



Modelo de Referenciación Geográfica de Calidad del Mineral Utilizando Técnicas de Estimación Estadística Geográfica

Ramiro Maydana Callisaya
Postgrado en Informática
Universidad Mayor de San Andrés - UMSA
La Paz, Bolivia
ramaydana@hotmail.com

Resumen— El presente artículo describe la problemática de no contar con un modelo de patrón de calidades mineralógicas de los departamentos y municipios productores de esta materia prima, la carencia de modelo citado, establece la utilización de métodos empíricos como es el de toma de muestra unitaria (toma de muestra para cada lote de producto comercializado), costos adicionales en la determinación entre valores de calidad de mineral documental en relación a ensayos de laboratorio químico (proceso real en determinación de calidad de mineral).

El análisis mediante el modelo de patrón de calidades de minerales permite estimar las calidades de minerales en el contexto municipal distribuido por concesiones mineralógicas, así mismo realizar la integración con técnicas analíticas de referenciación geográfica para determinar el comportamiento en calidad de mineral de acuerdo a distribución no uniforme en puntos relevantes.

La implementación de técnicas de estimación estadística geográfica con el análisis de datos de procedencia del mineral (municipio, concesión minera) permite diseñar el modelo de calidad mineralógica para la toma de decisiones en la etapa de muestreo de mineral para control de calidad previa a la exportación de minerales.

Esta técnica permite identificar las variables regionalizadas propuestos por Matheron para la estimaciones aleatorias, siendo en la actualidad amplio su uso en la esfera internacional en instituciones que utilizan y sus bondades en las ciencias de la tierra, a través de ella se establecen patrones de comportamiento, lo que coadyuva a la estandarización de variables bidimensionales (calidad minera, área geográfica).

Palabras clave— Mineral, calidad, referenciación geográfica, estadística geográfica, variograma, concesión minera, análisis químico, muestra representativa.

I. INTRODUCCIÓN

Bolivia posee diversidad de recursos naturales estratégicos, entre ellas se tienen a los minerales metálicos y no metálicos, que se encuentran en yacimientos mineros, vetas, minas, ríos y cerros en los nueve departamentos y más de ciento cincuenta municipios. Cada región geográfica posee una riqueza de minerales propias del lugar en cantidades y calidades distribuidas en los yacimientos mineros, siendo una de las características con mayor relevancia la ley del mineral para la comercialización del producto.

La entidad estatal que controla su comercialización interna y exportación es el Servicio Nacional de Registro y Control de la Comercialización de Minerales y Metales (SENARECOM) que depende del Ministerio de Minería y Metalurgia, entre sus atribuciones, realizar tomas de muestras de mineral procedente de diferentes departamentos, municipios y concesiones mineras a nivel nacional. Los principales minerales comercializados de origen nacional se clasifican en metálicos y no metálicos, siendo los metales tradicionales en su comercialización el estaño, plata, zinc, cobre y no metálicos como el yeso, piedra caliza, amatista, baritina [1].

Los minerales mencionados se encuentran en diferentes regiones geográficas, la característica más relevante para la comercialización es la calidad del mineral, o también denomina ley o pureza, siendo una característica de su composición química como materia prima. Esta característica tiene un comportamiento no uniforme en un determinado volumen de mineral; para determinar la ley se requiere tomar de muestras significativas a través de técnicas de muestreo y el análisis químico mediante laboratorio químico, de esta manera se determina la ley, un mineral que se produce con una determinada calidad en un determinado punto geográfico (municipio, concesión minera) difiere respecto al mismo mineral comparado con otro punto geográfico, respondiendo a variaciones que dependen de la composición física y química de los minerales.



II. PROBLEMÁTICA

A. Planteamiento del problema

La producción de minerales y metales en las concesiones mineras de Bolivia poseen diferentes leyes o calidades dependiendo del lugar geográfico, las mismas que se conocen a través del análisis químico de laboratorio mediante la toma de muestra realizada de un determinado volumen, esta actividad se realiza por los técnicos de acuerdo a criterios empíricos, no teniendo una técnica especializada en realizar la toma de muestra de acuerdo a un análisis del comportamiento del mineral asociado al lugar de procedencia.

La carencia de un modelo de patrón que permita la estimación de calidad de los minerales relacionados con su procedencia: departamento, municipio y cuadrícula o pertenencia de la concesión minera para realizar actividades de toma de muestra de mineral o metal previa a la exportación, esto ocasiona elaborar tareas repetitivas en las tomas de muestra y costo adicional en el análisis químico de laboratorio para la confirmación de las calidades declaradas documentalmente por los comercializadores de este material.

Los resultados del análisis químico de laboratorio químico no poseen una secuencia lineal, debido a la existencia de minerales con variación de leyes según el lugar de origen y la temporalidad que se comercializan los materiales, requiriendo un análisis más preciso de acuerdo un patrón de localización geográfica asociado al departamento, municipio, concesión minera de procedencia del mineral que permita reducir los valores de incertidumbre en la estimación de calidad del mineral.

B. Formulación del problema

Ante la problemática descrita en el presente artículo, se plante la siguiente formulación del problema:

¿Será posible implementar un modelo referenciación geográfica de calidad del mineral para reducir el nivel de incertidumbre en la determinación de calidad del mineral asociado al origen de producción?

III. OBJETIVO

Desarrollar un modelo de calidad mineralógica a través de técnicas de estimación estadística geográfica para reducir los niveles de incertidumbre en la obtención de muestras representativas asociados al origen de producción.

IV. HIPÓTESIS

La calidad del mineral posee un comportamiento aleatorio determinada por las características particulares geográficas de Bolivia, la implantación de técnicas de estadística geográfica permitirá determinar el modelo de referenciación geográfica mineralógico a partir de muestras significativas.

V. REVISIÓN DE LA LITERATURA

A. Calidad del Mineral

La calidad del mineral es la concentración que presenta el elemento químico de interés minero en el yacimiento. Se expresa como tantos por ciento, o como gramos por tonelada (g/t) (equivale a partes por millón, ppm) u onzas por tonelada (oz/t) [2].

En nuestro país, la calidad del mineral posee una variación en cuanto a su dimensión, distribuida de manera no uniforme, dependiendo básicamente de fenómenos naturales, las cuales se determinan a través de laboratorios de análisis químico que se aplica a una determinada muestra representativa. Los márgenes de error dependen de la tecnología aplicada en un determinado laboratorio, sin embargo para minerales de tipo concentrado, este margen de error no es significativo para fines comerciales.

B. Modelo de Referenciación Geográfica

Se trata de todo tipo de información en formatos digitales con referencias geográficas. Estas pueden ser coordenadas (latitud/longitud) o códigos de referencia como número de departamento, municipios, etc. Se entiende por "datos espaciales", tanto imágenes satelitales, estadísticas con referencia territorial, mapas escaneados, planos de ciudades, cartografía física, resultados de análisis complejos como capacidades productivas, o simplemente puntos levantados mediante sistemas de posicionamiento global (GPS) [3].

C. Técnica Estadística Geográfica

Matheron definió a la Estadística Geográfica como "la aplicación del formalismo de las funciones aleatorias al reconocimiento y estimación de fenómenos naturales". La estadística geográfica es una rama de la estadística aplicada que se especializa en el análisis, modelación y predicción de la variabilidad espacial de fenómenos en ciencias de la tierra. La estadística geográfica es un conjunto de técnicas matemáticas que orientan el análisis y predicción de valores distribuidos en el espacio y/o en el tiempo, dichos valores se asumen correlacionados entre sí [4].

La estadística geográfica nace como una ciencia aplicada para resolver problemáticas en la estimación principalmente de reservas minerales donde ha sido ampliamente utilizada, probando su superioridad entre tantos métodos de estimación, trabaja con métodos de interpolación por lo que es la versión estimada de un fenómeno, esto se realiza por distintos métodos de interpolación, pero el principal y más utilizado es la estimación lineal que utiliza la continuidad espacial del fenómeno [6].

D. Variable regionalizada

Una variable regionalizada es una función que representa la variación en el espacio de una cierta magnitud (pureza) asociada a un fenómeno natural [5]. Esta una función

describe un fenómeno natural geográficamente distribuido; el dato inicial obtenido es conocido como variable aleatoria, además de su valor este dato está distribuido en el espacio y tiene coordenadas geográficas, por esta característica es conocido como variable regionalizada.

La variable regionalizada, matemáticamente es una función $z(x)$ donde x es un punto o un vector en R^n ($n: 1,2,3,\dots$), representando a una función aleatoria $Z(x)$. La finalidad es encontrar las características de la función $Z(x)$ para hacer las estimaciones de posibles puntos desconocidos. La variable regionalizada presenta una estructura espacial de correlación (autocorrelación). Toda variable regionalizada está formada por dos componentes, una estructurada (marca la relación entre el valor de la variable y puntos próximos) y un segunda componente aleatoria (representa un valor desconocido).

E. Variograma

El variograma es una función que constituye la herramienta fundamental de la estadística geográfica [5]. El variograma es una herramienta que permite analizar el comportamiento espacial de una variable sobre una zona dada y modela como dos valores en el espacio se ponen en correlación. Es un estimador de la varianza poblacional, por lo tanto debe tener una tendencia de estacionalidad y es un soporte para las técnicas del Kriging ya que permite representar cuantitativamente la variación de un fenómeno regionalizado en el espacio. El variograma está relacionado con la dirección y la distancia (h).

Sean x , $x + h$ dos puntos en el espacio:

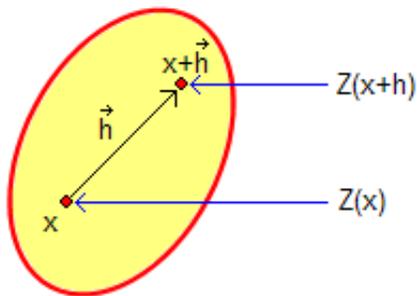


Figura 1. Dos puntos a la distancia vectorial h

La definición teórica de la función variograma $\gamma(h)$ es la Esperanza Matemática siguiente:

$$\gamma(\vec{h}) = \frac{1}{2} E \left[\left(Z(x + \vec{h}) - Z(\vec{x}) \right)^2 \right]$$

Dónde:

$\gamma(h)$: Función variograma E: Esperanza matemática x , h : Puntos en el espacio

Z: Función aleatoria estacionaria

- *Esperanza matemática:* La esperanza de una variable aleatoria representa un valor medio poblacional, en general no es igual a la mediana de la distribución.

- *Función aleatoria:* Se llama función aleatoria a aquella cuyo valor, para cada valor del argumento (o de los argumentos) es una variable aleatoria. Cada función concreta que puede ser registrada durante una sola observación de la función aleatoria se llama realización de la misma. Si se repiten las pruebas se obtienen diferentes realizaciones de la función aleatoria, debido a la naturaleza estocástica de las funciones muestras (realizaciones), las propiedades de una colección de realizaciones son descriptas sólo en un sentido estadístico.

F. Estimación Lineal

En términos mineros, se pretende encontrar la mejor estimación lineal de un bloque o zona V considerando la información disponible; es decir, las muestras interiores y exteriores a V .

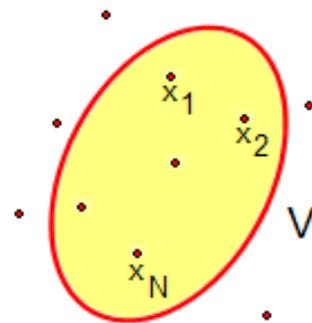


Figura 2. Volumen a estimar

El estimación lineal atribuye un peso λ_i a la muestra $z(x_i)$. Estos pesos λ_i . La estimación lineal proviene de los trabajos de Daniel Krige en las minas de oro sudafricanas de Rand, en los años 50. La teoría fue formalizada una década más tarde por el geomatemático francés Georges Matheron [6].

VI. TRABAJOS RELACIONADOS

Existen diferentes trabajos de investigaciones:

- El trabajo de Tesis de Maestría “Análisis georreferencial geológico minero para la definición de áreas de interés prospectivo en los municipios” del año 2010 presentada por la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas en la Republica de México. Se aplica técnicas que permiten profundizar estudios analíticos orientados a la actividad minera de prospección, que es una etapa previa a la exploración, explotación dentro de

la cadena productiva [7].

▪ La universidad de la República del Ecuador ha realizado estudios el 2011 sobre “Análisis georreferencial y estadístico de la actividad minera en los Páramos”. Esta investigación se enfoca en relacionar la actividad minera con el análisis estadístico de las variables tanto de prospecto, exploración y explotación, correlacionando información histórica generada por la institución [8].

▪ A inicios de año 2013, La asociación gvSIG de España firma un convenio con GMS S.R.L. de Bolivia como colaborador del proyecto gvSIG, logrando para la presente gestión la elaboración del programa de Educación Superior en la Maestría en “Geomática Libre” para la población boliviana y el mundo. Con esta maestría los estudiantes conocerán el esquema operacional de los sistemas de información geográfica: la generación, almacenamiento, análisis, producción, gestión, metadato, publicación de información geográfica y el manejo, personalización y programación de herramientas informáticas [9].

▪ La Vicepresidencia de Bolivia actualmente viene desarrollando investigaciones sobre la implementaciones de la Infraestructura de Datos Espaciales del Estado Plurinacional de Bolivia (IDE-EPB), definida como el conjunto de políticas, estándares, organizaciones y recursos tecnológicos, para facilitar el acceso y uso de la información geográfica, apoyar el desarrollo social, económico y ambiental, con la optimización en la producción y uso de la información geográfica, de manera oportuna y con un alto grado de precisión y calidad [3].

VII. METODOLOGÍA PROPUESTA

Para la implementación de modelo de referenciación geográfica de calidad de mineral, se establecen cuatro fases, descritas a continuación:

FASE I

Recopilación de información de las calidades de minerales asociados a lugar geográfico de origen de producción (departamento, municipio, concesión).

FASE II

Selección de las herramientas de software para la estimación de la calidad del mineral. Para el procesamiento de datos acorde a los modelos reutilizan las herramientas informáticas:

- PGgAdmin
- PL/pgSQL de Postgres 8.4
- ArcGIS Desktop 10.1

El procesamiento de información para la determinación de las variables regionalizadas, estimación mediante el

variograma y la correspondiente estimación lineal, se realiza con información real de calidades de minerales, las herramientas a utilizarse para el proceso el Lenguaje de consulta a Base de Datos Relacionales PL/SQL del PostgreSQL.

FASE III

Desarrollo del Modelo Referenciación Geográfica de localidad del mineral utilizando técnicas de estadística geográfica: variables regionalizadas, variograma-semivariograma, estimación lineal. Para la ilustración de esta fase se incorpora el ejemplo de calidades del cobre.

De acuerdo a los datos de calidades de minerales, en particular para el cobre en estado de broza, representado por su pureza entre las más bajas en determinadas áreas de explotación minera, a continuación se muestran algunos datos referenciales de calidad del cobre en un determinado área:

TABLA I. LEYES DEL COBRE (del 1% al 4%)

A 1	A 2	A 3	A 4	A 5
1.00	2.43	2.72	3.25	3.47
1.00	2.48	2.72	3.25	3.47
1.18	2.48	2.75	3.25	3.50
1.30	2.50	2.81	3.30	3.51
1.80	2.51	2.90	3.38	3.61
2.10	2.55	3.01	3.40	3.65
2.10	2.56	3.10	3.40	3.69
2.24	2.58	3.20	3.40	3.70

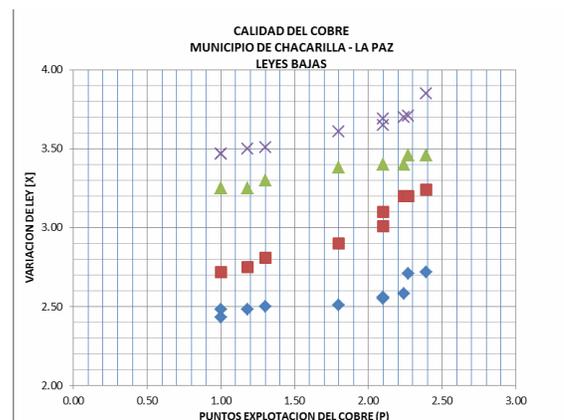


Figura 3. Puntos de calidad del mineral

Los datos geográficamente referenciados obtenidos a partir de datos representativos y los datos generados

mediante algoritmos de aproximación, permitirán la modelación gráfica a través de la herramienta informática el ArcGIS Desktop Vs 10.1, siendo este un programa informático, que agrupa varias aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica, entre sus herramientas se tiene:

- ArcMap, Es la aplicación central para visualización y manipulación de datos geográficos.
- ArcCatalog, Es la aplicación que se utiliza para gestionar los archivos a utilizar: mapas, bases de datos etc. Ayuda a organizar la información geográfica y es imprescindible para mantener nuestros datos en orden.
- ArcToolBox, Sirve para realizar operaciones de procesamiento de información geográfica: análisis de datos espaciales, conversión de formatos, gestión de datos y muchas más operaciones.

En el cuadro siguiente, se muestra un ejemplo de colocación de una determinada variable (mineral o mineral) debidamente geográficamente referenciado en una determinada región geográfica y los parámetros posibles de su calidad o pureza.

Los puntos representativos de calidad media de minerales, son representados gráficamente debidamente referenciados a un punto de origen, la cual permite establecer un patrón de comportamiento de variación de calidad, desde un valor mínimo hasta un valor máximo.

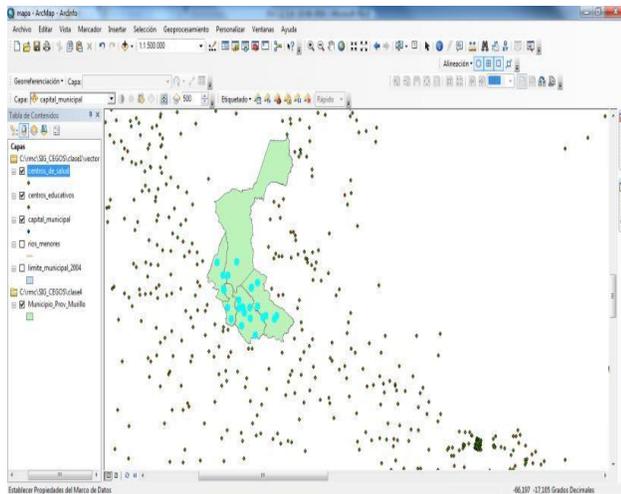


Figura 4. Datos geográficamente Referenciados – Herramienta ArcGIS Desktop 10.1

FASE IV

Validación de los resultados del Modelo Referenciación Geográfica de Calidad del Mineral, se realizan a través de pruebas comparativas de “leyes ponderadas”, que consiste en relacionar valores estimados con los valores obtenidos a partir de una muestra representativa real y en áreas aproximadas.

VIII. CONCLUSIONES

El desarrollo de un modelo de calidad mineralógica a través de técnicas de estimación estadística geográfica permite reducir los niveles de incertidumbre en la obtención de muestras representativas asociados al origen de producción.

Este modelo permite establecer patrones de comportamiento de calidad mineralógica distribuida geográficamente en determinados áreas de producción minera, así mismo coadyuvando a la toma de decisiones en políticas a implementar en aspectos de producción, comercialización interna y exportaciones mineras.

REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Minería, “Memoria Institucional”, 2012.
- [2] Alfaro M. “Introducción a la Teoría de las Funciones
- [3] Bustillo Revuelta, M.; López Jimeno, C. “Tipología, prospección, evaluación, explotación, mineralurgia, Vicepresidencia del Estado Plurinacional de Bolivia,
- [4] “Infraestructura de Datos espaciales del Estado Plurinacional de Bolivia Estrategia y Documento
- [5] Emery X., 2000, “Geoestadística lineal”, 2000.
- [6] Alfaro, M. “Introducción al Muestreo Minero”, 2003.
- [7] Matheron G. , “La Teoría de las Variables Regionalizadas y sus Aplicaciones”, 2005.
- [8] Romero M. U.,”Modelo probabilístico de la distribución geográfico-espacial”, 2006.
- [9] EMI, “Resolución del Concejo Académico N° 01/97”, 1997.