

## KRIGEAGE ORDINARIO MODIFICADO POR INDICADORES: EJEMPLO DE APLICACIÓN

**Mario Rossi**  
GeoSystems International, Inc.  
15998 Mataro Bay Ct.  
Delray Beach, Florida, USA.  
[mrossi@geosysint.com](mailto:mrossi@geosysint.com)

**Mario Baudino**  
Cementos Avellaneda  
San Luis, Argentina  
[mb@lc.avellaneda.com.ar](mailto:mb@lc.avellaneda.com.ar)

### RESUMEN

En el contexto de cálculos de recursos por métodos geoestadísticos, el krigeage ordinario es el método más comúnmente utilizado para estimar leyes de interés. Los resultados obtenidos utilizando el krigeage ordinario (OK) se ven habitualmente afectados por datos erráticos, dado que se trata de un método de regresión lineal y sensible a valores extremos. A partir de la geoestadística no-lineal se desarrollaron diversas alternativas metodológicas que ofrecen opciones para estimar mejor distribuciones de leyes que evidencian alta variabilidad y un comportamiento errático. Como ejemplo, este es el caso de yacimientos de Au de diversos orígenes, y en particular de origen hidrotermal. La distribución estadística de leyes de Au en estos yacimientos puede llegar a ser extrema, y es representada como una distribución estadística de sesgo positivo, con una muy pequeña proporción de muestras de perforaciones con leyes muy altas.

Una de las opciones disponibles más populares es el krigeage de indicadores múltiples, utilizado con éxito en numerosos depósitos alrededor del mundo. El método, aunque es efectivo, es de más difícil implementación y requiere un conocimiento avanzado de geoestadística, y puede resultar en errores de estimación importantes si no es implementado correctamente.

Este trabajo describe un método desarrollado para ser aplicado en presencia de distribuciones de leyes de alta variabilidad, que está basado en el uso combinado de una geoestadística de indicador simple y krigeage ordinario, llamado "krigeage ordinario modificado por indicadores", o IMOK por sus siglas en inglés. Este método ha sido aplicado por este autor en casos en que la cantidad de información disponible, el estado de avance de desarrollo del proyecto, u otros factores no aconsejen el uso del krigeage de indicadores múltiples. El método es ejemplificado con un caso de estimación para un yacimiento de oro en el Perú, y es comparado con los resultados obtenidos aplicando un krigeage ordinario tradicional.

### KRIGEAGE ORDINARIO MODIFICADO POR INDICADORES (IMOK)

El método IMOK tiene precedentes en la estimación de recursos de uranio en Norteamérica, ver Parker y Chávez (1979), y Froidevaux y Journel (1982). Fué también utilizado por M. Springett para los primeros cálculos de recursos de la Mina Mesquite (1984), una versión del cual fué posteriormente renombrado IMOK, ver Rossi et al, 1993.

La idea básica del método IMOK es modelar por separado una porción de la distribución de leyes de interés. La justificación geológica para este método se basa en que la mineralización habitualmente ocurre por etapas o pulsos, de tal manera que el volumen de interés (en este caso una zona de vetas) presenta zonas de estéril o de menor mineralización. En términos geoestadísticos, se postula un "modelo de mezcla", según el cual la ley de cualquier bloque se puede escribir como:

$$Z^*(x) = P_{um} * Z_{um}^* + P_m * Z_m^* \quad (1)$$

Donde  $P_{um}$  y  $P_m$  son las proporciones de los volúmenes no mineralizados y mineralizados dentro del bloque, respectivamente, estimados utilizando un krigeage de indicador único, y  $Z_{um}$  y  $Z_m$  son los valores de ley estimados por krigeage ordinario para ambas porciones de cada bloque.

Una posible variante de este modelo es suponer que la porción del bloque que se estima sin mineralización simplemente no tiene ley, y por lo tanto no se requiere estimar la ley  $Z_{um}$ .

Un aspecto clave de este método es determinar el indicador de ley que representa el límite entre las dos poblaciones mezcladas dentro del mismo dominio de estimación. Este aspecto es clave, ya que debe estar soportado por la evidencia geológica. Algunos de los criterios que se utilizan habitualmente son:

1. Desde el punto de vista geológico y geoquímico, es posible a veces definir un valor límite que determina una envolvente de mineralización, dentro de la cual existe la posibilidad de encontrar mineral, pero fuera de la cual no existe ninguna posibilidad de encontrar leyes de interés. Este mismo valor se puede utilizar para definir dentro de la envolvente zonas con menor ley o de estéril interno.
2. Observando la curva de frecuencias acumulada de los datos para obtener una indicación de los posibles quiebres poblacionales en la zona de baja ley o estéril.
3. Se verifica si existen cambios significativos en la continuidad espacial. Para esto, se obtienen variogramas para algunos indicadores "candidatos", observando si existen cambios en la correlación espacial. Es común que diferentes eventos mineralizantes tengan orientaciones de emplazamiento diferentes.

En el caso del ejemplo presentado en este trabajo, "no mineralizado" implica zonas con leyes menores de 0.25g/t, y por lo tanto, se requiere estimar esta población como ley de dilución dentro del bloque.

## **EJEMPLO DE APLICACIÓN.**

### **Descripción del Proyecto.**

El proyecto cuyo nombre y ubicación se mantienen confidenciales es un yacimiento hidrotermal de Au y Ag ubicado en la zona central-norte del Perú. Es un distrito donde se presentan múltiples depósitos de diversos tamaños, uno de los cuales fué utilizado para ejemplificar las diferencias entre dos métodos de estimación.

A solicitud de los dueños del proyecto y para proteger confidencialidad, no se presentan en este trabajo recursos estimados ni detalles de la ubicación del proyecto.

### **Base de Datos y Modelo Geológico.**

La Base de Datos utilizada para este modelo de recursos consiste en una serie de perforaciones ubicadas en secciones cruzadas cada 50m. En sección, las perforaciones están ocasionalmente a una distancia menor que 50m, y generalmente inclinados unos 60-70°. También existen túneles y chimeneas que han sido muestreadas, y para los que se observa leyes de Au más importantes que las leyes obtenidas por las perforaciones. Las labores han sido desarrolladas a lo largo de estructuras, donde existen las mejores leyes de Au.

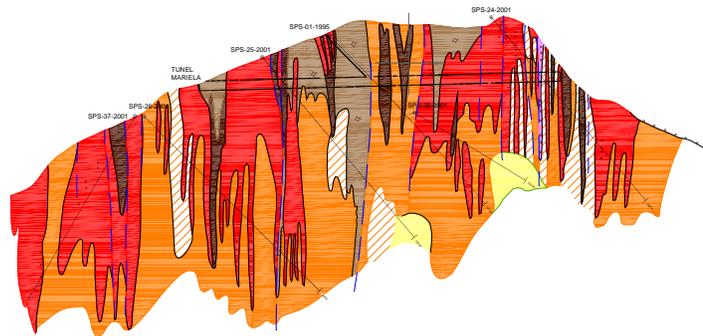
Las muestras originales de las perforaciones fueron compositadas a lo largo de la perforación sobre un largo nominal de 3m. Se utilizan compósitos a lo largo de las perforaciones (en vez de compósitos por banco) porque las perforaciones son inclinadas. Los compósitos fueron truncados en las interfaces de los dominios de estimación definidos, ver más abajo.

Se realizaron diversos estudios geoestadísticos y estadísticos sobre la base de datos, incluyendo estudios de desaglomeración, de leyes altas ("outliers"), y de cambio de soporte (dilución interna). Las conclusiones de estos estudios fueron utilizadas para diseñar los planes de estimación (krigeage), y también para validar los modelos obtenidos.

El modelo geológico permite utilizar los controles de mineralización para definir dominios de estimación, y estimar los recursos dentro de estos dominios. Este modelo geológico está basado en la alteración modelada por el personal de exploración del proyecto, aunque de formas más simples para poder incorporarlo de manera efectiva al modelo de bloques.

Se definieron tres zonas geológicas para cada depósito. La primera encapsula a la región que presenta casi exclusivamente alteración silíceo, y forma un “cap” donde aparecen las mejores leyes de la mineralización. Para ambos depósitos, se ubicaron las galerías y chimeneas en el corazón de esta zona de alta ley. La segunda zona definida es donde aparece alteración argílica casi exclusivamente, y es en general de muy baja ley o estéril. En el caso de uno de los dos modelos de leyes (OK), ni siquiera se estimaron los bloques dentro de esta zona. La tercera zona es en realidad una zona intermedia, llamada de “alteración mixta”, donde el volumen mayor aparece con alteración argílica avanzada (de baja ley), pero donde se intercalan “dedos” de alteración silíceo, que corresponden a “raíces” controladas estructuralmente, y que pueden ser de alta ley. Aunque volumétricamente poco importantes, estos “dedos” silicificados contienen una proporción importante del Au en este segundo dominio.

Una sección del modelo de alteración se muestra en la Figura 1. Las zonas rojas representan silicificación (en general con mejores leyes de Au), el anaranjado representa la Alteración Argílica Avanzada (menos favorable), las zonas rayadas y amarillas representan zonas Argílicas y Cloritizadas (de menor ley o estériles), y las zonas oscuras de brechas tectónicas o hidrotermales. La Sección 2700 (Fig. 1) es la sección de mineralización más importante del yacimiento, en donde está ubicado un túnel de exploración, y contiene mineralización de Au de mayor ley, comparando con las secciones adyacentes. Obsérvese como las zonas de alteración silicificada han sido modeladas con continuidad sub-vertical, pero en forma de “dedos” o raíces que profundizan.



**Figura 1: Modelo de Alteración 2004, Sección 2700, SPS.**

Esta distribución espacial de las zonas favorables de mineralización conlleva dos desafíos importantes:

1. Es muy difícil, en la práctica, traducir una interpretación en secciones como la que se muestra en la Figura 1 en un modelo tri-dimensional computarizado que tenga una expresión en tres dimensiones aceptable. Las dimensiones de las raíces en sentido lateral son muy pequeñas con relación a la continuidad vertical modelada y con relación a la distancia entre secciones (50m), por lo que es difícil decidir que “raíces” deben ser unidas de una sección a otra. Además, la densidad de estas “raíces” varía significativamente entre secciones.
2. Además de los factores prácticos en la construcción del modelo computarizado, también está el aspecto de confiabilidad del modelo resultante. Al no tener continuidad entre secciones de cada 50m, la confiabilidad de un modelo con tal pretensión de detalle sería cuestionable.

Para obtener un modelo geológico que sea robusto con relación a estos dos aspectos, se decidió tomar el modelo de alteración existente y modificarlo de acuerdo a los siguientes criterios:

1. Definir una zona de silicificación masiva, en la parte superior de ambos depósitos, a modo de encape, en donde se pueda suponer que las alteraciones argílicas, aunque existen, tienen menor desarrollo. Esta zona de silicificación masiva es la que presenta mejor mineralización.
2. Definir una zona sin silicificación (Argílica pura), en donde se sabe que no hay silicificación, y la probabilidad de que existan leyes significativas de Au es menor. Esta zona argílica es la base del modelo.
3. Finalmente, se definió una zona intermedia, de alteraciones mixtas, donde co-existen las silicificación y la alteración argílica avanzada (AA). En esta zona predomina la alteración AA, pero las estrechas zonas de silicificación pueden presentar leyes de Au importantes, y debe ser tratada de manera particular al estimar las leyes.

Para confirmar la relación entre las leyes de Au en cada una de las zonas, para cada depósito, se hicieron una serie de estadísticas sobre los compósitos de 3m, obtenidos a partir de las muestras originales de las perforaciones. La Figura 2 muestra los histogramas de los compósitos de 3m para cada alteración. Se comprueba que las leyes más altas de Au están en la zona silicificada ("cap"), las más bajas en la zona de alteración argílica, y la zona intermedia presenta una mayor variabilidad de leyes. Es evidente que el uso de estos dominios de estimación permitirá un mejor control de la estimación de las leyes de Au.

#### **Variografía.**

Se utilizó la función del correlograma para obtener modelos de continuidad espacial porque, por experiencia, ha demostrado ser más robusto con respecto a derivas y falta de estacionaridad que el variograma tradicional (Srivastava y Parker, 1988).

Se obtuvieron modelos de correlogramas para cada variable requerida por los métodos OK e IMOK que resultan en direcciones de continuidad y anisotropías esperadas. Estos modelos fueron contrastados con el conocimiento geológico del depósito, y en todos los casos se llegó a la conclusión de que representan controles geológicos observados en terreno. De esta manera se asegura la consistencia entre los modelos geológicos y geoestadísticos.

Existe un claro control estructural en el depósito cuya componente principal tiende a ser NE o N-NE, diferente de la tendencia general de la mineralización (E-W). Esto es particularmente evidente para el dominio de alta ley (silicificación), por lo que es apropiado modelar en los correlogramas dos estructuras con anisotropías diferentes. La primera estructura del modelo incorpora la influencia de corta escala (y de alta ley) de los sistemas estructurales evidentes en los túneles y mapeados en las perforaciones, y la segunda estructura representa mejor la distribución general de la mineralización.

Los correlogramas se modelaron utilizando 37 direcciones experimentales, ajustando un modelo tridimensional al elipsoide definido por los puntos experimentales en todas las direcciones. Se utilizaron tres ángulos de rotación para describir el elipsoide de continuidad, azimut, dip, y plunge.

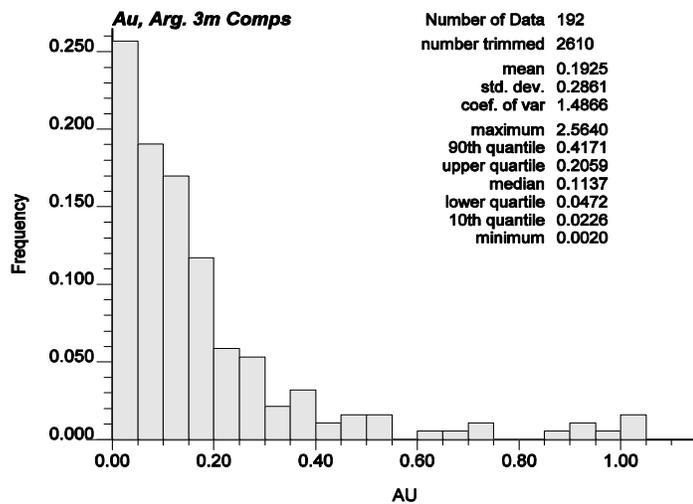
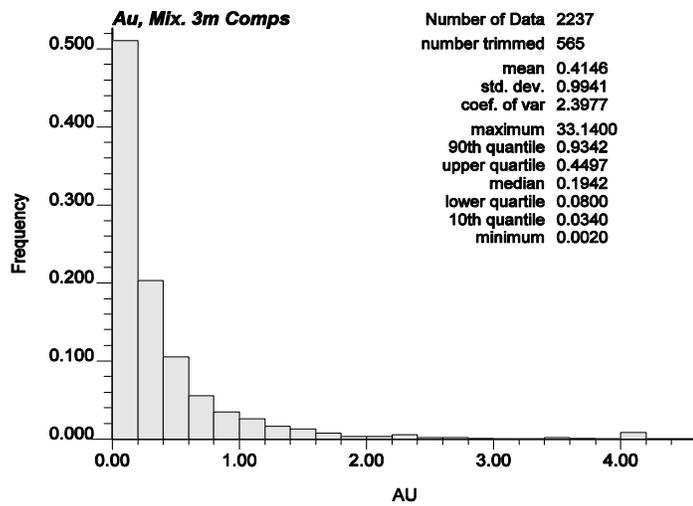
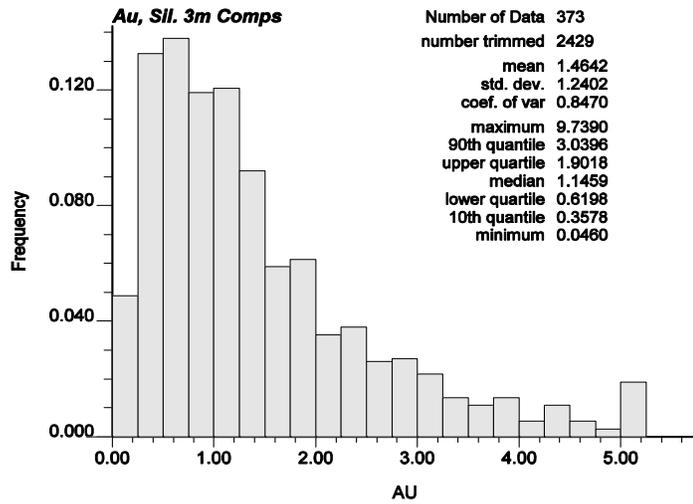


Figura 2: Histogramas y estadísticas básicas, compósitos de 3m, por dominio de estimación.

## **Modelos de Bloques y Estimación de Leyes.**

El modelo de bloques está construido con bloques de 12.5 x 12.5 x 6m con sub-bloques de 6.25 x 6.25 x 3m para mejor definición de los contactos geológicos. El tamaño de bloques está basado en el concepto propuesto por Journel y Huijbregts, (1978), quienes sostienen que es razonable utilizar un tamaño de bloques de aproximadamente 30 al 50% del espaciamiento entre taladros. En este caso, el bloque es un poco menor al sugerido para un espaciamiento entre secciones de 50m, porque estas están orientadas de manera oblicua a la malla de definición del modelo de bloques.

Para estimar las leyes de Au se utilizaron dos métodos diferentes: krigeage ordinario (OK) y el krigeage ordinario modificado por indicadores (IMOK). La estimación se hizo por separado para cada dominio de estimación, aplicando el modelo de correlograma correspondiente. Estos dos modelos alternativos se construyeron para analizar la susceptibilidad de los recursos estimados a cambios en la metodología de estimación. El Krigeage Ordinario (OK) no se describe en detalle en este trabajo, pues se presupone que es la metodología geoestadística más conocida. En cambio, se enfatizan las comparaciones entre ambos modelos.

Se aplicó una metodología de krigeage por pasadas, según la cual se utilizan planes de krigeage con diferentes restricciones para estimar los bloques. Durante la primera pasada se aplican las mayores restricciones, que en general corresponden a la continuidad de corta escala (altas leyes), obteniéndose así los bloques con mayor calidad de estimación. Se aplica una segunda pasada con menores restricciones para obtener una segunda serie de bloques estimados, con información de mediana calidad, y finalmente, una tercera pasada para estimar aquellos bloques en los márgenes de los volúmenes modelados. Esta metodología mejora la calidad de la estimación porque permite que ciertos bloques se estimen con mucha mayor información que el bloque promedio.

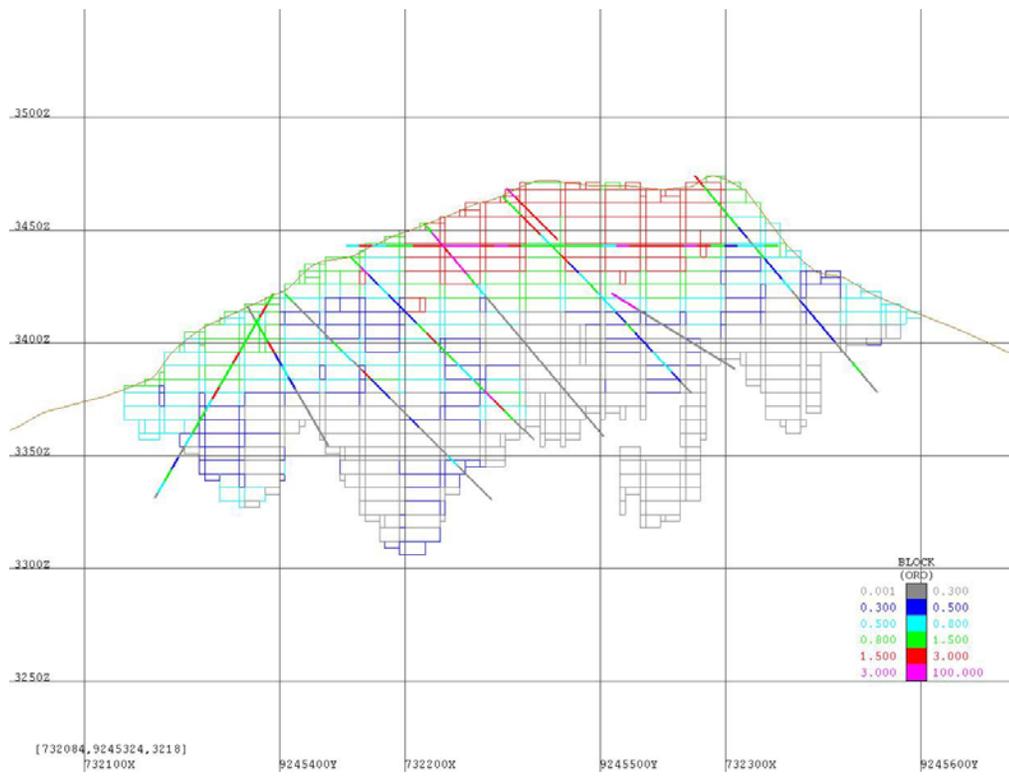
Basado en los conocimientos geológicos del yacimiento y en un análisis estadístico detallado, se concluyó que un indicador de 0.25 g/t Au separa una población de baja ley de la población principal en los dominios de estimación más significativos, las zonas mixtas y silicificada. Como no existe una diferenciación importante poblacional en el dominio de baja ley (argílico), éste se estimó solamente con krigeage ordinario.

En todos los casos se aplicó krigeage de bloques, discretizando cada bloque con 4x4x2 puntos estimados. Se aplicó una búsqueda por octantes para mejorar la capacidad del krigeage de desaglomerar, y también se aplicaron restricciones en el mínimo de muestras por octante como para asegurar que al menos dos taladros se requieran para estimar cada bloque. Los elipsoides de búsqueda aplicados están basados en los modelos de correlograma correspondientes, aunque utilizando anisotropías menos intensas, y se corresponden, en general, con los rangos de cada estructura del modelo de correlograma respectivo. Los valores estimados por los modelos de IMOK y de OK para la Sección 2700 se muestran en las Figuras 3 y 4, respectivamente.

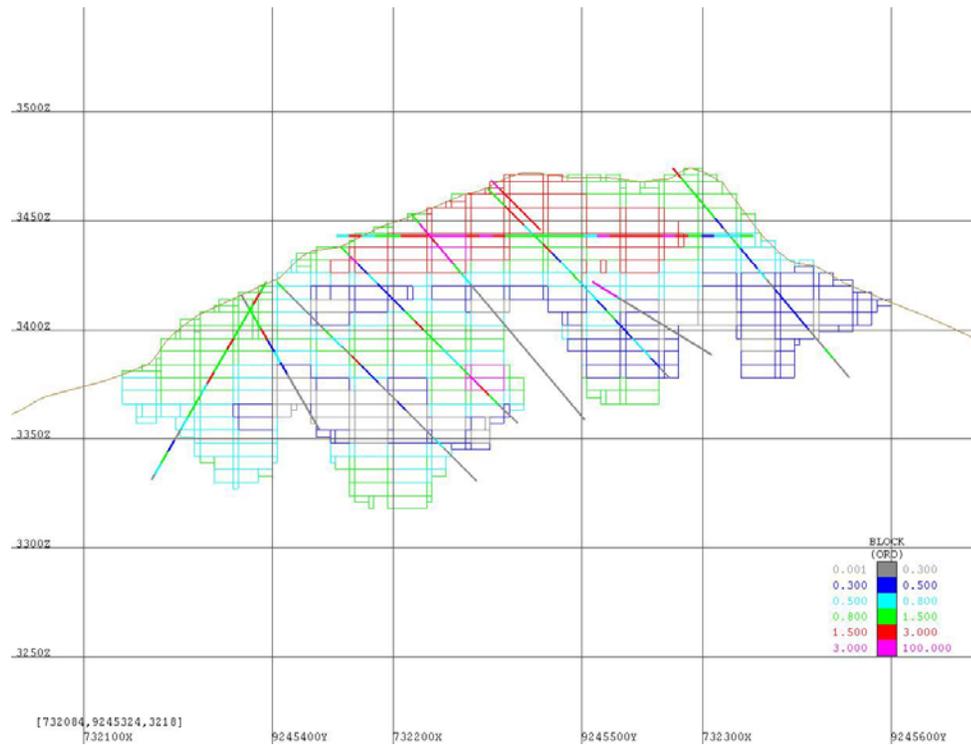
## **RESULTADOS.**

Las comparaciones entre ambos modelos muestran que el IMOK presenta menor cantidad de Au contenido estimado, principalmente por un menor tonelaje predicho por encima de las leyes de corte, fundamentalmente en el dominio de alteración mixta. Esta diferencia se atribuye fundamentalmente a la falta de control del modelo de OK, donde la presencia de un pequeño volumen de leyes altas se traduce en una sobre-estimación de los recursos, ver Figs. 3 y 4.

La Figura 5 muestra las diferencias relativas porcentuales de toneladas, ley, y metal contenido (fino) por encima de diversas leyes de corte entre los recursos estimados por los modelos OK e IMOK para los recursos totales. Las Figuras 6 y 7 muestran las mismas diferencias para los dominios de silicificación y mixta, respectivamente. En todos los casos, las diferencias se han hecho relativas al modelo de IMOK, y si son positivas significa que el modelo OK estima los mayores valores. Es evidente que la diferencia más importante entre ambos modelos es la suavización del OK con respecto al IMOK. El IMOK predice menor tonelaje y, con cierta frecuencia, mayor ley.

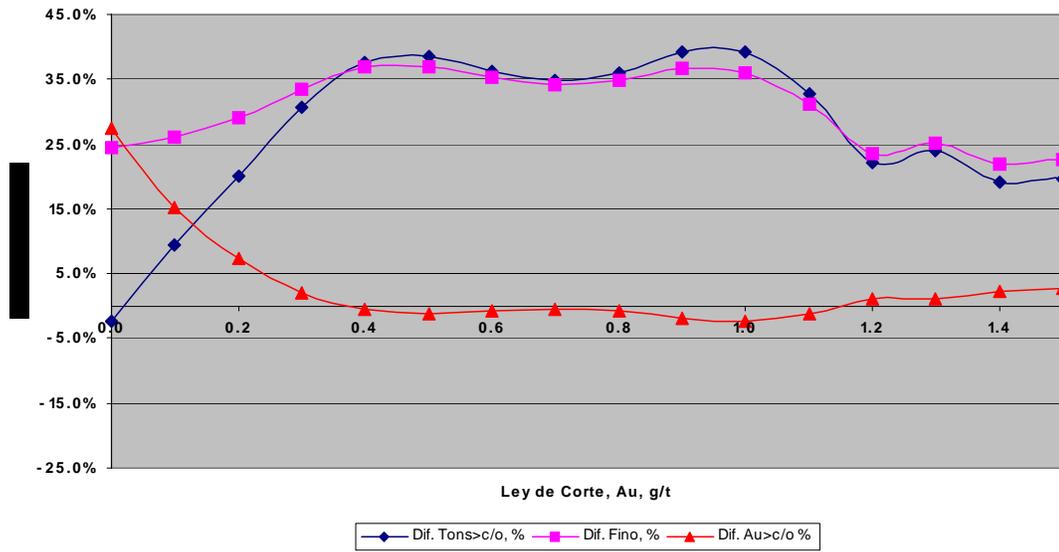


**Figura 3: Modelo de bloques IMOK, Sección 2700.**



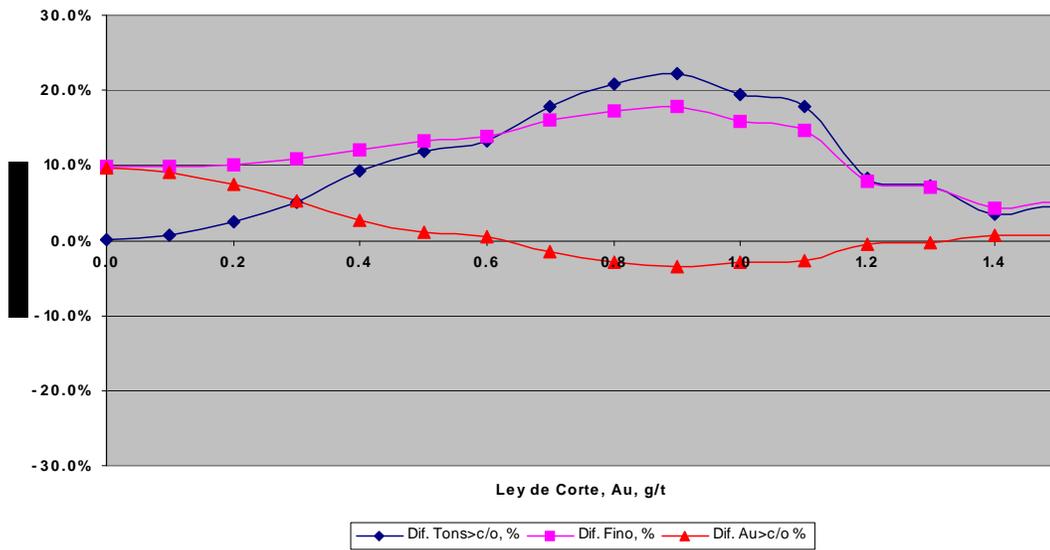
**Figura 4: Modelo de bloques OK, Sección 2700.**

**Recursos Totales  
Modelos OK vs. IMOK**



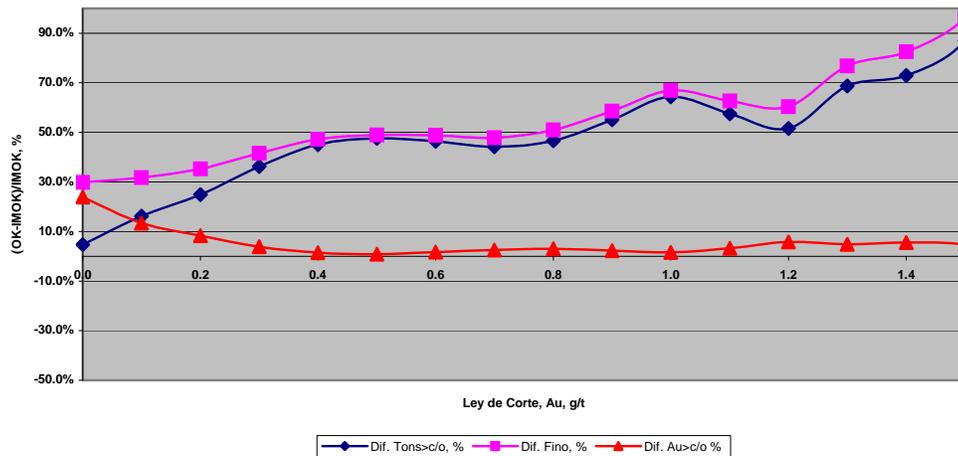
**Figura 5: Comparación por ley de corte, Modelos OK vs. IMOK, Recursos Totales.**

**Recursos, Silicificado  
Modelos OK vs. IMOK**



**Figura 6: Comparación por ley de corte, Modelos OK vs. IMOK, Silicificación.**

**Recursos, Mixtos  
Modelos OK vs. IMOK**



**Figura 7:** Comparación por ley de corte, Modelos OK vs. IMOK, Alteración Mixta.

## CONCLUSIONES

Las conclusiones más importantes alcanzadas son:

1. Las leyes de Au fueron estimadas utilizando dos métodos diferentes, krigeage ordinario (OK), y krigeage ordinario modificado por indicador (IMOK). Los planes de krigeage se ajustaron según cada modelo para evitar lo más posible la extrapolación de leyes altas.
2. El modelo de leyes utilizó un modelo geológico basado en alteraciones de roca, separando las zonas de silicificación “pura”, las zonas de alteración argílica “pura”, y dejando en un volumen intermedio una zona de alteraciones mixtas, principalmente de alteración argílica avanzada con pequeñas zonas estructurales de silicificación.
3. Las diferencias observadas entre estos modelos se deben en su mayor parte a que los cuerpos mineralizados de alta ley (SIL) han sido restringidos al momento de estimar leyes. Existe abundante evidencia geológica que indica que la zona de más alta ley no profundiza con la misma geometría masiva con la que aparece cerca de la superficie, sino que más bien se prolonga esporádicamente, en forma de “raíces” o “dedos” sub-verticales que aún pueden contener muy buenas leyes, y definidos por estructuras. Estas raíces tienen poca extensión lateral, y pueden causar sobre-estimaciones significativas.
4. El control de la extensión lateral de las leyes fue logrado aplicando el modelo geológico, por un lado, y por otro con una serie de planes de krigeage adaptados a cada dominio de estimación. Además, existen diferencias metodológicas importantes entre el OK y el IMOK, que resultan en diferencias importantes entre ambos modelos, particularmente en la zona de alteración mixta.
5. El IMOK presenta una mejor alternativa comparado con el OK en aquellos casos en que:
  - a. Se considera que la aplicación del krigeage de indicadores múltiples no se justifica por la cantidad de información disponible o el estado de avance del proyecto.
  - b. No se pueden definir zonas geológicas suficientemente homogéneas como dominios de estimación, en las que el OK generalmente no entrega resultados satisfactorios.
  - c. Existe fundamento geológico para implementar un modelo de mezcla de tipos o eventos de mineralización.

## REFERENCIAS

- **Deustch, C.V., y Journel, A.G.**, 1992, *GSLIB: A Geostatistical Software Library and User's Guide*, Oxford University Press, New York, 340p. y CD-ROM.
- **Froidevaux, R., y Journel, A.G.**, 1982 Prediction of Local Ore Recoveries and Ore-Waste Ratios at the Silver Bell Uranium Mine, *Mathematical Geology*, vol. 14, pp. 645-660.
- **Journel, A.G., y Huijbregts, Ch.J.**, 1978, *Mining Geostatistics*, Academic Press, 600p.
- **Parker, H.M. y Chávez, W.X.**, 1979. *The Use of Geostatistics in Delineation of Underground Sandstone-type Uranium Deposits*, 108th Annual Meeting AIME, New Orleans.
- **Rossi, M.E. y Parker, H.M.**, 1993, *Estimating Recoverable Reserves: Is It Hopeless?*, presentado en el Forum 'Geostatistics for the Next Century', Montreal, Quebec, Canada, June 3-5.
- **Rossi, M.E., Parker, H.M., y Roditis, Y.S.**, *Evaluation of Existing Geostatistical Models and New Approaches in Estimating Recoverable Reserves*, presentado en la XXIV APCOM'93, Montreal, Quebec, Canada, October 31-November 3, 1993.
- **Srivastava, R.M., y Parker, H.M.**, 1988, *Robust Measures of Spatial Continuity*, in M. Armstrong, Ed., *Geostatistics*, pp. 295-308, Reidel, Dordrecht, Holland.