de 20 escenarios equi-probables simulados de la distribución espacial de los lito-tipos presentes (arcillas, arcillas arenosas y arenas).

En el trabajo se presentan los resultados de la aplicación de la técnica geoestadística anteriormente enunciada, como solución a la problemática planteada y como basamento para la definición de los recursos minerales existentes en el yacimiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

La Metodología empleada para modelar los diferentes tipos lito-tecnológicos como base para definir los recursos minerales del yacimiento “Moja Hueva”, fue el empleo del método de la Simulación Secuencial Indicador de variables categóricas (Goovaerts, 1997; Deutsch y Journel, 1998), el cual se basa en el principio de la simulación estocástica, esto es, el proceso de construcción de modelos alternativos, igualmente probables (equi-probables), de alta resolución de la distribución espacial de un determinado atributo (Deutsch y Journel, 1998)

Desde el punto de vista conceptual, una variable Categórica se define como tal a aquella variable que toma valores en dependencia del predominio de una determinada categoría en una localización determinada. Se emplea generalmente para distinguir tipos de roca, presencia o ausencia de determinado atributo, etc.

La Simulación Secuencial Indicador de variables categóricas combina el formalismo de los indicadores con el paradigma secuencial, para simular una distribución categórica no paramétrica, en la cual se estima por Krigeaje Indicador la probabilidad de ocurrencia de una determinada litología (Remy, Boucher y Wu, 2009)

La estimación de la distribución de probabilidades se realiza a partir del estimador Krigeaje Indicador Simple (Pyrez y Deutsch, 2014):



$$p_{ik}^*(u, k) = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha}(k) \cdot [i(u_{\alpha}; k) - p(k)] + p(k)$$

$$k = 1, \dots, K$$

Dónde:

$p(k)$ - Valor esperado (probabilidad estacionaria de la categoría k conocida a priori)

$\lambda_{\alpha}(k)$ - Pesos del sistema Krigeaje Indicador Simple

$i(u_{\alpha}; k)$ - Probabilidad de que la categoría k esté presente en la localización u_{α} según:

$$i(u_{\alpha}; k) = \begin{cases} 1 & \text{la categoría } k \text{ está presente en } u_{\alpha} \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

Las probabilidades estimadas a partir del Krigeaje Indicador Simple deben cumplir (satisfacer) los requerimientos de una distribución de probabilidades, estas deben ser no negativas, definidas dentro del intervalo [0,1] y la suma de las probabilidades debe ser igual a 1.

$$\sum_{k=1}^K i(u_{\alpha}; k) = 1$$

ALGORITMO SISIM

El algoritmo de la Simulación Secuencial Indicador (SISIM) para variables categóricas desarrollado en el software SGeMS (Remy y otros, 2009), se describe a través de una serie de pasos los que a continuación se mencionan:

1. Crear una malla o red de nodos a simular en el espacio 3D
2. Definir un camino aleatorio a través de los nodos de la red a simular
3. En cada localización u (nodo) del camino aleatorio definido en 1:
 - a. Recuperar los datos condicionantes categóricos cercanos al nodo a simular.
 - b. Convertir cada dato recuperado $Z(u)_{\alpha}$ en un vector de Indicadores según $i(u, k) = 1$ si $Z(u) = K$; 0 sino; donde K es la categoría o tipo litológico.
 - c. Estimar la variable aleatoria indicador $I(u, k)$ para cada una de las K categorías mediante el sistema de Krigeaje. Los valores estimados $I^*(u, k) = \text{Prob}^* Z(u) = K$ definen la Función de densidad de la probabilidad condicional discreta (cpdf) de la variable categórica K .
 - d. Corregir los problemas de las relaciones de orden.



- e. Extraer la categoría simulada a partir de la cpdf obtenida utilizando un valor aleatorio uniformemente distribuido en el intervalo $[0,1]$.
 - f. Asignar la categoría simulada como dato a la localización u.
4. Los pasos precedentes se repiten para generar otra realización.

APLICACIÓN DEL ALGORITMO SISIM EN EL YACIMIENTO MOJA HUEVA.

Los pasos seguidos para la construcción del modelo lito-tecnológico del yacimiento Moja Hueva mediante el algoritmo SISIM fueron los siguientes:

1. Creación de un fichero de datos con la información obtenida de las perforaciones realizadas en la denominada "Zona 1", durante de la exploración del yacimiento (1822 muestras compósitos de 126 pozos perforados según una red de 50m X 50m)
2. Reclasificación lito-tecnológica de cada dato, a partir la clasificación tecnológica básica original (según los tipos tecnológicos A, B, C, D y X), en arcillas (A+B), arcillas arenosas (C+D) y arenas (X) y su agrupamiento mediante la técnica del análisis discriminante, utilizando las parámetros físico-mecánicos; "Agua Plástica", "Contracción a 900°C" y Resistencia a la presión por flexión a 900°C.
3. Creación de un vector de indicadores binarios $[0,1]$ por cada dato o compósito, que indica la ausencia o presencia (cero o uno respectivamente) de cada uno de los tipos lito-tecnológicos reclasificados, mediante la condición, $i(u, k) = 1$ si $Z(u) = K$; 0 sino; donde K es la categoría o tipo lito-tecnológico.
4. Análisis estructural (variográfico) de los indicadores de cada tipo lito-tecnológico. Estudio y definición de la anisotropía de los indicadores según las direcciones 0, 45, 90, 135 grados y pozo abajo.
5. Aplicación del algoritmo de la Simulación Secuencial Indicador de variables categóricas en una red de nodos de 5m x 5m x 1m para 20 escenarios equi-probables.
6. Validación de los datos simulados. Chequeo de reproductibilidad de las proporciones globales según los tipos lito-tecnológicos (arcillas, arcillas arenosas y arenas) y sus respectivos variogramas experimentales, contra el modelo teórico ajustado a los datos originales (compósitos).
7. Estimación de los tipos lito-tecnológicos en cada nodo de la red descrita en el paso 5, utilizando la frecuencia de aparición de cada uno de ellos según 20 escenarios equi-probables, asignándosele al nodo el tipo lito-tecnológico de mayor frecuencia de aparición que es por ende el de mayor probabilidad de ocurrencia.

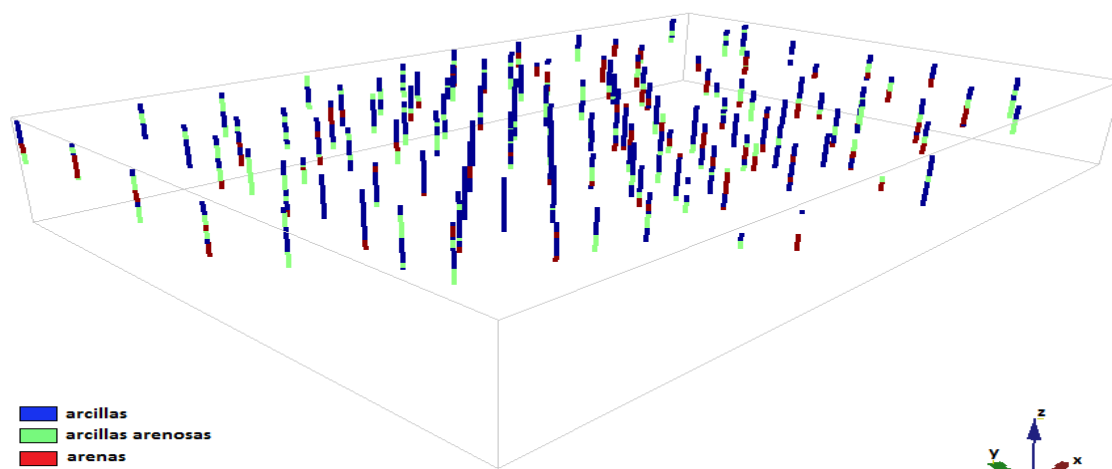


Figura 1- Vista 3D de los pozos exploratorios

RESULTADOS

El agrupamiento realizado por la vía del análisis discriminante (StatPoint Inc., 2005) permitió definir con mayor precisión los tipos lito-tecnológicos presentes a partir de la reclasificación realizada utilizando los parámetros físico-mecánicos tales como “Agua Plástica”, “Contracción a 900°C” y Resistencia a la presión por flexión a 900°C, mediante funciones discriminantes, determinando la pertenencia más probable de cada dato a un determinado tipo a través de las Funciones de clasificación.

Los coeficientes de las funciones de clasificación para cada tipo Lito-tecnológico determinado por análisis discriminante fueron los siguientes:

Tabla I Coeficientes de las funciones de clasificación por tipos Lito-tecnológicos

Parámetros	Arcillas	Arcillas arenosas	Arenas
Agua plástica	1.740	1.636	1.655
Contracción a 900°C	-2.367	-2.562	-2.947
LN(Resistencia a la presión por flexión a 900°C)	19.935	17.635	16.336
Constante	-52.939	-41.521	-36.604

Mediante esos coeficientes fue posible determinar para cada dato, la probabilidad de su pertenencia a un determinado tipo-lito tecnológico a través de la expresión:

$$\text{Probabilidad} = \text{constante} + c_{AP} \cdot X_{AP} + c_{CT} \cdot X_{CT} + \ln(c_{RP}) \cdot X_{RP}$$

Dónde: c_{AP} , c_{CT} , c_{RP} , son coeficientes de las funciones de clasificación para los parámetros Agua Plástica, Contracción a 900°C y logaritmo natural de Resistencia la presión por flexión a 900°C respectivamente (tabla I), X_{AP} , X_{CT} , X_{RP} son los valores de estos parámetros físico-mecánicos de la muestra compósito.



Tomando como base el agrupamiento y consecuentemente la clasificación lito-tecnológica realizada por análisis discriminante, seguidamente se codificó cada compósito (muestra) con los indicadores binarios correspondientes según el lito-tipo presente (uno para el lito-tipo presente y cero para el resto); realizándose posteriormente el análisis variográfico de tales indicadores.

De acuerdo con los resultados del análisis variográfico de los indicadores de los tipos lito-tecnológicos presentes en el yacimiento Moja Hueva, los semi-variogramas experimentales horizontales estimados según las direcciones de 0, 45, 90 y 135 grados, revelan la no existencia de anisotropía y por lo tanto el fenómeno regionalizado puede considerarse isótropo a gran escala, esto es, para distancias mayores o iguales a 50 metros, con alcances observados que oscilan entre 45m y 800m, con un efecto pepita prominente según esas direcciones, denotando que los lito-tipos cambian muy rápidamente y por ende existe una baja correlación espacial según estas direcciones. A diferencia, los semi-variogramas verticales (pozo abajo) están bien estructurados, poseen alcances entre 5m y 24m con efecto pepita considerablemente disminuido en relación con los semi-variogramas horizontales. (Figura 2)

Las funciones estructurales ajustadas a los semi-variogramas experimentales indicadores de los tipos lito-tecnológicos son las siguientes:

Arcillas

$$\gamma(h_x, h_y, h_z) = 0.04 + 0.16 \text{ Esférico } \left(\frac{h_x}{45} \right) + \left(\frac{h_y}{45} \right) + \left(\frac{h_z}{5} \right) + 0.05 \text{ Exponencial } \left(\frac{h_x}{800} \right) + \left(\frac{h_y}{800} \right) + \left(\frac{h_z}{5} \right)$$

Arcillas arenosas

$$\gamma(h_x, h_y, h_z) = 0.04 + 0.11 \text{ Esférico } \left(\frac{h_x}{70} \right) + \left(\frac{h_y}{70} \right) + \left(\frac{h_z}{5} \right) + 0.05 \text{ Exponencial } \left(\frac{h_x}{800} \right) + \left(\frac{h_y}{800} \right) + \left(\frac{h_z}{5} \right)$$

Arenas

$$\gamma(h_x, h_y, h_z) = 0.02 + 0.07 \text{ Esférico } \left(\frac{h_x}{66} \right) + \left(\frac{h_y}{66} \right) + \left(\frac{h_z}{2.5} \right) + 0.06 \text{ Exponencial } \left(\frac{h_x}{672} \right) + \left(\frac{h_y}{272} \right) + \left(\frac{h_z}{24} \right)$$

Las funciones estructurales precedentes, fueron utilizadas para simular por el algoritmo de la Simulación Secuencial de Indicadores (SISIM) los tipos lito-tecnológicos en 775,269 puntos del espacio tridimensional, distribuidos según una red regular de tamaño 5m x 5m x 1m que cubre volumétricamente el yacimiento "Moja Hueva". Se simularon 20 escenarios equi-probables, creándose finalmente el modelo lito-tecnológico 3D del yacimiento a partir de la composición de los escenarios simulados, empleando como criterio de asignación lito-tecnológica a los puntos, las frecuencias de aparición de los lito-tipos tecnológicos, asignándole a los mismos el de mayor frecuencia, esto es, el de mayor probabilidad de ocurrencia.

Los escenarios simulados y el modelo lito-tecnológico final 3D del yacimiento "Moja Hueva" fueron validados siguiendo los siguientes criterios:

- Proporcionalidad estadística entre los tipos lito-tecnológicos simulados y el de los compósitos utilizados para simular; esto es, entre los datos reales y simulados. (Tabla II)
- Reproducibilidad del patrón espacial de los semi-variogramas simulados contra los modelos teóricos ajustados a los semi-variogramas experimentales de los compósitos esto es, los datos reales (Figura 3)
- Reproducibilidad espacial de los lito-tipos tecnológicos utilizando como criterio comparativo un modelo preexistente, obtenido por Krigeaje de Indicadores (categórico), así como por la inspección visual del modelo contra los compósitos. (Figuras 4 y 5)



Tabla II Proporciones de los tipos lito-tecnológicos reales versus simulados.

Tipos lito-Tecnológicos	compósitos	escenarios				
		1	5	10	15	20
Arcillas	0.595	0.586	0.586	0.574	0.542	0.564
Arcillas arenosas	0.243	0.237	0.260	0.244	0.226	0.232
Arenas	0.162	0.177	0.154	0.182	0.232	0.204

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos de la simulación realizada de 20 escenarios equi-probables de los tipos lito-tecnológicos (arcillas, arcillas arenosas y arenas) sugieren que existe proporcionalidad estadística entre los tipos lito-tecnológicos simulados y el de los compósitos, las proporciones son aproximadamente equivalentes (ver tabla II) con la de los datos reales (compósitos). Por su parte la reproductividad del patrón estructural a juzgar por la comparación de los semi-variogramas experimentales simulados de 5 escenarios equi-probables (escenarios 1, 5, 10, 15 y 20 , figura 3) contra los modelos teóricos ajustados, evidencia que de forma general, existe una coincidencia más o menos satisfactoria entre las curvas experimentales y las teóricas, no obstante en caso de las arcillas, los semi-variogramas horizontales transicionan más suavemente hacia la meseta en comparación con su modelo teórico correspondiente, sobreestimando el alcance definido para la primera estructura del semi-variograma, superponiéndose satisfactoriamente las curvas experimentales y teóricas para los cinco escenarios analizados.

En el caso de las arcillas arenosas, los semi-variogramas experimentales simulados y sus modelos teóricos también coinciden satisfactoriamente, tanto para los horizontales como para los verticales. Los semi-variogramas experimentales simulados de las arenas son los que exhiben menos coincidencia con respecto a sus modelos teóricos, observándose una marcada dispersión con relación a la curva teórica, no obstante poseen una forma similar a la de sus respectivos modelos teóricos.

En cuanto a la reproductibilidad espacial de los litotipos tecnológicos según el modelo estimado a partir de los 20 escenarios simulados, es satisfactorio, observándose una correspondencia espacial en la distribución de los tipos lito-tecnológicos del modelo y los compósitos (Figura 5) , así como entre aquel y el modelo preexistente estimado por Krigeaje indicador. (Figura 4)

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente trabajo permiten arribar a las siguientes conclusiones:

1. El fenómeno regionalizado, (la variabilidad espacial de los lito-tipos tecnológicos presentes), es isótropo para distancias mayores o iguales a 50 metros según las direcciones horizontales, no existiendo variaciones en su comportamiento, a excepción de la dirección vertical (pozo abajo) que presenta anisotropía geométrica con respecto a las direcciones horizontales, con alcances reducidos, entre 5 y 24 metros, indicando una rápida transición según esta dirección.
2. Los lito-tipos poseen una marcada variabilidad espacial en sentido horizontal, a juzgar por el valor del efecto pepita observado en los semi-variogramas horizontales.



3. Existe proporcionalidad estadística entre los tipos lito-tecnológicos simulados y los datos reales (compósitos) utilizados como información condicionante de la simulación, validando positivamente los resultados alcanzados.
4. La reproductibilidad del patrón general de distribución espacial de los distintos tipos lito-tecnológicos mediante la técnica geoestadística aplicada, esto es, la simulación secuencial indicador (SISIM) es satisfactoria, cuyo modelo estimado a partir de 20 escenarios equiprobables puede servir como base para la estimación de los recursos minerales existentes en el yacimiento "Moja Hueva".

BIBLIOGRAFÍA

- Barrios E., A. Linares y otros, 1985, Informe Exploración Orientativa y Detallada Arcilla Moja Hueva, para la producción de Tejas, Lozas de azotea y Ladrillos, archivo ONRM: 37-45 p.
- Deutsch, C. y Journel, A.G., 1998, GSLIB Geostatistical Software Library and User's Guide, Second Edition, Oxford University Press: 119-128 p.
- Goovaerts P., 1997, Geostatistics for Natural Resources Evaluation, Oxford University Press: 393-403 p.
- Pyrez M.J., Clayton V. Deutsch, 2014, Geostatistical Reservoir Modeling, Second Edition, Oxford University Press: 131 p.
- Remy N., A., Boucher, J. Wu, 2009, Applied Geostatistic with SGeMS a User's Guide. Cambridge University Press: 150 p.
- StatPoint, Inc., 2005, Discriminant Analysis: www.statgraphics.com : 13 p.
- Vargas M., 2014, Reestimación de recursos yacimiento "Arcillas Moja Hueva", archivo ONRM: 11 p.

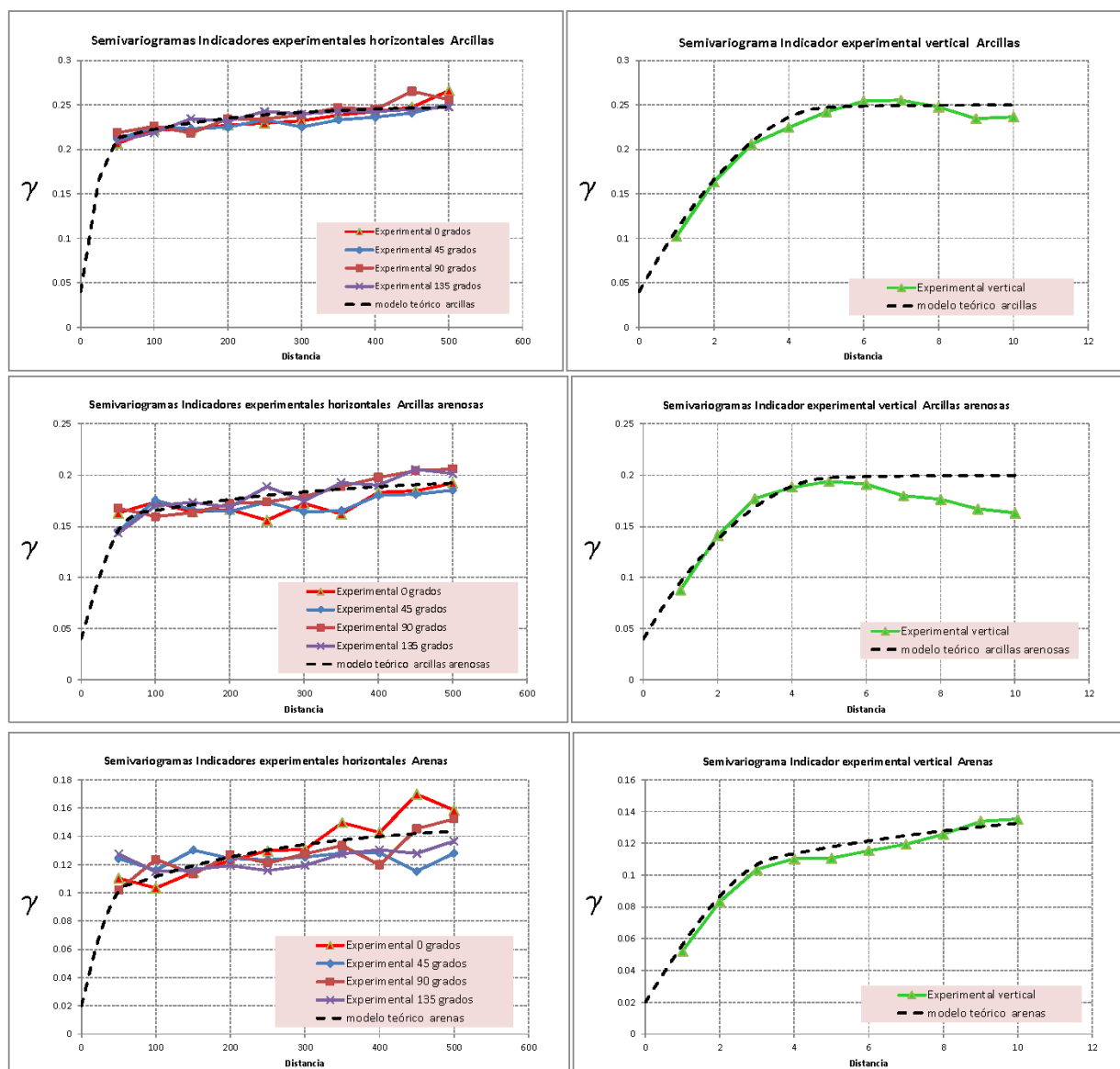


Figura 2 Semi-variogramas experimentales y modelos teóricos ajustados.

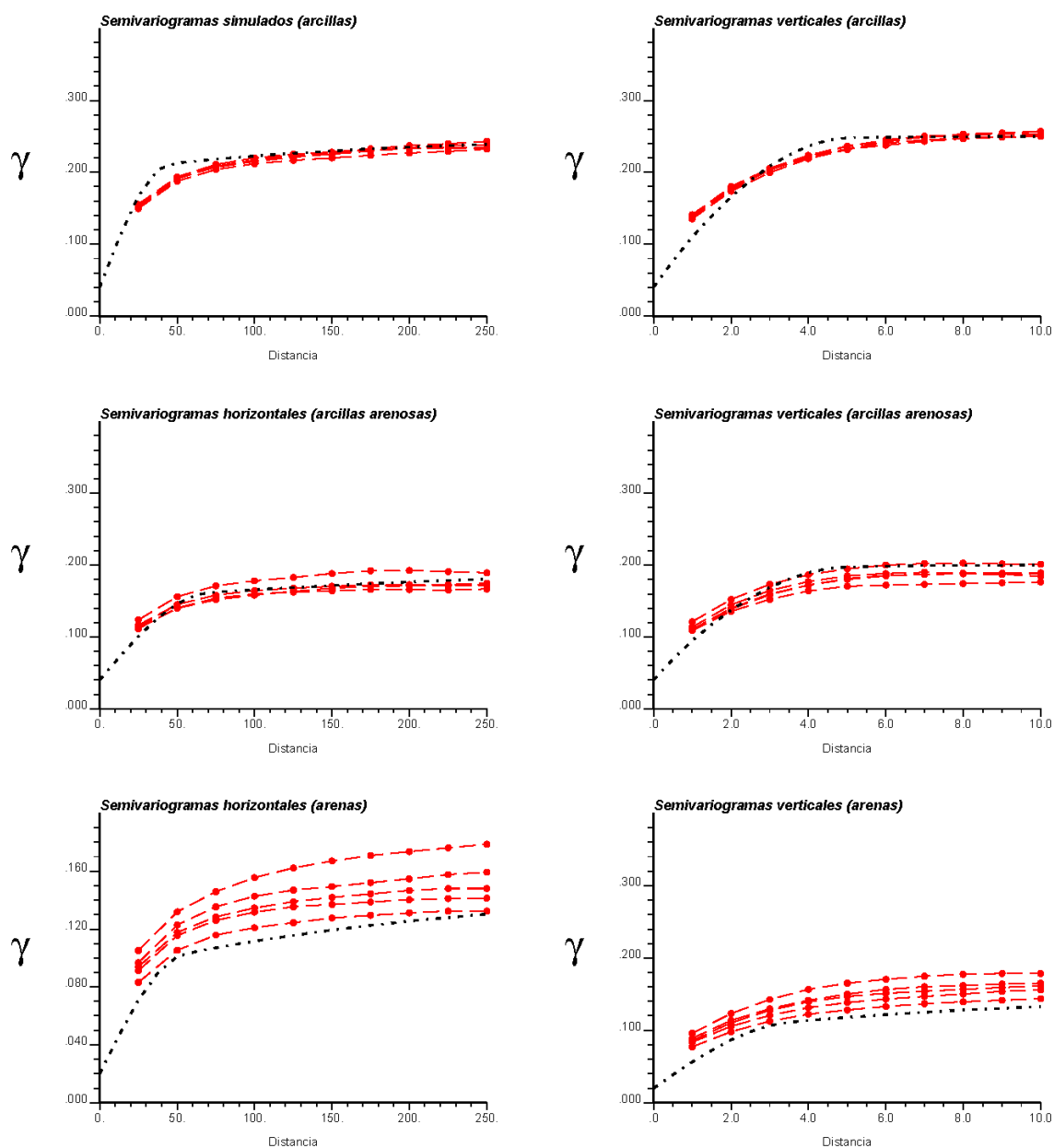


Figura 3 Semi-variogramas experimentales simulados versus modelos teóricos ajustados. 5 Escenarios

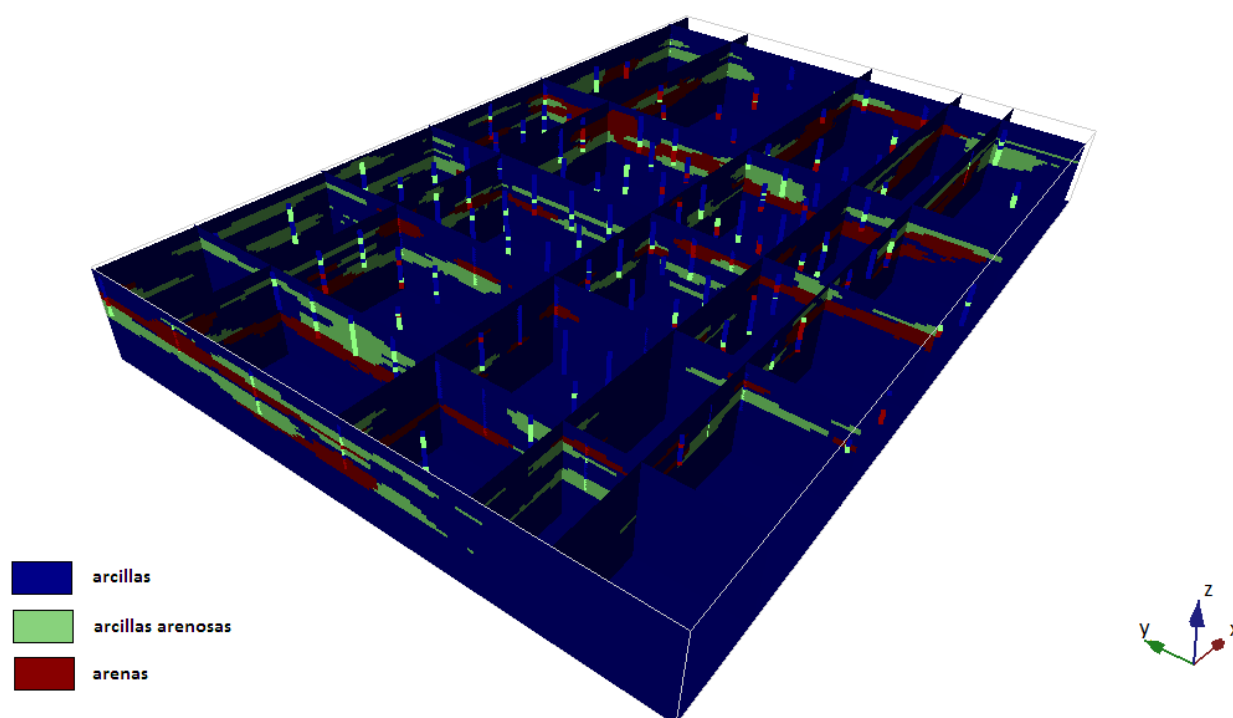


Figura 4 Tipos lito-tecnológicos estimados Krigeaje Indicador Categórico red 5m x 5m x 1m

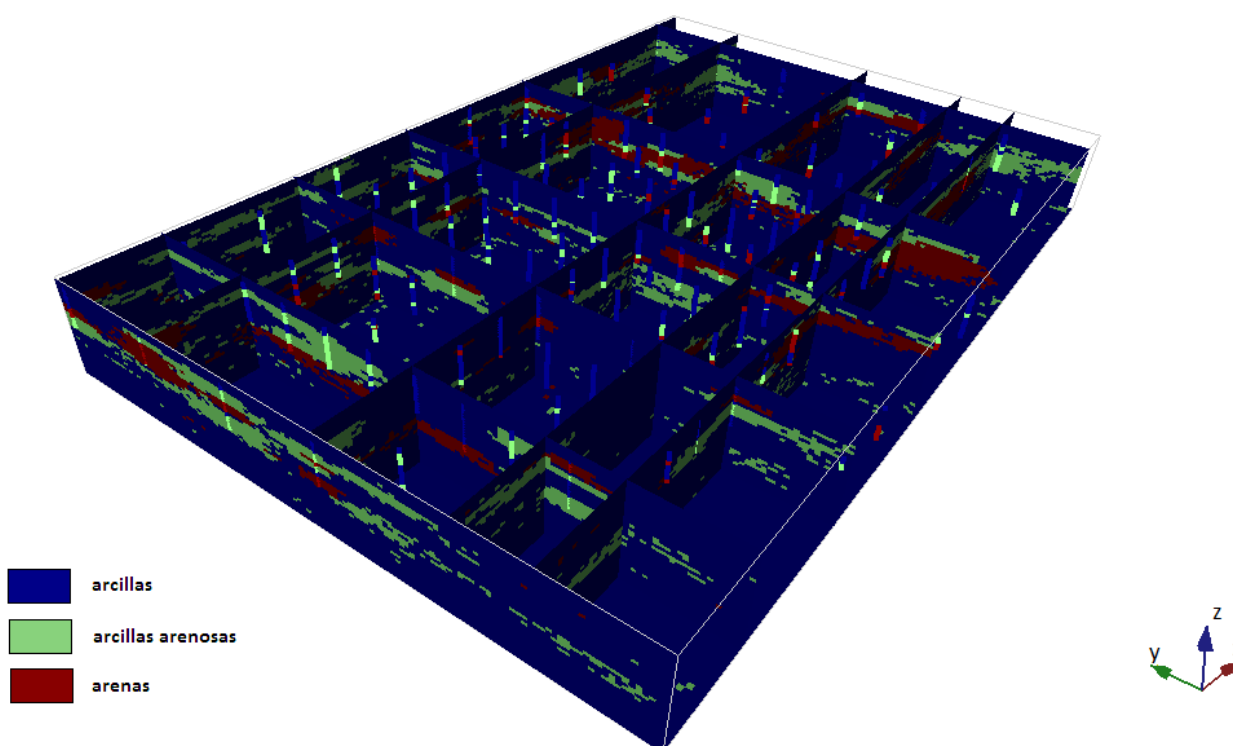


Figura 5 Tipos lito-tecnológicos estimados red 5m x 5m x 1m (20 escenarios equi-probables)