

muestreo no es lo suficientemente densa como para describir la microvariabilidad de cada una de ellas. Todo ello parece caracterizar a un fenómeno como el de intrusión salina (Hernández, 1997), con gran variabilidad del contenido salino en la zona de mezcla. Esta discontinuidad puede deberse, además, a errores de medición, o a la aleatoriedad del proceso. Como el variograma es función de la distancia h y de la dirección θ , con la finalidad de detectar anisotropía (direcciones particulares de variabilidad) se procedió a calcular variogramas en diferentes direcciones del espacio con una tolerancia angular de 22.5° , por lo que se abarca todas las direcciones posibles.

Con ello se pretende interpretar los rasgos direccionales principales del fenómeno y revelar la estructura del mismo. La mayor variabilidad aparece para las direcciones Norte-Sur y Este-Oeste; estas coinciden normalmente con las direcciones de mayor permeabilidad en el acuífero y a favor de ellas se suele producir la intrusión.

La anisotropía que caracteriza el área de estudio es zonal y puede observarse en la Figura 3.

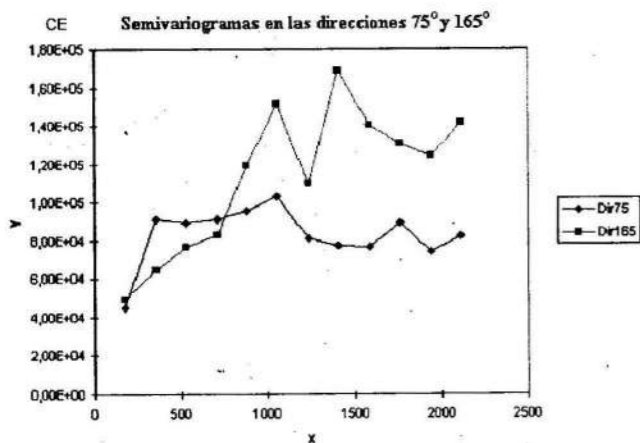


FIGURA 3. Semivariogramas

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Si la estadística proporciona métodos para la optimización de los parámetros de muestreo, la geoestadística aporta un conjunto de métodos y técni-

cas propias, de gran interés en el estudio ya que ha permitido estimar parámetros y optimizar red de adquisición de datos, con lo que se reduce el costo de muestreo y de los análisis de laboratorio sin pérdida significativa de información. La dificultad del método radica en que necesita un número importante de datos de partida con la finalidad de validar la robustez del estimador del mismo.

CONCLUSIONES

- La variabilidad de los parámetros cloruro, bicarbonato, conductividad y sodio mostró que las zonas más afectadas están localizadas en los puntos que aparecen pozos utilizados para el abasto.
- Se evidenció que las zonas altamente salinizadas coinciden con áreas donde tiene el carso su mejor manifestación.
- La Geoestadística aplicada es una herramienta importante en el estudio de los procesos de salinización de acuíferos.
- Los variogramas de las aguas cloruradas cálcicas y sódico-cálcicas y de la conductividad eléctrica mostraron una anisotropía zonal en dirección 75-165°.

BIBLIOGRAFÍA

- ARMSTRONG, M., y J. CARIGNAN: *Géostatistique Linéaire, Application au Domaine Minier*, École de Mines de Paris, 1997, 112 pp.
- GONZÁLEZ, A.: *Problema de salinización en el acuífero litoral del occidente de Huelva*, Ser, Publicaciones Universidad de Huelva, 1997.
- HERNÁNDEZ R.: "Caracterización hidrodinámica e hidroquímica del acuífero neógeno-Cuaternario de Cuenca Guane". Tesis de Maestría, 1997.
- JOURNEL, A., y CH. HUIBREGTS: *Mining Geoestatistic*, Ed. Academic Press, 1978, 600 pp.
- KRAJEWSKI, S. A. y B. L. GIBBS: *A Variogram Primer*, Gibbs Associates, 1993, 93 pp.
- MATHERON, G.: "Traite de géostatistique appliquée", I, II, en Memor. Bur. Rech. Geol. Min. Edit. Technip, París, 1962.
- ROMERO, E.: "Caracterización de la salinidad en el parque norte del Parque Nacional de Doñana", Tesis doctoral, Universidad de Huelva, 1998.

Estudio de la lixiviación de la serpentinita niquelífera con ácidos orgánicos

Study of the Leaching of the Nickeliferous Serpentinite with Organic Acid

Noel Bruguera Amaran¹
 Juan Rodríguez Gamboa¹
 Orquídea Coto Pérez²
 Neicis Capote Flores³
 Pedro Rafael Bassas Noa³

¹ Departamento de Metalurgia. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa.

² Departamento de Microbiología. Facultad de Biología. Universidad de La Habana.

³ Centro de Investigaciones de la Laterita, Moa.

RESUMEN: En el trabajo se realiza un estudio sobre la lixiviación de la serpentinita niquelífera del yacimiento Punta Gorda, empleando para ello los siguientes ácidos orgánicos: acético, oxálico, cítrico, tartárico, tánico y salicílico. El ácido sulfúrico fue el reactivo de control.

Para la investigación se utilizó una muestra de mena serpentinita previamente seleccionada, homogeneizada y cuarteada, posteriormente dicha muestra se sometió a un proceso de molienda y clasificación. Se seleccionaron para las pruebas experimentales las partículas menores de 0.300 mm.

En el trabajo se analiza la influencia de la concentración inicial de diferentes ácidos orgánicos en disolución (0.05 - 0.5 m), la densidad de la pulpa (2 - 20 %) y la granulometría (-0.3 + 0.25 a - 0.045 + 0.0 mm) sobre la recuperación de níquel y cobalto. De los ácidos analizados, el que mejores resultados ofrece para la recuperación de níquel y cobalto a partir de la serpentinita niquelífera es el ácido cítrico.

Se demuestra que los factores estudiados influyen significativamente sobre la extracción de estos metales. Se observó que el incremento de la concentración inicial del ácido favorece la recuperación del níquel y el cobalto, alcanzándose más de un 80% de recuperación de níquel cuando la concentración inicial del ácido cítrico es de 0.5 m. El incremento en el tamaño de las partículas favorece la recuperación de los metales en estudio, en el intervalo de -0.045 + 0.0 mm hasta -0.25 + 0.2 mm. Por encima de esta última clase de tamaño no se aprecia una influencia significativa en la extracción de níquel y su valor máximo alcanza el 90%. El incremento en la densidad de la pulpa, a diferencia de los parámetros anteriores, no favorece la recuperación de níquel y cobalto. Las mejores extracciones se alcanzaron con las pulpas más diluidas.

Palabras claves: Lixiviación, serpentinita niquelífera, ácidos orgánicos, níquel, cobalto.

ABSTRACT: In the work is accomplished a study on the leaching of the nickeliferous serpentinite of the Punta Gorda deposit, employing the following organic acids: acetic, oxalic, citric, tartaric, tannic and salicylic. The sulfuric acid was the reactive of control.

For the investigation was used an serpentinite ore sample previously selected, homogenized and quartered, afterwards such sample was submitted to a grinding and classification process.

Selecting for the experimental tests the particles of less than 0.300 mm. In the work was analyzed the influence of the initial concentration of different organic acids in dissolution (0.05 - 0.5 m), the density of the pulp (2 - 20%) and the grain (-0.3 + 0.25 to - 0.045 + 0.0 mm) on the nickel and cobalt recovery.

From the analyzed acids, the citric acid was the one that offers better results for the nickel and cobalt recovery based on the nickeliferous serpentinite.

It is demonstrated that the studied factors influence significantly on the extraction of these metals. It was observed that the increase of the initial concentration of the acid favors the nickel and cobalt recovery, reached more than a 80% of nickel recovery when the initial concentration of the citric acid is 0.5 m. The increase in the size of particles favors the recovery of the metals in study, in an interval from - 0.045 + 0.0 mm to - 0.25 + 0.2 mm. Over this last class of size there is not appreciated a meaningful influence in the nickel extraction and its maximum value reaches 90%. The increase of the pulp density, on the contrary to previous parameters, does not favor the nickel and cobalt recovery. The best extractions were reached with the most diluted pulp.

Key Words: Leaching, Nickeliferous Serpentinite, Organic Acids, Nickel, Cobalt.

INTRODUCCIÓN

Los minerales lateríticos presentan en su perfil una marcada heterogeneidad mineralógica y química, debido a las transformaciones que sufren estos minerales durante los procesos de intemperización. Además, las formas de migración geoquímica de los diferentes elementos, los procesos de disolución del níquel de las capas superficiales y su precipitación en los horizontes inferiores (zona de serpentinita lixiviada o roca muy alterada), ayudan a entender el comportamiento y los cambios de fases que ocurren en los procesos industriales donde se tratan estos minerales (Rojas Purón 1996).

En trabajos experimentales sobre lateritas Capote, Rojas Purón y Bassas, 1993 plantean que solamente de un 1-3% del níquel se encuentra en forma fácilmente soluble, por lo que prácticamente el 97% del níquel está asociado a una forma mineral determinada; siendo esta una de las razones que no permiten el aprovechamiento integral de estos minerales por las tecnologías existentes.

En la actualidad, la hidrometalurgia ha dirigido sus esfuerzos hacia la búsqueda de nuevas alternativas de tratamiento de las lateritas niquelíferas a nivel mundial, tomando un significativo auge el uso de la biolixiviación.

El empleo de esta nueva tecnología al tratamiento de los minerales oxidados se basa en la participación en el proceso de solubilización de los metales, de ácidos orgánicos que constituyen productos intermedios del metabolismo de los microorganismos heterótrofos, como el ácido oxálico, cítrico, etc. (Sukla, Panchanadikar y Kar 1993; Tzefers, Agatzini y Nerantzis 1994). Además, estos autores en trabajos anteriores informaron que previo a la lixiviación microbiológica, es necesario determinar el efecto de los ácidos orgánicos en la solubilización de los elementos metálicos; debido a que la eficiencia de la biolixiviación depende de la capacidad de los microorganismos heterótrofos para producir estos metabolitos, lo cual induce la disolución de los metales por la vía de la formación de los complejos y quelatos (Sukla y Panchanadikar 1993).

Valiosos aportes a los posibles mecanismos que tienen lugar en la disolución biotecnológica de los metales en los minerales lateríticos se muestran en las investigaciones de Bosecker, K. (1988 y 1989); quien comprobó que los ácidos orgánicos excretados en el medio, disuelven los metales pesados por desplazamiento directo de los iones hidrógenos (H⁺) y forman complejos solubles de metal.

El trabajo tiene como objetivos, seleccionar a nivel de laboratorio el agente lixiviante para extraer el níquel y el cobalto presentes en este mineral; así como analizar la variabilidad de la densidad de pulpa, la granulometría y la concentración inicial en la solubilización de estos metales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los reactivos empleados para el estudio de la lixiviación del níquel y el cobalto contenidos en la serpentinita niquelífera fueron los ácidos: cítrico, acético, oxálico, tartárico, tánico y salicílico. El ácido sulfúrico fue el reactivo de control.

La investigación se llevó a cabo en el laboratorio analítico central del Centro de Investigaciones de la Laterita, en Moa, con el uso de un reactor de cristal con una capacidad de 1000 ml, empleando para la agitación un agitador mecánico del tipo de turbina cerrada con 5 alabes.

Se emplearon disoluciones de estos ácidos de concentración 0.05m, 0.25m y 0.5m. El tiempo de lixiviación fue de 20 días; a cada una de las pruebas experimentales se le realizaron varias replicas.

Durante el desarrollo del proceso se controló de manera constante la pérdida de agua por evaporación en la disolución lixiviante, mediante el pesaje de las muestras, la cual fue restituida rigurosamente en los casos que se constató la pérdida.

Al finalizar la lixiviación se procedió a separar la fase líquida del sólido lixiviado, donde los licores fueron centrifugados a 3000 r.p.m., durante 20 min. Estos licores fueron analizados por la técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica de tipo: SP - 9 PYE.

UNICAM y de forma periódica se le realizaba análisis al sólido para balancear el sistema y corroborar el análisis de los licores.

Se tomó una muestra inicial de 5 kg de serpentinita del yacimiento Punta Gorda perteneciente a la empresa C.E.C.G de Moa. Esta muestra fue sometida a una rigurosa homogeneización y cuarteo por el método del anillo y el cono; el cuarteo se realizó con un divisor de Jones.

La molienda se llevó a cabo por vía seca en un molino de bolas a escala de laboratorio con una capacidad de 0.073 m³. El tiempo de molienda empleado fue de 30 minutos. Posteriormente, se separó el mineral por clases de tamaño, seleccionando para el estudio de la lixiviación las clases: - 0.3 + 0.25 mm, - 0.25 + 0.2 mm, - 0.2 + 0.15 mm, - 0.15 + 0.09 mm, - 0.09 + 0.045 mm y - 0.045 + 0,0 mm.

El mineral serpentinitico utilizado se caracterizó por Fluorescencia de Rayos X, obteniéndose un contenido promedio de metales en la muestra de: 1.54% de Ni, 0.027% de Co, 14.80% de Fe, 19.86% de Mg, 0.49% de Mn, 1.95% de Al y 1.02% de Cr. Las densidades de la pulpa empleadas en los experimentos fueron: 2; 5; 10; 15 y 20% y la temperatura fue la ambiental.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto de la concentración inicial del ácido

En la Tabla 1 se muestran los resultados del control del pH de los licores, producto de la lixiviación de la serpentinita, variando la concentración inicial de la disolución, para los diferentes ácidos investigados.

TABLA 1. Variación del pH de los licores de la lixiviación con diferentes ácidos orgánicos a los 20 días.

ácidos	pH, 0.05m	pH, 0.25m	pH, 0.5m
tánico	5.81	4.12	3.91
acético	4.72	3.83	3.43
salicílico	4.91	4.52	3.99
oxálico	5.18	4.31	3.77
tartárico	5.09	4.91	4.86
cítrico	6.93	5.89	5.67
sulfúrico(control)	3.82	2.37	1.98

De estos resultados se interpreta que para el ácido cítrico el pH manifiesta un incremento superior, respecto al resto de los ácidos, lo que se puede atribuir a la alta lixivabilidad de los óxidos de magnesio en el mineral. En el licor producto se obtuvo concentraciones de magnesio de 10.68 - 11.38 g/l.

En las Figuras 1 y 2, se reportan las extracciones de níquel y cobalto respectivamente con los diferente

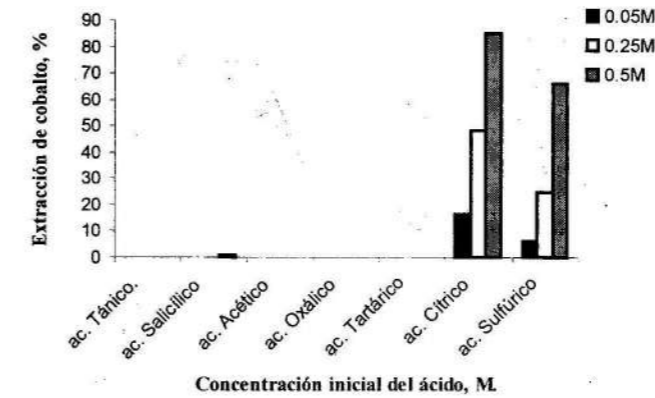


FIGURA 1: Variación de la extracción de níquel con la concentración inicial de la disolución para diferentes ácidos orgánicos.

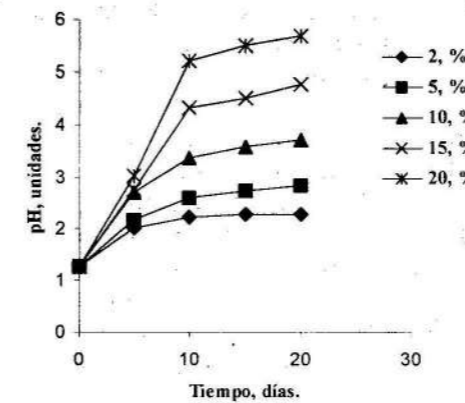


FIGURA 2: Variación de la extracción de cobalto con la concentración inicial de la disolución para diferentes ácidos orgánicos

agentes lixiviantes empleados, variando la concentración inicial de los ácidos.

Como se muestra en dichas figuras no todos los ácidos analizados solubilizan el níquel y el cobalto en la serpentinita. Se aprecia que el ácido tánico y el cítrico son los que mayor extracción de níquel permiten, mientras que en el caso del cobalto solo el ácido cítrico es capaz de lixiviar.

Las extracciones máximas de estos metales fueron de 90 y 85% respectivamente con el ácido cítrico a la concentración inicial de 0.5 m; mientras que para el resto de los ácidos las extracciones no superan el 20%.

Cabe señalar que este comportamiento también se reporta en los trabajos realizados por Bosecker K., (1988), sobre minerales lateríticos de Nueva Caledonia, Filipinas, Brasil y Australia. Además, en trabajos posteriores del autor (1989) sobre serpentinitas de Rumania, mostró que de los ácidos orgánicos analizados en la lixiviación, solo con el ácido cítrico se lograron elevadas extracciones de níquel y aluminio.

Además, se comprobó que al aumentar la concentración inicial de las disoluciones desde 0.05 - 0.5 m, se favorece la solubilización del níquel y el cobalto en el mineral; este resultado es atribuido al incremento en el contenido de ácido libre en la disolución al aumen-

tar dicha concentración inicial, por lo que se logra así una mayor relación ácido/mineral en el medio.

INFLUENCIA DE LA DENSIDAD DE LA PULPA

Al estudiar el efecto de la densidad de la pulpa en la lixiviación del níquel y el cobalto en este mineral, se utilizó una clase granulométrica de - 0.3 + 0.25 mm, la concentración inicial del ácido fue de 0.5 M, un tiempo de 20 días y las densidades empleadas estuvieron en el intervalo de 2 - 20 %. Los resultados del control del pH de los licores y las extracciones de níquel y cobalto se muestran en las Figuras 3 y 4 respectivamente.

Como se observa en la representación gráfica del pH, existe un marcado incremento de este parámetro con el aumento del porcentaje de sólido; como resultado de un aumento en el contenido de óxidos de magnesio, valorado como un alto consumidor de ácido.

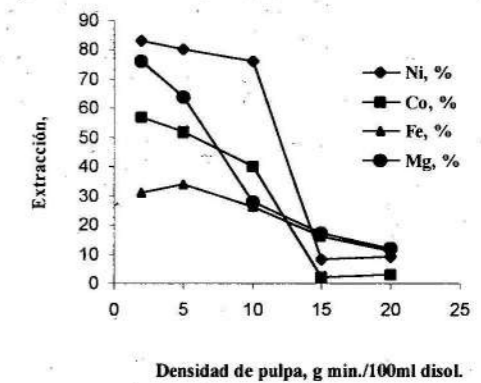


FIGURA 3: Variación del pH en el tiempo con la densidad de la pulpa.

En la Figura 4, se pone de manifiesto que el incremento en la densidad tiene un efecto negativo en al solubilización de estos metales, lográndose recupera-

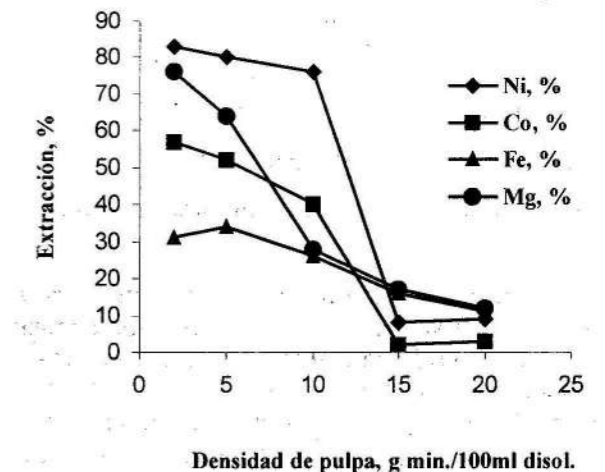


FIGURA 4. Extracción de Ni, Co, Fe y Mg de la serpentinita con ácido cítrico variando la densidad de la pulpa.

ciones de níquel superiores al 80% con 2 y 5%, lo cual puede estar provocado por un déficit de reactivo lixivante en el medio al variar la relación ácido/mineral. Resulta interesante el hecho de que para densidades de pulpa mayores de 10%, la recuperación de níquel y cobalto desciende bruscamente llegando a ser incluso inferior a la extracción de magnesio.

INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA

En la Tabla 2 y las Figuras 5 y 6, se muestran las variaciones del pH de los licores y la recuperación del níquel y el cobalto bajo el efecto de la granulometría respectivamente, durante veinte días.

TABLA 2. Variación del pH de los licores en el tiempo con la granulometría.

Tiempo, días.	0.090, mm.	0.150, mm.	0.200, mm.	0.250, mm.
0	1.25	1.25	1.25	1.25
5	2.95	2.94	2.93	2.91
10	3.29	3.28	3.26	3.25
15	3.61	3.58	3.59	3.56
20	3.89	3.86	3.86	3.87

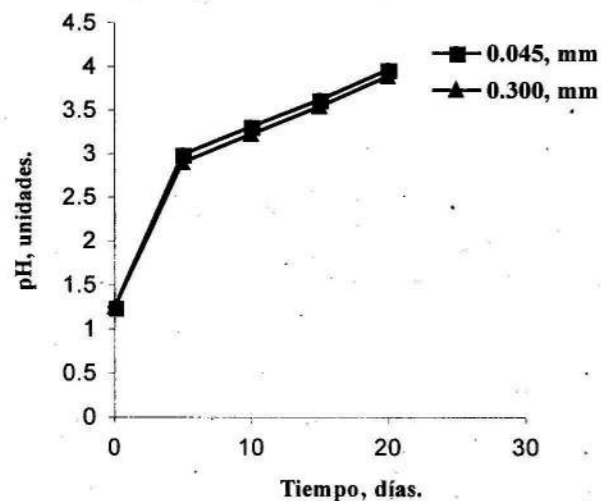


FIGURA 5: Variación del pH en el tiempo con la granulometría.

La representación gráfica mostrada en la Figura 5, corresponde a la variación de pH para las granulometrías (0.045 y 0.300 mm), para el resto de las granulometrías el comportamiento es similar (ver Tabla 2); de lo cual se infiere que la granulometría no tiene una marcada incidencia en la variación del pH de los licores, sin embargo existe una tendencia creciente en la recuperación del níquel y el cobalto al aumentar las clases de tamaño (Figura 6).

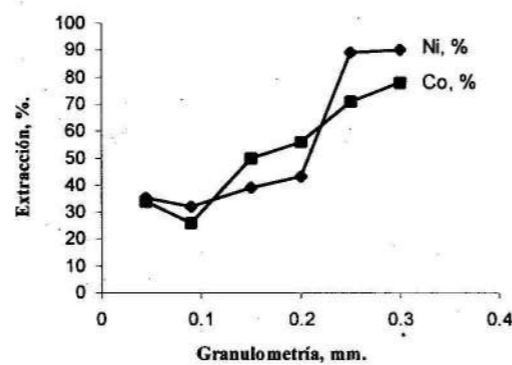


FIGURA 6. Extracción de Ni y Co en la serpentinita con ácido cítrico variando la granulometría.

El incremento del tamaño de las partículas influye positivamente para clases por debajo de (- 0.25 + 0.2 mm, observándose además que esta influencia es más significativa en el caso del cobalto que del níquel, para este último la variación fundamental está dada en el intervalo de tamaños de - 0.25 + 0.2 mm.

Esto puede deberse a que en las zonas serpentiniticas en cortezas de intemperismo para las partículas con estas granulometrías, el níquel y el cobalto se encuentran asociados a las fases silicatadas de neoformación, fundamentalmente, esmectitas con una marcada lixivabilidad (Almaguer y Zamarzy 1993).

CONCLUSIONES

1. De los ácidos orgánicos empleados en la lixiviación de la serpentinita níquelífera, el ácido cítrico resultó ser el lixivante más efectivo, logrando extracciones de níquel de 90%, a una concentración inicial de 0.5 m durante 20 días.
2. A bajos porcentajes de sólidos (2 y 5%) se obtuvieron extracciones de níquel superiores al 80% y además se vio favorecida a las granulometrías gruesas, específicamente a (- 0.25 + 0.3 mm).
3. Se demuestra que es posible recuperar el níquel y el cobalto contenido en la serpentinita con el uso de ácidos orgánicos a condiciones normales, lo cual resulta factible si se toma en consideración la existencia y el conocimiento de cepas de microorganismos, fundamentalmente hongos filamentosos, capaces de producir este ácido en cantidades considerables.

BIBLIOGRAFÍA

- ALIBHAI KAK, AWL DUDENEY, D.J. LEAK y OTROS: "Biolixivación y Bioprecipitación de Ni y Fe de lateritas", en *Fems Microbiology Reviews*, vol. 11(1-3), 1993; pp. 87-96.
- ALMAGUER FURNAGUERA, A.C., y V. ZAMAZRY: "Estudio de la distribución del Fe, Ni y el Co en los tamaños de los granos que componen el perfil de las cortezas de intemperismo de las rocas ultramáficas hasta su desarrollo laterítico y su relación con la mineralogía", en *Minería y Geología*, vol. 2(2), 1993.

BOSECKER, K.: "Leaching of Lateritic Nickel ore with Heterotrophic Microorganisms. Fundamental and Applied Biohydrometallurgy Procces", en *6th International Symposium on Biohydrometallurgy*, Vancouver, Canadá, 1985.

BOSECKER K.: "Bioleaching of non-sulfide minerals with heterotrophic microorganisms", *8th International Biotechnology Symposium*, Ed. by Societe Francaise of Microbiologie, vol. 2, Paris, Francia, 1988.

BOSECKER K.: "Biolixivación de valores metálicos de minerales silicatados y productos residuales silicatados", en *Biohydrometallurgy*, 1989, pp. 15-24.

CAPOTE, N., LUIS A. ROJAS PURÓN Y P.R. BASSAS N.: Determinación de la distribución del níquel en las macrofases del mineral laterítico, *Minería y Geología*, vol. 1(1), 1993.

DEMERQUITA L.M.S., T. RODRÍGUEZ, S. GÓMEZ: "Biolixivación de una caolinita brasileña usando ácidos orgánicos y medio fermentativo", en *Minerals Engineering*, vol. 9(9), 1996, pp. 965-971.

ROJAS PURÓN, A.L., G. OROZCO: "Iniciación al estudio de las fases minerales portadoras de níquel en el horizonte limonítico del yacimiento Moa", en *Minería y Geología*, vol. 11(2), 1994.

ROJAS PURÓN, L. A.: Principales fases portadoras de níquel en los horizontes lateríticos del yacimiento Moa. Tesis presentada en la

opción al grado científico de doctor en ciencias geológicas, ISMM, Moa, 1995.

SUKLA L.B., V.V. PANCHANADIKAR, R. N. KAR: "Lixiviación Microbiológica de una mena laterítica de níquel", en *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, vol. 9(2), 1993, pp. 255-257.

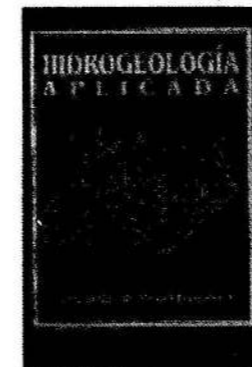
SUKLA L.B., V.V. PANCHANADIKAR: "Biolixivación de una mena laterítica de níquel usando un microorganismo heterótrofo", en *Hydrometallurgy*, vol. 32(3), 1993, pp. 373-379.

SUKLA L.B., K. M. SWAMY, K.L. NARAYANA, R.N. KAR, V.V. PANCHANADIKAR: "Biolixivación de una mena laterítica de Sukinda usando ultrasonido" en *Hydrometallurgy*, vol. 37(3), 1995, pp. 387-391.

TZEFERES P.G., S. AGATZINI, E.T. NERANTZIS: "Lixiviación microbiana de un mineral de níquel no sulfuroso usando microorganismos heterótrofos", en *Letters in Applied Microbiology*, vol. 18(4), 1994: pp. 209-213.

TZEFERES P.G.: "Lixiviación de un mineral laterítico (Hematítico) de baja ley usando un hongo y metabolitos ácidos producidos biológicamente", en *International Journal of Mineral Processing*, vol. 42(3-4), 1994, pp. 267-283.

HIDROGEOLOGÍA APLICADA



El libro contiene conceptos modernos de la hidrogeología y los recursos que conforman las reservas de explotación de las aguas subterráneas, sus métodos de determinación y fórmulas de cálculo, incluyendo métodos con aportes novedosos del autor. Constituye un material didáctico-teórico y un manual práctico para profesionales que se ocupan de estudios hidrogeológicos. Su estructura y contenido lo convierten en literatura de consulta para profesionales de entidades docentes, investigativas, de proyectos y científicas en las especialidades de hidrogeología, ingeniería geológica, hidráulica y medio ambiente. Los capítulos especializados satisfacen necesidades de estudios de posgrado y maestría en las especialidades antes señaladas así como en riego y drenaje.

Consta de 425 páginas, que contienen catorce capítulos, de ellos ocho de carácter general y seis de especialización. Incluye 62 tablas de parámetros y funciones, 154 figuras (esquemas de cálculos, gráficos y nomogramas) y 414 fórmulas de aplicación práctica.

La confección del libro es producto de un análisis bibliográfico selectivo de 47 títulos, en su mayoría extranjeros, con aportes y diseños originales del autor. Por su contenido, es el primera obra de hidrogeología que se publica por un autor cubano.



CONSTANTINO DE MIGUEL FERNÁNDEZ (Puerto Padre, 1945). Ingeniero Minero Hidrogeológico., Doctor en Ciencias Geológicas, Profesor Asistente del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Posee amplia experiencia de trabajo y varias publicaciones en revistas técnicas. Sus investigaciones han estado dirigidas fundamentalmente al mejoramiento de suelos salinos, obras hidrotécnicas, recarga artificial de acuíferos, drenaje de yacimientos minerales sólidos, evaluación de reservas de aguas subterráneas y evaluación de impacto ambiental. En 1995, el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos le otorgó la Distinción de Investigador Relevante.