

Estado del Arte en el Diseño de las Redes de Exploración en Yacimientos Lateríticos de Níquel y Cobalto

Ramón Eddie Peña-Abreu ^(1*), Ortelio Vera-Sardiñas ⁽²⁾, Gerardo Antonio Orozco-Melgar ⁽²⁾

⁽¹⁾*Centro de Investigaciones del Níquel, Carretera Yagrumaje km 5 ½ Moa. Holguín., Teléf: 024-67123, 024-67976, rpena@cil.moa.minbas.cu, csam@cil.moa.minbas.cu.*

⁽²⁾*Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Facultad Minería-Geología. Dpto. de Geología. 833329, Moa. E-mail: overa@ismm.edu.cu.*

Recibido: mayo 21, 2014	Aceptado: abril 23, 2015
-------------------------	--------------------------

Resumen

La rentabilidad de las empresas metalúrgicas que extraen níquel de menas lateríticas, depende de la calidad de las menas, la cual se entiende como la estabilidad del contenido de los elementos útiles que exige el proceso, algunos autores aseveran que es indispensable la estabilidad del contenido mineralógico. Para lograrla es necesario conocer adecuadamente el yacimiento y las zonas a explotar, esto se logra con los datos que aporta el muestreo que se realiza en las redes de exploración. Se persiguió el objetivo de analizar de forma crítica los trabajos que enfrentan la optimización de las redes de exploración y aquellos que forman parte del contexto teórico que abarca el tema del diseño de las redes de exploración. Se expone la crítica a trabajos desarrollados en Cuba y foráneos, se advierte la necesidad de un nuevo enfoque que permita enfrentar una investigación para la optimización de las redes de exploración.

Palabras clave: Redes de exploración, muestreo, modelación matemática, optimización.

Art State of Designing Exploration networks of Nickel and Cobalt Lateritic ore body

Abstract

The profitability of metallurgical companies which recover nickel from lateritic ores depends on ore quality, which is understood as the useful elements contents stability required by the process, some authors assert that it is essential the mineralogical content stability. To achieve this is necessary to know very well the characteristic of the ore body as well as the areas to be removed taking into account the results provided from data sampling executed on network scanning. The objective carried out was to analyze deeply the work facing network optimization exploration and those which are part of the theoretical framework that covers network design exploration. Criticism of works developed in Cuba and other foreign countries were presented, It was clearly exposed the need for a new approach to face an investigation for the optimization of networks exploration.

Key words: network exploration, sampling, optimization, mathematical modeling.

1. Introducción

La ineficiencia productiva de los procesos metalúrgicos está ligada a la falta de información precisa sobre las menas alimentadas (Núñez et al, 2007). La información se adquiere en el estudio geológico que se inicia con las marchas de reconocimiento, le siguen en orden sucesivo el diseño y la perforación de las redes de muestreo de exploración y explotación (RMEE); de aquí en lo adelante cuando se exprese “redes de muestreo” ambas se considerarán incluidas. La adquisición de información culmina con el diseño y extracción de la muestra tecnológica (MT), la que al ser procesada como prueba metalúrgica garantiza un material similar al que se procesará en la industria (Peña y Sam, 2013). Al proceso metalúrgico se le exige un estrecho margen en la variación de los contenidos de las sustancias útiles y nocivas que componen las menas como estándar de calidad (Castellanos, 2007; Hernández et al, 2009).

Las RMEE aportan la información necesaria de cada punto sondeado y las muestras tecnológicas el comportamiento metalúrgico de los minerales que se enviarán al proceso. Las inexactitudes en su diseño repercuten desde el proceso minero hasta el metalúrgico y favorecen la dilución, las pérdidas y el empobrecimiento, el incumplimiento en el volumen y la calidad de las menas y el uso inadecuado del equipamiento de extracción. Todo esto provoca afectaciones al medio ambiente e ineficiencias que redundan en baja rentabilidad económica (Legrá, 1999; Arderí y García, 2003; Fernández, Mariño y Reynosa, 2007; Fernández y Mariño, 2009).

No siempre se entendió la necesidad de orientar las investigaciones hacia los métodos de diseño de las redes del muestreo de exploración y explotación. La convergencia dialéctica de causas sociales, económicas, tecnológicas y científicas, generaron la necesidad de optimizar el diseño de dichas redes de muestreo en los yacimientos cubanos de Níquel para elevar la representatividad de las nuevas concesiones mineras y mejorar el conocimiento de las existentes. En lo económico, la crisis afectó sustancialmente al mercado del Níquel (LarcoNickel, 2006), por ello la industria cubana de este metal, para aminorar sus efectos, fomentó las investigaciones orientadas al aumento de la eficiencia que puedan realizarse sin inversiones costosas.

En lo tecnológico, los procesos metalúrgicos requieren un estrecho margen en los componentes útiles y nocivos de las menas (Ashok et al, 2004; Castellanos Suárez, 2007; Chang et al, 2004 y 2005; Hernández et al, 2009), esto representa un reto para el procesamiento de las menas lateríticas, compuestas por una alta diversidad de minerales (De Vettler, 1955; Lavaut, 1987 y 2003; Rojas, 1994; Rojas y Orozco 1998; Coello et al, 1998; Rojas et al, 2005; Freyssinet, Butt & Morris, 2005), lo que influye en la ineficiencia productiva de los procesos metalúrgicos, ligada a la ausencia de precisión en la información sobre la composición mineralógica de las menas que se procesan (Núñez, 2007; Bernal, 2003).

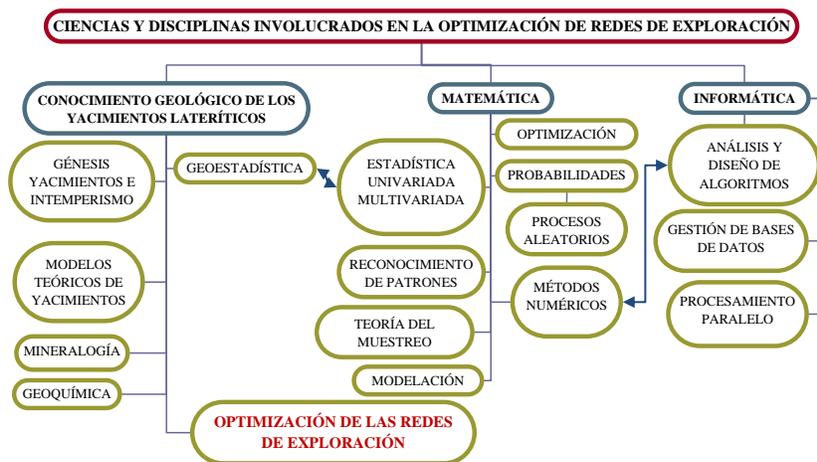


Fig. 1. Interrelación de las disciplinas involucradas en la optimización de las redes de exploración.

En la última década de la pasada centuria, nuestro país tuvo que insertarse en el mercado internacional, debido los cambios en el mapa geopolítico, provocado por el derrumbe del campo socialista, paralelamente se agotaban nuestros mejores yacimientos y se acrecentaba la obsolescencia y deterioro del equipamiento minero y metalúrgico, con la consecuente disminución de la eficiencia industrial y con ello las pérdidas económicas que repercutieron directamente en el aspecto social. La asimilación de tecnologías occidentales trajo aparejado un cambio cultural en la producción minera de la industria cubana del níquel, ya que varió la forma de extracción y planificación minera (Hernández, 2003). Se introdujeron nuevos softwares, conceptos y normas diferentes en el cálculo de recursos y reservas, adecuados a las normas de las instituciones internacionales que financian proyectos mineros (Lavaut, 2007; Resolución N° 215/99 del extinto Ministerio de la Industria Básica), los primeros dotados de métodos geoestadísticos. Estas premisas coincidieron, antes no existían causas objetivas en Cuba que generaran la necesidad de investigar en el diseño de las RMEE.

Es obvio de lo explicado en los párrafos anteriores que se ha identificado como *problema* la ausencia de conocimiento sobre los factores que han impedido avanzar significativamente en el desarrollo teórico y práctico para la optimización de las RMEE, por ello se persigue el *objetivo* de analizar las investigaciones que enfrentan su diseño y aquellas que forman parte de su contexto teórico, lo que permitirá trazar la estrategia de desarrollo en una investigación que genere los métodos y modelos para optimizar las RMEE, en cuanto a la relación del aporte de información vs su densidad.

2. Materiales y métodos

La revisión y búsqueda bibliográfica se realizó evaluando toda ciencia y disciplina que involucra el diseño de las redes del muestreo de exploración y explotación en yacimientos lateríticos. Esto permitió definir la interrelación entre ellas, lo cual se expone en la fig. N° 1.

Se utilizaron los tres tipos de fuentes bibliográficas y la consulta a especialistas de la academia, así como de las empresas productoras y de las empresas exploradoras. Los materiales más recientes se obtuvieron de las búsquedas en internet, fundamentalmente del buscador Google académico.

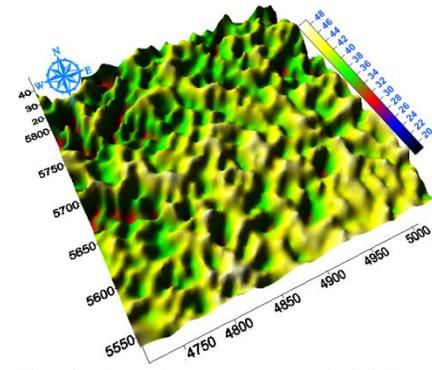


Fig. 2. Distribución espacial del Fe en el bloque O48.

3. Análisis y discusión

Ya que el desarrollo de las RMEE inicia con un diseño para ubicar los pozos, ellas constituyen el plan de muestreo en los yacimientos, pero es erróneo considerar que disciplinariamente se enmarca únicamente en la estadística, teniendo en cuenta que existe en este caso una diferencia sustancial con la planificación estadística de experimentos, en la cual el propio plan no genera errores y se tienen en cuenta solo los generados en la toma de la muestra y los que se producen en los análisis físicos y químicos (Federov, 1972; Da Luz et al, 2004; Berger, 2010). En el diseño de las RMEE el plan de sondeos puede generar errores ya que depende del comportamiento espacial de las menas, es por ello que se entrelazan varias ciencias y disciplinas que serán abordadas.

El análisis realizado al estado del arte del diseño de las RMEE se explicará en cuatro ámbitos que se consideran los ejes principales del conocimiento que involucra su diseño, el geológico, el matemático, el de la teoría del diseño óptimo del muestreo y el de los trabajos que abordan directamente el diseño de las RMEE.

3.1. Ámbito geológico

En la formación de los yacimientos de intemperismo influyen diversos factores que contribuyen en la *meteorización*, en Wilson (2004) se detalla lo complejo de este proceso y Lavaut (1987, 2003) en sus estudios sobre las ofiolitas de Cuba oriental demuestra que depende de la fisuración tectónica de las rocas madres y del microclima de la localidad, aclara que la tendencia de ese proceso sobre las ultramafitas es única para cada yacimiento, con marcadas disimilitudes dentro de una misma región.

A conclusiones similares arriban otros autores que analizan la influencia de las condiciones microclimáticas y del basamento en la formación de los yacimientos de intemperismo (De Vettler, 1955; Rodríguez et al, 1987; Llorca, 1993; De Dios y Díaz, 2003; Gleeson et al, 2004, Freyssinet, Butt & Morris, 2005; Bergues, 2006; Proenza et al, 2007 y 2010). De estos trabajos se deduce el marcado carácter local y anisotrópico del comportamiento espacial y de las propiedades fundamentales del producto residual de la meteorización. La figura N° 2 ilustra este hecho en un bloque del yacimiento Punta Gorda para el Fe. El diseño de las redes de exploración para los yacimientos lateríticos no debe obviar esta complejidad, la cual no se limita sólo a la composición química y mineralógica, sino que se manifiesta en otras características del material yacente.

Los yacimientos lateríticos fueron formados por el intemperismo de rocas básicas y ultrabásicas en horizontes de materiales residuales de la meteorización (Iturralde et al, 2009), los cuales se han dividido para su estudio de diferentes formas (Lavaut, 1987 y 2004; Muñoz et al, 2009). La clasificación de Lavaut, (1987), se ha establecido en la exploración geológica de los yacimientos lateríticos de níquel y cobalto del oriente cubano (YLOC), propone seis horizontes, se fundamentó en la geoquímica, la mineralogía, la morfología, las propiedades estructurales y en

propiedades físicas tales como el peso volumétrico, humedad natural, granulometría y resistencia a la compresión. Otra clasificación muy utilizada se expone en Elias (2001 a y b).

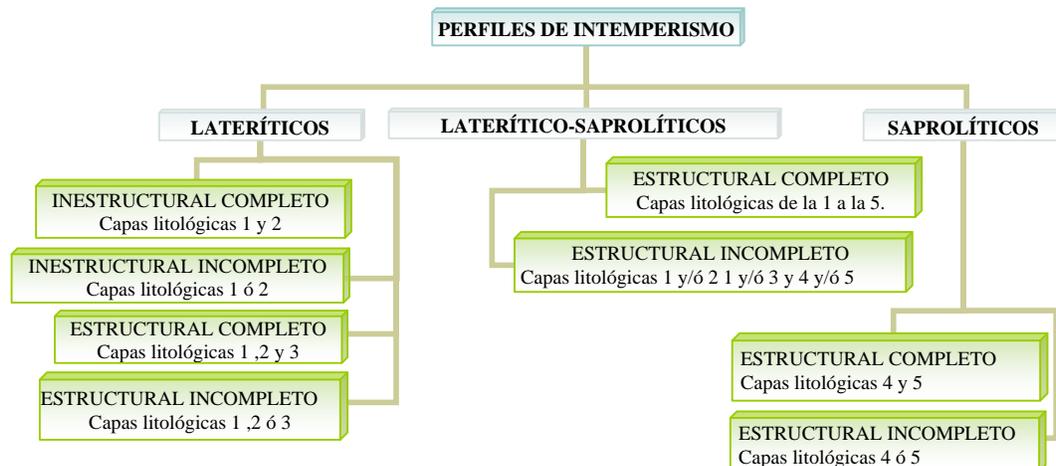


Fig. 3. Tipos de perfiles de intemperismo según Lavaut, 2003

Los perfiles en los YLOC pocas veces aparecen de forma ideal, Lavaut (2003) caracterizó ocho combinaciones de los horizontes que conforman perfiles de intemperismo. Esta clasificación se divide en tres grupos o familias de perfiles lateríticos que se ilustra en el esquema de la fig. 3. En Lavaut (2003) se deja al descubierto la complejidad de las combinaciones del producto residual del intemperismo observado en los perfiles lateríticos del nordeste oriental cubano. Rojas (1994) aporta un resultado, que en función de la modelación de dichos yacimientos es equivalente. Estableció la relación de los perfiles con el grado evolutivo o madurez de la corteza de intemperismo, su influencia en las características físicas, químicas y mineralógicas; estableció un método de diferenciarlas por la granulometría, densidad, color y la potencia. Deja establecida la relación de los minerales con la granulometría, asociando cada fracción granulométrica a un nivel de enriquecimiento en níquel.

En otros trabajos se demuestra la complejidad de la composición mineralógica de los YLOC (Rojas, 2001; Rojas et al, 2005; Ageyi et al, 2010), la relacionan con su génesis durante la cual ocurrieron movimientos tectónicos verticales, de ascenso y descenso a diferentes intensidades que removieron y redepusieron los materiales, en ambiente marino y continental. Otros autores explican que estas cortezas aparecen de ambas formas y generan otros tipos de perfiles (Adamovich et al, 1962 y 1963; Sitnikov, 1976; Aleojin, et al, 1977; Formell y Oro, 1980; Formell, 2003). La dispersión de los elementos químicos se ha explicado en Wilson (2004), en Muñoz, Rojas y Díaz (2007), también en Muñoz y Orozco (2009), ellos exponen la existencia de minerales con enlaces químicos y estructuras moleculares muy diversas.

Las variables sustanciales de la composición de los YLOC tienen un comportamiento anormal, según lo expresan Vera (2001) y Cuador (2002). En Peña y Perdomo (2014) se realiza un análisis direccional de dicho comportamiento y se demuestra que para tres yacimientos la anomalía es direccional.

Una solución para explicar el comportamiento caótico que se ha descrito y aligerar el estudio de este tipo de yacimientos son los modelos *teóricos*, que sintetizan y generalizan su conocimiento (Ariosa et al, 2003; Muñoz et al, 2009). Ellos pueden contribuir a racionalizar el diseño de las redes de exploración (Vera, 2001; Cuador, 2003), los utilizados hasta el momento tienen como dificultad que se soportan en clasificaciones no orientadas a la modelación matemática, sus clases no siempre son mutuamente excluyentes y no discretizan el espacio lo suficiente.

De lo anterior expuesto se concluye que en los YLOC *existe un intenso carácter local en el comportamiento de las variables sustanciales; en ello radica la esencia de la anomalía de sus distribuciones probabilísticas en cada dirección. Por tanto, no es correcto suponer que en ellas existen regularidades probabilísticas. La gran cantidad de factores que influyen en la composición mineralógica de las lateritas, debido a su génesis, conlleva a la necesidad de un estudio multivariado para caracterizar el comportamiento de sus variables.*

3.2. Ámbito Matemático

En Cuba la aplicación de la matemática al análisis de yacimientos comenzó con la utilización de la estadística a la exploración (Duda, 1971 a y b; Rodríguez, 1987). Se realizó con procedimientos elementales que describen y asocian el comportamiento de las variables de interés industrial al conocimiento geológico. En las empresas cubanas se han implantado softwares con herramientas geoestadísticas (Lavaut, 2007; Barrientos, 2009; Guilarte, 2011), estos se utilizan en trabajos de diplomas, maestrías y doctorados (Chinhama, 2000; De Dios, 2000; Vera, 2001; Cuador, 2002; Cuador, Estévez y Lavaut, 2003; y Pérez, 2006).

La modelación matemática de los yacimientos lateríticos cubanos de Ni y Co se ha centrado hasta el momento en la utilización de diversos interpoladores geoestadísticos, que estiman en el espacio una o más variables para pronosticar el comportamiento geoquímico de las menas enviadas al proceso metalúrgico (Legrá et al 1997 a y b, 1999, 2001; Cuador, 2002; Martínez, 2007). Esta modelación no siempre es efectiva pues está sujeta a exigencias que de no cumplirse se afectan la precisión de los cálculos. Es conocida la anormalidad de las variables en los YLOC (Peña y Perdomo, 2014), esa dificultad actualmente se soluciona transformando los datos con métodos que pueden resultar numéricamente inconsistentes (Bajvalov et al, 1987), *entonces es lógico concluir que en la modelación de los YLOC es recomendable utilizar métodos estadísticos no paramétricos.*

3.3. Estudios de redes

Un resumen de los principales trabajos hasta la década del 90 del pasado siglo dedicados al estudio de redes, se ha expuesto en Vera (2001); los principales aportes teóricos se encuentran en Arias (1984), Bravo (1984), Rodríguez (1986 y 1990). Arias (1984), en un sector del yacimiento Martí aplica métodos geoestadísticos, obtiene el radio de autocorrelación, define la distancia óptima entre muestras de la red cuadrada y realiza el análisis de la variabilidad. Su importancia radica en la utilización del modelo geoestadístico para la definición de la densidad de las redes de exploración. Como inconveniente se advierte la falta de un estudio de normalidad previo a las variables y el enfoque univariado en la definición de la densidad de la red. Bravo (1984) expone dos métodos para densificar las redes de exploración, uno determina la cantidad de sondeos conocida la distribución y el segundo utiliza el coeficiente de autocorrelación para mejorar el criterio de la *t* de Student, ambos presentan dificultades similares al trabajo anterior.

En los dos trabajos analizados se considera una dificultad el enfoque univariado, el criterio o método de selección de la variable para definir la red y la inobservancia de las regularidades probabilísticas de las variables. Pese a estas dificultades ambos aportaron avances en el tema.

Rodríguez en sus trabajos (1986; 1990 y 1991), propone una metodología para determinar redes óptimas en la que son herramientas fundamentales la estadística univariada y los medios computacionales. Utilizó el método de analogía entre yacimientos para la red primaria, secciona el yacimiento por horizontes, particulariza las redes a cada yacimiento, tiene en cuenta la variabilidad de los componentes útiles y realiza secuencialmente el diseño de las redes de exploración; estos cinco aspectos, según la autora, son fundamentales para mejorar los estudios de redes. Realiza un análisis geológico profundo que intenta clasificar las variedades en el yacimiento, de esta forma logra mostrar la diversidad geoquímica y mineralógica, la cual relaciona con las clasificaciones, tecnológicas y por horizontes.

Aborda la analogía entre los yacimientos de tal forma que adecua al contexto geológico, los resultados similares de otros yacimientos y zonas. La particularización de cada yacimiento se realiza teniendo en cuenta las diferencias entre ellos; aunque no explícitamente, utiliza las invariantes de los yacimientos (Ariosa, 2002).

Es una limitante el hecho de que fija la forma de la red, los errores y las condiciones de categorización de las etapas. Presenta dificultades respecto al tratamiento estadístico, similares a las señaladas en los trabajos anteriores; en las comparaciones no se realizan pruebas de hipótesis, tampoco se aplican estas pruebas a los coeficientes de correlación obtenidos. Su aporte fundamental radica en la modelación del yacimiento y la sistematización de conocimiento que logra en la metodología desarrollada, las premisas que define están vigentes aún en las últimas investigaciones relacionadas con este tema.

Entre las dificultades fundamentales de los trabajos en este período se encuentran, el uso inadecuado de la estadística, la utilización de modelos incongruentes con los yacimientos lateríticos, la falta de criterios para la selección de las variables, la limitación del análisis a una variable y la restricción a una secuencia de etapas fijas en el diseño de la red.

Un nuevo período comenzó con el trabajo de Vera (2001), el cual supera parte de las limitaciones presentes en trabajos anteriores. Este autor eligió e incorporó más de una variable al diseño de la red de exploración con la ayuda del *análisis de componentes principales* (ACP), que le permitió construir una combinación lineal de dos variables representativas e independientes. Realizó la comprobación de la normalidad de cada variable y transformó las

anormales para aplicarle las herramientas geoestadísticas. Implementó los *dominios geológicos* (DG) (Quintas et al, 1989) para el diseño de las redes de exploración, con ello logra establecer zonas de menor heterogeneidad geológica y calcula la red en cada dominio para el cómputo del volumen. Asume que este criterio de modelación le permitirá acotar características particulares de cada zona para realizar analogías. Logró modelar cada situación posible y analizó en detalles los errores, especifica la metodología a seguir para obtener una red racional en cada caso acorde con las condiciones de los DG.

El uso del ACP para sintetizar la información fue un paso de avance en el diseño de redes y en el estudio de los yacimientos lateríticos, teniendo en cuenta la complejidad que se enfrenta en la aplicación de los métodos geoestadísticos multivariados (Martínez, 2007).

La utilización de los dominios geológicos constituyó el punto de apoyo en la construcción teórica expuesta por Vera (2001), los cuales logró elaborar minuciosamente y disminuir en ellos la variabilidad espacial de los elementos útiles, adecuando la modelación matemática para racionalizar las redes de exploración en un proceso secuencial de etapas definidas, a las cuales se le imponen condiciones de transición en ascenso del nivel de conocimiento y cada una certifica el volumen de acuerdo a un estándar establecido (MINBAS, Resolución 215, 1999).

Vera (2001), mejoró la precisión con el empleo de Kriging de Bloque y una densificación específica de cada panel, sin embargo, la estabilidad en la exactitud del cálculo de volumen está sujeta al empleo del método Kriging, pues un cambio de aproximador puede hacerla variar, esto hace menos robusto al método. Adicionalmente los DG no lograron evitar la anomalía de las variables y esto afecta el uso del Kriging aún con la transformación de las variables. Este comportamiento es natural en los yacimientos lateríticos causado por su génesis caótica, que genera una mezcla de poblaciones estadísticas en correspondencia con los procesos de formación antes explicados.

En este trabajo y en todos los analizados hasta el momento se restringe la forma en el diseño de la red, se asumen fijos el error y la cantidad de etapas en la densificación y se utiliza un mismo procedimiento geomatemático para el diseño de las RMEE, en este caso particular en los dominios geológicos, en otros se aplican al yacimiento o a la zona estudiada.

Se considera un inconveniente que para lograr la definición precisa de los dominios geológicos se requiere un grupo de profesionales avezados en cada una de las disciplinas, ya que la opinión de expertos puede variar con los criterios de modelación y generar ambigüedad, lo que limita la generalización del método e indica que se debe profundizar en los métodos de seccionamiento espacial de los yacimientos, para lograr modelos geológicos que permitan integrar en modelos matemáticos las características geológicas y optimizar con ellos la red.

Otra tendencia en el diseño de las redes de exploración es la “Simulación Geoestadística” (Cuador, 2002 y 2003; Lavaut et al, 2007; Barrientos, 2009). En Cuador et al (2003), se alterna entre la estimación y la simulación, contrastando el espaciamiento de la red vs por ciento de bloques que incumple los errores. Se diseñan redes virtuales muy densas simulando la variable que define la red con interpolación geoestadística, para un valor esperado y una dispersión, a partir de los valores reales en las redes perforadas en el yacimiento. Luego se estima cuál de las densidades satisfacen la condición de categorización buscada. En este método las variables que incumplen la normalidad se transforman con procedimientos no explícitos en el trabajo que pueden afectar la simulación (Bajvalov et al, 1987; Bavienko, 1986).

Los métodos desarrollados por Vera (2001) y Cuador (2003) constituyeron importantes avances ingenieriles en la racionalización de las RMEE. En ellos y en todos los trabajos analizados anteriormente la modelación parte desde las mismas premisas, las cuales impiden el avance de la racionalización a la optimización del diseño de las RMEE. El enfoque de modelación que utilizan se expone en Vera (2001) y en Peña y Legrá (2005 a y b), éste se resume de la forma siguiente: *en un yacimiento, para adquirir un grado de conocimiento E_k (etapa k de la red), se exige que el porcentaje P_k de los bloques o paneles i , de lado L_k , tengan un error ϵ_i menor que el ϵ_k permitido por una norma o la condición que se exija para la variable que define la red (Ni o Fe en los YLOC). A este enfoque en el diseño de redes de muestreo se le denominará en lo adelante clásico o restringido. La fig.4 lesboza su forma de adquirir la información según el enfoque clásico, del cual se considera que presenta las dificultades siguientes:*

1. se restringe la forma en el diseño de la red;
2. se asumen fijos el error (ϵ_i) y la cantidad de etapas (t) en la densificación;
3. se utilizan modelos univariados en un contexto multivariado
4. un mismo método geomatemático en los dominios geológicos, en una zona o para todo un yacimiento.

Se ha dicho que este enfoque limita la modelación, no permite la *optimización* y sólo logra la *racionalización* de dichas redes. La diferencia entre estos dos términos es que la optimización de un objeto se expresa en una función

K	C _K	P _K	L _K	ε _K
1	C ₁	P ₁	L ₁	ε ₁
2	C ₂	P ₂	L ₂	ε ₂
3	C ₃	P ₃	L ₃	ε ₃
.
.

Fig. 4. Secuencia actual en el desarrollo de una red de exploración.

denominada objetivo (FO) cuyo dominio de solución es el conjunto de soluciones factibles (CSF). Los valores óptimos son aquellos que minimizan o maximizan a la FO en el CSF. Si en el modelado no se incluyen las variables fundamentales en la FO y/o se restringe el CSF obviando aspectos que describen el objeto, entonces se obtiene un modelo racionalizado y su solución es una *racionalización* del objetivo que se busca (Peña y Trujillo, 2005).

La racionalización es un método de encontrar soluciones prácticas con un bajo costo computacional o para modelar objetos muy complejos, en cualquiera de los casos se deben mantener los rasgos fundamentales del objeto para que sean efectivas sus soluciones. En la medida que se avanza en la implementación de nuevos métodos de cálculo y se hacen más rápidos los ordenadores, la racionalización deja de tener sentido para algunos modelos. No obstante, sucede con frecuencia que se racionaliza bajo concepciones económicas o técnicas que innecesariamente se incluyen como restricciones de los modelos matemáticos, tal es el caso de la optimización de las redes de muestreo en los YLOC, la cual se ha planteado hasta el momento como una racionalización (Vera, 2001; Cuador, 2002).

En el ámbito internacional no son numerosos los trabajos de racionalización y optimización de las redes de muestreo para yacimientos lateríticos, Boucher, Dimitrakopoulos y Vargas (2005) utilizaron una simulación estocástica que conjuga las variables correlacionadas para producir una realización simulada del depósito a partir del sondeo real. Los resultados se tratan como sondeos reales, luego se utilizan para volver a simular el depósito y validar la categoría en los bloques. De esta forma se comparan diferentes esquemas de perforación y se elige el más eficiente según la categoría.

Las variables se conjugan con una factorización mínimo/máximo de la autocorrelación (MAF) la cual se aplica a los semivariogramas y es una transformación similar al ACP. El criterio condicionante en estos trabajos es la rentabilidad (de la extracción, de la molienda y del procesamiento metalúrgico), tiene en cuenta el aporte de los elementos útiles y los descuentos en eficiencia generados por los elementos nocivos, calculados para cada bloque o unidad de selectividad minera, el objetivo es maximizar la ganancia.

Este procedimiento se utilizó para definir las redes del yacimiento australiano de Ni laterítico “Murrin Murrin”, también en un yacimiento de diamante (Duggan y Dimitrakopoulos, 2005) y en un yacimiento de carbón (Li et al, 2004). En “Murrin Murrin” se evaluaron cuatro esquemas de redes cuadradas, de ellos se eligieron los lados de 12 m y 25 m.

En ese trabajo se consideran aportes al diseño de las RMEE la conjugación de variables con el MAF, la simulación condicional y los criterios económicos utilizados. El método empleado por los autores es similar al utilizado por Cuador (2002), ya que realizaron simulaciones con un método univariado que aplican a todo el yacimiento. Aún con la utilización de potentes herramientas matemáticas y el uso de condicionantes económicas, esos autores obtuvieron resultados similares a los de Arias (1984) y Bravo et al (1983 y 1984) que fueron desarrollados dos décadas antes para un yacimiento de Ni del oriente cubano. De ello se evidencia que la modelación desde la perspectiva del enfoque clásico genera resultados similares independientemente de los métodos matemáticos empleados. Esos autores utilizan métodos paramétricos y ya se ha concluido que no son aplicables a los YLOC (Peña y Perdomo, 2014).

Es obvio que los métodos de simulación que se han empleado hasta el momento en el diseño de las redes de muestreo no generan redes óptimas, porque obvian aspectos geológicos claves de los yacimientos modelados y del muestreo.

En Boucher et al (2005), así como en Duggan y Dimitrakopoulos (2005) apenas se describen los aspectos geológicos, priorizaron la modelación económica en detrimento de los aspectos naturales y la simulación se encarga de describir totalmente el comportamiento de las variables. Este tipo de modelos es frecuente en trabajos foráneos (Li et al, 2004; Saikia y Sarkar, 2006), en comparación, se puede decir que los trabajos nacionales han profundizado más en la modelación geológica, lo que ha favorecido la creación de modelos matemáticos más precisos.

En el monitoreo de aguas subterráneas y en estudios medioambientales numerosos trabajos se orientan a optimizar la distribución del muestreo en redes, Bárdossy, Bogárdi, (1983); Bogárdi, Bárdossy y Duckstein, (1985); Andricevic y Foufola, (1991); Lo, Kuo y Wam (1996); Bueso, Angulo y Alonso (1998); Pardo (1998); Fowler et al (2000); Wu, (2004); Geza et al (2006); Díaz Viera (2007); Shakeel et al (2008), así como, Barca y Passarella, 2009 utilizan herramientas matemáticas similares a las analizadas en los trabajos anteriores con las diferencias propias del objeto modelado y los criterios de optimización.

Otras investigaciones no menos importantes se han revisado y su análisis se encuentran incluido en las conclusiones que se han decantado (Duda, 1971 a; Secik, 1971; Pérez, 1972; Rodríguez, 1977; López, 1981; Abad, 1984; Leyva y Soler, 1984; Olea, 1984; López, 1986 y Rodríguez, 1991; Lavaut, 2000). Una parte importante de los métodos empleados para el diseño de las RMEE en los yacimientos no se plasman explícitamente en artículos o informes geológicos, solo en algunos casos se hace referencia a la densidad de puntos y la forma de la red, es por ello que no se tiene referencia de todos los trabajos realizados fundamentalmente de los referentes al diseño de las redes utilizadas en la primera planta de níquel cubana en Nicaro (Roque, 2014; Bonsoño y Karell, 2015).

De todos los trabajos analizados se destacan como avances el empleo de *métodos geomatemáticos para establecer criterios en la densificación de las redes de muestreo; el seccionamiento espacial del yacimiento para particularizar el diseño de las redes a cada sección y aplicar el método de analogías entre zonas de diferentes yacimientos; la conjugación de variables en el modelado; la utilización de la simulación condicional y la combinación de simulación con estimación geoestadística*. Las dos principales dificultades comunes en estos trabajos son, *el uso del enfoque clásico para el diseño de las RMEE y en el empleo de métodos geoestadísticos que dependen del ajuste de las variables a la distribución normal, particularmente de la geometría de los datos* (Cuador, 2002 y 2003), ambas pueden condicionar el diseño de las RMEE de forma contrapuesta a los principios básicos del muestreo (Montgomery, 2001; Da Luz, 2004).

La aplicación de métodos iguales a yacimientos diferentes evidencian un pobre avance en el diseño de las redes de muestreo, que obvia el desarrollo existente en la teoría del muestreo expuesta en Gavoronski y Feodorov (1984), Hardin y Sloane (1993), Bernardo, (1993), Cook y Fedorov 1995, Box y Tyssedal (1996), Douglas et al (1999), Torres y Ospina (2001), Royle (2002), Makransky (2009) y en Berger (2010).

Relación de las redes del muestreo de exploración y explotación con la teoría de optimización del muestreo

Una red de exploración o de explotación constituye un plan de muestreo que depende de la distribución espacial de las propiedades del material muestreado, por ello se exponen los principales avances teóricos de la optimización del muestreo.

En Berger (2010) se exponen dos tareas, la primera es encontrar un conjunto de muestras para obtener estimadores eficientes de las variables de una distribución según un modelo específico; la segunda es encontrar el conjunto óptimo de estimadores para los parámetros de una distribución conocida de la variable independiente en el modelo. A la primera tarea se le denominó *problema del diseño óptimo del muestreo*, a la segunda se le denominó *problema del diseño de experimentos*. La primera tarea fue desarrollada por Federov (1972) para el modelo de regresión. La búsqueda del conjunto óptimo de muestras se realiza con diferentes criterios de optimalidad (se refiere a los criterios de análisis de la función objetivo bajo los cuales se debe conseguir el óptimo), que utilizan la matriz de varianzas del modelo de regresión o matriz de información de Fisher (Cook y Fedorov, 1995; Pardo, 1998; Douglas et al, 1999; Royle, 2002; Berger, 2010).

El criterio más conocido es la “Optimalidad D” que maximiza en los parámetros del modelo de regresión al determinante de la matriz de información de Fisher, con ello utiliza toda la información y es invariante a la transformación lineal en la escala de los parámetros (Berger, 2010). El criterio de “Optimalidad A” maximiza la traza de la matriz de Fisher, por tanto no utiliza toda la información disponible y depende de la escala de la variable independiente.

Existen además, el criterio de “Optimalidad E” que maximiza la menor raíz característica de la matriz de Fisher y no utiliza toda la información disponible; el criterio de “Optimalidad E ponderada” o criterio MAXIMIN que utiliza los pesos del muestreo en la maximización del peor valor posible, según Berger (2010) es un problema de optimización multiobjetivo; la “Optimalidad G” que minimiza la máxima varianza de predicción del modelo y la “Optimalidad I” que minimiza la varianza promedio del modelo. Estos problemas son computacionalmente duros, en ambos se asume conocida la distribución de la variable y el modelo de ajuste. La optimización de las RMEE se asocia a la primera tarea, pero es multivariada, depende del comportamiento espacial y no se conocen las distribuciones probabilísticas de las variables lo que complejiza el modelado.

Estrategia que se deriva del estado del arte para la optimización de las redes del muestreo

En Vera (2001) se define “el conocimiento de un parámetro” de tal modo que es dependiente del modelo utilizado en el procesamiento de los datos, esta dependencia queda también implícita en el método que utiliza Cuador (2002) para definir redes racionales y es una consecuencia directa del punto de vista que propone el enfoque clásico. Se considera imprecisa esta definición para la modelación integral en el diseño de las redes de muestreo y para avanzar hacia una nueva construcción teórica se adopta la definición expuesta en Legra y Silva (2011). Se entenderá como información en este contexto, el mensaje que expresa el cambio de un estado a otro en el objeto investigado y se forma ex profeso de datos adquiridos con medios técnicos.

Entonces se puede definir que para generar conocimiento de un objeto se debe poseer información de él y ésta se debe cuantificar independientemente de las herramientas que se utilicen para analizarla y transformarla en conocimiento. Atendiendo al nuevo punto de vista sobre la información resulta lógico que la medida de *la información que aportan las redes de muestreo sea la entropía* (Shannon, 1948), que se expresa en unidades naturales en función de la probabilidad de un evento perteneciente al espacio de eventos que conforman todos los

estados del objeto. *Ella permite medir la máxima cantidad de información que es posible adquirir y transformar en conocimiento.*

Para aplicar esta definición es necesario conformar el espacio de eventos posibles en los yacimientos, para ello se debe tener en cuenta el medio y la tecnología para la toma de las muestras. En los YLOC el medio es continuo, su comportamiento sustancial es aleatorio, multivariado y no se ajusta a una distribución probabilística específica. En el sondeo se extrae una muestra de longitud fija en cada intervalo hasta el contacto con la roca madre, lo que discretiza todo el yacimiento, por tanto, el espacio de evento debe ser discreto. El comportamiento sustancial se debe hacer corresponder con la discretización del espacio que genera el muestreo, lo que debe lograrse con una clasificación que ponga en correspondencia a cada intervalo del sondeo con una clase que en consecuencia exprese las propiedades geológicas.

El perfil de intemperismo laterítico se ha clasificado en horizontes que poseen una gama de características, pero se confunden en las zonas de transición entre horizontes colindantes y generan ambigüedades que afectan la modelación matemática (Lavaut, 1987 y 2003; Elías, 2001b; Muñoz et al, 2009). La clasificación tecnológica se fundamenta en intervalos del Fe y el Ni, en criterios económicos dinámicos y en conceptos metalúrgicos que no integran toda la información.

De este análisis se concluye que ninguna de estas clasificaciones modela de forma precisa el comportamiento sustancial de los YLOC y no deben utilizarse para conformar su espacio de eventos. Para este fin se debe crear una clasificación en la cual las clases sean *mutuamente excluyentes; conformen en conjunto el comportamiento sustancial del yacimiento; no dependan de su distribución espacial* y respondan al uso industrial. Sin embargo, en la modelación de los yacimientos el aspecto más importante es *la georeferenciación de sus propiedades* y se ha planteado obtener clases sustanciales independientes de ella, por tanto, debe garantizarse una estructura en el modelo que imbrique las clases con su distribución espacial.

Se ha expresado que los comportamientos en los YLOC presentan direccionalmente un carácter local, de ello se supone que el comportamiento sustancial en un punto, desde una dirección, depende del estado en que se encuentre el punto inmediato anterior. Lo explicado se esquematiza en la **fig. 5**, asumiendo independientes las probabilidades condicionales $p_{3,8}$, $p_{7,3}$ y $p_{7,8}$, entre los puntos Pz31, Pz42 y Pz53 respectivamente. Esta forma de enlace entre los eventos se modela con cadenas de Markov, cuando la combinación entre ellos no se distribuye normalmente se deben utilizar cadenas no paramétricas.

De todo lo anteriormente analizado se puede resumir que la estrategia de modelación que se debe emprender es la siguiente:

1. establecer la entropía como medida de la información que aportan las redes;
2. clasificar el comportamiento sustancial de los YLOC en un sistema discreto de clases mutuamente excluyente;
3. incluir en la estructura del modelo la relación de los comportamientos sustanciales con su distribución espacial;
4. el comportamiento sustancial se modelará con cadenas de Markov en cada dirección;
5. en la optimización tendrá el objetivo de maximizar secuencialmente la relación entre el aporte de información y el número de sondeos, para generar en cada secuencia una serie optimizada de pozos, que será la información inicial en la próxima secuencia.

Nuevo enfoque al problema del muestreo en los YLOC

La estrategia de modelado se formaliza matemáticamente de la siguiente forma: *dado el objeto O del cual se tienen en el momento t un número finito de propiedades (P_k , $k \in \mathbb{Z}^+$), con su correspondiente nivel de conocimiento (l_k) forman el par (P_k, l_k) que representa un nivel $\mathcal{F}(t)$ de conocimiento de O. Maximizar el conocimiento de O en el momento t significa optimizar la relación funcional $\mathcal{F}(t) = \Phi(l_1, l_2, l_3, \dots, l_k, k, t)$, donde l_k y P_k se relacionan funcionalmente $l_k = l_k(P_k)$. Maximizar el conocimiento de O, significa optimizar la serie funcional $S = S(\mathcal{F}(t^\zeta))$, $\zeta \in \mathbb{Z}^+$. Cuando el O es un yacimiento, optimizando el funcional $\mathcal{F}(t)$ se optimiza la topología de la red, el error y el número de las etapas, el aproximador entre puntos del yacimiento puede ser optimizado en el mismo proceso. Este planteamiento matemático permitió optimizar el diseño de las RMEE.*

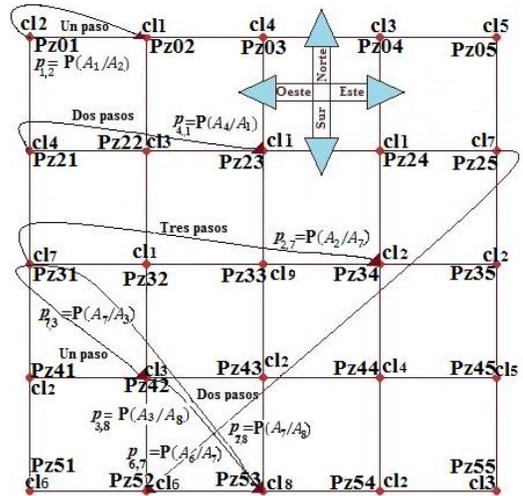


Fig. 5. Esquematización de los pasos de comparación entre nodos.

Nota: Los números después de "cl" indican las clases en el nodo y después de "Pz" el número del pozo.

Conclusiones

- Se evidenció que en la actualidad el contexto *tecnológico, económico y social* de la producción de Ni y Co a partir de lateritas necesita elevar su eficiencia y que en ello contribuye sustancialmente el aumento de la información de sus yacimientos, por lo cual es necesario *optimizar la adquisición de dicha información en las RMEE*.
- El *contexto teórico* mostró la particular complejidad del comportamiento sustancial, mineralógico y geológico en los YLOC, lo que permitió valorar los modelos utilizados para el diseño de las RMEE y percibir que las deficiencias fundamentales están ligadas al enfoque utilizado.
- Se definió un nuevo enfoque y se trazó una estrategia de modelación integral para la optimización de las RMEE.

Agradecimientos

Los resultados del artículo no se hubiesen logrado sin la realización del proyecto 1265, financiado por el extinto MINBAS para la “Optimización de Redes de Exploración en Yacimientos Lateríticos”, desarrollado en el Centro de Investigaciones del Níquel (años 2006-2007). Tampoco hubiese sido posible sin el apoyo de mi esposa, mis compañeros de trabajo y todos los que me ha aportado conocimientos de geología.

Referencias bibliográficas

- Abad M. N.1984. Propuesta de racionalización de las redes de perforación del escombro en los yacimientos de Nicaro y Pinares de Mayarí. Archivo de la Empresa Comandante René Ramos Latourt. Pp. 24.
- Adamovich, A., Chejovich, V. y otros. 1963. Estructura geológica de los minerales útiles en los macizos montañosos de la sierra de Nipe y Cristal. CNFG.
- Adamovich, A., Chejovich, V., et al. 1962. Estructura geológica y minerales útiles de la zona de Moa a escala 1: 50 000. CNFG.
- Ageyi G & Beyris Mazar P.E., Rojas Purón A & Hernández Flores A. 2010. Distribución fraccional de metales y minerales en la laterita de balance del yacimiento Punta Gorda, Moa, Cuba. Minería y Geología. V.26 n.4, octubre-diciembre. p. 36-52. ISSN 1993 8012.
- Aleojin, V., et al. 1977. Sobre los resultados de los trabajos de exploración geológica detallada y orientativa realizada en el yacimiento "Punta Gorda" en los años 1973 –1976. ONRM, La Habana, Cuba. Inventario 2874 Oficina Nacional de Recursos Minerales.
- Andricevic R., Foufola E. G. 1991. A Transfer Function Approach to Sampling Network Design for Groundwater Contamination. Water Resour. Res.,27 (10), 2759-2769.<http://132.248.182.189/cursos/gest/APLICACIONES/Mtdisred 2002.pdf>. [Consultado en Junio, 2012]
- Arderí García A. y García de la Cruz M. I. 2003. Control de la Dilución en el Yacimiento Punta Gorda. Memorias GEOMIN'2003. La Habana, del 24 al 28 de marzo. TGMNI-117. ISBN: 959-7117-11-8.
- Arias del Toro. J. A. 1984. Geometrización y Variabilidad de un Sector del Yacimiento Martí. Trabajo de Diploma. ISMM. Moa, Holguín.
- Ariosa Iznaga, J. D. 2002. Modelos de Yacimientos de Lateritas de Ni, Fe y Co asociados a las ofiolitas del macizo Mayarí Baracoa de Cuba Oriental. [Tesis doctoral], Instituto Superior Minero, Moa. 111p.
- Ariosa Iznaga, J. D, Lavaut Copa W, Bergues Garrido P.S, Díaz Martínez R. 2003. Modelo geológico descriptivo para los yacimientos lateríticos de Fe-Ni-Co en la faja ofiolítica Mayarí-Baracoa de Cuba oriental. Minería y Geología.
- Ashok D. Dalvi, Gordon Bacon W, Osborne R. C. 2004. The Past and the Future of Nickel Laterites. En: International Convention Trade Show & Investors Exchange, [Memorias] Ontario, L5K 1Z9 Canada PDAC 2004, March 7-10, 2004.
- Bajvalov N. S, Zhidkov N.P, Koviellkov G.M. 1987. Métodos de Cálculo. 598 pp. Ed. Nauka. Moscú. [en Ruso].
- Barca E., Passarella G. 2009. A stochastic method for optimal location of groundwater monitoring sites at aquifer scale. Geophysical Research Abstracts, Vol.11, EGU2009-12347, 2009. EGU General Assembly 2009.
- Bárdossy A. and Bogárdi I. 1983. Network Design for the Spatial Estimation of Environmental Variables. Appl. Math.Comput.Nº.12,pp.339-369.<http://mmc2.geofisica.unam.mx/cursos/geoest/APLICACIONES/Monitoring%20Sampling%20Design.pdf> [Consultado el 12/05/2011].
- Barrientos Domínguez K. 2009. Simulación Condicional Aplicada a Estudio de Redes. En: III Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. La Habana. 16-20 de Marzo. Memorias [CD ROM], pp. MIN2-P29. ISBN: 978-959-7117-19-3.
- Berger Martijn P.F. 2010. Optimal Designs for Latent Variable Models: A Review. University of Maastricht. The Netherlands.. <http://www.ipn.uni-kiel.de/aktuell/buecher/rostbuch/c05.pdf> [Consultado 05/02/2010]
- Bergues Garrido P. S. 2006. Presencia de perfiles lateríticos con intercalaciones atípicas y bauxitas en el sector septentrional del río Yagrumaje, Moa. Minería y Geología. Vol: 22. 1. ISSN 0258 5979.
- Bernal Hernández S, Trujillo Codorniú R.A. 2003. Tecnología de Extracción de Precisión. V Congreso Cubano de Minería y Geología. La Habana. Marzo 24-28. Memorias [CD-ROM]. ISBN: 959-7117-11-8.
- Bernardo J. M. 1993. Optimizing Prediction with Hierarchical Models: Bayesian Clustering. Technical Report 06/93, (August 30,1993). Presidencia de la Generalidad. Caballeros 9, 46001- Valencia, España. Tel. (34)(6) 386.6138, Fax (34)(6) 386.3626,e-mail: bernardo@mac.uv.es. [En Línea]. <http://www.uv.es/~bernardo/Prediction.pdf>. [Consultado: septiembre 2012]
- Bogárdi I, Bárdossy A., Duckstein L. 1985. Multicriterion Network Design Using Geostatistics, Water Resour. Res., 21(2),199–208.http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-data_query?bibcode=1985WRR....21..199B&db_key=PHY&link_type=ABSTRACT&high=4a830e222b02859 [Consultado el 12/05/2011].
- Bonsoño Gonzalez, A y Karell Arrechea Dinorah. Enero 2015. Consulta verbal a cerca de trabajos que contengan información de los métodos para el diseño de las redes del muestreo de exploración y explotación. Centro

- Nacional de Información Geológica (CNDIG) del Servicio Geológico de Cuba (IGP). dinorah@igp.minbas.cu, alfredo@igp.minbas.cu.
- Boucher A, Dimitrakopoulos R, Vargas-Guzman J.A. 2005. Joint Simulations, Optimal Drillhole Spacing and the Role of the Stockpile. *Geostatistics Banff*. O. Leuangthong and C. V. Deutsch (eds.). Springer. Printed in the Netherlands, pag:35-44. Consultado el 26/03/2012. http://cosmo.mcgill.ca/research/pdf/geo/GEO_%5B2005%5DBOUCHER_DIM_Joint_simulation_optimal_drillhole_spacing_and_the_role_of_the_stockpile.pdf
- Box G., Tyssedal J. 1996. Projective properties of certain orthogonal arrays. *Biometrika*. 83,4. pp. 950-995.
- Bravo L. F, Sánchez Sánchez E y Lepin O. V. 1983: Métodos gráficos para el análisis de la variabilidad de algunos parámetros geólogo - industriales y la caracterización de bloques geológicos en el yacimiento Moa. *Revista Minería y Geología*. N° 3.
- Bueso M. C, Angulo J. M, Alonso F. J. 1998. A state-space model approach to optimum spatial sampling design based on entropy. *Environmental and Ecological Statistics*. Vol.5, 1. Pag. 29-44. Ed. Springer Netherlands. ISSN 1352-8505 (Print), 1573-3009 (Online). www.springerlink.com/content/hg0fwpamb9xa/?p=be8da9f57eed4fdf8414aa543838433b&pi=0
- Castellanos Suárez J. 2007. Tendencias del proceso de lixiviación ácida a presión. En: II Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. *Memorias [CD-ROM]*. La Habana, 20-23 de Marzo del 2007, pp. MIN8-MR2. ISBN: 978-959-7117-16-2.
- Chang Cardona A. R; Rojas Purón, A; Arce Molina J. 2004. Metodología para pronosticar el extractable de Níquel por la mineralogía computacional. En: IV Conferencia Internacional de Aprovechamiento de los Recursos Minerales y el desarrollo sostenible, CINAREM'2004. Mayo 11-13, Moa. *Memorias [CD-ROM]*. ISBN 959-16-0258-4.
- Chang Cardona, A.R., J., Arce Molina, M, Toirac Suárez 2005. Modelos multivariantes para predecir el extractable de níquel por la composición mineralógica de la mena tecnológica en el proceso Caron. *Minería y Geología*. Vol. 21, 1. ISSN 0258 5979.
- Chinhama A. J. 2000. Análisis Variográfico de los Parámetros Geólogo Industriales del Yacimiento Zona A. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa.
- Coello, A. L.; Beyris, P.; Hernández, A. & Ramírez, B. 1998. Distribución fraccional de los valores metálicos en el escombros laterítico. *Minería y Geología XV* (1): 37-42.
- Cook D, Fedorov V. 1995. Constrained Optimization of Experimental Design. *Statistics*, 26. P. 129-178. [En Línea]. <http://www.csm.ornl.gov/~ost/papers/fedorov/Cook95Constrained.ps>. Consultado: 20/11/2012.
- Cuador Gil J. Q. 2002. Estudios de Estimación y Simulación Geoestadística para la Caracterización de Parámetros Geólogo - Industriales en el Yacimiento Laterítico Punta Gorda. [Tesis Doctoral]. Universidad de Pinar del Río, Pinar del Río.
- Cuador Gil J. Q., Estévez Cruz E., Lavaut Copa W. 2003. Definición de Redes Racionales Exploración en Yacimientos Lateríticos Usando Procedimientos Conjuntos de Estimación y Simulación Geoestadística. En: Taller Internacional de la Geología y Minería del Níquel Cubano. V Congreso de Geología y Minería de la Sociedad Cubana de Geología, GEOMIN'2003. La Habana, 24-28 de Marzo del 2003. (Memorias) [CD-ROM], pp. TGMNI.10. ISBN: 959-7117-11-8.
- Cuador Gil J. Q., Estévez Cruz E., Lavaut Copa W. 2003. Definición de Redes Racionales Exploración en Yacimientos Lateríticos Usando Procedimientos Conjuntos de Estimación y Simulación Geoestadística. En: Taller Internacional de la Geología y Minería del Níquel Cubano. V Congreso de Geología y Minería de la Sociedad Cubana de Geología, GEOMIN'2003. La Habana, 24-28 de Marzo del 2003. *Memorias [CD-ROM]*, pp. TGMNI.10. ISBN: 959-7117-11-8.
- Da Luz B, A., J., Alves Sampaio; S.L., Matos de Almeida S. 2004. Tratamiento de Minérios. 4ta ed. Centro de Tecnología de Mineral. Ministerio de Ciencia y Tecnología (CETEM-MCT). Rio de Janeiro, Brasil. 858p. ISBN: 85-7227-204-6.
- De Vettler D. R. 1955. How Cuban Nickel ore was formed: a lesson in laterite genesis?. *Engineering and Mining Journal*, 156 (10). Págs.: 84-87.
- Díaz Viera M. 2007. Una Metodología Alternativa para el Diseño de una Red de Monitoreo Nueva en Aguas Subterráneas para Fines de Manejo con Casi Ninguna Información. [En Línea] Consultado: 12/4/2007. <http://mmc2.geofisica.unam.mx/cursos/geoest/APLICACIONES/Monitoring%20Sampling%20Design.pdf>.
- Douglas. H. J, Nediak S. M., Xiang Bo Wang. February, 1999. Sequential Optimal Designs For On-Line Item Calibration. *RRR 2-99*. <http://rutcor.rutgers.edu/pub/rrr/reports99/02.pdf>. [En Línea]. [Consultado Marzo 20, 2009].

- Duda J. 1971 a. Cálculo de Redes Optimas para los Yacimientos de Nicaro y Pinares de Mayarí. Archivo de la Empresa Comandante René Ramos Latourt.
- Duda J. Junio 1971 b. Informaciones a la Problemática de la Dilución en el Proceso de Minería de los Yacimientos Residuales de Níquel. Informe Técnico: Departamento de Minas. Archivos de la Empresa Comandante Rene Ramos Latourt. Nicaro. 79 p.
- Duggan S, Dimitrakopoulos R. 2005. Application of Conditional Simulation to Quantify Uncertainty and to Classify a Diamond Deflection Deposit. Geostatistics Banff 2004. eds: O Leuanthong and C.V Deutsch. Springer. Printed in Netherlands. p. 419-428.
- Elias M. 25 June 2001 a. Global Lateritic Nickel Resources. New Caledonian Nickel Conference. CSA Australia Pty Ltd.
- Elias, M. 2001 b. Nickel laterite deposits – geological overview, resources and exploitation. In: Giant ore deposits: Characteristic, genesis and exploitation. CDES Special Publication 4, Center for ore deposits research. University of Tasmania. pp, 205-220. <http://www.csaaus.com/documents/public/publications/godpaper.pdf>.
- Federov, V.V. 1972. Theory of optimal experiments. New York: Academic Press.
- Fernández Martínez L, León Mariño M, y Reynosa Hernández C. 2007. Evaluación del Esquema Informativo Minero y su Incidencia en los Resultados la Calidad de las Operaciones Mineras. CD, Memorias de la II Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. MIN2-P41. ISBN: 978-959-7117-16-2. La Habana.
- Fernández Martínez L, León Mariño M. 2009. Consideraciones Acerca de la Dilución en Yacimientos Lateríticos de Ni y Co y Factores Geológicos que Influyen en su Comportamiento. III Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. MIN2-P25. La Habana, Cuba, 16-20 de Marzo del 2009. (Memorias) [CD-ROM]. ISBN: 978-959-7117-19-3.
- Formell Cortina F. y Oro J. 1980. Sobre los procesos de redeposición en el yacimiento Punta Gorda. Ciencias de la Tierra y del Espacio 2: 53- 66.
- Fowler, H.J., Kilsby, C.G. and O'Connell, P.E. 2000. A stochastic rainfall model for the assessment of regional water resource systems under changed climatic conditions. Hydrol. Earth Sys. Sci., 4, 261-280. [Consulta: Marzo 2011].
- Freyssinet, P.H., Butt, C.R.M. & Morris, R.C. 2005. Ore-forming processes related to lateritic weathering. Economic Geology. 100th Anniversary Volume, p. 681-722. [Consultado en febrero del 2012].
- Gaceta Oficial. 20 de Julio de 1999. Resolución N° 215 del Ministerio de la Industria Básica. Pag: 732-743.
- Gavoronski. A, Feodorov. V. January 1984. Design Experiment Under Constraints. [En Línea]. <http://www.iiasa.ac.at/Admin/PUB/Documents/WP-84-008.pdf>. [Consultado en Diciembre del 2012].
- Geza Pesti, William Kelly E., Bogardi I. 2006. Observation network design for selecting locations for water supply wells. Environmetrics. Vol 5. 2, Pag. 91-110. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/env.3170050202/abstract>
- Gleeson, S. A., R. J, Herrington, J., Durango, C. A, Velásquez, G, Koll. 2004. The Mineralogy and Geochemistry of the Cerro Matoso S.A. Ni Laterite Deposit, Montelíbano, Colombia. Economic Geology. Vol. 99, pp. 1197–1213.
- Guilarte Lores E. 2011. Uso de las Herramientas del Software Gemcom para el Diseño de Canteras. (Proyecto de Explotación Oro Barita). En: VI Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GEOCIENCIAS 2011. La Habana, abril del 4 al 8. Memorias [CD-ROM], pp. MIN1-P11. ISBN 978-959-7117-30-8.
- Hardin R. H; Sloane N. J. A. 1993. A New Approach to the Construction of Optimal Designs. Journal of Statistical Planning and Inference, Vol. 37 (1993), 339–369. [En Línea] <http://www2.research.att.com/~njas/doc/design.pdf> [Consulta julio2010].
- Hernández Martínez A. N, Alfonso Olmos E; Castellanos Suárez J, Alonso A J. 2009. Procesamiento de la Serpentina en el Proceso HPAL. En: III Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. Memorias [CD-ROM]. La Habana, 16-20 de Marzo del 2009, pp. MIN4-P33: ISBN 978-959-7117-19-3.
- Hernández Vidal E. F. 2003. Aplicación del Sistema de Explotación por Bancos en los Yacimientos Lateríticos Cubanos. En: V Congreso de Geología y Minería de la Sociedad Cubana de Geología (GEOMIN'2003). La Habana, 24-28 de Marzo del 2003. Memorias [CD-ROM], pp. TGMNI.07. ISBN: 959-7117-11-8.
- Iturralde Vinent M. A. y Colectivo de Autores. 2009. Geología de Cuba para todos. Ed. Científico Técnica, La Habana. Pp. 150.
- JORC 1999. Australasian Code for Reporting of Mineral Resources and Ore Reserves (The JORC Code), The Joint Ore Reserves Committee of The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Australian Institute of Geoscientists and Minerals Council of Australia, 16 p.
- Larco Nickel 2006. Uses of Níkel. [en línea]. <http://www.larco.gr/nickel.php> [Consulta 12/09/2006].

- Lavaut C. W. 1987. Control litológico-mineralógico de la mineralización en la corteza de intemperismo de ultramafitas del campo mineral yacimientos Punta Gorda, Camariocas y Piloto. Tesis en Opción del Grado de Doctor en Ciencias. Archivo E.G.S. Moscú. 1987.
- Lavaut C. W. 2000. Sobre el Estudio Preliminar de las Redes de Perforación y Muestreo para el Cálculo del Mineral Laterítico. Archivos EGMO. Santiago de Cuba.
- Lavaut C. W. 2003. La Meteorización de la Ofiolita de Cuba Oriental. Modelos Geológicos y Terminología Cubana. En: V Congreso de Geología y Minería de la Sociedad Cubana de Geología. Memorias [CD-ROM]. La Habana, 24-28 de Marzo, pp. TGMNI.03. ISBN: 959-7117-11-8.
- Lavaut Copa W. 2007. Situación Actual del Sistema de Prospección Geológica de Lateritas en Cuba. En: II Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. La Habana, 20-23 de Marzo del 2007. Memorias [CD-ROM], pp MIN2-027. ISBN: 978-959-7117-16-2.
- Legrá Lobaina A. A. et al. 1997 a. Relación entre el Kriging y la Interpolación Lineal en Rn. COMPUMAT'97, Cienfuegos.
- Legrá Lobaina A. A. et al. 1997 b. Tres factores que influyen en la exactitud de los resultados de los cálculos de volúmenes geólogo - mineros. Revista Minería y Geología. Vol. 14. No 2.
- Legrá Lobaina. A. A., 1999. Metodología para el Pronóstico, Planificación y Control de la Minería en Yacimientos Lateríticos. Tesis en Opción al Grado de Doctor en Ciencias Técnicas. CUJAE, La Habana.
- Legra Lobaina A.A, Silva Diéguez O.R. 2011. La investigación Científica, Conceptos y Reflexiones. Ed. Felix Varela. La Habana. Pgs: 445. ISBN: 978-959-07-1631-7.
- Leyva R. R. y Soler E. F. 1984. Racionalización de las Redes de Perforación de Escombro en los Yacimientos Ferroniquelíferos de Nicaro [Trabajo de Diploma]. ISMM, Moa, Holguín.
- Li S, Dimitrakopoulos R, Scott J y Dunn D. 2004. Quantification of Geological Uncertainty and Risk Using Stochastic Simulation and Applications in the Coal Mining Industry. Orebody Modelling and Strategic Mine Planning. Perth, WA, Noviembre 22 - 24.
- Llorca, S.M. 1993. Metallogeny of supergene cobalt mineralization, New Caledonia. Australian Journal of Earth Sciences, 40, 377-385.
- Lo S.L, Kuo. J.T, Wam S.M. 1996. Water Quality Monitoring Network Design of eelung River, Northern Taiwan. Wat.Sci. Tech. Vol. 34. No. 12. Pág.: 49-57. Elsevier Science. Printed in Great Britain.
- López A. J. 1981. Cálculo de las redes óptimas para el estudio de los yacimientos niquelíferos de la Empresa Comandante René Ramos Latourt. [Trabajo de Diploma]. ISMM. Moa, Holguín.
- López D. J. 1986. Cálculo de las Redes Óptimas del Yacimiento Camarioca Este, Moa, Holguín [Trabajo de Diploma]. ISMM, Moa, Holguín.
- Makransky G. 2011. An Automatic Online Calibration Design in Adaptive Testing. [En Línea]. <http://www.psych.umn.edu/psylabs/catcentral/pdf%20files/cat09makransky.pdf>. Consulta: Junio 2011.
- Martínez Vargas A. 2007. Modelación de los Contenidos de Hierro en Yacimientos Lateríticos Heterogéneos de Níquel y Cobalto. Caso de Estudio, Yacimiento Moa Oriental. Minería y Geología. v.23. N°2. 2007.
- Muñoz Gómez J. N., Orozco Melgar G. 2009. Mineralogía y Orden Cronológico de Formación de los Minerales de las Menas Lateríticas: Implicaciones en la Exploración de Explotación. MIN2-O2. En: III Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. La Habana. 16-20 de Marzo. Memorias [CD ROM], pp. MIN2-O2. ISBN: 978-959-7117-19-3.
- Muñoz Gómez J. N., Rodríguez Infante A., Vera Sardiñas L.O, Martínez Vargas A. 2009. Modelo Genético Teórico de los Yacimientos Lateríticos Asociados al Macizo Ofiolítico de Moa-Baracoa: Implicaciones de la Exploración de Explotación. En: III Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. La Habana. Memorias [CD-ROM], pp. MIN2-P27. ISBN: 978-959-7117-19-3.
- Muñoz Gómez J. N., Rojas Purón A. L, Díaz. Martínez R. 2007. La Migración Geoquímica del Níquel en las Cortezas de Intemperismo Fero-Niquelíferas: Implicaciones en la Exploración de Explotación. En: II Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. La Habana, 20-23 de Marzo. Memorias [CD ROM], pp. MIN2-011. ISBN: 978-959-7117-16-2.
- Núñez Silva A, Pérez Sánchez M. R, Rodríguez A. 2007. Ventajas al Estabilizar la Calidad del Mineral de Alimentación a la Empresa Comandante Ernesto Guevara. II Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. La Habana, 20-23 de Marzo del 2007. Memorias [CD-ROM], pp. MIN2-P28. ISBN: 978-959-7117-16-2.
- Olea R. A. 1984. Sampling Design Optimization for Spatial Functions. Mathematical-Geology, 16(4), pp. 369-392, <http://mmc2.geofisica.unam.mx/cursos/geoest/APLICACIONES/Monitoring%20Sampling%20Design.pdf>. Consultado: Marzo 2009.
- Pardo Igúzquiza E. 1998. Optimal selection of number and location of rainfall gauges for areal rainfall estimation using geostatistics and simulated annealing. Journal of Hydrology, 210. Pág: 206–220. Elsevier Science.

- Peña Abreu R. E, Legrá Lobaina A. 2005 a. Informe Técnico de la Etapa 01. Búsqueda Bibliográfica. Proyecto Optimización de las Redes de Exploración en Yacimientos Lateríticos. CEDINIQ, Moa: pp. 12.
- Peña Abreu R. E, Legrá Lobaina A. 2005 b. Nuevo enfoque al problema de la optimización de redes de exploración en yacimientos lateríticos. Centro Nacional del Derecho de Autor (CENDA). Registro: 1116-2005. Expuesto en: I Convención Cubana de ciencias de la Tierra. La Habana, Cuba, 5-8 Abril. Resumen [CD-ROM] ISBN: 959-7117-03-7.
- Peña Abreu R.E, Matos Elias L, Pérez Padilla O, Ortiz Romero E, Robles Labacena V. 2007. Propuesta de Clases Patrones en Yacimientos Lateríticos Ferro-Niquelíferos. En: II Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. La Habana, 20-23 de Marzo del 2007, Memorias [CD-ROM], pp. MIN2-021. ISBN: 978-959-7117-16-2.
- Peña Abreu R.E, Trujillo Codorníu R. 2005. Algunos Problemas de Programación Cuadrática Binaria Asociados a la Minería. Publicación del Centro de Investigaciones y de Estudios Avanzados, Departamento de Matemática. DF México, Reporte interno # 357.
- Peña Abreu, R. E., E. A. Perdomo Orellana. 2014. Comportamiento Probabilístico del Hierro y el Níquel en Tres Yacimientos Lateríticos Cubanos. Ciencia de la Tierra y el Espacio. Vol. 15. No. 2. ISSN 1729-3790.
- Pérez R. 1972. Estudio preliminar sobre redes de exploración. Archivo de la Empresa Comandante René Ramos Latourt.
- Proenza J. A, Roque Rosell J, Labrador M, Galí S, et al. 2010. Mineralizaciones de Co en los Depósitos Lateríticos de Ni Tipo Óxido y Silicato Hidratado. Revista de la sociedad española de mineralogía. Macla N° 13. Septiembre '10.
- Proenza J.A, Galí S, Labrador M, et al. 2007. Nuevos Datos Sobre los Minerales Portadores de Ni Y Co en los Perfiles Lateríticos de Cuba Oriental. II Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. MIN2-02. La Habana, 20-23 de Marzo del 2007. (Memorias) [CD-ROM]. ISBN: 978-959-7117-16-2.
- Quintas F. 1989. Análisis estratigráfico y paleogeografía del Cretácico Superior y del Paleógeno de la provincia Guantánamo y áreas cercanas. Tesis doctoral, departamento de Geología, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMMM).
- Rodríguez Cardona A. 1977. Informe sobre optimización de la perforación de red intensiva en los yacimientos Martí y Pinares de Mayarí. Archivo de la Empresa Comandante René Ramos Latourt.
- Rodríguez Cardona A, Rodríguez Ruiz H, 1987. Distribución del Níquel en los Yacimientos Lateríticos Cubanos. Revista Tecnológica, Vol. XVII, No.3, (19-26).
- Rodríguez Cardona A. 1986. Determinación de las Redes Optimas para la Prospección Geológica en los Yacimientos Ferro Niquelíferos de Nicaro. Minería y Geología, No. 1.
- Rodríguez Cardona A. 1990. Prospección y Exploración en las Cortezas de Intemperismo Sobre Ultramafitas en Nicaro y Pinares de Mayarí. [Tesis Doctoral], Instituto Superior Minero, Moa. P. 120.
- Rodríguez Cardona A. 1991. Cambio de intervalo de perforación para la exploración detallada del yacimiento ferroniquelífero cobaltífero de Levisa. Minería y Geología. 8(1-3), 11-18.
- Rojas Puron A.L y Orozco, G. 1998. Iniciación al estudio de las fases minerales portadoras de Ni en el horizonte limonítico del yacimiento Moa. Minería y Geología XI(2): 11-15.
- Rojas Purón A.L. 1994. Principales Fases Minerales Portadoras de Níquel en los Horizontes Lateríticos del Yacimiento Moa. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa. [Tesis Doctoral], 91 p.
- Rojas Puron A.L. 2001. Evidencias a Favor de que la Goethita es la Principal Portadora de Níquel en los Horizontes Lateríticos de las Cortezas Ferroniquelíferas. Minería y Geología. Vol. 18, Nos. 3-4. pp. 21-31.
- Rojas Puron A.L, Orozco, G; Vera, O & Arderí, A. 2005. Caracterización mineralógica de los perfiles lateríticos del yacimiento Punta Gorda. En: I Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. La Habana, 5-8 abril, Memorias [CD-ROM]. ISSN 0258 5979.
- Roque Rodríguez A. I. Noviembre 2014. Consulta verbal a cerca de trabajos que contengan información de los métodos para el diseño de las redes del muestreo de exploración y explotación en Nicaro. Archivo de la Empresa Comandante René Ramos Latourt. RRL. aroque@rrl.moa.minem.cu.
- Royle J.A. 2002. Exchange Algorithms for Constructing Large Spatial Designs. Journal of Statistical Planning and Inference. vol. 100, N° 2, pp. 121-134. Elsevier, Amsterdam, PAYS-BAS (1977) ISSN: 0378-3758. NIST: 17575 35400010345016.0030. [EnLínea] http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V0M-44N9KBP4&_user=10&_coverDate=02%2F01%2F2002&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&_view=c&_searchStrId=1190145785&_rerunOrigin=google&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=af71d031515561e52ed6647d8eb87246 [Consulta.2001].
- Torres Saavedra P. A, Ospina Botero D. 2001. Muestreo de Conglomerados con Multiplicidad: Estimación del Total en Poblaciones Raras. Revista Colombiana de Estadística. Vol. 24. No 2, pp. 121-140.

- Saikia K, Sarkar B. C. 2006. Exploration drilling optimization using geostatistics: a case in Jharia Coalfield, India. Applied Earth Science (Trans. Inst. Min. Metall. B) Vol. 115 N° 1. Published by Maney on behalf of the Institute and The AusIMM.
- Secik R. 1971. Métodos de optimización de las redes de perforación para las investigaciones y exploraciones geológicas. Centro de Proyectos Minero – Metalúrgico.
- Shakeel Ahmed, Ramaswamy Jayakumar, Abdin Salih. 2008. Application of Geostatistics in Optimal Groundwater Monitoring Network Design. Groundwater Dynamics in Hard Rock Aquifers. Springer Netherlands. Pág: 179-190. 978-1-4020-6539-2 (Print), 978-1-4020-6540-8 [En Línea]. DOI: 10.1007/978-1-4020-6540-8_14.
- Shannon C. E. 1948. A Mathematical Theory of Communication. Reprinted with corrections from The Bell System Technical Journal. July vol. 27, pp. 379–423, 623–656.
- Sitnikov, V., et al. 1976. Informe sobre la exploración orientativa del yacimiento Camarioca con el cálculo de reservas. ONRM. La Habana, Cuba. Inventario 2783 ONRM.
- Vera Sardinias L. O. 2001. Procedimiento para la determinación de las redes racionales de exploración de los yacimientos lateríticos de níquel y cobalto en la región de Moa. [Tesis Doctoral], Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa.
- Wu Y. 2004. Optimal design of a groundwater monitoring network in Daqing, China. Environmental Geology. Volume 45, Number 4 / febrero de 2004. Pag. 527-535. Springer Berlin / Heidelberg. ISSN 0943-0105 (Print), 1432-0495 (Online). DOI 10.1007/s00254-003-0907-x.

Acerca de los autores:

Ramón Eddie Peña-Abreu: Máster en Física y Matemática, Doctor en Ciencias Técnicas, con 26 años de experiencia, 23 de los cuales han sido dedicados a la actividad científica y docente, ha dirigido proyectos de investigación y servicios científicos tecnológicos. En la docencia ha impartido alrededor de 15 asignaturas de cursos regulares en el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, y cursos de postgrados. Participa regularmente en congresos internacionales y otros eventos. Ha publicado más de 30 artículos. Es miembro de varias sociedades científicas, ha participado como miembro del comité científico de varios eventos, el Congreso de Matemática y Computación (COMPUMAT), el Congreso Nacional de Reconocimiento de Patrones (RECAPT) entre otros. Actualmente se desempeña como jefe de dos proyectos y un servicio de investigación para la industria del níquel.

León Ortelio Vera-Sardiñas: Profesor Titular y Doctor en Ciencias Técnicas de la Facultad de Geología y Minería del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, en Cuba. Imparte las asignaturas relacionadas con la Geología y Prospección de Yacimientos Minerales Sólidos. Posee experiencia en mapeo geológico regional y detallado.

Gerardo Antonio Orozco-Melgar: Graduado de ing. Geólogo en la Universidad de Oriente, Cuba, en 1975. Obtuvo el doctorado en ciencias naturales de la Academia de Minas de Jurteg en Alemania, 1987. Más de 40 años de experiencia en la docencia, en el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Miembro del tribunal nacional para la defensa de grados científicos en geología, geofísica y minería de la república de Cuba.