

Modelación matemática de la fragmentación en los trituradores de cono y de rodillos usando el modelo de Whiten (1972) modificado

Alfredo L. Coello-Velázquez
José R. Hechavarría-Pérez
Luis Orlando Castellanos-Pérez
Juan María Menéndez-Aguado

Resumen

La modelación matemática del proceso de trituración de minerales mediante los métodos de balance de la población de partículas (PBM) es una herramienta fundamental en el análisis de procesos, la optimización y el diseño. Con el propósito de evaluar los eventos y procesos de fractura en los trituradores de cono y de rodillos se tomó como referencia el modelo estructural de Whiten (1972), modificando la función de distribución de la fragmentación. En tal sentido, esta función fue sustituida por la expresión de Austin y Luckie (1972). Para el desarrollo de la modelación se propuso un algoritmo elaborado en Matlab, como recurso para la determinación de los parámetros de fractura. El error de estimación del modelo estableció la factibilidad de su empleo en la modelación de la fragmentación de los trituradores evaluados, particularmente de los trituradores de rodillos, hasta hoy siempre descritos con modelos de fragmentación simple. Las funciones de clasificación y de distribución de la fragmentación, describen las particularidades de los eventos y procesos de fractura que tienen lugar en ambos trituradores.

Palabras clave: comminución; funciones de fracturas; métodos de balance de población de partícula; modelación matemática; trituración.

Mathematical modeling of fragmentation in cone and roller crushers using modified Whiten's model (1972)

Abstract

Crushing mathematical modeling using particles population balance method is a fundamental tool for process analysis, optimization and design. This paper deals with the evaluation of the fracture events and process in cone and rolls crushers. For that proposes, is taken as reference Whiten (1972) structural model modifying fragmentation distribution function. This function was replaced by Austin and Luckie (1972) expression. For model development, was created an algorithm using Matlab 13a like determining resource of fractures parameters. Model estimated error for evaluated crushers established the viability of its use for modelling and simulation, particularly for rolls crushers that even before were simulated by simple fragmentation models. Classification and fragmentation distribution functions obtained, describe the events and process fracture essentials that take place in both crushers.

Keywords: comminution; crushing; modeling; particles population balance method.

1. INTRODUCCIÓN

La comminución, término bajo el cual se agrupan los procesos de reducción de tamaño, ocupa un lugar importante en un numeroso grupo de industrias, tales como el procesamiento de minerales, la industria del cemento, la maderera, la química, la farmacéutica, de la cerámica y otras. Estos procesos son altos consumidores de energía (Stamboliadis 2002). Deniz (2003) asegura que, de toda la energía producida en el mundo, en la comminución se consume entre el 3-4 %.

En la industria minero-metalúrgica son empleados diferentes tipos de trituradores y molinos. En el caso particular de los trituradores, los de cono están ampliamente difundidos en el procesamiento de menas y rocas de dureza media y alta, mientras que los de rodillos tienen una presencia interesante en el procesamiento del carbón, caliza, yeso, fosfatos y minerales de hierro de dureza media y baja (Wills y Finch 2016). La principal diferencia entre ambos tipos de trituradores guarda relación con los mecanismos de fractura presentes en la fragmentación: la compresión y fricción para el triturador de cono y la compresión para el de rodillos.

El proceso de comminución, como norma, se caracteriza por la sucesión de varios fenómenos de fragmentación que operan simultáneamente o de forma consecutiva, o incluso de ambas formas (Lynch 1980). Los eventos de selección-fragmentación se suceden dentro de cada uno de esos eventos de fragmentación.

No obstante, puede suceder que cada evento sea precedido de un evento de separación dimensional, o sea, de una clasificación antes de cualquier evento de fragmentación. Este fenómeno de clasificación-fragmentación se pone de manifiesto principalmente en los trituradores de cono y de mandíbulas. En ambos casos, las partículas saldrán del triturador solo si son menores que la apertura de descarga del triturador. En otras palabras, el triturador de cono puede simplificarse en una zona de fragmentación y en una zona de clasificación (Leyva *et al.* 2015).

En los trituradores de cono, la fragmentación ocurre de forma progresiva por la compresión y desgaste sucesivo, resultado de la acción de los órganos de trabajo sobre el material en su acercamiento al punto descarga, describiendo así un evento de fragmentación múltiple.

Según Wills y Napier-Munn (2006), en la trituración por rodillos la fragmentación ocurre por la compresión simple de los rodillos, lo cual hace suponer que prevalece la fragmentación simple.

Los modelos basados en el balance de la población de partículas son herramientas muy útiles en la modelación de procesos de trituración y molienda (Coello *et al.* 2011). En su esencia, estos métodos consideran que el proceso de reducción de tamaño básicamente contiene dos elementos: a) el evento de fractura representado por la función de distribución de la fragmentación, b) el proceso de fractura, representado por la función de selección. En los trabajos de Lynch (1980) y Kelly & Spottiswood (1990) están ampliamente tratados los fundamentos de las funciones de fractura.

La función selección (S) expresa la probabilidad de que las partículas sean seleccionadas para el proceso de fragmentación. Esta probabilidad depende del tamaño de las partículas (Lynch, 1980). La función de distribución de la fragmentación (B) describe la forma en que se redistribuye el tamaño del material después de la fragmentación de las partículas originales (Coello, Menéndez & Laborde 2008).

La función de distribución de la fragmentación en su forma parcial se representa como $b_{i,j}$ y expresa la fracción de masa de las partículas de tamaño mayor que i , obtenida por la fragmentación de las partículas de tamaño mayor j . En forma acumulada $B_{i,j}$ cuantifica la fracción másica de los fragmentos de tamaño menor que i , obtenidos por la fractura de las partículas de mayor tamaño j .

Considerando las características particulares del trabajo de los trituradores de cono y de rodillos, en lugar de la función de selección se propone utilizar una función de clasificación que expresa la esencia de la fragmentación en los trituradores de cono y de mandíbulas, principalmente. Esta función ha sido ampliamente utilizada en la modelación del proceso de trituración en trituradores de cono (Whiten 1972; Leyva *et al.* 2015), trituradores de martillo (Nikolov 2002, 2004; Coello *et al.* 2011; Austin, Van Orden & Pérez 1980) y para la trituración en rodillos (Kwon *et al.* 2012).

Whiten (1972) definió en la función de clasificación que los elementos de la matriz diagonal son obtenidos a partir de una función de tamaño de partícula $C(x_i)$, la cual proporciona la probabilidad de una partícula de tamaño (x_i) de entrar en la fragmentación del triturador.

Para describir esta función, en la trituración en cono de menas de plomo-zinc del yacimiento de Broken Hill en Australia, Whiten empleó una función de probabilidad dependiente del tamaño de las partículas. Los parámetros de esta función dependen de la apertura de descarga de las trituradoras (*closed size setting*). Esta función ha sido utilizada ampliamente anteriormente con resultados satisfactorios (Leyva *et al.* 2015; Hechavarría *et al.* 2008).

Por su esencia, la función de probabilidad empleada por Austin *et al.* (1981) es una función de clasificación. Austin prefija el módulo de distribución de su ecuación igual para todos los materiales. Resulta poco probable que la forma de distribución de la función de probabilidad sea siempre la misma.

Para la descripción matemática de la función de distribución de la fragmentación (*B*) se han propuesto diferentes expresiones matemáticas. En su modelo, Whiten (1972) para la modelación de esta función, utilizó la ecuación de Broadbent y Callcot (1956). La expresión de Austin y Luckie (1972) ha sido empleada para representar dicha función, tanto en procesos de molienda como de trituración (Nikolov 2004; Hernández *et al.* 2008; Coello *et al.* 2011; Leyva *et al.* 2015; Laborde 2005).

Los modelos estructurales que aparecen con mayor frecuencia en la literatura corresponden a Reid (1965) y a Whiten (1972). El modelo de fragmentación simple (Reid 1965) se puede representar según el esquema de la Figura 1.

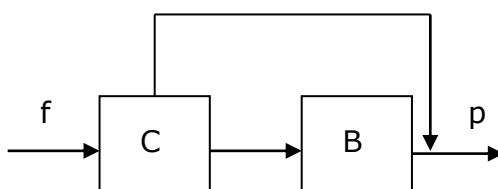


Figura 1. Modelo estructural de Reid (1965).

El modelo estructural de Whiten (1972), presentado en la Figura 2, describe un proceso donde las partículas pueden someterse a varios eventos de fragmentación. Su extendida aplicación es muestra de su probada eficacia en la práctica de la modelación y simulación de varios trituradores.

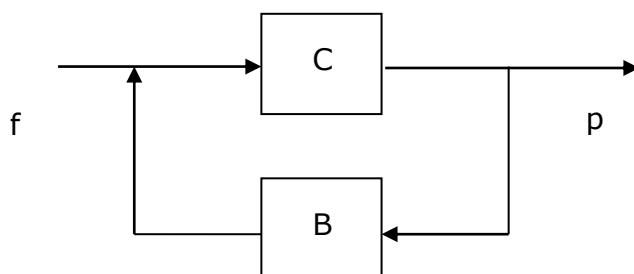


Figura 2. Esquema del modelo estructural de Whiten (1972).

Varios investigadores (Austin *et al.* 1981; Soni, Shukla & Kundu 2009) usaron un modelo de fragmentación simple para la modelación de la trituración de rodillos lisos. Sin embargo, otros (Kwon *et al.* 2012) emplearon un modelo de fragmentación múltiple para describir el triturador

de rodillos desarrollado por Austin, Van Orden & Pérez (1980) muy diferente del modelo de Whiten (1972). De acuerdo con ellos (Kwon *et al.* 2012) en este modelo, luego de una fragmentación primaria, las partículas pueden ser seleccionadas para una re-fragmentación o simplemente pasar sin ella, para considerar el proceso de reaglomeración del carbón en estos trituradores.

Comúnmente, la evaluación del trabajo de los trituradores y molinos está basada en la información energo-tecnológica que requiere de múltiples y laboriosos cálculos (Wills & Finch 2016).

El propósito de este artículo es exponer un modelo matemático, cuyo algoritmo desarrollado en *Matlab* no solo permite obtener la información suficiente para la evaluación del trabajo de los trituradores, sino que además brinda la posibilidad de valorar los eventos y procesos de fractura presentes en la conminución de materiales.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Descripción del modelo

Para la modelación del proceso de conminución se emplea el modelo de balance de la población de partícula de la ecuación (1) propuesta por Whiten (1972).

$$p = ((I - C) \cdot (I - BC)^{-1}) f \quad (1)$$

I= es la matriz de identidad.

C= función de clasificación, u.

B= función de distribución de la fragmentación, u.

2.2. Parámetros del modelo

Función de clasificación

Para la descripción de la función de clasificación se asume la función de Whiten (1972):

$$\left. \begin{array}{l} C_j = 1 - \left(\frac{x_j - k_1}{k_2 - k_1} \right)^{k_3} \quad \text{para } k_1 \leq x_j \leq k_2 \\ C_j = 1 \quad \text{Si} \quad x_j > k_2 \\ C_j = 0 \quad \text{Cuando} \quad x_j < k_1 \end{array} \right\} \quad (2)$$

Donde:

dj : tamaño de partículas. Cj es la probabilidad o razón de fragmentación de las partículas de tamaño j , k_1 tamaño máximo de las partículas con probabilidad de fragmentación igual cero (mm), k_2 es el tamaño mínimo de partículas con probabilidad de fragmentación igual a uno (mm) y k_3 es una constante adimensional que caracteriza la forma de distribución de tamaño del material.

Función de distribución de la fragmentación

Para describir esta función se emplea la ecuación de Austin & Luckie (1972).

$$B_{ij} = \left. \begin{aligned} & \phi \left(\frac{x_i}{x_j} \right)^\alpha + (1 - \phi) \left(\frac{x_i}{x_j} \right)^\beta \quad \text{si } i < j \\ & B_{ij} = 0. \quad \text{para } i > j \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$B_{i,j}$ es la fracción de masa con tamaño de partículas i obtenida por la fragmentación de las partículas de mayor tamaño j , x_j es el tamaño de las partículas iniciales, x_i es la fracción de masa de las partículas con tamaño máximo i que aparecen después de la fragmentación de las partículas originales. Los parámetros α , β y ϕ son adimensionales y dependen de las condiciones del proceso.

La ecuación (3) genera un sistema de ecuaciones no lineales con varias incógnitas. Los métodos de solución mediante prueba y error resultan excesivamente laboriosos, aún con el uso de programas informáticos. Su solución presenta cierta complejidad por el uso de herramientas matemáticas.

2.3. Algoritmo para la determinación de las funciones de C y B

La determinación de B y C , por separado, permite obtener modelos de mayor alcance, pero se requiere de gran laboriosidad y recursos. Sin embargo, su determinación conjunta presupone una economía del tiempo, recursos e información. Según Kelly y Spottiswood (1990) este tipo de técnicas se han convertido en una verdadera moda.

El algoritmo empleado para la obtención y validación del modelo se representa en el esquema de la Figura 3. Como etapa previa a la modelación se deben obtener las distribuciones de tamaño del mineral de alimentación (f) y del producto (p), mediante la toma de muestras y la caracterización del tamaño del mineral a través del método de análisis de tamices.

El algoritmo presentado en la Figura 3 se puede dividir en las siguientes etapas:

- I. Introducción de los datos iniciales (x, f y p)
- II. Introducción del intervalo de valores de los coeficientes de k_1, k_2, k_3, a, β y ϕ .
- III. Cálculo de las matrices b y C que representan las funciones de la fractura.
- IV. Cálculo del vector p mediante el modelo matricial (1) y las funciones B y C .
- V. Búsqueda de los valores de los parámetros de las funciones de la fragmentación mediante algoritmo de optimización. Para esto se emplean métodos iterativos en la obtención de un mínimo para el error estándar del modelo.
- VI. Validación del modelo mediante criterios estadísticos como Chi-cuadrado, comparaciones de la media y la desviación estándar entre los valores observados y calculados de la distribución de tamaño del producto (p observado y p calculado).

Para la validación del modelo se asumen como datos los valores de f , p y x (Tablas 1 y 2) de una mena de zinc (Taggart & Behre 1945) procesadas en dos tipos de trituradoras: una de cono y una de rodillos.

Tabla 1. Valores iniciales de los datos para la trituradora de cono (After, Taggart & Behre 1945)

Datos iniciales para el triturador de cono											
x , mm	100	76	51	38	25,4	19	12,7	9,5	7,65	3,75	0,074
f , mm	9,1	26,4	19,5	11,6	7,1	0	11,4	0	0	0	14,9
p , mm	0	0	0	0	20,8	13,6	23,5	8,5	6,7	8,5	18,4

Tabla 2. Valores iniciales de los datos para la trituradora de rodillos (After, Taggart & Behre 1945)

Datos iniciales para el triturador de rodillos											
x , mm	2,36	1,65	1,39	1,16	0,83	0,5	0,35	0,24	0,17	0,14	0
f , mm	0,1	6,1	35,4	35,9	19,1	2,6	0,4	0,1	0	0,1	0
p , mm	0	1,2	15,4	35,5	30,5	8,5	3,7	1,6	1,1	0,8	0

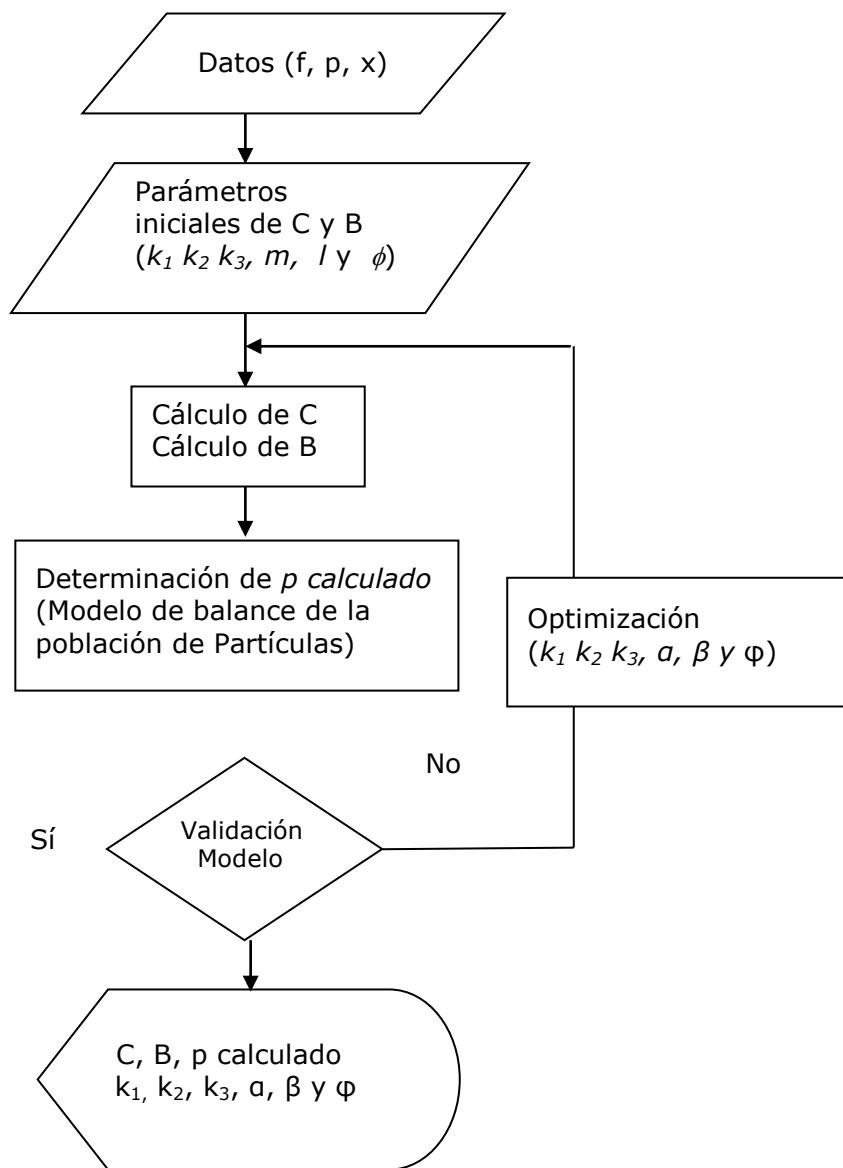


Figura 3. Algoritmo para los cálculos iterativos de los parámetros de fractura.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis de las funciones de clasificación y de distribución de la fragmentación.

En las Figuras 4 y 5 se presenta la función clasificación obtenida para las trituradoras de cono y de rodillos, respectivamente. Ambas funciones se describen de forma adecuada mediante la expresión 2. De acuerdo con los valores de k_3 , la forma de la distribución de la función de probabilidad es diferente para ambos trituradores.

La diferencia en los coeficientes k_1 y k_2 está dada por las diferencias en el tamaño de alimentación, el *closed size setting* (CSS) y las especificidades de los mecanismos de fragmentación de ambas trituradoras. Los valores de

los coeficientes del modelo de la función de clasificación aparecen en la Tabla 3.

Tabla 3. Valor de los coeficientes de la función de clasificación

No	Tipo de triturador	Valor de los coeficiente		
		k_1 , mm	k_2 , mm	k_3 , u
1	De cono	31,9	7,99	1,025
2	De rodillos	1,646	0,155	1,730

El coeficiente de nitidez (SI) es una medida de la inclinación de la curva de la clasificación (Austin & Concha 1994); cuando el valor de SI es igual a 1, la clasificación es ideal. El coeficiente de nitidez para el triturador de cono y de rodillos resultó 0,6 y 0,4, respectivamente. Esto significa que, en el triturador de cono, las partículas minerales mayores que el tamaño d_{50} tienen mayor oportunidad de fragmentación. Teniendo en cuenta que los tamaños relativos (d_{50}/d_{\max}) de ambos trituradores son iguales, se puede concluir que las partículas menores que el d_{50} tienen menores oportunidades de fragmentación en el triturador de rodillos. Esto explica la mayor producción de finos en los primeros.

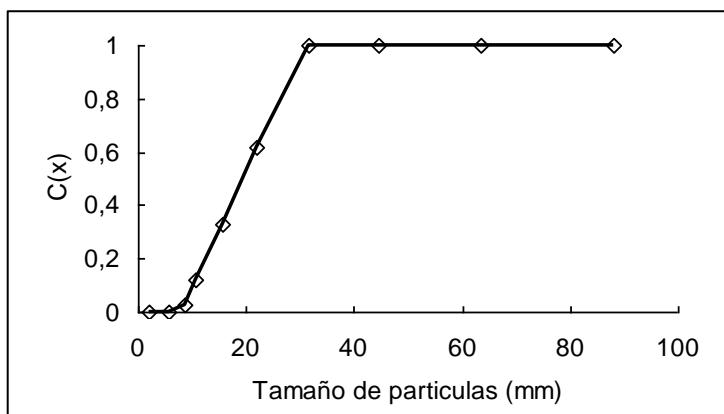


Figura 4. Función clasificación para la trituradora de cono.

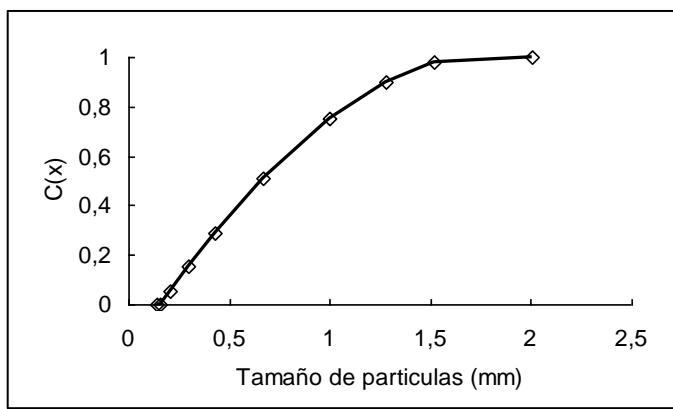


Figura 5. Valores de la función clasificación en la trituradora de rodillos.

La forma de la función de distribución de la fragmentación para ambos trituradores sigue las mismas regularidades independientemente de las diferencias en los tamaños de alimentación. Pole (2005) encontró regularidades similares en la trituración en trituradoras de mandíbulas para el yacimiento de Caimanes. Resulta interesante que para las menas de zinc empleadas en este estudio también se cumplen estos patrones de conducta de la función de distribución de la fragmentación.

Estos elementos confirman los postulados de Nikolov (2002) sobre la independencia de la forma de la función de distribución de la fragmentación del tamaño inicial para la trituración de las rocas de caliza (Nikolov 2002) y de zeolitas (Hechavarría *et al.* 2008); más bien, depende del tipo de material (Leyva *et al.* 2015). El BWI de ambas rocas y la mena de zinc son cercanos: 12,1 kWh/t para la caliza (Wills y Finch 2016) y 13,2 kWh/t (Pole 2005) y 12,42 kWh/t (Lewis & Horst 1980) para la mena de zinc.

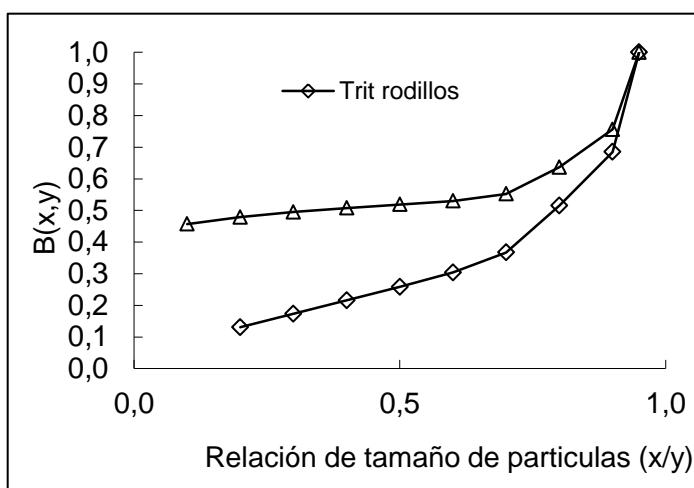


Figura 6. Función de distribución de fragmentación para ambos trituradores.

Los parámetros de fractura de la expresión de Austin y demás colaboradores (1972) se presentan en la Tabla 4. Los valores de los parámetros de fractura se muestran consecuentes con los mecanismos de fragmentación de las trituradoras evaluadas y, por ende, con las fracturas generadas en las partículas minerales: el clivaje y la abrasión para las trituradoras de cono, y el clivaje para las de rodillos.

Tabla 4. Parámetros de fractura del modelo de Austin *et al.* (1972)

Tipo de triturador	Φ	α	β
De cono	0,55	0,11	14,9
De rodillos	0,42	0,9	13,9

En cuanto a la generación de finos, los parámetros de fractura (Φ y α) confirman que las trituradoras de cono generan más finos que las

trituradoras de rodillos; el valor de φ es mayor que en el primero. Los valores de α demuestran que el mecanismo de fractura generador de partículas finas (abrasión) está presente en el triturador de cono. A juzgar por el valor del coeficiente α para el triturador de rodillos también existe cierta generación de finos, sin embargo, esta producción de finos debe estar relacionada con la refragmentación del material entre los rodillos y entre el material interior.

Básicamente estos elementos se asocian a la intensidad de la energía aplicada a las partículas minerales. De acuerdo con Kelly y Spottiswood (1990), los mecanismos de fractura y los resultados de la distribución de tamaño dependen de la intensidad de la energía aplicada en la fragmentación.

La tendencia a la sustitución de los trituradores de rodillos por trituradoras de cono (Wills & Napier-Munn 2006) es una expresión práctica de los argumentos anteriormente planteados.

3.2. Análisis de los resultados de la distribución granulométrica

En las Figuras 6 y 7 se aprecia que la distribución granulométrica de los productos modelados para cada triturador sigue patrones similares a la distribución granulométrica del producto triturado en los objetos reales. El error estándar de estimación de los modelos es de 2,16 % y 1,28 % para las trituradoras de cono y de rodillos, respectivamente.

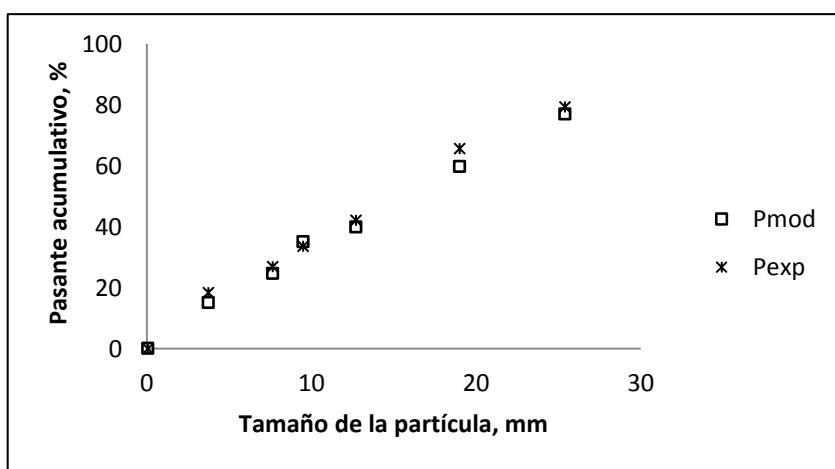


Figura 6. Distribución granulométrica del producto calculado y observado en la trituradora de cono.

Resulta interesante que la sensibilidad del modelo asume las diferencias en los mecanismos de fragmentación de ambos trituradores. La tendencia de la distribución de tamaño modelada para ambas trituradoras es un poco diferente. La distribución de tamaño del producto del triturador de cono

sigue un patrón lineal, mientras para el triturador de rodillos sigue una tendencia en forma de una función S.

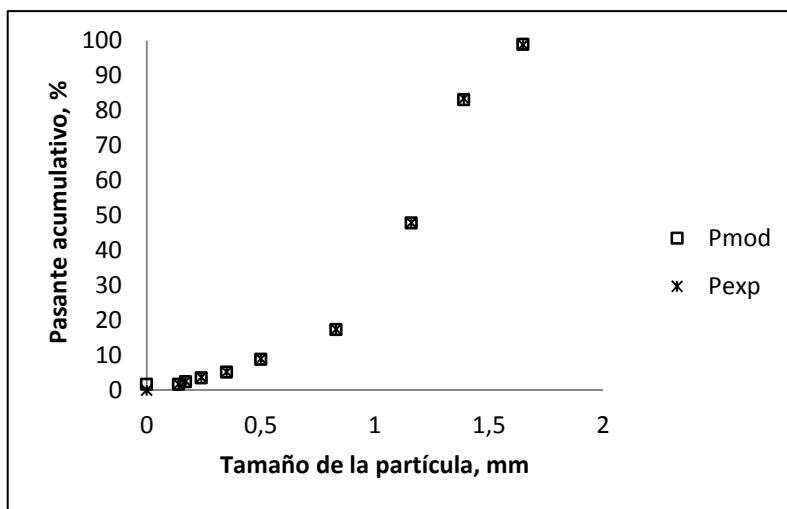


Figura 7. Distribución granulométrica del producto calculado y observado en la trituradora de rodillos.

Los resultados de las Figuras 7 y 8 representan la comparación entre los valores modelados y experimentales del producto de las trituradoras modeladas. Sus desviaciones muestran escasas diferencias, un poco más pronunciadas para el triturador de cono. Para el triturador de rodillos, la sensibilidad del modelo es mayor para las fracciones mayores de d_{10} aproximadamente; el caso del triturador de cono la distribución de las desviaciones es bastante homogénea a todo lo largo del espectro granulométrico.

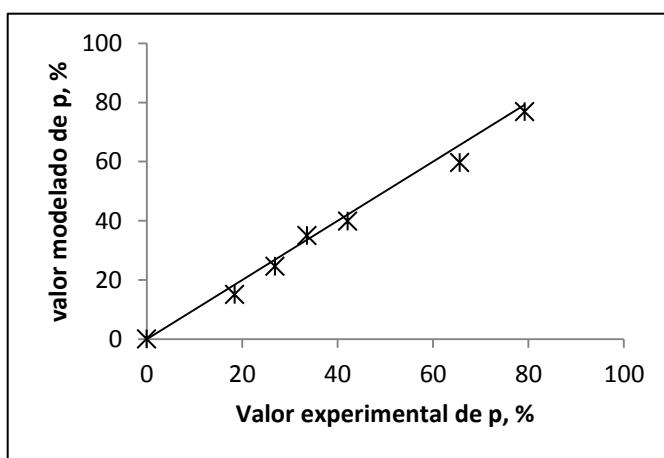


Figura 7. Correlación entre los valores del producto modelado y el producto experimental para la trituradora de cono.

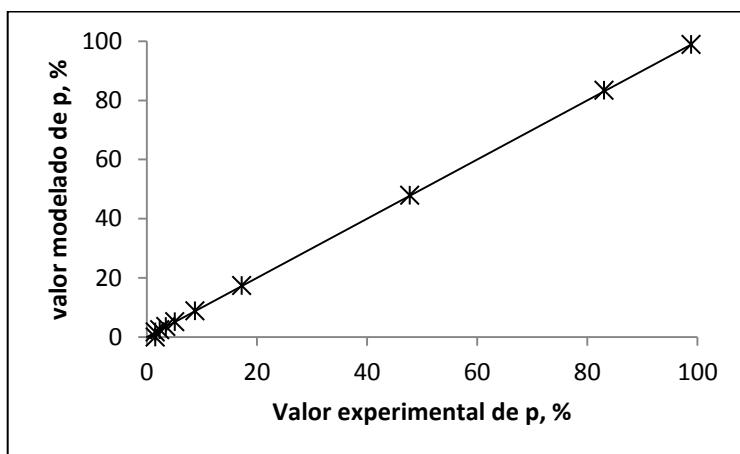


Figura 8. Correlación entre los valores del producto modelado y el producto experimental para la trituradora de rodillos.

En la Tabla 5 se observa que para una probabilidad de un 95 %, los valores calculados del criterio de Chi-cuadrado (χ^2) son muy inferiores a los valores críticos. Esto indica que existe una adecuada correspondencia entre los valores observados y los modelados.

Tabla 5. Resultados de la prueba Chi cuadrado

Tipo de trituradora	Valor del estadígrafo de Chi-cuadrado	
	Valor crítico	Valor obtenido
Trituradora de cono	12,5916	1,791
Trituradora de rodillos	16,9190	2,697

4. CONCLUSIONES

- Las funciones obtenidas de clasificación y de distribución de la fragmentación describen las particularidades de los eventos y procesos de la fragmentación en ambos trituradores, específicamente para el triturador de cono; a las partículas minerales se les presentan mayores oportunidades de fragmentación con mayor producción de finos.
- El modelo matemático propuesto reproduce patrones similares de la distribución granulométrica del producto triturado en las trituradoras de cono y de rodillos con una adecuada precisión. Particularmente en esto último, antes simulado con un modelo de fragmentación simple, se demuestra la factibilidad del modelo de Whiten (1972) modificado.

5. REFERENCIAS

- AUSTIN, L. G. & CONCHA, F. 1994: *Diseño y simulación de circuitos de molienda y clasificación*. CYTED. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. Subprograma de Tecnología Mineral. Red de Fragmentación XIII-A.
- AUSTIN, L. G. & LUCKIE, P. T. 1972: Estimation of non-normalized breakage distribution parameters from batch grinding. *Powder Technol* 5: 267-277.
- AUSTIN, L. G.; VAN ORDEN, D. R. & PÉREZ, J. W. 1980: A preliminary analysis of smooth roll crushers. *International Journal of Mineral Processing* 6: 321-336.
- AUSTIN, L. G.; VAN ORDER, D. R.; Mc WILLIAMS, B. & PÉREZ, J. M. 1981: Breakage parameters of some materials in smooth roll crushers. *Powder Technology* 28: 245-251.
- BROADBENT, S. R. & CALLCOTT, T. G. 1956: A matrix analysis of processes involving particle assemblies. *Phil. Trans Royal Soc. Lond. Ser. A.* 249(960): 99-123.
- COELLO-VELÁZQUEZ, A. L.; MENÉNDEZ, A. J. M. & LABORDE, B. R. 2008: Grindability of lateritic nickel ores in Cuba. *Powder Technology* 182: 113-115.
- COELLO-VELÁZQUEZ, A. L.; MENÉNDEZ-AGUADO, J. M.; HECHAVARRÍA-PÉREZ, J. R.; SÁNCHEZ, A. B. & ÁLVAREZ, B. 2011: Toward the determining the behaviour of de fragmentation functions during the impact crushing of minerals. *Mineral and metallurgical processing* 28(2): 82-86.
- DENIZ, V. 2003: The effect of the fraction mill critical speed on kinetic breakage parameters of clinker and limestone in laboratory ball mill. Snd. International Mining Congress and Exhibition of Turkey-IMCET. ISBN-975-395-603-3.
- HECHAVARRÍA, J. R.; COELLO, V. A.; MENÉNDEZ, J. M. & LABORDE, R. 2008: Aplicación de los modelos de Nikolov en la trituración por impacto de la mineral zeolita del yacimiento San Andrés, Holguín. *Minería & Geología* 24(4).
- KELLY, E. G. & SPOTTISWOOD, D. J. 1990: The breakage function, what is it really? *Minerals Engineering* 3(5): 405-414.
- KWON, J.; CHO, H.; MUN, M. & KIM, K. 2012: Modeling of coal breakage in a double-roll crusher considering the reagglomeration phenomena. *Powder Technology* 232: 113-123.
- LABORDE, R. 2005: *Modelación y simulación matemática de la molienda del mineral laterítico con composición substancial compleja*. Tesis doctoral.

Alfredo L. Coello Velázquez & Juan María Menéndez Aguado (Tutores).
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

- LEWIS, F. M. & HORST, W. E. 1980: Comminution-classification-screening. In: Weiss, N. (ed). *SME Mineral Processing Handbook*. SME, NY.
- LEYVA-MORMUL, A.; COELLO-VELÁZQUEZ, A. L.; HECHAVARRÍA-PÉREZ, J. R.; MENÉNDEZ-AGUADO, J. M.; LEYVA-GONZÁLEZ, O. S. & LEYVA-RAMÍREZ, E. 2015: Modelo de Whiten (1972) modificado para modelación de la trituración de la antracita residual de Nicaro. *Minería & Geología* 31(1): 13-28.
- LYNCH, J. A. 1980: *Circuitos de trituración y molienda de minerales*. Editorial Rocas y Minerales, Madrid.
- NIKOLOV, S. 2002: A performance model for impact crusher. *Minerals Engineering* 15: 715-721.
- NIKOLOV, S. 2004: Modelling and simulation of particle breakage in impact crushers. *Int. J. Miner. Process.* 74: 219-225.
- POLE, F. M. 2005: *Caracterización de la preparación mecánica de las zeolitas naturales de Caimanes*. Coello-Velázquez, A. & Menéndez-Aguado, J. M. (Tutores). Tesis de maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- REID, K. J. 1965: A solution to the batch grinding equation. *Chemical Engineering Science* 20(11): 953-963.
- SONI, S. K.; SHUKLA, S. CH. & KUNDU, G. 2009: Modeling of particle breakage in a smooth double roll crusher. *International Journal of Mineral Processing* 90(1): 97-100.
- STAMBOLIADIS, E. T. 2002: A contribution to the relationship of energy and particle size in the comminution of brittle particulate materials. *Mineral Engineering* 15(10): 707-714.
- TAGGART, A. F. & BEHRE, H. A. 1945: *Handbook of mineral dressing, ores and industrial minerals*. John Wiley & Sons.
- WHITEN, W. J. 1972: The simulation of crushing plants with models developed using multiple spline regression. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* 72(10): 257.
- WILLS, B. & FINCH, J. 2016: *Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. Eighth Edition. Elsevier Ltd, London, 496 p.
- WILLS, B.; NAPIER-MUNN. 2006: *Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. Seventh Edition. Elsevier Ltd, London, 450 p.

Alfredo L. Coello-Velázquez, acoello@ismm.edu.cu

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular.
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba.

José R. Hechavarría-Pérez, jhperez@facing.uho.edu.cu

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Auxiliar.
Universidad de Holguín “Oscar Lucero Moya”. Holguín, Cuba.

Luis Orlando Castellanos-Pérez, locp@facinf.uho.edu.cu

Universidad de Holguín, Cuba.

Juan María Menéndez Aguado, maguado@uniovi.es

Doctor en Ciencias Técnicas. Universidad de Oviedo. España.

Modelos matemáticos para pronosticar parámetros reológicos de hidromezclas lateríticas

Gabriel Hernández-Ramírez
Arístides A. Legrá-Lobaina
Beatriz Ramírez-Serrano
Liudmila Pérez-García

Resumen

El presente trabajo tuvo como objetivo establecer modelos matemáticos que permitan el pronóstico de los parámetros reológicos de la pulpa laterítica a concentraciones de sólidos desde 35 % hasta 48 %, temperatura de la hidromezcla precalentada superior a los 82 °C y número de mineral entre 3 y 16. En el estudio se utilizaron cuatro muestras de pulpa laterítica en diferentes ubicaciones del proceso. Los resultados permitieron definir que las propiedades plásticas de la pulpa laterítica en las condiciones de este estudio se ajustan al modelo de Herschel-Bulkley para plásticos reales. Además, evidencian que para las condiciones de operación actuales, incluso para situaciones nuevas, los modelos matemáticos UPD tienen una mayor capacidad de predicción de los parámetros reológicos que los modelos matemáticos de mínimos cuadrados.

Palabras clave: hidromezclas lateríticas; parámetros reológicos; modelos matemáticos.

Mathematical models to predict rheological parameters of lateritic hydromixtures

Abstract

The present work had as objective to establish mathematical models that allow the prognosis of the rheological parameters of the lateritic pulp at concentrations of solids from 35% to 48%, temperature of the preheated hydromixture superior to 82 ° C and number of mineral between 3 and 16. Four samples of lateritic pulp were used in the study at different process locations. The results allowed defining that the plastic properties of the lateritic pulp in the conditions of this study conform to the Herschel-Bulkley model for real plastics. In addition, they show that for current operating conditions, even for new situations, UPD mathematical models have a greater ability to predict rheological parameters than least squares mathematical models.

Keywords: lateritic hydromixtures; rheological parameters; mathematical models.

1. INTRODUCCIÓN

En la industria del níquel de la región oriental de Cuba conocer el comportamiento reológico de las suspensiones de minerales lateríticos y su influencia en el proceso de lixiviación ácida es de vital importancia para lograr una explotación óptima de dicha tecnología. Cuando estas relaciones de influencia solo se conocen de manera general es necesario realizar nuevas caracterizaciones experimentales para determinar los vínculos específicos entre las propiedades de las hidromezclas lateríticas crudas.

Varios investigadores en el mundo han dedicado sus estudios al campo de la reología de polímeros (Mewis *et al.* 1989; Caram *et al.* 2006; McGuire, Addai-Mensah & Bremmell 2006; Gomes & Marchese 2013; Li *et al.* 2016) y de emulsiones de petróleo (Ohtake, Hano & Takagi 1987; Pal & Masliyah 1990; Briceño *et al.* 1997; Briceño, Salager & Bertrand 2001; Rodríguez, Angulo & Falcón 2015; Vernáez *et al.* 2016). Otros han analizado el comportamiento reológico de suspensiones de minerales como bentonita (Bekkour, Leyama & Benchabane 2005; İşçi, Seniha & Güngör 2005), goethita (Blakey 2003) y lateritas procedentes de distintos yacimientos (Bhattacharya & Panda 1998; Larson 1999; Klein & Hallbom 2002; Blakey 2003; Pérez 2010b).

Estudios realizados en pulpas lateríticas cubanas han permitido determinar que para concentraciones inferiores al 18 % en peso de sólidos, las curvas de flujo prácticamente son independientes de su composición mineralógica y exhiben un comportamiento seudoplástico (Garcell, Díaz & Surís 1988; Avramidis 1991; Cerpa 1998; Garcell *et al.* 1998; Garcell 2001; Izquierdo, Turro & Nikolaev 2001; Pérez 2004; Pérez 2010b; Hernández, Pérez & Rodríguez 2016).

Sin embargo, para concentraciones de alrededor de 22 % hasta 45 % en peso de sólidos, la viscosidad aumenta dependiendo cada vez más de la mineralogía y en este caso el comportamiento reológico adquiere propiedades plásticas, pudiendo ajustarse en algunos casos al modelo de Bingham y en otros al de Bulkley-Herschel. Estas suspensiones lateríticas se comportan como flujos no newtonianos con plasticidad, debido a su carácter de materiales polidispersos, con un predominio de granulometría fina, con partículas menores de 0,045 mm.

Se destacan los resultados obtenidos por Pérez (2010a) al obtener los modelos matemáticos que correlacionan los principales factores de influencia sobre el comportamiento reológico de las pulpas lateríticas. Los resultados obtenidos son válidos en el dominio de operación del proceso a temperatura ambiente, a niveles de concentración de sólidos entre 43 %,

y 45 %, número de mineral entre 10 y 20, índice de estabilidad entre 0,03 y 0,12 y coeficiente de polidispersión entre 0,74 y 0,79. Estas limitantes no permiten establecer relaciones entre los factores que caracterizan las pulpas cruda y precalentada.

El presente trabajo tiene como objetivo establecer modelos matemáticos que permitan el pronóstico de los parámetros reológicos de la pulpa laterítica, a concentración de sólidos desde 35 % a 48 %, temperatura de la hidromezcla precalentada superior a 82 °C y número de mineral entre 3 y 16.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para este trabajo se escogieron cuatro muestras de pulpa laterítica del proceso de lixiviación ácida en las siguientes ubicaciones: en la descarga del espesador A y D, en la línea de transferencia, y en la descarga de las bombas volumétricas. También se tomaron muestras de agua de reboso de los tanques de sedimentación para realizar las diluciones necesarias durante la preparación de soluciones, a diferentes concentraciones de sólidos.

2.1. Equipos y utensilios

Equipos: Viscosímetro HAAKE VT 550. Balanza técnica digital. Balanza secadora. Agitador mecánico con impelente mecánico. Plancha térmica. Bomba de agua.

Utensilios: Probetas de 500 ml. Beakers de 500 ml. Recipiente de 20 l. Jeringuillas de 20 ml. Frascos de 250 ml.

2.2. Preparación de las suspensiones minerales

Para la preparación de las suspensiones minerales se definieron las proporciones de sólido a ser evaluados: 37 %, 40 %, 43 %, 46 % y 48 %. Se tomaron muestras compósito (MC) de pulpa en tanquetas de 20 l. La Tabla 1 muestra los valores de porcentaje de sólido reportados por el control de operaciones de la planta.

Tabla 1. Contenido de sólido de las muestras

Muestras	Punto de Muestreo	% Sólido
MC1	Salida Espesador A	44,70
MC2	Salida Espesador D	38,30
MC3	Línea de transferencia de 508 mm	43,25
MC4	En la descarga de las bombas volumétricas	40,28

Teniendo en cuenta que el porcentaje de sólido de pulpa inicial de cada muestra no fue el mismo, una vez tomadas las muestras se dejaron reposar

para que sedimentaran, hasta lograr un 48 % de sólidos; el agua exudada se extrajo por decantación. En beakers de 500 ml se prepararon, de cada una de las muestras a partir de su dilución, cinco suspensiones en los cinco porcentajes definidos para este estudio.

2.3. Selección de variables

Las propiedades reológicas o variables dependientes que son de especial interés para obtener los modelos matemático son:

μ_a : viscosidad aparente de la suspensión, identificada como Y_1 .

τ_0 : Esfuerzo cortante inicial, identificada como Y_2 .

K : índice de consistencia, identificada como Y_3 .

n : índice de flujo, identificada como Y_4 .

Y las que constituyen respuestas cuando varían experimentalmente ciertas propiedades de la pulpa:

s : parámetro característico de la granulometría (coeficiente de polidispersión), identificada como X_1 .

$\%S$: contenido de sólido (porcentaje másico de sólidos en la pulpa), identificada como X_2 .

pH, identificada por X_5 .

$Nrmin$: Número mineral, identificada como X_4 .

A partir de los datos obtenidos por Pérez (2010a), se determinaron modelos lineales (r es el coeficiente de correlación) y se obtuvo, mediante pruebas de hipótesis, la validez del nivel de influencia de las variables independientes sobre las variables dependientes. Además, se consideró importante incorporar la variable independiente temperatura, denotada como X_3 . Se han realizado muy pocos estudios acerca del efecto de la temperatura en las suspensiones de laterita, entre ellos están los realizados por Pérez (2004, 2006) y por Hernández, Rosa & Durán (2015). No se conocen referencias de investigaciones previas del comportamiento de los parámetros reológicos de la pulpa precalentada que es procesada en la planta de lixiviación a una temperatura superior a 82 °C.

2.4. Mediciones reológicas

Para las mediciones reológicas se utilizó un viscosímetro rotacional marca HAAKE 550, al cual se le conectó una bomba de flujo para hacer recircular el agua a diferentes temperaturas para precalentar la pulpa.

Para obtener los valores de esfuerzo de corte se midieron tres réplicas para cada valor de gradiente de velocidad y se determinaron las correspondientes medias aritméticas, desviación estándar y coeficiente de variación, que no excedió del 5% (Tabla 2).

Tabla 2. Procedimiento para obtener los valores de $(Y_2)\tau$ utilizando el HAAKE VT 550

X2	X3	Gradiente de velocidad	Esfuerzo de Corte τ						Coeficiente de variación %
			Réplica $(Y_2)\tau_1$	Réplica 2 $(Y_2)\tau_2$	Réplica 3 $(Y_2)\tau_3$	Media $(Y_2)\tau$	Desviación Estándar		
37	28	231,6	93,37	92,98	93,39	93,25	0,23	0,25	
37	28	139	70,38	71,56	68,95	70,30	1,31	1,86	
37	28	83,3	52,94	52,69	53,3	52,98	0,31	0,58	
37	28	58,43	42,63	43,33	43,02	42,99	0,35	0,82	
37	28	29,92	28,41	29,39	29,19	29,00	0,52	1,79	
37	28	17,93	21,07	21,21	20,73	21,00	0,25	1,18	
37	28	10,7	14,89	15	14,82	14,90	0,09	0,61	
37	28	6,45	10,9	11,2	10,9	11,00	0,17	1,57	

2.5. Técnica de fluorescencia de rayos X para determinar la composición química

La composición química del mineral se determinó mediante análisis químicos, con los que se identifican 10 elementos; pero como en el proceso se emplea un parámetro denominado Número de Mineral (Nrmin) para predecir el comportamiento de la pulpa cruda en la sedimentación (que se determina por la ecuación 1), se decidió utilizarlo como variable representativa de la composición química en el diseño de experimentos.

$$Nr\ min = \frac{\%Mg + \%SiO_2}{\%Co + \%Mn} \quad (1)$$

Se ha comprobado que cuando $7 < Nr\ min < 14$ la pulpa tiene buena sedimentación.

2.6. Análisis granulométrico de las muestras por analizador de tamaños

La determinación de las distribuciones granulométricas de las muestras se realizó mediante un analizador de tamaño de partículas del tipo Analysette 22 COMPACT, el cual permite obtener fracciones de partículas menores de 0,045 mm (325 mallas), que no pueden ser determinadas

mediante el uso de tamices y que ejercen un efecto importante sobre el comportamiento de estas pulpas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Composición química de las suspensiones lateríticas

La Tabla 3 muestra la composición química y número de mineral de las muestras seleccionadas para el experimento.

Tabla 3. Composición química y número de mineral de las muestras seleccionadas para el experimento

Elemento (%)	Muestras			
	M1	M2	M3	M4
Ni	1,21	1,3	1,22	1,21
Co	0,11	0,121	0,115	0,112
Fe	42,9	43,9	43,2	43,1
Mg	1,77	1,94	1,72	1,61
Al	4,43	4,32	4,42	4,44
SiO ₂	6,61	5,21	6,39	6,52
Cr	1,55	1,68	1,56	1,57
Mn	0,75	0,79	0,74	0,73
Cu	0,029	0,03	0,028	0,028
Zn	0,036	0,036	0,036	0,036
Ni + Co	1,32	1,421	1,335	1,322
Número de Mineral	9,74	7,85	9,48	9,65

Como puede apreciarse, la pulpa posee un alto contenido de hierro, característica típica de las lateritas cubanas, en las que abundan los óxidos de este metal (Agyei 2006). En cada muestra todos los elementos se encuentran dentro de los dominios del proceso productivo y los parámetros óptimos para la operación de la planta.

3.2. Análisis granulométrico

Los resultados del análisis de distribución de tamaño de partículas minerales se asemejan a lo reportado por Pérez (2010), en cuanto a que: la pulpa cruda de laterita posee un 30 % de partículas mayores de 0,045 mm, existe un predominio de las fracciones finas de forma general y el D₈₀ se corresponde con el diámetro de partícula igual a 0,006872 mm, aproximadamente 7 µm. Todo ello indica que el 80 % de la muestra presenta un diámetro inferior a este valor, por tanto, las partículas más finas son mayoritarias y determinan la velocidad de sedimentación de este

mineral, así como su comportamiento reológico; es decir, las partículas de todos estos materiales tienen un comportamiento propio de sistemas polidispersos.

Los resultados (Tabla 4) fueron ajustados al modelo de distribución granulométrica (Pérez 2010) y comprobados por Hernández, Pérez & Rodríguez (2016).

Tabla 4. Parámetros granulométricos que describen el modelo de polidispersión

Muestras	$D_{50} (\mu_m)$	B_N	s	R
M1	2,980	0,1738	4,1989	0,9918
M2	3,087	0,3792	1,6098	0,9963
M3	2,818	0,4595	1,4112	0,9941
M4	2,907	0,4354	1,4806	0,9949

3.3. Resultados experimentales para el comportamiento reológico de la pulpa

Pulpa cruda

Luego de haber realizado las mediciones reológicas a las muestras de pulpa cruda en la línea de transferencia (M3), para los cinco porcentajes de sólidos evaluados y manteniendo constante la temperatura a 28° C, se obtuvieron los valores de esfuerzos de corte y gradiente de velocidad representados en la Figura 1. La representación gráfica de los datos experimentales de gradiente de velocidad (γ) contra esfuerzo de corte (τ) permiten realizar el ajuste de los modelos reológicos.

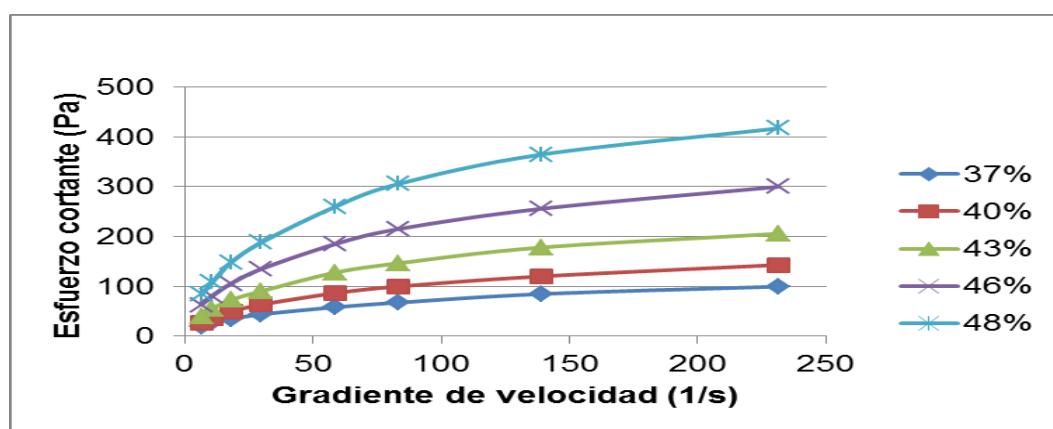


Figura 1. Curvas de flujo de la pulpa cruda a 28 °C para los diferentes porcentajes de sólidos ($s=1,4112$ y $NM=9,48$).

La Figura 1 describe el comportamiento típico de las suspensiones no newtonianas. A medida que aumenta la concentración de sólidos, los esfuerzos de corte (τ) se incrementan, al igual que el valor de las viscosidades aparentes, para un valor fijo de gradiente de velocidad (γ).

Mediante una aplicación informática se determinó la forma de la curva de flujo que fueron ajustados al modelo Herschel-Bulkley para plásticos reales, indicando la presencia de un esfuerzo de corte inicial (τ_0), como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros reológicos según el modelo Herschel-Bulkley para la pulpa cruda a diferentes porcentajes de sólidos y a temperatura ambiente ($s=1,4112$ y $NM=9,48$).

% Sólidos	$\tau = \tau_0 + K\gamma^n$			
	τ_0	K	n	R
37	4,75	12,42	0,63	0,9992
40	6,79	13,45	0,55	0,9980
43	8,37	14,41	0,52	0,9901
46	14,39	15,5	0,47	0,9989
48	17,59	16,61	0,40	0,9975

Los cambios en las constantes reológicas se produjeron tal y como se esperaba, pues los valores de esfuerzo de corte inicial y el índice de consistencia másico (K) aumentaron, mientras que los valores de índices de flujo (n) disminuyeron con el incremento de la concentración de fase sólida en la suspensión.

Pulpa precalentada

Se realizaron las mediciones reológicas de la muestra de pulpa precalentada tomadas en la descarga de la bomba de desplazamiento positivo (M4), a un porcentaje fijo; en este caso se escogió 40 % de sólidos por ser este el valor que se obtiene con más frecuencia en la pulpa precalentada bajo condiciones actuales de operación y a diferentes temperaturas (28 °C, 40 °C, 50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C y 90 °C), para analizar la influencia de la misma sobre los parámetros reológicos.

Al representar gráficamente la relación entre el esfuerzo cortante (τ) y el gradiente de velocidad (γ) se obtuvieron las curvas de flujo representadas en la Figura 2.

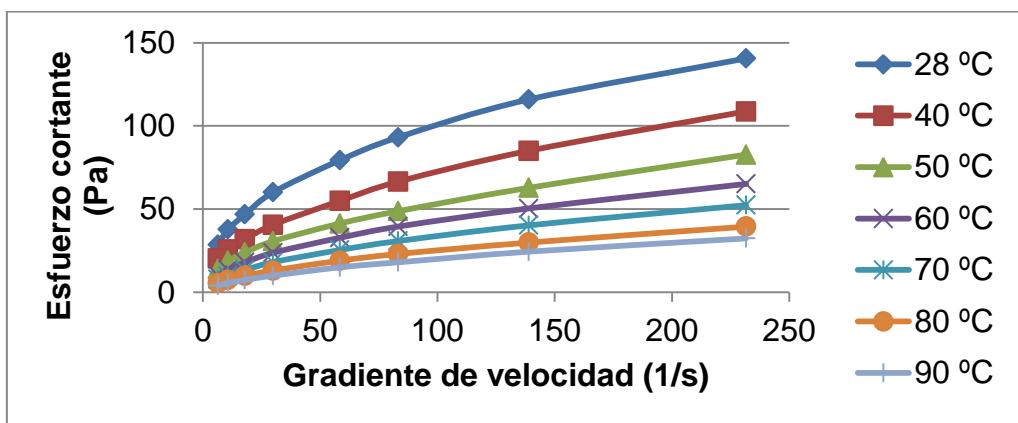


Figura 2. Curvas de flujo para la pulpa precalentada a 40 % de sólidos y diferentes temperaturas ($s=1,4806$ y $NM=9,65$).

Las curvas obtenidas también describen el comportamiento típico de las suspensiones no newtonianas, ajustándose al modelo de Herschel-Bulkley para plásticos reales. Se observa que a medida que aumenta la temperatura, el esfuerzo cortante disminuye, al igual que la viscosidad del fluido.

Se confirma entonces que a altas temperaturas los valores de las propiedades plásticas de la pulpa laterítica tienden a disminuir, presentando esta un comportamiento menos viscoso, de ahí que los problemas de alta viscosidad que en ocasiones se presentan con las pulpas lateríticas son mayores a temperatura ambiente (Pérez 2004; Pérez *et al.* 2008). Los valores de los esfuerzos cortantes e índice de consistencia másica K disminuyeron; los valores del índice de flujo aumentaron, evidenciándose que a medida que aumenta la temperatura, la viscosidad aparente de la pulpa disminuye, y este es el comportamiento típico esperado en la mayoría de los líquidos y suspensiones.

3.4. Modelos matemáticos para pronósticos de parámetros reológicos

Teniendo en cuenta las frecuentes dificultades operativas para determinar el valor de coeficiente de polidispersión y considerando la menor influencia que tiene esta variable con respecto a las otras que refieren el comportamiento reológico de la pulpa, se desarrollaron modelos mínimos cuadrados (Tabla 6), que permiten explicar los valores de Y_1 , Y_2 , Y_3 y Y_4 en función de las variables físicas X_2 , X_3 y X_4 .

Tabla 6. Modelos matemáticos obtenidos con tres variables

Variable Dependiente	Modelo	Coeficiente de Correlación	Prueba F de Fisher para el modelo con un 95 % de nivel de confianza (Se acepta si $F_c > F_t$)	
Y_1	$12,81985184 - 0,61835058 X_2 - 0,02540338 X_3 + 0,06344126 X_4 + 0,00816184 X_2^2 + 0,00010965 X_3^2 - 0,00388950 X_4^2$	0,93	Valor de $F_c = 161,6$ $F_t = 2,079$	Ajuste significativo
Y_2	$264,31464578 - 13,94651205 X_2 - 1,54794301 X_3 - 14,40698449 X_4 + 0,18761191 X_2^2 + 0,00887587 X_3^2 - 0,81306145 X_4^2$	0,79	Valor de $F_c = 37,86$ $F_t = 2,079$	Ajuste significativo
Y_3	$65,32704227 - 3,08445518 X_2 - 0,28195806 X_3 + 1,12151249 X_4 + 0,04140936 X_2^2 + 0,00147273 X_3^2 - 0,06121405 X_4^2$	0,88	Valor de $F_c = 82,22$ $F_t = 2,079$	Ajuste significativo
Y_4	$1,71509892 - 0,04041758 X_2 + 0,00152881 X_3 - 0,06625053 X_4 + 0,00048453 X_2^2 + 5,8284286 E^{-6} X_3^2 + 0,00334413 X_4^2$	0,83	Valor de $F_c = 49,60$ $F_t = 2,079$	Ajuste significativo

Dada la necesidad de obtener adecuados pronósticos de Y_1 para cualesquiera que sean los valores medidos de X_2 , X_3 , y X_4 en el proceso real de producción, se propone con estos fines el método denominado UPD (Legrá 2015; Legrá, Lamorú & Cala 2016), análogo al método de Funciones de Base Radial (Baxter 1992) y al de Kriging (Clark 2007).

Para esta modelación se tomaron los parámetros estándar del método: potencia de la distancia $p=1$, factor de suavización de la distancia $\delta=0$ y deriva ε como la media aritmética de la variable dependiente.

A continuación se muestran los resultados de este modelo; nótese que para estimar la variable dependiente, en cada sumando aparece la distancia euclíadiana $d_{ie} = \sqrt{(X_{i2} - X_2)^2 + (X_{i3} - X_3)^2 + (X_{i4} - X_4)^2 + \delta^2}$ entre la coordenada P_i = $(X_{i2}; X_{i3}; X_{i4})$ de un dato y la coordenada del punto por donde se va a estimar $P_e = (X_2; X_3; X_4)$:

$$\begin{aligned}
 Y_1 = & 0,02291d_{1P} + 0,00598d_{2P} + 0,00156d_{3P} - 0,01104d_{4P} - 3,27972E^5d_{5P} + \\
 & 0,003277d_{6P} + 0,004680d_{7P} - 0,009942d_{8P} - 0,010850d_{9P} - 0,001878d_{10P} + \\
 & 0,0157583d_{11P} - 0,001864745d_{12P} - 0,00558d_{13P} - 0,000370d_{14P} + \\
 & 0,0146953d_{15P} + 0,0464904d_{16P} + 0,0427403d_{17P} + 0,0309242d_{18P} + \\
 & 0,0306947d_{19P} + 0,0433756d_{20P} + 0,0224190d_{21P} + 0,1010392d_{22P} + \\
 & 0,0408189d_{23P} + 0,0361621d_{24P} - 0,0143033d_{25P} + 0,0113755d_{26P} - \\
 & 0,022953d_{27P} + 0,003928d_{28P} - 0,109138d_{29P} - 0,055350d_{30P} - 0,042753d_{31P} \\
 & + 0,0173862d_{32P} + 0,00036220d_{33P} + 0,0129535d_{34P} + 0,0112266d_{35P} - \\
 & 0,147509d_{36P} - 0,013894d_{37P} + 0,0994314d_{38P} + 0,1131460d_{39P} + \\
 & 0,1377183d_{40P} + 0,1252790d_{41P} + 0,1523298d_{42P} + 0,0529902d_{43P} + \\
 & 0,501153d_{44P} + 0,493034d_{45P} + 0,421942d_{46P} + 0,345063d_{47P} + \\
 & 0,340137d_{48P} + 0,277950d_{49P} - 0,28388d_{50P} - 0,05902d_{51P} - 0,06165d_{52P} - \\
 & 0,01044d_{53P} + 0,02950d_{54P} + 0,19371d_{55P} + 0,13971d_{56P} + 0,21732d_{57P} + \\
 & 0,20404d_{58P} + 0,32240d_{59P} + 0,29986d_{60P} + 0,27537d_{61P} + 0,31414d_{62P} + \\
 & 0,39228d_{63P} - 0,14098d_{64P} - 0,16935d_{65P} - 0,00838d_{66P} + 0,235621d_{67P} + \\
 & 0,270722d_{68P} + 0,118497d_{69P} + 0,175142d_{70P} + 0,134687d_{71P} + \\
 & 0,001575d_{72P} - 0,10611d_{73P} - 0,11170d_{74P} - 0,14496d_{75P} - 0,13518d_{76P} - \\
 & 0,15778d_{77P} - 0,05125d_{78P} - 0,47841d_{79P} - 0,47512d_{80P} - 0,40792d_{81P} - \\
 & 0,32918d_{82P} - 0,31875d_{83P} - 0,25990d_{84P} + 0,233632d_{85P} - 0,01020d_{86P} - \\
 & 0,00146d_{87P} - 0,03745d_{88P} - 0,06595d_{89P} - 0,22710d_{90P} - 0,16415d_{91P} - \\
 & 0,15925d_{92P} - 0,15466d_{93P} - 0,26406d_{94P} - 0,24687d_{95P} - 0,24254d_{96P} - \\
 & 0,27726d_{97P} - 0,38331d_{98P} + 0,054843d_{99P} + 0,111264d_{100P} - 0,02427d_{101P} - \\
 & 0,29567d_{102P} - 0,28800d_{103P} - 0,14374d_{104P} - 0,19318d_{105P} + 0,01414d_{106P} - \\
 & 0,00508d_{107P} - 0,01122d_{108P} - 0,02114d_{109P} - 0,00813d_{110P} + 0,003161d_{111P} - \\
 & 0,0041646d_{112P} - 0,03085d_{113P} - 0,05217d_{114P} - 0,03271d_{115P} - 0,02189d_{116P} \\
 & - 0,01566d_{117P} - 0,028932d_{118P} - 0,01887d_{119P} + 0,12856d_{120P} + \\
 & 0,10959d_{121P} + 0,07644d_{122P} + 0,06466d_{123P} + 0,03138d_{124P} + 0,03127d_{125P} \\
 & + 0,02385735d_{126P} + 0,02481d_{127P} + 0,05613d_{128P} + 0,04440d_{129P} + \\
 & 0,00398d_{130P} + 0,04442d_{131P} - 0,02815d_{132P} - 0,00116d_{133P} - 0,06832d_{134P} - \\
 & 0,06992d_{135P} - 0,09058d_{136P} - 0,02044d_{137P} - 0,08222d_{138P} + 0,001162d_{139P} - \\
 & 0,00495d_{140P} + 0,58325
 \end{aligned}$$

3.5. Análisis de los resultados

Tiene especial interés demostrar la sensibilidad de todo el procedimiento para la obtención de los modelos y para ello se comprobó, a partir de datos

medidos en la etapa experimental, que cambios pequeños en los datos de entrada producen cambios de igual escala en los pronósticos hechos.

La comprobación del modelo mínimo cuadrado y modelo UPD para el pronóstico de la viscosidad aparente (Y_1) se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados obtenidos por los modelos

Modelo Mínimo Cuadrado													
40 % de sólido				43 % de sólido				46 % de sólido					
Y_1	Y_1	Y_1	Y_1	Y_1	Y_1	Y_1	Y_1	Y_1	Y_1	Y_1	Y_1	Y_1	Y_1
28 °C	50 °C	80 °C	90 °C	28 °C	50 °C	80 °C	90 °C	28 °C	50 °C	80 °C	90 °C		
0,65	0,32	-0,01	-0,09	0,74	0,57	0,23	0,15	1,15	0,65	0,49	0,40		

Modelo Mínimo UPD													
Y_1	Y_1	Y_1	Y_1	Y_1	Y_1	Y_1	Y_1	Y_1	Y_1	Y_1	Y_1	Y_1	Y_1
28 °C	50 °C	80 °C	90 °C	28 °C	50 °C	80 °C	90 °C	28 °C	50 °C	80 °C	90 °C		
0,65	0,36	0,177	0,08	0,94	0,56	0,27	0,176	1,33	0,75	0,47	0,36		

Los modelos de mínimos cuadrados presentan inconsistencias predictivas cuando los valores de las variables independientes se alejan suficientemente de los rangos de los datos y, en algunos casos, se obtienen valores inadecuados; para altas temperaturas los valores de viscosidad aparente son negativos.

En la Figura 3 se muestran isofranjas 3D de los dos modelos que evidencia la capacidad de pronósticos de los modelos UPD.

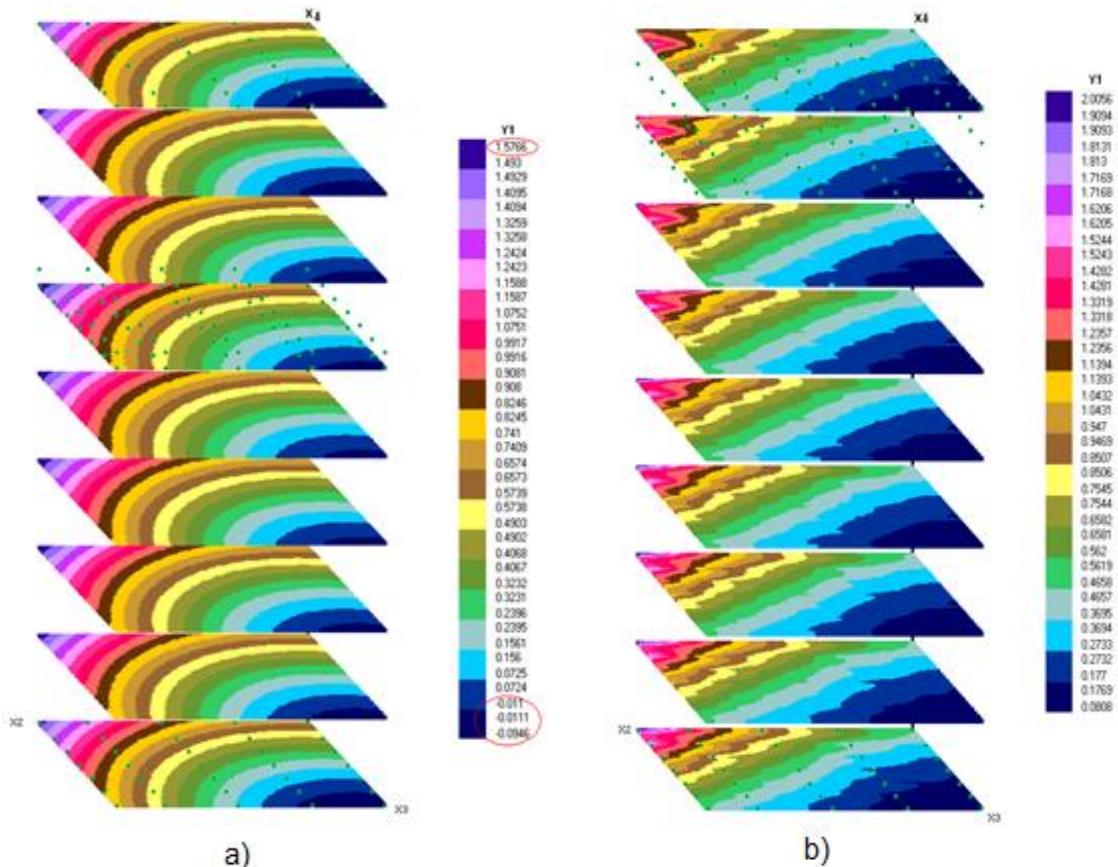


Figura 3. Isofranjas 3D de los modelos de mínimos cuadrados (a) y modelos UPD (b).

4. CONCLUSIONES

- De acuerdo con los resultados de los experimentos reológicos la pulpa laterítica cruda y precalentada presenta propiedades plásticas, ajustándose a un modelo de Herschel-Bulkley para plásticos reales.
- Los modelos matemáticos desarrollados permiten modelar y calcular los parámetros reológicos: viscosidad aparente, esfuerzo cortante inicial, índice de consistencia e índice de flujo.
- Se demuestra la capacidad de pronósticos de los modelos UPD para variables reales del proceso productivo.

5. REFERENCIAS

- AVRAMIDIS, S. & TURIAN, R. M. 1991: Yield Stress of Laterite Suspensions. *Journal of Colloid and Interface Science* 143(1): 54.
- BAXTER, B. 1992: *The Interpolation Theory of Radial Basis Functions*. Tesis doctoral. University of Cambridge.

- BEKKOUR, K. M.; LEYAMA, A. & BENCHABANE, O. 2005: Time-dependent rheological behavior of bentonite suspensions: An experimental study. *Journal of Rheology* 49(6): 1329-1345.
- BHATTACHARYA, I. N. & PANDA, P. 1998: Rheological behaviour of nickel laterite suspensions. *International journal of mineral processing* 53(4): 251-263.
- BLAKEY, B. C. 2003: Characterizing the rheology of laterite slurries. *International journal of mineral processing* 70(1): 23-39.
- BRICEÑO, M.; SALAGER, J. & BERTRAND, J. 2001: Influence of the dispersed phase viscosity on the mixing of concentrated oil-in-water emulsions in the transition flow regime. In: International Symposium on Mixing in Industrial Processes – ISMIP4. Toulouse, Francia.
- BRICEÑO, M. I.; RAMIREZ, M.; BULLÓN, J. & SALAGER, J. 1997: Customizing Drop Size Distribution to Change Emulsion Viscosity. In: 2nd World Congress on Emulsion CME2. Francia.
- CARAM, Y.; BAUTISTA, F.; PUIG, J. E. & MANERO, O. 2006: On the rheological modeling of associative polymers. *Rheologica acta* 46(1): 45-57.
- CERPA, A. & GARCELL, L. 1998: Propiedades superficiales y reológicas de suspensiones minerales lateríticas. In: Metalurgia 98. La Habana.
- CLARK, I. Y. H. W. 2007. *Practical geostatistics*. Ecosse North America Llc., Kinkos, Westerville, Ohio USA.
- GARCELL, L. 2001: Flujo por tuberías de suspensiones minerales no newtonianas. Monografía. Universidad de Oriente.
- GARCELL, L.; DÍAZ, L. & SURÍS, G. 1988: *Transferencia de cantidad de movimiento, calor y masa*. Pueblo y Educación, La Habana.
- GARCELL, L.; MORALES, M. P.; ANDRES-VERGES, M.; TARTAJ, P. & SERNA, C. J. 1998: Interfacial and Rheological Characteristics of Maghemite Aqueous Suspensions. *Journal of Colloid and Interface Science* 205(2): 470-475.
- GOMES, M. & MARCHESE, T. 2013: Ajuste de Modelos Reológicos Mecânicos no Creep de Polipropileno, Poliestireno e Policarbonato: Comparação com o MEF. *Revista Iberoamericana de Polímero* 14(2): 65-82.
- HERNÁNDEZ, G.; PÉREZ, L. & RODRÍGUEZ, K. 2016: Influencia de los parámetros reológicos de la pulpa de mineral laterítico en la eficiencia del sistema de bombeo de hidromezclas. In: 3er Congreso Internacional de Minería y Metalurgia. Matanzas, Cuba.
- HERNÁNDEZ, G.; ROSA, Y. & DURÁN, C. 2015: Influencia de la temperatura del fluido en la eficiencia energética de los sistemas de bombeos. In: CINAREM 2015, ISMMM. Moa, Holguín.

- İŞÇİ, S. F.; SENIHA, Ö. & GÜNGÖR, N. 2005: Investigation of rheological and colloidal properties of bentonitic clay dispersion in the presence of a cationic surfactant. *Progress in Organic Coatings* 54(1): 28-33.
- IZQUIERDO, R.; TURRO, A. & NIKOLAEV, A. 2001: Hidrotransporte del mineral laterítico en régimen estructural. *Minería & Geología* 18(2): 53-59.
- KLEIN, A. & HALLBOM, D. 2002: Modifying the rheology of nickel laterite suspensions. *Minerals Engineering* 15(10): 745-749.
- LARSON, R. G. 1999: The Structure and Rheology of Complex Fluids. (Vol. 150). Oxford University Press, New York.
- LEGRÁ, A. A. 2015: Método UPD-L para estimar valores de una variable geominera medidos en un conjunto de puntos de Rn. *Minería & Geología* 31(1): 1-12.
- LEGRÁ, A. A.; LAMORÚ, A. & CALA, H. A. 2016: Evaluación de modelos de variables geo-tecnológicas en un bloque de un yacimiento laterítico cubano: Quinta parte: Optimización combinatoria del Método UPD. *Minería & Geología* 32(4): 33-48.
- LI, Z.; WANG, J.; PÉREZ-CAMARGO, R.; MÜLLER, A. J.; ZHANG, B.; GRAYSON, S. M. & Hu, W. 2016: Non-monotonic molecular weight dependence of crystallization rates of linear and cyclic poly(epsilon-caprolactone)s in a wide temperature range. *Polymer International* 65(9): 1074-1079.
- MCGUIRE, M. J.; ADDAI-MENSAH, J. & BREMMELL, K. 2006: The effect of polymer structure type, pH and shear on the interfacial chemistry, rheology and dewaterability of model iron oxide dispersions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 275(1): 153-160.
- MEWIS, J.; FRITH, W.; STRIVENS, T. & RUSSEL, W. 1989: The Rheology of Suspensions Containing Polymerically Stabilized Particles. *AIChE Journal* 35(3): 415-422.
- OHTAKE, T.; HANO, K. & TAKAGI, F. 1987: Effects of viscosity on drop diameter of w/o emulsion dispersed in a stirred tank. *Journal of Chemical Engineering of Japan* 20(5): 443-447.
- PAL, R. & MASLIYAH, J. 1990: Rheology of oil in water emulsions with added solids. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 68(1): 24-28.
- PÉREZ, L. 2004: *Efecto de la temperatura y de la distribución de tamaño de las partículas sobre la correlación entre las propiedades reológicas y coloidequímicas de las suspensiones lateríticas*. Tesis de maestría. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba.
- PÉREZ, L. & GARCELL, L. 2006: Influencia de la distribución de tamaño de las partículas y de la temperatura sobre la reología de suspensiones lateríticas. *Tecnología Química* XXVI(1).

- PÉREZ, G. L. 2010a: *Modelo matemático que correlaciona los principales factores de influencia sobre el comportamiento reológico de las pulpas lateríticas*. Tesis doctoral. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba.
- PÉREZ, L.; GARCELL, L.; ROJAS, A. & SIMOES, R. 2010b: Mineralogía y reología de suspensiones minerales del proceso de lixiviación ácida a presión en Moa. *Minería & Geología* 26(4): 16-35.
- RODRÍGUEZ, T. H.; ANGULO, H. J. & FALCÓN, J. 2015: Comportamiento reológico de las emulsiones empleando productos de la pirolisis. *Tecnología Química* XXXV(3): 412-423.
- VERNÁEZ, O.; GARCÍA, A.; CASTILLO, F.; VENTRESCA, M. L. & MÜLLER, A. J. 2016: Oil-based self-degradable gels as diverting agents for oil well operations. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 146: 874-882.

Gabriel Hernández-Ramírez, ghdezs@ismm.edu.cu
Ing. Eléctrico. Máster en Electromecánica. Profesor Auxiliar
Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Cuba.

Arístides A Legrá-Lobaina, alegra@ismm.edu.cu
Lic. Matemática. Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Auxiliar.
Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Cuba.

Beatriz Ramírez-Serrano, bramirez@ismm.edu.cu
Ing. Metalurgia. Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Auxiliar.
Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Cuba.

Liudmila Pérez-García, lgarcia@moanickel.com.cu
Ing. Química. Doctora en Ciencias Técnicas. Profesora Auxiliar.
Pedro Sotto Alba Moa Níquel SA. Moa, Cuba.

Modelo matemático de fragmentación para la trituración por impacto de las zeolitas de San Andrés, Holguín (Cuba)

José Ramón Echevarría-Hernández
Alfredo Lázaro Coello-Velázquez
Juan María Menéndez-Aguado

Resumen

La modelación matemática con ayuda de los métodos de balance de población de partículas resulta imprescindible cuando se trata de la evaluación de los procesos y eventos de fracturas que tienen lugar en la trituración por impacto. Con el propósito de valorar la influencia de la energía de fragmentación y la razón de alimentación a la trituradora en las funciones de clasificación y de distribución de la fragmentación se propone un modelo basado en la combinación en serie de los modelos estructurales de Reid (1965) y Whiten (1972) modificado, que incluyen las expresiones de Vogel y Peukert (2003) y Austin y Luckie (1972). La validación del modelo combinado se realizó utilizando las técnicas estadísticas de Chi-cuadrado y los gráficos cero errores. Los resultados del trabajo demuestran que el modelo propuesto simula con adecuada precisión la fragmentación en la trituración por impacto. La función de probabilidad de fragmentación de la roca zeolítica depende de las condiciones de operación cuya sensibilidad se ve afectada por la energía de impacto. La función de distribución del tamaño no depende de las condiciones de operación. La distribución de tamaño del producto se ve severamente afectada por la energía de impacto, siguiendo las mismas regularidades de la función de clasificación.

Palabras clave: funciones de fractura; modelación matemática; métodos de balance de población de partículas; trituración por impacto; zeolitas.

Mathematical model of fragmentation for the impact crushing of the zeolites of San Andrés, Holguín (Cuba)

Abstract

Mathematical modeling based on particles population balance method is a useful tool for impact crushing valuation. With the objective to evaluate the impact energy and feed rate influence on classification and fragmentation distribution functions, is proposed a mathematical model based on serial combination of Reid (1965) and Whiten (1972) structural models, that include Vogel and Peukert (2003), and Austin and Luckie (1972) mathematical expressions. Model validation was done using Chi-square statistical technique and zero-error graphic. The results show that proposed model simulate with adequate accuracy the impact crushing fragmentation process. The probability function of zeolite rock from San Andrés ore depend on the operation conditions which sensibility was affected by impact energy. Fragmentation distribution function do not depend on the energy impact variation, while particle size distribution was affected by impact energy varying according to classification function tendency

Keywords: fracture functions; mathematical modeling; particle population balance methods; impact crushing; zeolites.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad las trituradoras de impacto son ampliamente utilizadas en las operaciones de conminución gracias a su alto grado de reducción, la flexibilidad granulométrica de los productos y su diseño sencillo (Nikolov 2002).

Es comúnmente reconocido el empleo de la modelación y simulación en la predicción del comportamiento de las plantas de procesamiento de minerales con fines de ahorro energético, reducción de los costos generales y el análisis y optimización de los circuitos de trituración y molienda (King 2012; Coello *et al.* 2011).

La práctica de la modelación por los métodos basados en el balance de población de partículas cuenta con varios modelos que describen el proceso de fragmentación de minerales con una adecuada precisión y exactitud. Los más extendidos son el modelo de Reid (1965) y el de Whiten (1972). El primero considera la fragmentación de partículas como un acto simple de fragmentación; mientras que el segundo supone que las partículas de material dentro de la trituradora pueden someterse a más de un ciclo de fragmentación o pasar a través del proceso sin romperse (Leyva-Mormul *et al.* 2015). El modelo de fragmentación simple de Reid (1965) aparece en la ecuación (1):

$$p_i = (1 - C_i) f_i + \sum_{j=1}^{i-1} b_{i,j} C_j \cdot f_j \quad (1)$$

La ecuación (2) representa el modelo de fragmentación de Whiten (1972):

$$p = ((I - C) \cdot (I - BC)^{-1}) f \quad (2)$$

Particularmente para la trituración de impacto existen algunos reportes a considerar en su estudio (Nikolov 2002, 2004; Shi *et al.* 2003; Vogel & Peukert 2005).

El modelo de Nikolov (2002, 2004) toma como punto de partida el modelo estructural de Whiten (1972) e incluye, en lugar de la ecuación de la función de clasificación, la distribución de Weibull acumulativa. La naturaleza de la trituración por impacto permite obtener un producto de un rango de tamaño más amplio que las trituradoras de cono y de mandíbulas.

Intentando resolver las limitaciones de la expresión de la función de clasificación propuesta por Attou (1999), Nikolov y Lucio (2002) para la modelación de la trituración por impacto, utilizaron la siguiente ecuación, asumida por Nikolov (2002) en su modelo:

$$C_i(d_i) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{d_i - d_{min}}{d_{min}} \right) \right] \quad (3)$$

A juzgar por las características de los parámetros de la función de clasificación de Nikolov y Lucio (2002), al estar basado en la distribución de Weibull, potencialmente puede cubrir con mayor precisión el rango de tamaño producido en la trituración por impacto.

Por su parte, Vogel y Peukert (2003) proponen un modelo de fragmentación que, siendo matemáticamente más sencillo que el modelo de Shi y demás investigadores (2003), representa la fragmentación múltiple como un resultado de la repetición en n ciclos del modelo de fragmentación simple de Reid (1965). Esto supone que todas las partículas minerales tienen las mismas oportunidades de fragmentación, algo verdaderamente poco probable. Es archiconocida la dependencia de la probabilidad de fragmentación del tamaño de las partículas minerales.

A diferencia de la expresión usada por Nikolov para la función de clasificación Vogel y Peukert (2003) emplean una ecuación que considera no solo el tamaño de las partículas minerales (x_j), sino la resistencia a la fragmentación del mineral (coeficiente f_{mat}) y la energía cinética de impacto para la fragmentación ($E - E_{min}$). E – es la energía cinética del rotor del triturador y E_{min} – es el límite de la energía cinética por debajo del cual no ocurre la fragmentación de la partícula mineral con tamaño (x_j). En este sentido, la ecuación presentada por Vogel y Peukert (2003) articula las variables operacionales con la función de clasificación.

Las trituradoras de impacto se diferencian substancialmente del resto. En el caso específico de las trituradoras de cono y de mandíbulas, el proceso de la fragmentación es relativamente lento. Sin embargo, en la trituración por impacto, el proceso de fragmentación ocurre particularmente rápido, provocando que la formación y propagación de las fisuras magistrales, a partir de los defectos naturales de las partículas minerales, sea extremadamente dinámica, propia de la fractura por estadillo.

Esta dinámica se expresa en las trituradoras de impacto por su elemento distintivo: el rotor. Este elemento mecánico es responsable de la fragmentación por impacto de las partículas minerales. En los trituradores de eje vertical (*vertical axis crusher*), las partículas son alimentadas al rotor horizontal (*horizontal turning table*) con guías radiales y así son proyectadas por las fuerzas centrífugas contra las paredes del triturador.

En el caso de los trituradores de martillo, la fragmentación ocurre en la periferia del rotor y las paredes de las trituradoras por la interacción martillo-partícula. Es importante señalar que el tamaño del rotor es

incomparablemente mayor que las partículas minerales. Esto hace que la energía cinética asociada al rotor sea mucho más importante que la propia velocidad de las partículas minerales en su proyección hacia las paredes del triturador. Esta energía cinética del rotor fue considerada por Attou (1999) y Nikolov (2002) como la energía de impacto por unidad de masa.

Otro elemento que distingue a estas trituradoras es la posibilidad de regulación del tamaño del producto triturado. Según los reportes de Shi *et al* (2003) y de Vogel y Peukert (2005), la influencia de esta variable en la trituración por impacto resulta de notable significación.

Considerando estas particularidades de la trituración por impacto, el objetivo de presente artículo es, mediante la combinación en serie de los modelos de Reid (1965) y Whiten (1972), exponer la influencia en las funciones de clasificación y de distribución de la fragmentación de la energía de impacto y productividad de la alimentación.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Descripción del modelo

Como punto de partida para la modelación de la trituración por impacto de las zeolitas de San Andrés, Holguín (Cuba) se ha tomado un modelo que combina la fragmentación en serie de los modelos estructurales de fragmentación de Reid (1965) y de Whiten (1972) modificado. Este modelo aparece representado en la ecuación 4.

$$p = \left[(I - C_1) \cdot (I - B \cdot C_1)^{-1} \right] \cdot [(I - C_1)f + BC_1 \cdot f] \quad (4)$$

En la ecuación (1) el parámetro f (matriz de alimentación) es substituida por p en el modelo de fragmentación de Reid (1965).

$I =$ es la matriz de identidad.

$C_1 =$ función de clasificación en el modelo de fragmentación de Reid, u .

$B =$ función de distribución de la fragmentación, u .

2.2. Parámetros del modelo

2.2.1. Función de distribución de la fragmentación

Según Kelly & Spottiswood (1982) existen dos esquemas conceptuales sobre la función de distribución de la fragmentación: uno considera que esta función es independiente de tamaño inicial; la otra requiere de la determinación de dicha función para cada clase inicial. Ambos conceptos son empleados ampliamente en la modelación de los procesos de reducción con la debida precisión (Leyva-Mormul *et al.* 2015). La ecuación de Austin y

Luckie (1972) usualmente es considerada como la más adecuada a la trituración por impacto (Nikolov 2004; Coello *et al.* 2011).

$$B_{(i,j)} = \Phi \left(\frac{x_i}{x_j} \right)^m + (1 - \Phi) \left(\frac{x_i}{x_j} \right)^l \quad \text{si } i < j \\ B_{(i,j)} = 0 \quad \text{para } i > j \quad (5)$$

Donde:

$B_{(i,j)}$ = Fracción de masa de tamaño i obtenida de la fragmentación de las partículas de tamaño j;

Φ : Fracción de masa de partículas finas, unidades;

x_i : es el tamaño de las partículas del intervalo i producto de la fragmentación de las partículas j, mm;

x_j : Tamaño promedio de las partículas originales en el intervalo de tamaño j, mm;

α y β : son coeficientes adimensionales que caracterizan la forma de la distribución de las fracciones finas y gruesas del material;

2.2.2. Función de clasificación

Los modelos empleados por Nikolov (2002) y por Vogel y Peukert (2003) fueron evaluados por Coello y demás investigadores (2011) mediante el ajuste a los datos experimentales de Datta (1999). En este sentido, el ajuste del modelo de la función de clasificación de Nikolov y Lucio (2002) no fue el esperado. Considerando estas razones y las oportunidades que brinda la función de clasificación de Vogel y Peukert (2003) condujeron a la selección.

La expresión de Vogel y Peukert (2003) se expone en la ecuación 6.

$$C_j = 1 - \exp\{-[x_j f_{mat}(E - E_{min})]\} \quad (6)$$

2.3. Experimentos

La roca zeolítica en calidad de monoclasa, de tamaño de 4-6 mm, fue alimentada a una trituradora de martillos de laboratorio con un rotor de 0,1 m de velocidad variable de 1 500 rpm, 2 750 rpm y 3 100 rpm desde una tolva de 0,1 m³. El rotor dispone de cuatro filas de martillos de tipo estribo.

La energía cinética de impacto fue calculada por la fórmula de Attou (1999) que aparece en la ecuación (7).

$$E = 0,5 \cdot (R + 0,5H_b)^2 \cdot \omega^2 \quad (7)$$

Donde:

E: energía de impacto, J/kg;

R: radio del rotor (m);

H_b : altura de la superficie de impacto de los martillos (m);

ω : velocidad angular (1/s).

Se realizaron dos series de ensayos. En la primera se simula la fragmentación simple por el modelo de Reid (1965) y la segunda simula la fragmentación múltiple por el modelo de Whiten.

En la primera serie se variaron dos parámetros en la trituradora: la velocidad del rotor en los tres niveles posibles que corresponden a los valores de E de 100 J/kg, 275 J/kg y 450 J/kg y la capacidad de alimentación en 0,6 t/h; 1,3 t/h y 2,3 t/h.

La función de clasificación se determinó según Vogel y Peukert (2003), que simula la fragmentación simple usando la trituradora sin rejilla de control. Considerando que el producto alimentado es una monoclasa la función de clasificación se determinó de forma experimental por la fórmula 8.

$$C_j = \frac{M_j}{M} \quad (8)$$

Donde:

C_j : Función de clasificación experimental, u;

M_j : Masa del producto de la trituradora cernido, g;

M : Masa total del producto, g.

A partir de los valores de C_j , obtenidos experimentalmente, se obtuvieron los parámetros del modelo de Vogel y Peukert (2003): $x_j \cdot E_{\min}$ y f_{mat} .

Considerando que el producto alimentado es una monoclasa, entonces, $f_j = 1$ y $f_i = 0$; por ende, la función de distribución de la fragmentación puede ser determinada por la fórmula 9:

$$p_i = b_{i,j} C_j \quad (9)$$

Los intervalos i y j se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Intervalos de tamaño i y j

i	1	2	3	4	5	6	7	
j	1	2	3	4	5	6	7	
Tamaño (mm)	9	6	4	3	2	1	0,5	0

En la segunda serie las partículas del producto (p_i) obtenido por fragmentación simple son alimentadas a la fragmentación múltiple descritas por el modelo de Whiten (1972) para ocho combinaciones diferentes de valores de: energía cinética (E), flujo de alimentación (Q) y regulación de salida del producto (S). Los valores de las variables fueron: $Q = 0,3$ y $2,3$ t/h; $E = 100$ y 450 J/kg para dos tamaños de abertura de la rejilla de control del triturador ($d = 3$ mm y 6 mm).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Considerando las regularidades presentadas de la Figura 1, la probabilidad de fragmentación de las partículas minerales depende de las condiciones de operación.

Con el incremento de la productividad esta función se inclina ligeramente hacia su disminución. El efecto de la energía de impacto se muestra mucho mayor que la productividad de alimentación. Así lo confirma el tratamiento de los resultados experimentales con el software StatGraphics 5.1 (Tabla 2). Regularidades similares son reportadas por Coello y demás investigadores (2011). Nikolov (2004) cita que el incremento de la productividad del triturador incide en la disminución de la probabilidad de fragmentación.

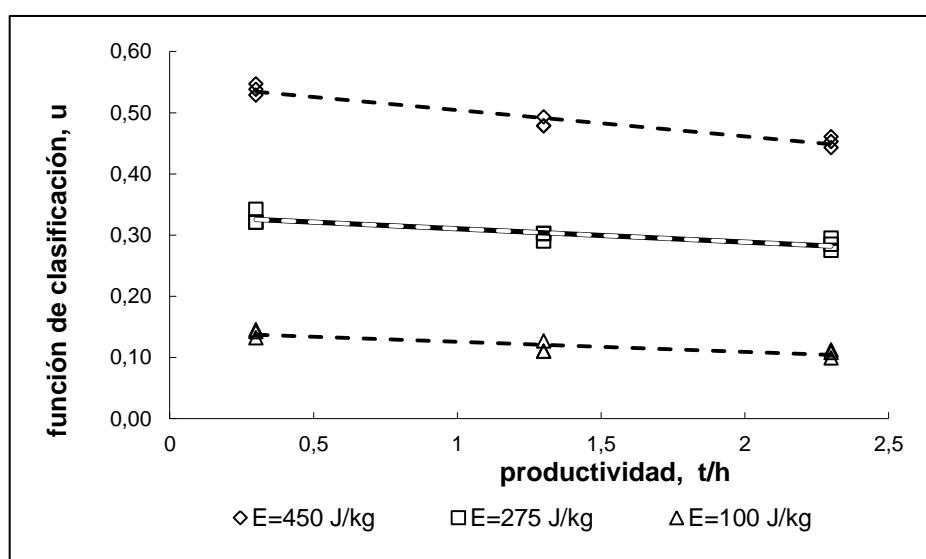


Figura 1. Dependencia de la función de clasificación de la productividad de alimentación y la energía de impacto de la trituradora.

A juzgar por la Figura 2, la influencia de la variación de la energía de impacto del rotor de la trituradora sobre la función de distribución de la fragmentación es poco definida, aunque existen diferencias notables en los niveles de la energía de impacto.

Tabla 2. Análisis de varianza del comportamiento de la razón de fragmentación

Fuente	Fisher-Ratio	Valor de la probabilidad
A: productividad de alimentación	10,11	0,0049
B: Energía de impacto	2338,49	0,0000
AA	4,24	0,0534
AB	0,97	0,3359
BB	1,09	0,3100
Bloques	1,77	0,1976

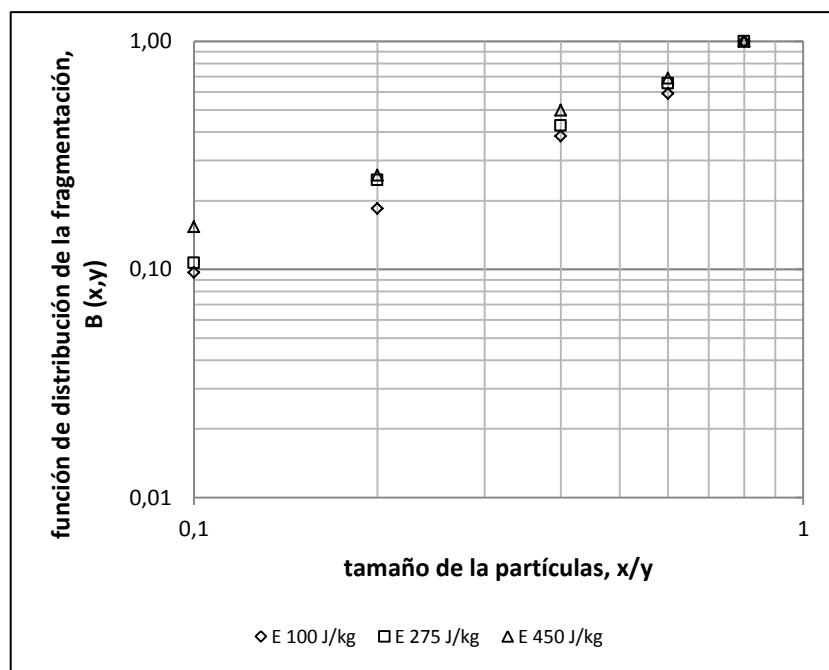


Figura 2. Influencia de la energía de impacto sobre la función de distribución de la fragmentación.

Considerando los valores de los parámetros de la función de Vogel y Peukert (2003), obtenidos para la roca zeolítica de San Andrés (Holguín, Cuba) ($x_j \cdot E_{min} = 0,1 \text{ J m/kg}$ y $f_{mat} = 0,302 \text{ kg /Jm}$), fueron simuladas las funciones de clasificación y de distribución de la fragmentación (Figuras 3 y 4).

La probabilidad de fragmentación de la partícula mineral está sujeta a la variación de la energía de impacto del rotor de la trituradora. En este sentido, un incremento de esta última conlleva al incremento notable de los valores de la función de clasificación.

No es posible demostrar que la variación de la energía de impacto del rotor de la trituradora provoque una variación apreciable de la función de distribución de la fragmentación. En el concepto original de esta función (Epstein 1948) no se debe a las condiciones operacionales, sin embargo, en los equipos reales la re-fragmentación de la progenie es algo verdaderamente probable. Kelly & Spottiswood (1990) enfatizan que el concepto de fragmentación simple deja de ser válido en condiciones de fragmentación donde la intensidad de la energía sea alta. Los valores del coeficiente m (0,6-0,9) hablan sobre la prevalencia de la fractura por estallido frente al clivaje.

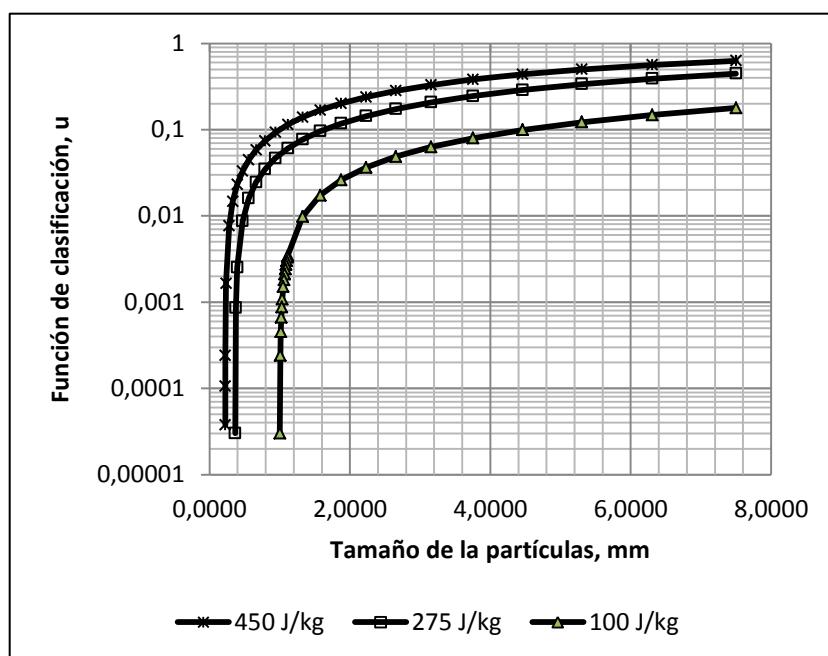


Figura 3. Influencia de la energía de impacto en la función de clasificación.

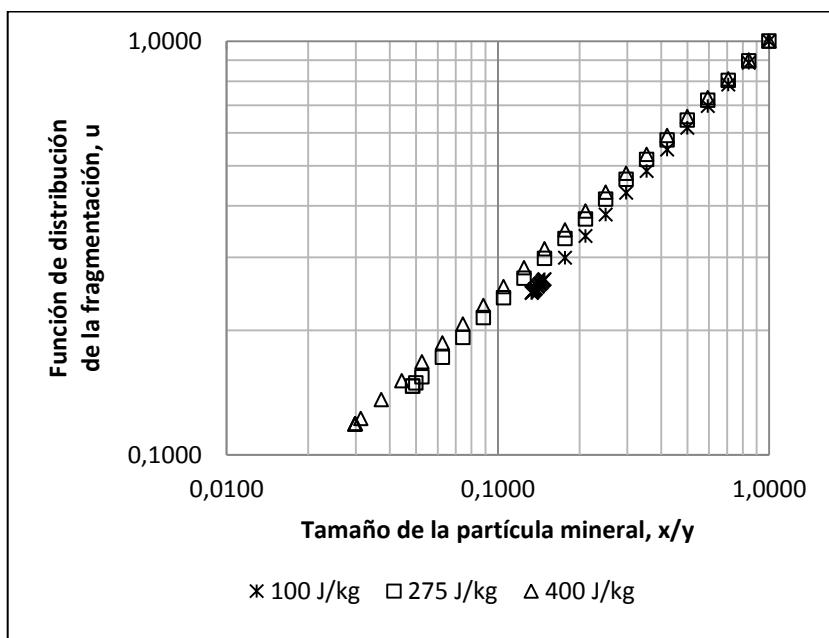


Figura 4. Influencia de la energía de impacto en la función de distribución de la fragmentación.

En la Figura 5 aparecen los resultados experimentales para la segunda serie de experimentos de la fragmentación múltiple. A juzgar por los resultados, se conserva la misma regularidad de la curva del pasante acumulativo para las diferentes condiciones de operación, correspondiendo a la energía de impacto un efecto positivo sobre la fineza del producto triturado; mientras que el tamaño de la rejilla impone un efecto similar, o sea, en tanto mayor es el tamaño de la rejilla, más grueso es el producto de la trituración.

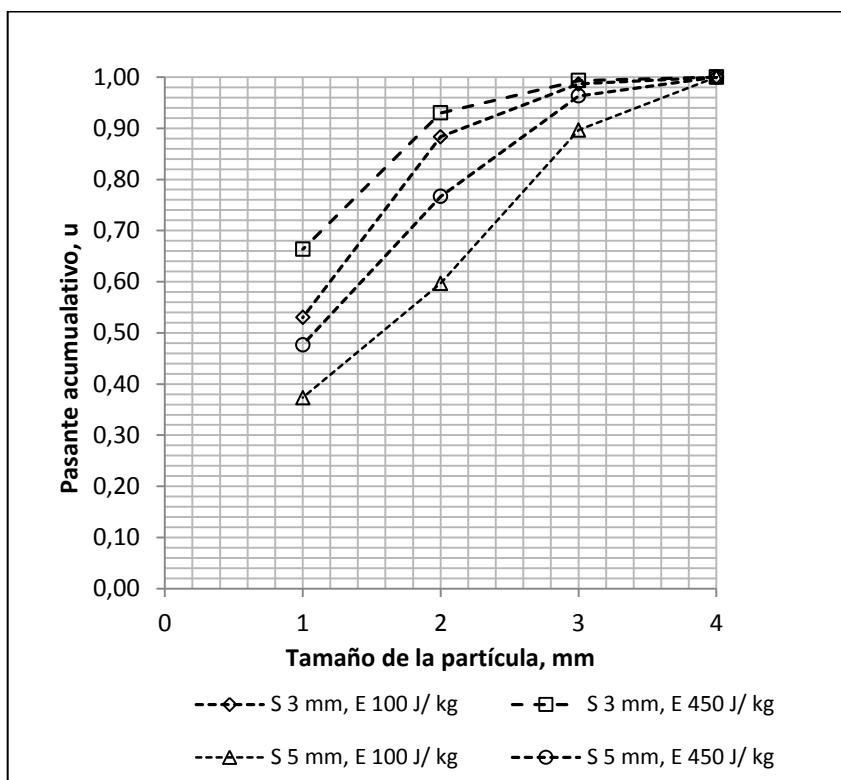


Figura 5. Resultados experimentales de la serie de fragmentación múltiple.

Los valores de la función de clasificación muestran una dependencia de las condiciones de operación similar a la regularidad observada del pasante acumulativo. Los valores simulados del pasante acumulativo del producto triturado (p_i), usando el modelo de la ecuación 4, aparecen en la Figura 7. A juzgar por estos resultados, la forma de la distribución de tamaño de ambos productos es bastante similar, siendo consecuentes las variaciones en dependencia de la energía de impacto.

La reproducibilidad del modelo propuesto se pone de manifiesto en el valor del error de estimación (0,02 %) y los resultados de la prueba de Chi-cuadrado, cuyo valor calculado (0,0045) es mucho menor que su valor crítico para 95 % de probabilidad. El gráfico cero errores (Figura 8) confirma esta valoración.

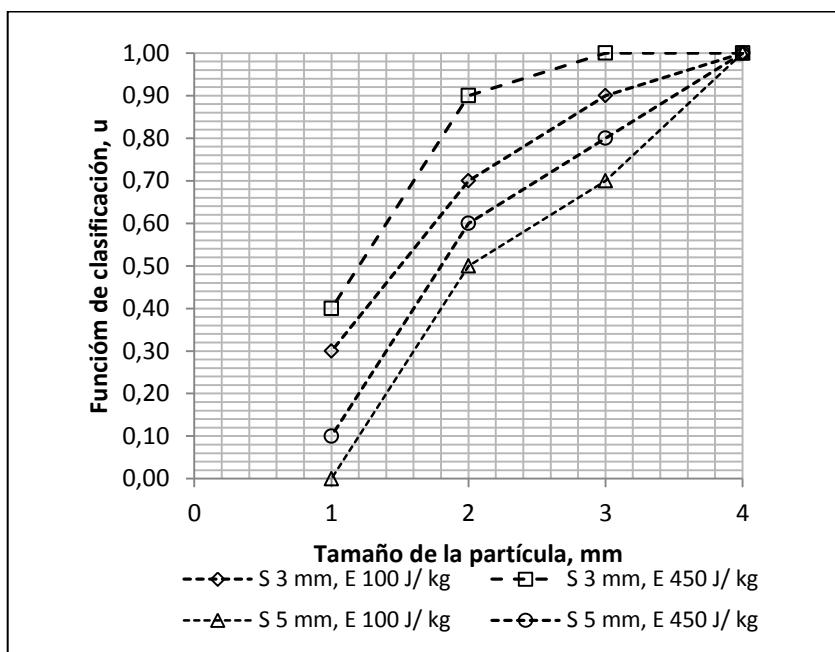


Figura 6. Función de clasificación para la serie de experimentos de la fragmentación múltiple.

Finalmente, los resultados confirman la hipótesis de que, en el triturador de martillo, las partículas minerales, probablemente, en un primer momento reciban el impacto con los martillos que debe producir una primera fragmentación. Luego del primer impacto son lanzadas a cierta velocidad contra las paredes revestidas de la carcasa donde debe recibir una segunda fragmentación que puede convertirse en múltiples fragmentaciones.

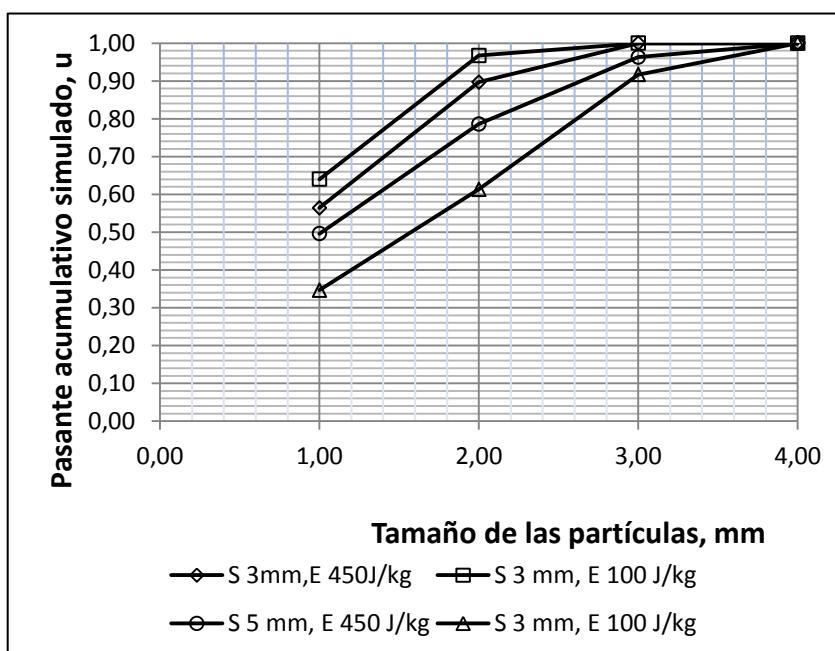


Figura 7. Valores del producto triturado simulados para la serie de fragmentación múltiple.

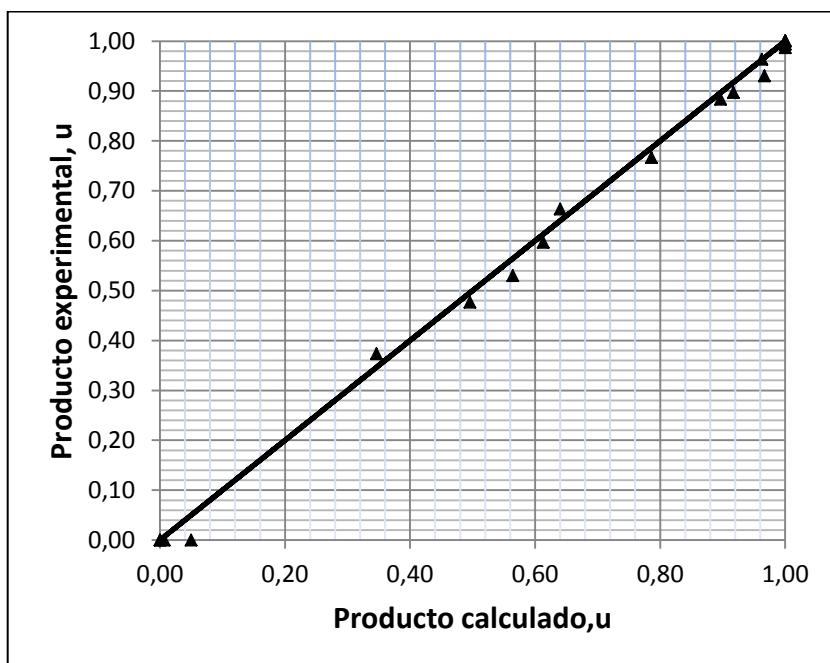


Figura 8. Gráfico cero errores para los productos simulado por el modelo y el experimental.

4. CONCLUSIONES

- Se demuestra que la combinación en serie de los modelos de Whiten (1972) y Reid (1965) simula con adecuada precisión la trituración por impacto de la roca zeolítica de San Andrés en diferentes condiciones de operación, variando la productividad y la energía de impacto de la trituradora.
- La probabilidad de fragmentación de la roca zeolítica depende de las condiciones de operación; su sensibilidad a estos cambios se expresa por una alta dependencia de la energía de impacto. En tanto, la función de distribución de la fragmentación para esta roca se mantiene prácticamente inalterable al variar las condiciones de operación del triturador. Se evidencia que la variación de la granulometría del producto triturado opera según las regularidades de la función de clasificación.

5. REFERENCIAS

- ATTOU, A.; CLEPKENS, O. & GUSTIN, R. 1999: Modélisation de la fragmentation de matière solide dans un concasseur à chocs à axe horizontal. *CTP Report TP 909*: 19-28.
- COELLO-VELÁZQUEZ, A. L.; MENÉNDEZ-AGUADO, J. M.; HECHAVARRÍA-PÉREZ, J. R.; SÁNCHEZ, A. B. & ÁLVAREZ, B. 2011: Toward the determining eh behavior of de fragmentation functions during the impact crushing of minerals. *Mineral and metallurgical processing* 28(2): 82-86.

- EPSTEIN, B. 1948: The mathematical description of certain breakage mechanisms leading to the logarithmic-normal distribution. *Journal of the Franklin Institute* 244(6): 471-477.
- HECHAVARRÍA, J. R. 2011: *Modelación de la trituración por impacto en la planta de zeolita de San Andrés*. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero-Metalúrgico de Moa. Cuba.
- KELLY, E. G. & SPOTTISWOOD, D. J. 1990: The breakage function, what is it really? *Minerals Engineering* 3(5): 405-414.
- KING, R. P. 2012: *Modelling and simulation of mineral processing Systems*. 2 ed. Schneider, C. L. & King, E. A. (editors). Elsevier, 403 p.
- LEYVA-MORMUL, A.; COELLO-VELÁZQUEZ, A. L.; HECHAVARRÍA-PÉREZ, J. R.; MENÉNDEZ-AGUADO, J. M.; LEYVA-GONZÁLEZ, O. S. & LEYVA-RAMÍREZ, E. 2015: Modelo de Whiten (1972) modificado para modelación de la trituración de la antracita residual de Nicaro. *Minería y Geología* 31(1): 13-28.
- NIKOLOV, S. 2002: A performance model for impact crusher. *Minerals Engineering* 15(10): 715-721.
- NIKOLOV, S. 2004: Modelling and simulation of particle breakage in impact crushers. *International Journal of Mineral Processing* 74: 219-225.
- REID, K. J. 1965: A solution to the batch grinding equation. *Chemical Engineering Science* 20(11): 953-963.
- SHI, F.; KOJOVIC, T.; ESTERLE, J. S. & DAVID, D. 2003: An energy-based model for swing hammer mills. *International Journal of Mineral Processing* 71(1): 147-166.
- VOGEL, L. & PEUKERT, W. 2005: From single particle impact behaviour to modelling of impact mills. *Chemical Engineering Science* 60(18): 5164-5176.
- WHITEN, W. J. 1972: The simulation of crushing plants with models developed using multiple spline regression. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* 72(10): 257.

José Ramón Hechavarria-Pérez, jhperez@facing.uho.edu.cu
Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Auxiliar.
Universidad de Holguín “Oscar Lucero Moya”. Holguín, Cuba.

Alfredo L. Coello-Velázquez, acoello@ismm.edu.cu
Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular.
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba.

Juan María Menéndez-Aguado, maguado@uniovi.es
Doctor en Ciencias Técnicas. Universidad de Oviedo. España.

Caracterización geoeléctrica de cortezas lateríticas a partir de sondeos eléctricos verticales de polarización inducida (SEV-PI)

Alfredo de Jesús Hernández-Ramsay
Emilio R. Escartín-Sauleda

Resumen

La cuantificación de los recursos meníferos en las cortezas de intemperismo ferrolateríticas se ve afectada, entre otros factores, por la gran variabilidad en su espesor, lo que exige del uso de redes de perforación muy densas que resultan muy costosas. Este trabajo expone resultados de la aplicación del método geofísico de sondeo eléctrico vertical de polarización inducida (SEV-PI) en las ofiolitas cubanas donde se desarrollan cortezas de intemperismo ferroniquelíferas-cobaltíferas, con el fin de determinar sus espesores y contribuir al aumento de la precisión en el cálculo de recursos. Los resultados constatan que el método posee buen poder resolutivo para estimar los espesores de la corteza laterítica y mapear las irregularidades del contacto corteza-basamento.

Palabras clave: depósitos lateríticos; cortezas de intemperismo; geofísica aplicada; SEV-PI; ofiolitas.

Geoelectric characterization of lateritic crusts from vertical polarized induced electrical probes (SEV-PI)

Abstract

The quantification of the mineral resources in the iron-weathering crusts is affected, among other factors, by the great variability in their thickness, which requires the use of very dense drilling nets that are very expensive. This work presents results of the application of the geophysical method of induced electric polarization induced vertical (SEV-PI) in the Cuban ophiolites where iron-cobaltiferous weathering crusts are developed, in order to determine their thicknesses and contribute to the increase of the precision in the calculation of resources. The results show that the method has good resolution power to estimate the thickness of the lateritic crust and to map the irregularities of the laterites-basement contact.

Keywords: lateritic deposits; weathering crust; applied geophysics; sev-PI; ophiolites.

1. INTRODUCCIÓN

En la industria cubana del níquel la mena que alimenta las fábricas productoras se extrae de la corteza de intemperismo ferroniquelífera-cobaltífera que se origina sobre las ofiolitas. El espesor de esa corteza es tan variable que puede aumentar o disminuir entre dos pozos contiguos de la red de perforación, lo que altera los valores del cálculo de recursos.

Esta alta variabilidad y complejidad geológica en los depósitos incluye una gran irregularidad en el relieve del piso de la corteza, la existencia de bloques no intemperizados dentro de los ocres y presencia de cuerpos de composición no ultramáfica que disminuyen el contenido de níquel y provocan la no confirmación de las reservas; ello conduce a invertir cuantiosos recursos en la realización de trabajos geológicos complementarios.

Las irregularidades químicas, geológicas y mineralógicas en las rocas de la corteza laterítica niquelífera-cobaltífera provocan variaciones en sus características físicas, las que pueden ser detectadas mediante la aplicación de métodos geofísicos, en particular de métodos eléctricos, como SEV-PI (Peric 1981; Barongo & Palacky 1991; Acosta-Breal 2007; Hernández-Ramsay 2007, 2009; Hernández-Ramsay *et al.* 2005; Sosa 2007; Fon, Che & Suh 2012; Hafiz 2015; Vieira *et al.* 2016).

Los autores del presente trabajo se propusieron estudiar las cortezas de intemperismo sobre las ofiolitas con SEV-PI y contribuir a la determinación, con mayor precisión, de parámetros geométricos (tales como los espesores de la corteza) y de algunas de sus propiedades. Esto favorece los cálculos de recursos, al proceder de una fuente independiente de las redes de perforación e incluir datos observados en puntos entre los pozos.

Como resultados de los primeros trabajos de perfilaje de polarización inducida (gradiente medio) y SEV-PI en la Sierra de Puriales de Caujérí, provincia de Guantánamo; Sierra Maestra (yacimientos El Cobre, Infierno y los sectores El Roble y San Pablo de Yao), provincias de Santiago de Cuba y de Granma, así como en Aguas Claras, provincia de Holguín, se observó como regularidad que sobre las ofiolitas los valores de la polarizabilidad y la cargabilidad aparente son mucho mayores, en comparación con los valores sobre los esquistos, las calizas y las secuencias vulcanógeno-sedimentarias de la formación El Cobre.

Se estableció como hipótesis de trabajo que si las secuencias ofiolíticas del basamento rocoso tienen valores de polarizabilidad y cargabilidad aparente más altos que las rocas friables de la corteza de intemperismo ferroniquelífera-cobaltífera, entonces es posible cartografiar el contacto

entre corteza y basamento y determinar los espesores de corteza en cada punto de SEV-PI. Los resultados prácticos reportados en este trabajo confirman la veracidad de esta hipótesis.

1.1. Cortezas de intemperismo ferroniquelíferas-cobaltíferas de Cuba

En las áreas de estudio se encuentran rocas ultrabásicas del cinturón ofiolítico que bordea la isla de Cuba por su costa norte, por aproximadamente 900 km (Cuador-Gil 2002); el cual es uno de los más largos en todo el mundo y tiene asociados grandes yacimientos de corteza de intemperismo de menas lateríticas ferruginosas, niquelíferas y cobaltíferas. La distribución de rocas ultrabásicas no es homogénea en todo el cinturón, sus relaciones con las rocas de cobertura platafórmica a veces son muy complejas.

El perfil litológico de las cortezas lateríticas ferroniquelíferas-cobaltíferas, está formado por zonas (capas u horizontes) resultantes de los procesos de intemperismo. Existen diversas clasificaciones de esos horizontes, pero en Cuba la más utilizada es la de Lavaut-Copa (2005) que se muestra en la Figura 1.

1. Zona de ocres inestructurales con concreciones ferruginosas u ocres inestructurales con perdigones (OICP)
2. Zona de ocres inestructurales sin concreciones ferruginosas u ocres inestructurales sin perdigones (OISP)
3. Zona de ocres estructurales finales (OEF)
4. Zona de ocres estructurales iniciales (OEI), (llamada también saprolita fina o saprolita blanda)
5. Zona de rocas madres lixiviadas (RML), (llamada también saprolita gruesa, saprolita dura o basamento)
6. Zona de rocas madres agrietadas o roca madre alterada (RMA), (llamada también basamento).

COLUMNA		CLASIFICACION DEL PERFIL LITOLOGICO	
		PERFIL DE INTEMPERISMO	ZONAS LITOLOGICAS
1	* * OICP	A) PERFILES LATERITICOS :	
2	-V- OI	INESTRUCTURAL COMPLETO	1 y 2
3	V V OEF	INESTRUCTURAL INCOMPLETO	1 ó 2
	V V IT A	ESTRUCTURAL COMPLETO	1, 2 y 3
		ESTRUCTURAL INCOMPLETO	1 ó 2 y 3
		B) PERFILES LATERITICO-SAPROLITICOS	
4	V @ V OEI	ESTRUCTURAL COMPLETO	1, 2, 3, 4 y 5
5	@ RML	ESTRUCTURAL INCOMPLETO	1 y/o 2 y/o 3 y 4 y/o 5
		C) PERFILES SAPROLITICOS:	
6	V VV RMA	ESTRUCTURAL COMPLETO	4 y 5
		ESTRUCTURAL INCOMPLETO	4 ó 5

Figura 1. Clasificación del perfil litológico de la corteza de intemperismo, según Lavaut-Copa (2005).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Trabajos de campo. Elaboración y procesamiento de los datos

Las investigaciones comenzaron en el año 1997 en la meseta de Cajálbana, provincia de Pinar del Río; meseta de San Felipe, Camaguey; meseta Pinares de Mayarí (este y oeste); Nicaro (Luz Norte, Vega Grande y Martí Grupo VII); Moa (en los yacimientos Punta Gorda, Yagrumaje Norte, Yagrumaje Sur, Yagrumaje Oeste, Camarioca Este, Camarioca Oeste, Punta Gorda, Zona A, Yamanigüey) (Figura 2).

Se utilizaron varios equipos de medición: Complejo Diapir E, receptor; Diapir T, transmisor, de fabricación húngara, con un motor generador Honda; e IPR-12, de fabricación canadiense, que proporcionan el valor de la resistividad aparente, ρ_a y cargabilidad aparente, C_a , con un dispositivo de cuatro electrodos tipo Schlumberger. El error de las mediciones no sobrepasó el límite permisible, el cual fue de 5 % para la cargabilidad aparente C_a y de 10 % para la resistividad aparente ρ_a ; fue evaluado con la expresión del error relativo, sobre la base de repeticiones en el 10 % de las mediciones.

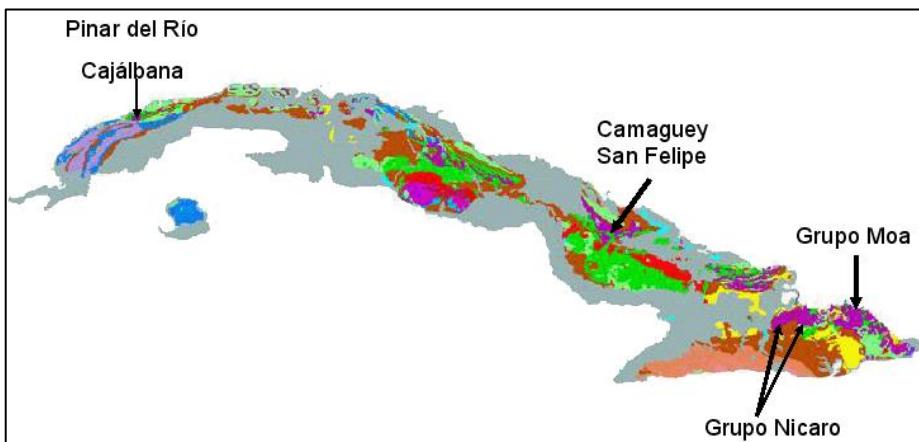


Figura 2. Ubicación de los sectores estudiados en Cuba.

En todos los casos, la orientación de las líneas AB de alimentación o energización del terreno se hizo coincidir con la orientación E-W de los perfiles de medición de otros métodos geofísicos y la orientación de los pozos perforados en la red de exploración (Figura 3).

Se trabajó con pulsos cortos de doble polaridad y la adquisición se hizo en el dominio del tiempo, donde el tiempo de carga en el Diapir fue de ocho segundos y en el IPR-12 de dos segundos. Cada sector o yacimiento se trabajó con un solo tipo de equipo. Se realizaron SEV-PI paramétricos en cada pozo de la red más densa y tres SEV-PI entre pozos; el dispositivo utilizado se muestra en la Figura 4.

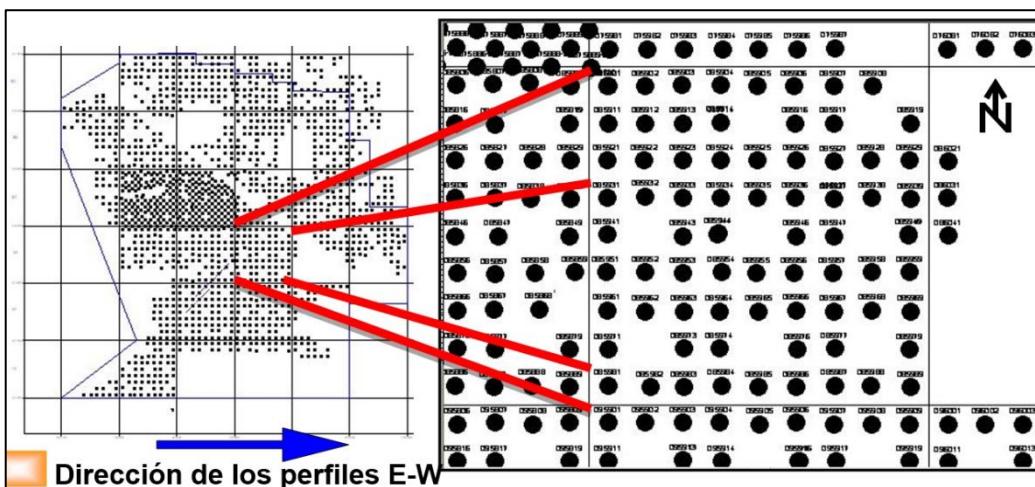


Figura 3. Esquema de proyección de los pozos y la dirección de los perfiles de medición.

Para la interpretación de los SEV-PI se construyeron las curvas de resistividad (ρ_a) y cargabilidad (C_a) aparente (Danko & Azze 1972). El método de interpretación utilizado fue el de los puntos característicos. A partir de la calibración de los sondeos paramétricos con los datos de pozo

se obtuvo que la profundidad de estudio en estas condiciones resultó igual a la abertura $AB/2$ máxima (Telford, Geldart & Sheriff 1990).

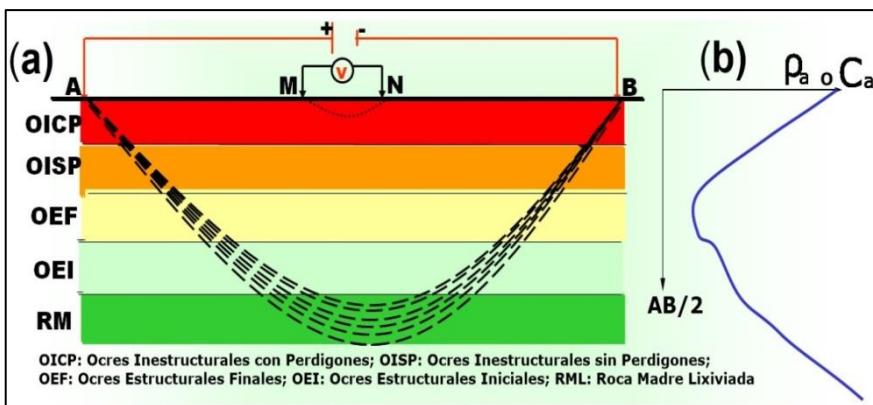


Figura 4. (a) Dispositivo de medición de cuatro electrodos tipo Schlumberger. (b) Forma de la curva correspondiente a cada horizonte o capa en la corteza de intemperismo sobre ofiolitas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con los datos adquiridos en los levantamientos se confeccionaron tablas, curvas de variación de las dos propiedades físicas: ρ_a y C_a , con la profundidad en cada punto físico estudiado, mapas de tipos de curvas, cortes de curvas de nivel de resistividad aparente ρ_a (iso-ohmas) y cortes de curvas de nivel de cargabilidad aparente C_a (Danko & Azze 1972).

Atendiendo a las formas de la variación de la ρ_a y C_a con la profundidad, es posible identificar patrones geométricos específicos o formas específicas de dichas curvas. Esos patrones se identifican con los nombres de curvas tipo "H" (Figura 5), tipo "A" (Figura 6), tipo "Q" (Figura 7) y tipo "K", que se muestra en la Figura 8 (Danko & Azze 1972).

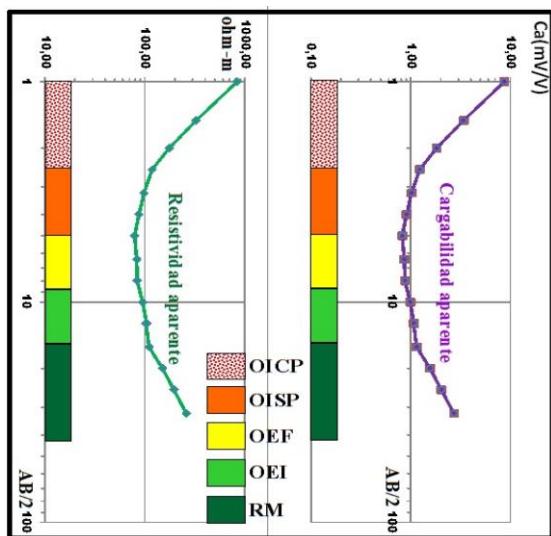


Figura 5. Curvas de tipo "H" de resistividad y cargabilidad aparente, con litología, asociadas a un mismo punto de SEV-PI, yacimiento Punta Gorda, bloque PQ 50.

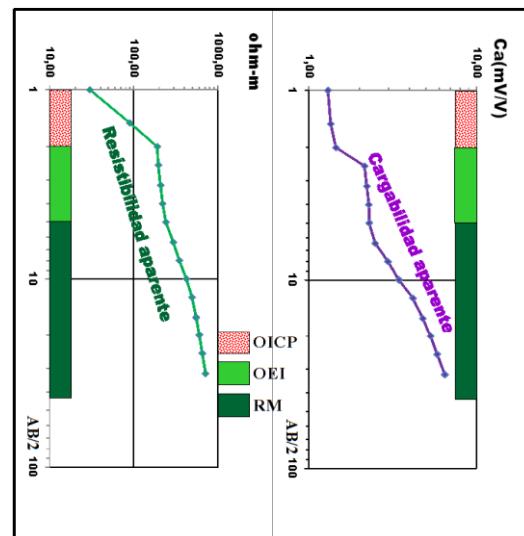


Figura 6. Curva de tipo "A" de resistividad y cargabilidad aparente, con litología asociada en un mismo punto de SEV-PI, yacimiento Punta Gorda, bloque PQ 50, perfil 3333

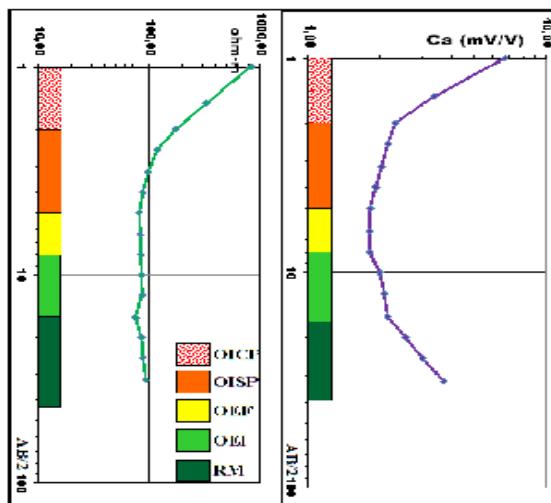


Figura 7. Curva de resistividad aparente de tipo "Q" y de cargabilidad aparente de tipo H con litología asociada, yacimiento Punta Gorda, bloque PQ, pozo 17.

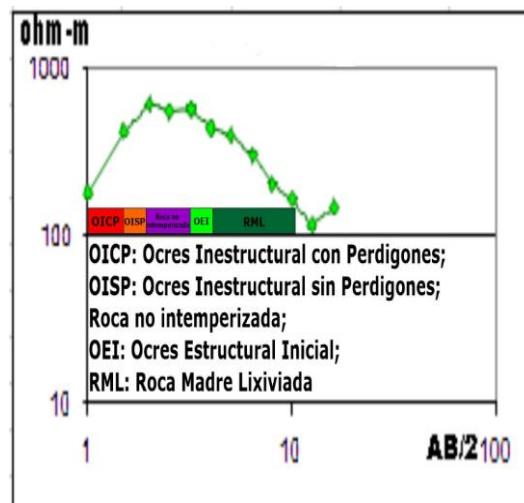


Figura 8. Curva de resistividad aparente de tipo "K" con litología asociada, yacimiento Yagrumaje Norte, bloque 0758, pozo 05.

En los datos de más de 19 000 puntos físicos de SEV-PI, realizados en cortezas de intemperismo o en áreas de roca ofiolítica intemperizada, se identificaron estos cuatro tipos de curvas y combinaciones de ellas, que fueron utilizadas para la construcción de los mapas locales de tipos de curvas, en cada uno de los sectores objeto de estudio (Hernández-Ramsay

et al. 2005). Este trabajo se refiere solamente a las curvas de tipo "H" porque reflejan con mayor detalle el perfil laterítico completo.

Curvas de tipo "H": Presentan valores de resistividad aparente (ρ_a) y cargabilidad aparente (C_a) que cumplen las condiciones siguientes: $\rho_{a1} > \rho_{a2} < \rho_{a3}$ y $C_{a1} > C_{a2} < C_{a3}$ (Danko & Azze 1972); la curva presenta tres ramas (superior, intermedia e inferior) bien definidas.

De los 19 000 sondeos realizados se tomó como ejemplo ilustrativo un sondeo paramétrico realizado en el yacimiento Punta Gorda, bloque PQ 50, en un punto correspondiente con el pozo número 15. En este punto el perfil es laterítico saprolítico, como lo muestran las Figuras 1 y 5.

Este tipo de curva H (Figura 5) es una de las más difundidas en las cortezas de intemperismo de Cuba oriental. La rama superior de la curva presenta valores altos, localizados geológicamente y espacialmente sobre materiales lateríticos con zonas de cuarcificación, sílice y los ocres inestructurales (OI), en general, debido a la existencia de oxi-hidróxidos de Fe (perdigones), los cuales se polarizan y a la vez ofrecen una alta resistencia al paso de la corriente por el medio. La intensidad de los valores depende de la abundancia y diseminación de ellos y de la forma en que están interconectados, así como de la presencia o no de agua.

En algunas ocasiones ha sido posible identificar el material de ocres inestructurales con perdigones (OICP) respecto al de los ocres inestructurales sin perdigones (OISP), material laterítico. En este caso, la primera rama presenta un ligero a muy ligero punto de inflexión que indica el final (piso) de los OICP y el inicio (techo) de los OISP (Figura 5).

En la rama intermedia se observan los valores más bajos de la curva, posiblemente por la abundancia de material arcilloso, presencia de agua y la homogeneidad del tamaño de los granos de los minerales. Esta rama coincide geológicamente y espacialmente con los ocres estructurales finales (OEF). La experiencia demuestra que el ancho de esta rama depende de la potencia de las capas lateríticas.

Cuando las potencias de los OICP, OISP y OEF (secuencias lateríticas) son pequeñas (menores que tres metros, aproximadamente) el SEV-PI los refleja como una sola capa y la curva adopta la forma del tipo "A" que se ilustra en la Figura 6.

La existencia de buen desarrollo de los OEI (o capa de saprolita blanda) provoca la aparición en la curva de tipo "H" de una rama de valores medios entre la rama de valores intermedia y la de los valores inferiores altos, asociada a esta litología, cartografiando dicha capa, y su tamaño está en

dependencia del espesor de la misma; entonces, en este caso la curva de tipo "H" presenta cuatro ramas (Figura 5).

En la rama inferior los valores vuelven a ser altos y se asocian geológicamente y espacialmente con zonas de cuarcificación (sílice) de las rocas del basamento, posiblemente por la gran variedad y heterogeneidad del tamaño de los granos de los minerales, el grado de alteración, fracturación y serpentización (Milovski & Kónonov 1988).

El contacto entre las secuencias lateríticas y el basamento se cartografía entre el valor mínimo y el valor siguiente donde cambia la pendiente de la curva, y mientras mayor sea la pendiente de la rama inferior, más brusco será el contacto entre las lateritas o los ocres y el basamento, de saprolitas duras (Figura 5). Esta regularidad se manifiesta en los SEV-PI de todos los yacimientos estudiados y se confirma con los datos de los SEV-PI paramétricos en los puntos de las perforaciones.

En el caso de la cargabilidad aparente los valores altos probablemente son originados por el fenómeno llamado de "polarización de membrana" (Danko & Azze 1972), por la gran heterogeneidad y diversidad de tamaño de los fragmentos de rocas y granos de minerales de varias composiciones y diferentes intensidades de cargabilidad aparente en el medio geológico. Para el caso de la resistividad aparente, estos valores altos están revelando la presencia de roca dura o ligeramente agrietada, zonas de cuarcificación, sílice, rocas compactas, poco alteradas física y mecánicamente (Figura 5). Son los casos, por ejemplo, de la presencia de gabro olivínico, peridotitas o serpentinitas presentes en los pozos, revelada por estudios petrográficos (Rodríguez-Crombet 2007) en puntos coincidentes con sondeos de SEV-PI paramétricos.

Cuando la pendiente de la curva es igual o mayor que 45° , el contacto entre las lateritas o los ocres y las saprolitas duras se encuentra en el mínimo o punto de inflexión. Los valores de la última rama de la curva de tipo "H" - rama inferior- describen características del estado físico-mecánico de las rocas del basamento rocoso, o saprolitas duras, diferenciándose cada estado físico-mecánico de la roca de otro, por un cambio brusco de la pendiente de la curva. Este hecho está relacionado proporcionalmente y se cumple que a mayor pendiente de la curva, el material rocoso es más compacto y menos alterado física y mecánicamente. La descripción realizada por los geólogos metro a metro en cada pozo y en los diferentes sectores confirman esta regularidad mencionada.

Con estos materiales se construyeron mapas del relieve del basamento (Figura 9) y cortes geólogo-geofísicos, con los que se pudo determinar una

voluminosa información, como la cartografía de la tectónica del área, los cambios de composición litológica, los espesores de los horizontes de la corteza, la profundidad del nivel freático y la profundidad a que se encuentra el basamento de roca dura no alterada. Con los cortes interpretados, incluyendo también los datos arrojados por la red de perforaciones, se hicieron cálculos de recursos, los cuales fueron evaluados positivamente por los especialistas de la Oficina Nacional de Recursos Minerales de Cuba, quienes han emitido los correspondientes avales de aceptación satisfactoria.

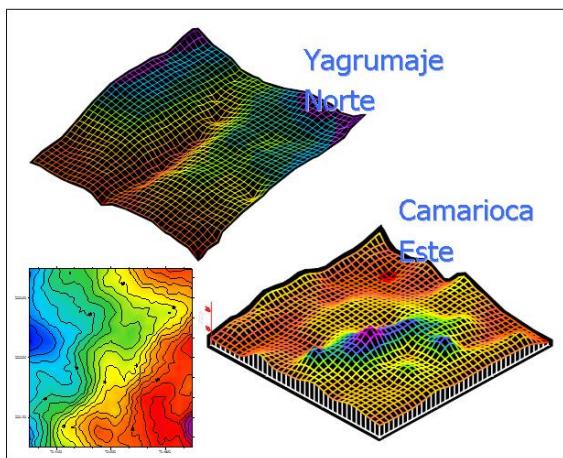


Figura 9. Relieve del basamento determinado por los SEV-PI.

La Figura 10 representa un corte de cargabilidad aparente donde predominan las curvas de tipo "H". Los tonos amarillos simbolizan los valores bajos, los cuales se asocian geológica y espacialmente con los ocres estructurales finales; mientras que los tonos magenta se asocian a valores altos de cargabilidad aparente, cartografiando los OI en la parte superior del corte y el basamento en la parte inferior del corte. Los triángulos rojos, en la superficie, señalan la ubicación de cada SEV-PI en el perfil. Los símbolos en forma de estrellas, alineados verticalmente, con su valor de resistividad aparente a la derecha, indican las aberturas AB/2.



Figura 10. Puntos característicos de la curva de tipo "H" de cargabilidad aparente C_a , yacimiento Pinares de Mayarí Oeste, bloque I19115, pozo 03.

Las Figuras 11 y 12 representan, respectivamente, un mismo corte de cargabilidad y de resistividad aparente, donde predominan las curvas de tipo "H". En la Figura 11 el color magenta representa los valores bajos de C_a , los cuales se asocian geológicamente y espacialmente con los ocres inestructurales en el tope del corte y con la roca madre en la base del corte y los colores amarillos, los valores bajos de cargabilidad aparente, que cartografián los OEF en la parte central del corte. En la Figura 12 el color azul fuerte representa los valores bajos de ρ_a , los cuales se asocian geológicamente y espacialmente con los ocres estructurales finales y el magenta y el amarillo, los valores altos de resistividad aparente, que cartografián los OI en la parte superior del corte, y el basamento en la parte inferior del corte.

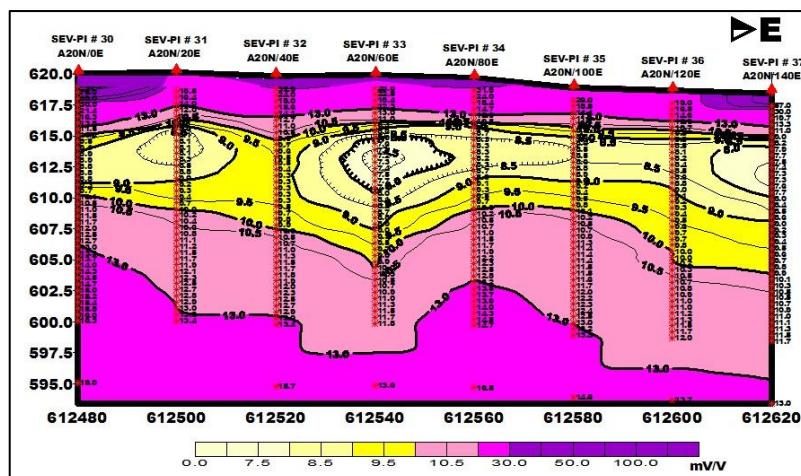


Figura 11. Corte de cargabilidad aparente C_a con curvas de tipo "H", Pinares de Mayarí Este, sector A perfil A20N.

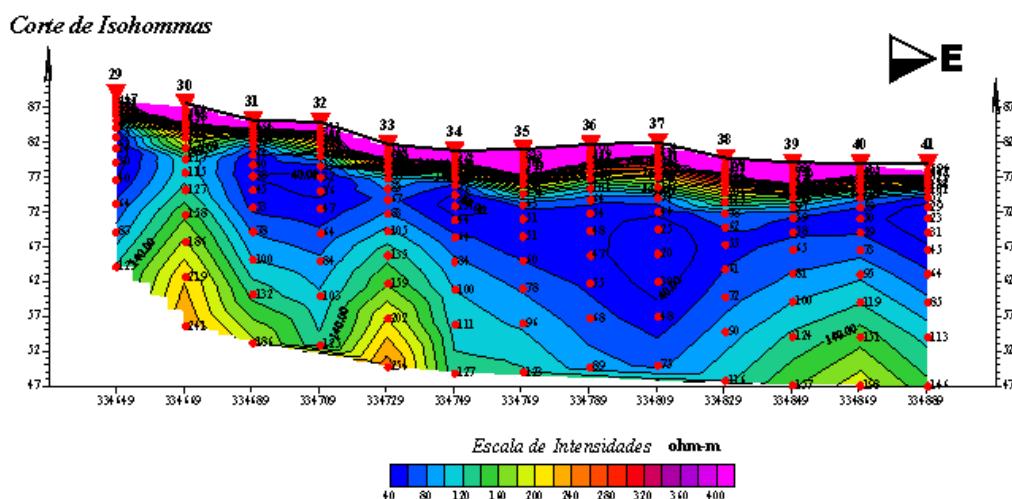


Figura 12. Corte de resistividad aparente ρ_a con curvas de tipo "H", meseta de Cajálbana, Pinar del Río, perfil 1.

4. CONCLUSIONES

- El método geofísico de SEV-PI logra cartografiar el espesor de la corteza de intemperismo en yacimientos lateríticos y seguir las irregularidades del contacto entre corteza y basamento.
- El método posee buen poder resolutivo para estimar los espesores de la corteza laterítica, atendiendo a la diferencia promedio entre el espesor de la corteza interpretado con los SEV-PI paramétricos y los observados en los pozos perforados.
- El 50 % de las curvas de C_a son del tipo "H", lo que revela la presencia de todas las litologías (OICP; OISP; OEF; OEI; RML, RMA) en el corte laterítico, correspondiendo los valores altos de la primera rama a los OI, mientras que a los OEF se asocian los valores más bajos de la curva. La última rama de la curva, donde los valores vuelven a ser altos, se asocian geológicamente y espacialmente con los OEI y la RML, RMA. El 30 % de las curvas de C_a son del tipo "A", las cuales indican un corte con potencia de OI menor que 5 m o incluso nula.

5. REFERENCIAS

- ACOSTA-BREAL, J. E. 2007: Prospección con georadar en los yacimientos lateríticos de Yagrumaje Sur. En: II Convención de Ciencias de La Tierra. La Habana.
- BARONGO, J. O. & PALACKY, G. J. 1991: Investigations of electrical properties of weathered layers in the Yala area, western Kenya, using resistivity soundings. *Geophysics* 56(1): 133-138.
- 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.
- DANKO, J. & AZZE, A. 1972: *Geoelectricidad*. Editorial Universidad de La Habana, La Habana.
- FON, A. N.; CHE, V. B. & SUH, C. E. 2012: Exploration of Electrical Resistivity and Chargeability Data on a GIS Platform in Delineating Auriferous Structures in a Deeply Weathered Lateritic Terrain, Eastern Cameroon. *International Journal of Geosciences* 3(05): 960-971.
- HAFIZ, B. 2015: *Subsurface electrical resistivity investigation at the nysc proposed permanent orientation camp, Paiko, Niger state, Nigeria*. Tesis doctoral. Lambert Academic Publishing (LAP).
- HERNÁNDEZ-RAMSAY, A. D. J. 2007: Determinación de material saprolítico dentro de la corteza con el uso del sev-PI en el yacimiento Yagrumaje

- Norte. En: II Convención de Ciencias de La Tierra, La Habana.
- HERNÁNDEZ-RAMSAY, A. D. J. 2009: Informe de las Lateritas de Moa. Geominera Oriente.
- HERNÁNDEZ-RAMSAY, A. D. J.; GUERRA, M.; SOSA, I.; ACOSTA-BREAL, J. E.; DUSSAC, O.; GENTOIU, M. M. & LAVAUT-COPA, W. D. 2005: Algunas características geoeléctricas de la corteza de intemperismo y su basamento en Nicaro. La Habana.
- LAVAUT-COPA, W. D. 2005: Clasificador para modelación litológica de lateritas. Consulta: 25 feb 2012. Disponible en: http://www.ismm.edu.cu/R_Geociencias%20y%20Quimica/volumen1.htm
- MILOVSKI, A. V. & KÓNONOV, O.V. 1988: *Mineralogía*. Mir, Moscú, 168 p.
- PERIC, M. 1981: Exploration of Burundi Nickeliferous Laterites by Electrical Methods. *Geophysical Prospecting* 29(2): 274-287.
- RODRÍGUEZ-CROMBET, R. 2007: Características petrólogo-geoquímicas del yacimiento Camarioca Norte, macizo Moa-Baracoa. La Habana.
- SOSA, I. 2007: Efectividad de los métodos geofísicos en la evaluación del yacimiento Yagrumaje Oeste. En: II Convención de Ciencias de La Tierra, La Habana.
- TELFORD, W. M.; GELDART, L. P. & SHERIFF, R. E. 1990: *Induced Polarization*. United Kingdom. Press Syndicate of the University of Cambridge.
- VIEIRA, L. B.; MOREIRA, C. A.; CORTES, A. R. P. & LUVIZOTTO, G. L. 2016: Geophysical modeling of the manganese deposit for Induced Polarization method in Itapira (Brazil). *Geofísica Internacional* 55(2): 107-117.

Alfredo de Jesús Hernández-Ramsay, aramsay@geominera.co.cu
ahr_amsay@yahoo.es

Máster en Geofísica Aplicada.
Empresa Geominera Oriente. Santiago de Cuba, Cuba

Emilio R. Escartín-Sauleda. escartin@civil.cujae.edu.cu
Ing. Geofísico. Doctor en Ciencias Geológicas
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, CUJAE. La Habana, Cuba

Contribución a la gestión de riesgos urbanos en la ciudad de Pinar del Río mediante un modelo geológico-geotécnico 3D

Alexis Ordaz-Hernández

Resumen

El trabajo tuvo por objetivo elaborar el modelo geológico-geotécnico en tres dimensiones (MGG-3D) para el corte cenozoico más superficial de la ciudad de Pinar del Río (Cuba). El modelo podrá ser utilizado como base interpretativa de los fenómenos geotécnicos que surjan en el entorno urbano. El procedimiento seguido es fácilmente reproducible en otros casos de estudios a nivel mundial, especialmente donde se cuente con un volumen considerable de información geotécnica. En el modelo elaborado se identificaron seis tipos ingeniero-geológicos (TIG): rellenos artificiales, capa vegetal, aluvial marino grueso, aluvial marino fino, eluvial y rocoso. El MGG-3D permite visualizar la disposición espacial de los TIG anteriormente mencionados y puede contribuir notablemente a la toma de decisiones en la planificación urbana.

Palabras clave: geotecnia; modelo geológico-geotécnico; tipos ingeniero-geológicos; ordenamiento urbano.

Contribution to the management of urban risks in Pinar del Río city using a 3D geological-geotechnical model

Abstract

The objective of this paper is to elaborate a geological-geotechnical model in three dimensions for the Cenozoic section which is the shallowest of Pinar del Rio City. It is intended that the model obtained is used in future as an interpretative basis for geotechnical phenomena arising in the urban environment. The procedure followed can be easily applied to other worldwide studies, mainly in the areas that exist a big volume of geotechnical information. The procedure followed can be easily reproduced in other study cases worldwide, specifically counting on a wide volume of geotechnical information. Six Engineering Geological Types (EGT) are identified in the model, namely, Artificial fill, Vegetation layer, Marine alluvial coarse grained soil, Marine alluvial fine grained soil, Eluvial soil and Bed rock. The 3D geological-geotechnical model illustrates the spatial arrangement of the EGT above, and can contribute significantly at decision making in urban planning.

Keywords: geotechnics; geological-geotechnical model; geotechnical types; urban planning.

1. INTRODUCCIÓN

Los modelos geológico-geotécnicos (MGG) constituyen una simplificación de la realidad; esta simplificación u omisión de detalles puede estar originada por desconocimiento o simplemente por el estricto interés de la investigación. Los MGG han evolucionado paralelamente a las técnicas asistidas por computadoras, desde los modelos en dos dimensiones (2D) hasta los actuales modelos tridimensionales (3D), pero en todos los casos han tenido como propósito representar espacialmente las unidades básicas de información geotécnicas (UBIG), las que pueden variar en función de la escala y finalidad del estudio.

Un término ya recurrente en publicaciones recientes es el de “geología urbana” (Neumann, Schönberg & Strobel 2006; Lapido & Pereyra 2010; Banlayá *et al.* 2013). El término geología urbana es aplicado a la solución de las problemáticas de génesis geológica en ciudades donde se emplean generalmente como unidades básicas para los modelos geológico-geotécnicos las siguientes:

- Formación de rocas precuaternarias: espacialmente indican un conjunto de facies unidas paragenéticamente según un ciclo geotectónico.
- Conjunto facial genético: Conjunto de rocas o suelos surgidas en las mismas condiciones faciales.
- Tipo petrográfico: Rocas o suelos de una misma composición mineralógica y con la misma estructura y textura.
- Tipo ingeniero-geológico: Parte de cierto tipo petrográfico caracterizado por la homogeneidad de las cualidades geotécnicas de los suelos o rocas.

Los MGG tienen un amplio rango de aplicaciones. La aplicación inmediata consiste en la identificación de las características litológicas, geomorfológicas y estructurales del objeto de estudio. De esta primera aplicación se pueden inferir las características del medio por donde eventualmente circularía el agua subterránea, y se puede determinar la predisposición o susceptibilidad del medio a la ocurrencia de procesos geológicos generadores de peligros geotécnicos, cuyos métodos de predicción siempre llevan implícito la variable litología.

Una aplicación, poco conocida, se refiere al vínculo estrecho entre el modelo geológico-geotécnico y la modelación de propiedades físicas o mecánicas. En este caso la geometría de la unidad básica de información es empleada como límite virtual para la estimación de la propiedad de interés (Rienzo,

Oreste & Pelizza 2008; Ordaz 2013; Chinthaka 2015, entre otros). Con esta aplicación se logra reducir considerablemente las incompatibilidades entre la interpretación cuantitativa, concebidas en función de un parámetro geotécnico y la realidad del medio físico.

Los primeros trabajos de generalización y sistematización del conocimiento geológico-geotécnico para la ciudad de Pinar del Río (caso de estudio seleccionado) fueron desarrollados por la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA). El primer trabajo cartográfico se denominó "Esquema ingeniero-geológico de la ciudad de Pinar del Río" (Aguado 1993); este trabajo se realizó en formato analógico y contó con una densidad de puntos de documentación ingeniero-geológicos (PDIG) de 4,3 PDIG/km². En este caso se adoptó como UBIG el conjunto facial genético, donde se definieron cuatro conjuntos:

- 1) secuencia terrígena del Paleógeno (formación Capdevila),
- 2) secuencias terrígenas-carbonatadas del Neógeno (formación Paso Real),
- 3) depósitos aluvial-marino (formación Guane) y
- 4) depósitos aluviales.

Posteriormente, la ENIA elaboró un segundo esquema (Govea 2014), elaborado sobre plataforma de sistema de información geográfica y con 6,4 PDIG/km². En esta segunda versión del esquema ingeniero-geológico se adoptaron los mismos conjuntos faciales genéticos establecidos por Aguado (1993), cuyos límites espaciales sufrieron ligeras modificaciones, debido al conocimiento superior adquirido del área de estudio.

Ambos esquemas conforman importantes referentes para los estudios geotécnicos del sitio. Sin embargo, tienen limitaciones especialmente relacionadas con la interpretación en la dirección vertical. Además, sus memorias descriptivas están sesgadas al uso del suelo como base de cimentaciones, siendo prácticamente nulas las interpretaciones aplicadas a los peligros geotécnicos (carso, subsidencias, expansibilidad de los suelos, sufusión, respuesta sísmica, entre otros).

Tomando como base los antecedentes expuestos, este trabajo se propone como objetivo elaborar el modelo geológico en tres dimensiones para la ciudad de Pinar del Río. Se pretende que el modelo obtenido se utilice como base interpretativa para predecir los fenómenos geotécnicos que surgen en el entorno urbano. Además, la representación gráfica obtenida constituirá el modelo geométrico para la estimación espacial de propiedades geotécnicas (modelo geomecánico) en trabajos posteriores. Ejemplos de modelos

similares se han realizado en Alicante (España) (Tomás *et al.* 2004), en Thames Gateway (Inglaterra) (Royse, Reeves & Gibson 2008), en Turín (Italia) (Rienzo, Oreste & Pelizza 2008), entre otros casos a nivel internacional.

1.1. Ubicación geográfica y características geológicas del área de estudio

El área de estudio se ubica en el sector más occidental del Caribe, exactamente en el oeste de Cuba. Administrativamente el área de estudio pertenece a la provincia de Pinar del Río y abarca parte del municipio homónimo.

La investigación se enfoca en la ciudad de Pinar del Río, principal centro administrativo y político de la provincia; con una población de aproximadamente 150 000 habitantes. Los límites de la ciudad son irregulares, cubre una superficie de 31,0 km² y las coordenadas geográficas de su centro son: latitud norte 22°25' y longitud este 83°42' (Figura 1).

Desde el punto de vista geológico existe predominio de formaciones geológicas recientes, formadas en la cuenca cenozoica Los Palacios (Figura 2). Las rocas más antiguas que afloran en la ciudad de Pinar del Río pertenecen al Grupo Mariel, de edad Eoceno Inferior parte baja, constituido por areniscas polimicticas, limolitas, argilitas y conglomerados. Sobre este complejo vulcano-sedimentario se han depositado discordantemente las formaciones geológicas de composición terrígeno-carbonatadas, con una yacencia horizontal y sub-horizontal y edades desde el Eoceno Inferior al Mioceno Superior (formaciones Universidad y Paso Real).

Sobre las formaciones terrígeno-carbonatadas del Eoceno Inferior-Mioceno Superior yacen los sedimentos del Plioceno-Pleistoceno Inferior, representados en este caso de estudio por la formación Guane. Esta formación está constituida especialmente por gravas, arenas y arcillas arenosas; depositadas en un ambiente marino poco profundo con abundante aporte aluvial (Cabrera & Peñalver 2001). En la parte superior de la cuenca cenozoica Los Palacios se ubican los depósitos aluviales del Holoceno. Estos ocupan las primeras terrazas de los ríos presentes en el área, constituidas por arenas, arenas arcillosas y arcillas arenosas; sus espesores varían de 1,0 m hasta 5,0 m (Barrios *et al.* 1988).

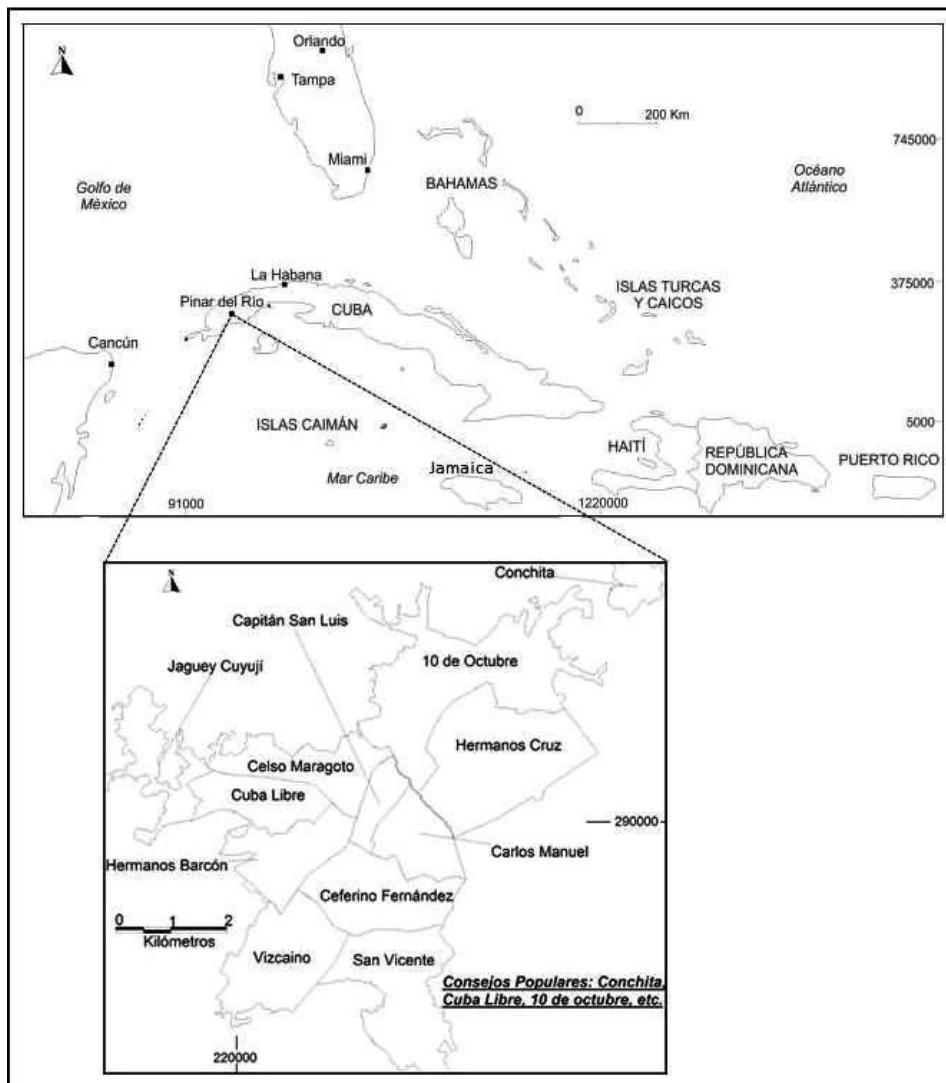


Figura 1. Ubicación geográfica de la ciudad de Pinar del Río y de sus consejos populares en el contexto del Caribe.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la confección del MGG de la ciudad de Pinar del Río se empleó la información geotécnica proveniente de 890 perforaciones, distribuidas en los 31,0 km² de la ciudad. Estas se realizaron con diferentes fines y con una profundidad mínima de 5 m y máxima de 25 m. Las perforaciones fueron ejecutadas por la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas, entre los años 1962 y 2015 (Figura 3).

Un segundo dato de partida para alcanzar el objetivo previsto en esta investigación lo constituyen los valores promedios de las propiedades físicas y mecánicas de los diferentes tipos ingeniero-geológicos (TIG) que conforman el corte geotécnico. Esta información se obtuvo de los trabajos de Govea (2014), Gilbert (2014) y Chinthaka (2015).

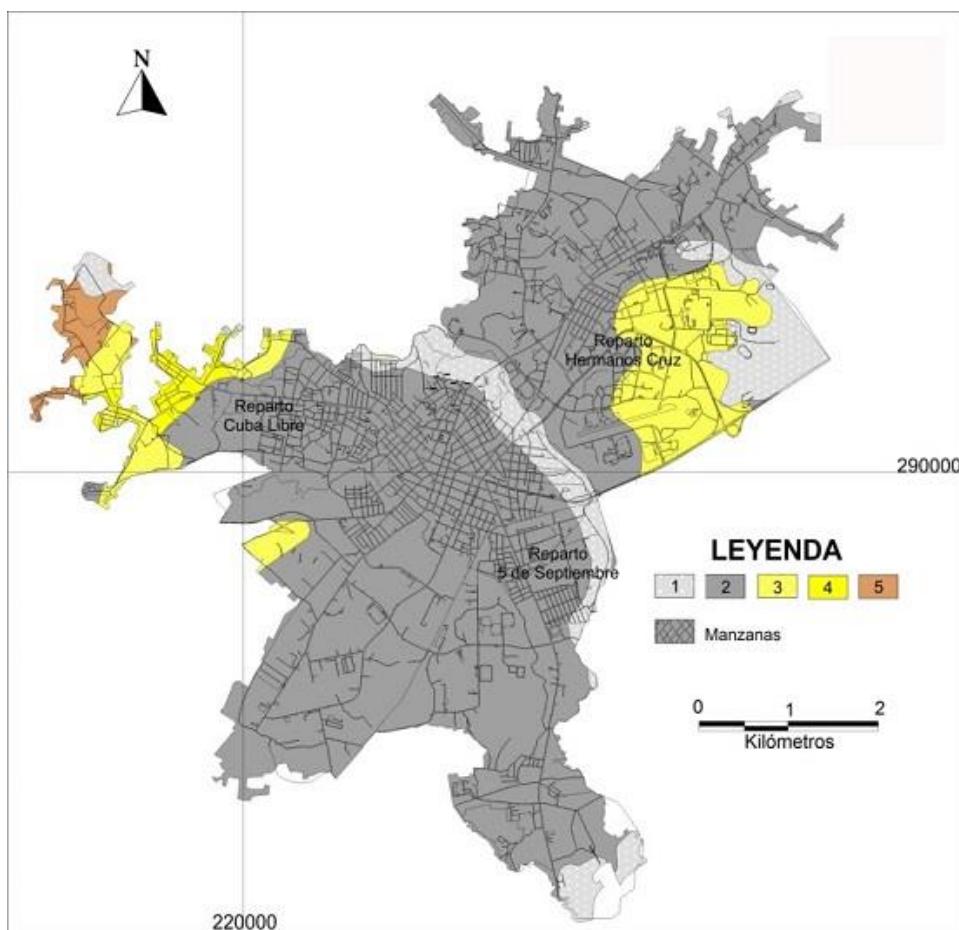


Figura 2. Mapa geológico para la ciudad de Pinar del Río, escala original 1: 100 000, modificado del Instituto de Geología y Paleontología de Cuba (2006). 1: depósitos aluviales del Holoceno, 2: formación Guane de edad Plioceno-Pleistoceno Inferior, 3: formación Paso Real (Oligoceno Superior), 4: formación Universidad (Eoceno Inferior), 5: Grupo Mariel (Eoceno Inferior parte baja).

El MGG-3D de la ciudad de Pinar del Río cubre la parte más superficial del corte cenozoico, especialmente en sus primeros 20 m. A esta profundidad ocurren los principales procesos de interacción cimentaciones-fenómenos geotécnicos. La confección del modelo siguió los siguientes pasos:

1. Elaboración de base de datos
2. Definición de los tipos ingeniero-geológicos que conforman el corte superficial cenozoico de la ciudad de Pinar del Río
3. Establecimiento del orden estratigráfico de los TIG
4. Modelación geométrica e interpretación.

La base datos confeccionada presenta seis atributos: (1) código de la perforación, (2) coordenadas, (3) cota, (4) tipo ingeniero-geológico, (5)

profundidad del piso y el techo de cada tipo ingeniero-geológico y (6) profundidad total de la perforación.

La definición de los TIG se fundamentó en los siguientes aspectos:

- Descripciones litológicas contenidas en los 890 reportes de perforaciones (columnas litológicas).
- Propiedades físico-mecánicas de los suelos y/o rocas presentes en el sitio (homogeneidad de las cualidades geotécnicas).
- Clasificaciones previas realizadas por otros investigadores (Aguado 1993; Govea 2014; Gilbert 2014 y Chinthaka 2015). La revisión detallada y asimilación de los tipos ingeniero-geológicos, descritos en los trabajos citados, permite la homogenización de la información y evita la aplicación de nuevos calificativos, para estratos con iguales características ya descritos con anterioridad.

Para el procesamiento de la información es necesario asignarle al programa computarizado empleado (RockWorks 15) el orden estratigráfico de las diferentes capas de suelos y/o rocas a modelar. En este caso de estudio se realizó un análisis de frecuencia de aparición de cada uno de los diferentes TIG en las diferentes posiciones en el corte.

Posterior al establecimiento del orden estratigráfico se procede a la representación espacial de los diferentes TIG que componen los 20,0 m superiores del corte Cenozoico de la ciudad de Pinar del Río (modelación geométrica). La superficie topográfica se generó a partir del modelo digital del terreno con escala 1: 10 000 de la ciudad. El proceso automatizado se realizó con el software RockWorks 15. La modelación geométrica permite definir la posición espacial (profundidad de yacencia, espesores y distribución) de los tipos ingeniero-geológicos, sobre los cuales se emplaza la ciudad de Pinar del Río. Finalmente se concluye el proceso, con interpretaciones geotécnicas vinculadas especialmente a los diferentes fenómenos geotécnicos que pueden ocurrir en el substituto y que, de alguna forma, afectan o afectarán la infraestructura de la ciudad de Pinar del Río.

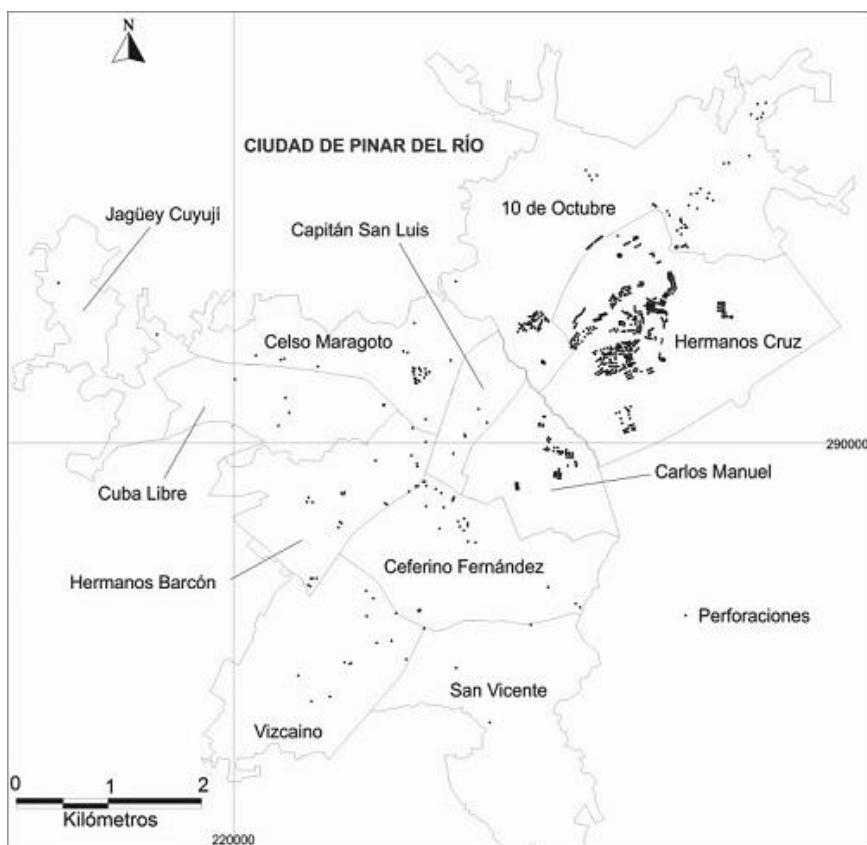


Figura 3. Distribución de perforaciones en la ciudad de Pinar del Río.

El proceso interpretativo se sustenta, desde el punto de vista técnico, en tres elementos: (1) en la modelación geométrica obtenida en este trabajo, (2) en la información geotécnica precedente que caracteriza cada TIG (Govea 2014; Gilbert 2014 y Chinthaka 2015) y (3) en los resultados de trabajos contenidos en la literatura especializada en geotécnica; en los cuales, a partir de sólidas argumentaciones, se relacionan litologías con fenómenos geotécnicos (Siyahi & Ansal 1999; González de Vallejo 2002; Redolfi 2007, Chávez & Guardado 2008, entre otros).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Unidades ingeniero-geológicas

Como se argumentó anteriormente, la unidad básica de información seleccionada para el modelo geológico-geotécnico de la ciudad de Pinar del Río es el TIG. De acuerdo con las descripciones litológicas contenidas en los 890 reportes de perforaciones, las propiedades físico-mecánicas de los suelos y rocas presentes en el sitio y las clasificaciones previas para el área se definen seis TIG (Tabla 1):

- 1) Relleno artificial
- 2) Capa vegetal

- 3) Aluvial marino grueso
- 4) Aluvial marino fino
- 5) Eluvial
- 6) Rocoso.

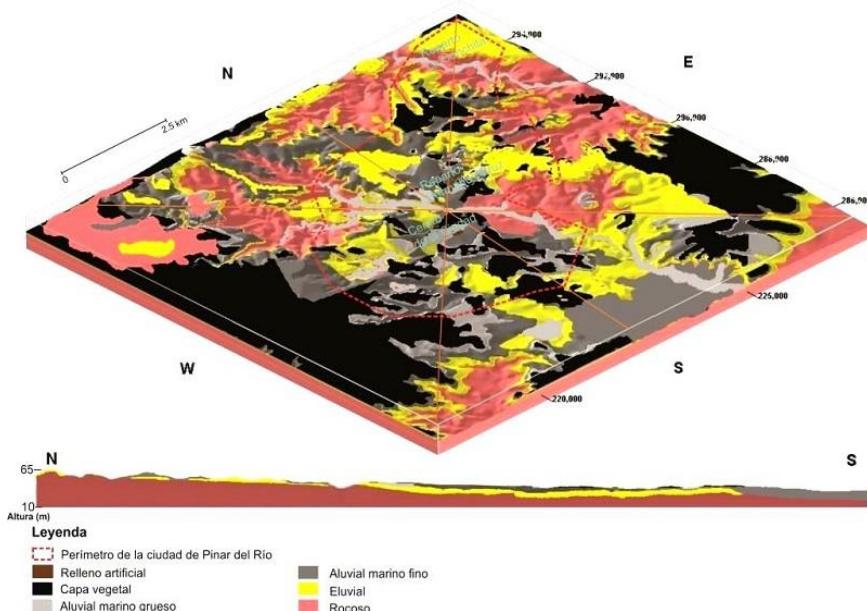
Tabla 1. Características generales de los tipos ingeniero-geológicos identificados en la ciudad de Pinar del Río

Tipo ingeniero-geológico	Unidad geológica	Edad	Litológica
Relleno artificial		-	Mezclas de materiales con alta heterogeneidad granulométrica, con espesores entre 1,0 m y 3,0 m
Capa vegetal		-	Materia orgánica muy compresible
Aluvial marino grueso	Formación Guane	Plioceno-Pleistoceno inferior	Arenas, arenas arcillosas y gravas arenosas que clasifican según el Sistema Unificado de Suelos (SUCS) como arenas arcillosas (SC) y gravas arcillosas (GC). Fase arenosa de la formación Guane
Aluvial marino fino	Formación Guane	Plioceno-Pleistoceno inferior	Clasifican según el SUCS como arcillas de alta plasticidad (CH) y arcillas de baja plasticidad (CL). Fase arcillosa de la formación Guane
Eluvial	Formación Paso Real	Oligoceno superior	Suelos o semirrocas que pertenecen a la parte superior de las unidades geológicas: Paso Real, Universidad y Mariel. Existe predominio de arcillas carbonatadas con fragmentos de calizas de tamaños variables
	Formación Universidad	Eoceno inferior	
	Grupo Mariel	Eoceno Inferior parte baja	
Rocoso	Formación Paso Real	Oligoceno superior	Conforma la parte basal del área de estudio. Está compuesta por alternancias de calizas y margas
	Formación Universidad	Eoceno inferior	
	Grupo Mariel	Eoceno Inferior parte baja	

De acuerdo con el origen y las edades de cada uno de los depósitos citados en la Tabla 1 la parte alta de corte estratigráfico sería ocupada por los rellenos artificiales y la parte baja por el tipo ingeniero-geológico rocoso. Este último, además de ocupar la base del corte cenozoico, también aflora en las zonas positivas del relieve y en algunos cauces fluviales.

3.2. Modelación de las unidades ingeniero-geológicas

La representación espacial en tres dimensiones de las unidades ingeniero-geológicas (Figuras 4, 5 y 6) muestra una amplia heterogeneidad en superficie. La heterogeneidad más evidente se concentra en el perímetro de la ciudad (Figura 4), donde confluyen el total de los tipos ingeniero-geológicos identificados. Al mismo tiempo es el sector mejor estudiado de la ciudad. Sin embargo, la variabilidad descrita es exclusiva de los primeros 10 m de profundidad (en ocasiones hasta los 20 m), a partir de esta profundidad se evidencia una homogeneidad notoria representada por el tipo ingeniero-geológico rocoso (formación Paso Real, formación Universidad y el Grupo Mariel (Figuras 5 y 6).



La Figura 6 muestra dos cortes orientados en direcciones ortogonales. La vista revela una buena relación en la ocurrencia de los tipos ingeniero-geológicos “eluvial” y “rocoso” con las zonas positivas del relieve (en este caso superiores a los 40,0 m sobre el nivel medio del mar); quedando reservados las pequeñas depresiones y los sectores llanos para la acumulación de los TIG aluviales marinos finos y gruesos.

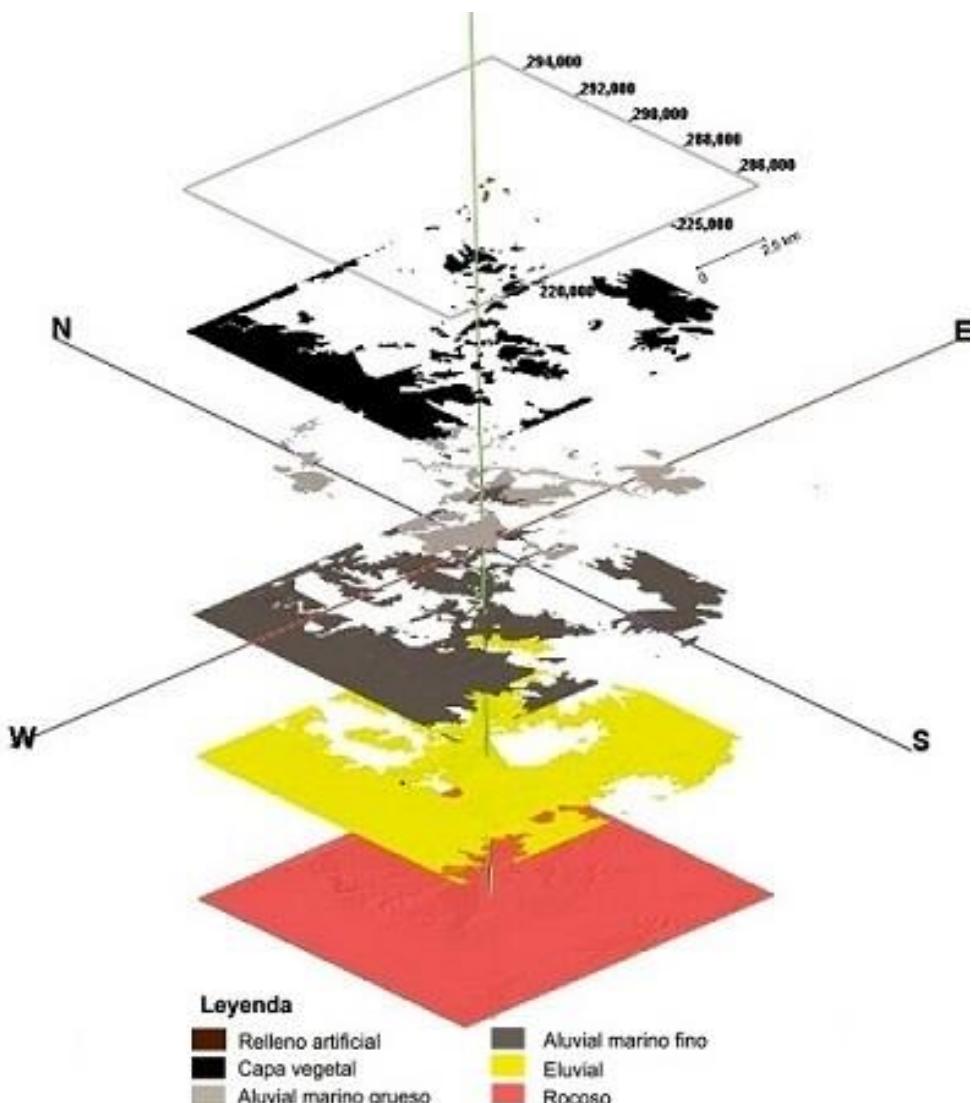


Figura 5. Vista desagregada de los diferentes tipos ingeniero-geológicos, ciudad de Pinar del Río.

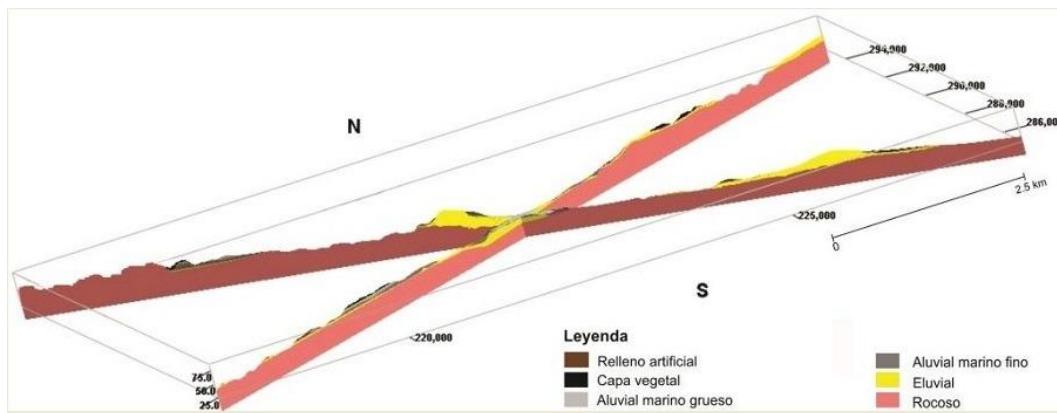


Figura 6. Vistas de cortes orientados en direcciones perpendiculares NE-SW y NW-SE.

Las diferentes vistas del corte geológico cenozoico de la ciudad de Pinar del Río permiten dilucidar la disposición espacial de los suelos y rocas que lo componen. Esto último es un elemento clave en el pronóstico de los peligros geólogo-geotécnicos que pueden ocurrir en este espacio geográfico, pero no es el único criterio, pues el análisis debe completarse con las propiedades geotécnicas de los materiales, aspectos que se tratan a continuación.

Capa vegetal y rellenos artificiales: Los tipos ingeniero-geológicos “capa vegetal y rellenos artificiales” para el caso de la ciudad de Pinar del Río, y desde la óptica de los peligros geológico-geotécnicos, no presentan relevancia. La capa vegetal (o suelos orgánicos) en el perímetro urbano ha sido prácticamente retirada. En los lugares donde se cartografiaron no presentan espesores superiores a los 0,5 m y la práctica seguida por las empresas constructoras, en todos los casos, consiste en evitar estos suelos como base de las cimentaciones.

De lo anterior se deriva que los suelos orgánicos no han sido estudiados con fines geotécnicos, en este caso de estudio. Según los datos aportados por la literatura, la compresibilidad es el principal fenómeno geotécnico que puede ocurrir en los suelos orgánicos (Hibino, Yamaguchi & Kogure 1989; Kogure, Yamaguchi & Shogaki 1993; Calderón, Livia & Aguilar 2003, entre otros). Por otro lado, la distribución de los rellenos artificiales es muy restringida (Figuras 4 y 5); estos materiales, al igual que la capa vegetal, no han sido estudiados geotécnicamente, ni empleados como base de cimentaciones.

Aluvial marino grueso: El fenómeno geológico-geotécnico reportado con más recurrencia en estos suelos ha sido la erosión subterránea; algunas veces identificado también en la literatura técnica con el término sufusión. Este fenómeno se ha originado, especialmente, debido a la composición granulométrica de los suelos aluviales marinos gruesos; en los que resalta un 60,16 % de arena, para un 64,61 % de la fracción gruesa (gravas y

arenas) (Tabla 2). Estas condiciones naturales, en combinación con elevados gradientes hidráulicos que eventualmente se desarrollan por roturas en redes hidráulicas, han generado en la ciudad algunos colapsos de la carpeta asfáltica (Figura 7).



Figura 7. Hundimientos y colapsos de carreteras debido al fenómeno de erosión subterránea, ciudad de Pinar del Río, Cuba Occidental.

En los cortes representados en la Figura 6 se pueden constatar la presencia del TIG aluvial marino grueso hacia el centro de la ciudad.

Las diversas representaciones ofrecidas en las Figuras 4, 5 y 6 permiten tener una percepción clara de la distribución espacial de los suelos aluviales marinos gruesos, lo que sugiere, para estos sitios, estudios geotécnicos dirigidos a aclarar los factores condicionantes y desencadenantes a la ocurrencia de la erosión subterránea.

Aluvial marino fino: en el caso particular de la ciudad de Pinar del Río se caracterizan por contenidos de arcillas y limos de un 64,55 %, aproximadamente, como promedio y un límite líquido promedio del 44,9 %. Estas características sugieren un potencial de expansividad medio. En la ciudad se han reportado reiterados casos de daños estructurales a los inmuebles, debido a este fenómeno (Figura 8). Trabajos recientes realizados por Chinthaka y otros investigadores (2016) en el Consejo Popular Hermanos Cruz, emplazado al este de la ciudad (Figura 1), demostraron la presencia de arcillas con potencial de expansión de bajo a medio, en el tipo ingeniero-geológico aluvial marino fino.



Figura 8. Fenómenos geotécnicos en el tipo ingeniero-geológico aluvial marino fino. Donde, a y b: grietas bien desarrolladas en los muros de la vivienda y c: afloramientos de arcillas en las cercanías de la vivienda.

Eluvial: Se debe indicar la buena estabilidad de los suelos incluidos en el tipo ingeniero-geológico eluvial; la no ocurrencia de fenómenos geológico-geotécnicos en los suelos que componen este TIG se debe, fundamentalmente, a los contenidos equilibrados de las fracciones de grava, arena, limo y arcilla (Tabla 2).

Tabla 2. Comportamiento de algunos parámetros geotécnicos que caracterizan los tipos ingeniero-geológicos identificados en la ciudad de Pinar del Río; se excluye la capa vegetal y el relleno artificial

Propiedades geotécnicas	Tipos ingeniero-geológicos				
	Aluvial Marino grueso	Aluvial Marino fino	Eluvial	Rocoso	
Contenido de grava promedio (%)	4,45 (454)	1,45 (411)	12,40 (355)	-	-
Contenido de arena promedio (%)	60,16 (454)	34,00 (411)	31,12 (355)	-	-
Contenido de limo promedio (%)	14,85 (454)	22,55 (411)	21,19 (355)	-	-
Contenido de arcilla promedio (%)	20,54 (454)	42,00 (411)	35,29 (355)	-	-
Límite líquido promedio (%)	32,83 (404)	44,90 (410)	33,86 (351)	-	-
Índice de plasticidad promedio	18,83 (404)	24,90 (410)	18,41 (351)	-	-
Densidad natural promedio (g/cm ³)	2,00 (352)	2,08 (347)	2,04 (288)	2,22 (15)	

Cohesión promedio (kg/cm ²)	0,03	(243)	0,62	(238)	0,37	(194)	-	-
Ángulo de fricción Internamente promedio	18º	(250)	13º	(237)	17	(185)	-	-
Porosidad Promedio (%)	34,38	(260)	38,17	(190)	36,59	(198)	25 % (15)	
Resistencia a la Compresión Simple promedio (MPa)	-	-	-	-	-	-	5,1 (15)	
El valor medio de las propiedades geotécnicas fue calculado utilizando el total de mediciones existentes y ponderando por el espesor de los estratos								
Entre paréntesis se indica el número de mediciones o muestras de suelo estudiadas								

3.3. Predisposición a la ocurrencia de fenómenos geotécnicos en los TIG que forman el substrato del entorno urbano

Cada uno de los TIG identificados en el área y representados espacialmente en las Figuras 4, 5 y 6 tendrán diferentes niveles de influencia en la ocurrencia de fenómenos generadores de riesgos geológicos en el entorno urbano objeto de estudio. En este trabajo no se pretende elaborar mapas de peligrosidad a la ocurrencia de algún fenómeno geológico-geotécnico específico, generador de riesgos; simplemente se demostrará la predisposición de los TIG identificados a la ocurrencia de los citados fenómenos.

Rocoso: Si se considera la naturaleza carbonatada de este tipo ingeniero-geológico, y los informes de oquedades de hasta 10,0 cm de diámetro en las descripciones litológicas contenidas en los reportes de perforaciones, se pudiera inferir la ocurrencia de desplomes o derrumbes kársticos. Sin embargo, hasta el momento no existen reportes en la ciudad de Pinar del Río de los fenómenos citados.

No obstante, se sugiere la realización de estudios geofísicos para el emplazamiento de obras civiles de importancia. Especialmente se sugieren levantamientos gravimétricos de detalle, geoeléctricos o símicos, en sitios donde aflore el TIG rocoso o en los casos donde los espesores de los suelos que lo sobreyacen sean inferiores a los 15 m. En este sentido, el modelo geológico para el corte cenozoico, realizado y discutido anteriormente, puede constituir una guía para la planificación de los trabajos geofísicos.

4. CONCLUSIONES

- El nivel de conocimiento actual de las condiciones geólogo-geotécnicas de la ciudad de Pinar del Río permitió la confección del modelo geológico-geotécnico 3D para su corte cenozoico más superficial. En el modelo elaborado se identifican seis tipos ingeniero-geológicos (TIG): rellenos artificiales, capa vegetal, aluvial marino grueso, aluvial marino fino, eluvial y rocoso.
- El comportamiento de algunos parámetros geotécnicos y antecedentes de ocurrencia de daños estructurales en la ciudad vinculan al TIG aluvial marino grueso con la ocurrencia de la erosión subterránea; y al TIG aluvial marino fino con fenómenos de expansividad de las arcillas.
- Aunque hasta la actualidad no se han reportado desplomes kársticos en la ciudad, se proponen levantamientos gravimétricos de detalle, geoeléctricos o símicos donde aflore el TIG rocoso o donde los espesores de los sedimentos consolidados sobreyacentes sean inferiores a 15 m.
- El modelo geológico-geotécnico 3D permite visualizar la disposición espacial de los seis TIG anteriormente mencionados y asiste la toma de decisiones en la planificación urbana. Además, constituye un antecedente de consulta para posteriores análisis de peligros geólogo-geotécnicos.

5. REFERENCIAS

- AGUADO, N. 1993: Esquema Ingeniero-Geológico de la ciudad de Pinar del Río. Informe inédito. Archivos de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) de Cuba, 4 p.
- BANLAYÁ, J. C.; BARCOS, L.; BRUQUE, J. M.; CORDERO, T.; DÍAZ-AZPIROZ, M.; EXPÓSITO, I.; JIMÉNEZ, A.; MARTÍ, J. M.; MORAL, F.; OLÍAS, M.; ORTIZ, M. P.; ORTIZ, R.; PARRA, M.; RODRÍGUEZ, M. & VÁZQUEZ, M. A. 2013: *Geología Urbana de Sevilla*. Sociedad Geológica de España, Sevilla, 12 p.
- BARRIOS, E.; MARRERO, J.; PORTUONDO, A.; NUÑEZ, R. & PLACERES, R. 1988: Levantamiento geológico a escala 1:100 000 y búsqueda acompañante Pinar Sur. Oficina Nacional de Recursos Naturales, La Habana, 4 p.
- CABRERA, M. & PEÑALVER, L. 2001: Contribución a la estratigrafía de los depósitos cuaternarios de Cuba. *Revista Cuaternario y Geomorfología* 15(3-4): 37-49.
- CALDERÓN, D. L.; LIVIA, C. M. & AGUILAR, Z. 2003: Consideraciones sobre la compresibilidad de suelos orgánicos y turbas. En: XIV Congreso

- Nacional de Ingeniería Civil del Consejo Departamental de Loreto del Colegio de Ingeniería del Perú, 1-11.
- CHÁVEZ, M. & GUARDADO, R. 2008: Evaluación ingeniero-geológica del deterioro de las rocas en la provincia de Manabí, Ecuador. *Minería y Geología* 24(4): 1-13.
- CHINTHAKA, G. A. 2015: *Evaluación del potencial de expansión de los suelos en el Reparto Hermanos Cruz. Una contribución a la planificación urbana*. Tesis de grado. Universidad de Pinar del Río. 107 p.
- CHINTHAKA, G. A.; SAID, A.; ORDAZ, A.; ESTÉVEZ, E. & HERNÁNDEZ-SANTANA, J. R. 2016: Evaluación de la expansividad de los suelos en el reparto Hermanos Cruz, Pinar del Río, Cuba. *Boletín Geológico y Minero* 127(4): 811-826.
- GIRBERT, Y. 2014: *Pronóstico sobre la expansividad de las arcillas en la ciudad de Pinar del Río*. Tesis de maestría. Universidad de Pinar del Río. 100 p.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L. I. 2002: *Ingeniería Geológica*. Pearson Educación, Madrid, 744 p.
- GOVEA, D. 2014: Esquema Ingeniero-Geológico de la ciudad de Pinar del Río. Informe inédito. Archivos de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) de Cuba, 20 p.
- HIBINO, T.; YAMAGUCHI, H. & KOGURE, K. 1989: Compression characteristics of highly organic soils. In: *Symp. of highly organic soils*: 19-28.
- KOGURE, K.; YAMAGUCHI, H. & SHOGAKI, T. 1993: Physical and pore properties of fibrous peat deposit. In: *11th Southeast Asian Geotechnical Conference*. Singapore: 135-139.
- LAPIDO, O. & PEREYRA, F. 2010: Geología urbana y ordenamiento territorial. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 66(4): 459-460.
- NEUMANN, D.; SCHÖNBERG, G. & STROBEL, G. 2006: 3D-modeling of ground conditions for the engineering geology map of the city of Magdeburg. *The International Association for Engineering Geology and the Environment* (IAEG) 444: 1-7.
- ORDAZ, A. 2013: *Evaluación de las condiciones ingeniero-geológicas para el pronóstico de la respuesta dinámica de los suelos. Caso de estudio: Ciudad de San Cristóbal, Cuba occidental*. Tesis doctoral. Universidad de Pinar del Río. 170 p.
- REDOLFI, E. 2007: *Suelos Colapsables*. Manual. Universidad Nacional de Córdoba, 36 p.
- RIENZO, F.; ORESTE, P. & PELIZZA, S. 2008: Subsurface geological-geotechnical modelling to sustain underground civil planning. *Engineering Geology* 96(3): 187-204.

- ROCKWORKS 15: Earth Science and GIS Software. (Trial mode). Disponible en: <https://www.rockware.com/product/productDemo.php?id=165>
- ROYSE, K.; REEVES, H. & GIBSON, A. 2008: The modelling and visualization of digital geoscientific data as a communication aid to land-use planning in the urban environment: an example from the Thames Gateway. *Geological Society, London, Special Publications*, 305(1): 89-106.
- SIYAHİ, B. G. & ANSAL, A. 1999: Manual for zonation on seismic geotechnical hazards. Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering. *Technical Committee 4*: 68-70.
- TOMÁS, R.; CUENCA, A.; DELGADO, J. & DOMÉNECH, C. 2004: Diseño de un modelo geológico-geotécnico 3D de la Vega Baja del río Segura (Alicante, SE España). En: XVI Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica. Universidad de Alicante, España. Departamento de Expresión Gráfica y Cartografía, 1-10.

Alexis Ordaz-Hernández, alexisordaz.1978@gmail.com

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Categoría B. Facultad de Geografía.
Universidad Autónoma del Estado de México, México.

Cierre sostenible de canteras de materiales para la construcción en Cuba

Julio Montero-Matos
Oscar Jaime Restrepo-Baena
José Otaño-Nogel

Resumen

La inclusión de planes efectivos de cierre de mina en el proyecto de explotación es la vía para compensar el efecto nocivo de esta actividad. A partir de un diagnóstico realizado en 11 yacimientos en explotación, pertenecientes a la empresa Canteras, se diseñó una metodología con un enfoque sistémico e integral que consta de tres etapas y que permite ejecutar el cierre de canteras de manera sostenible. Se aplicó el método Delphi para seleccionar los criterios que inciden directamente en el cierre sostenible de canteras, de tal forma que considere los postulados esenciales del Modelo Económico Cubano (MEC). La metodología propuesta representa una contribución a la planificación y diseño del cierre minero en yacimientos no metálicos cubanos para garantizar la disminución de los impactos ambientales provocados durante su explotación y la disminución, al menor grado posible, de efectos socio-económicos negativos para los trabajadores y la comunidad situada en el área de influencia de las canteras. Actualmente se aplica en la cantera de San José, en la provincia de Mayabeque.

Palabras clave: cierre de canteras; desarrollo sostenible; minería sostenible.

Sustainable closure of construction materials quarries in Cuba

Abstract

The inclusion of effective mine closure plans in the exploitation project is the way to compensate for the harmful effect of this activity. Based on a diagnosis carried out in 11 sites in operation, belonging to the company Canteras, a methodology was designed with a systemic and integral approach that consists of three stages and allows the execution of quarry closures in a sustainable manner. The Delphi method was applied to select the criteria that directly affect the sustainable closure of quarries in such a way that it considers the essential postulates of the Cuban Economic Model (MEC). The proposed methodology represents a contribution to the planning and design of the mining closure in Cuban non-metallic deposits to guarantee the reduction of the environmental impacts caused during its operation and the reduction, to the lesser extent possible, of negative socio-economic effects for the workers and the community located in the area of influence of the quarries. Currently applied in the quarry of San José, in Mayabeque province.

Keywords: quarry closure; sustainable development; sustainable mining.

1. INTRODUCCIÓN

El cierre de minas toma cada vez mayor importancia en la industria minera de Cuba, así lo demuestran investigaciones presentadas en eventos científicos nacionales e internacionales que se han realizado a partir del año 2000 (Villas-Bôas & Barreto 2000; Santana-Maurell & Sánchez-Cabrera 2001; Villas-Bôas & Beinhoff 2002; Jones 2008; Rodríguez 2011; Falero-Salgado 2011).

Gran parte de las investigaciones sobre el tema han tenido carácter práctico y la literatura se compone principalmente de estudios de caso (Paredes 2003; Laurence 2006; ICMM 2008; Oyarzún-Muñoz 2008; López *et al.* 2012; Fuentes-Sardiñas & Hernández-Álvarez 2014; Guerrero *et al.* 2014; Kabir *et al.* 2015). Otros trabajos se han dedicado a la teoría del cierre de la mina (Oyarzún-Muñoz 2008; Rodríguez 2011; Falero-Salgado 2011; Salazar-Pérez & Montero-Peña 2014 y Montero-Matos, Otaño-Nogel & Guerrero-Almeida 2016).

El desarrollo de una minería sostenible guarda una relación muy estrecha con el cierre de minas. Cuba ha mostrado interés en su puesta en práctica, aunque los resultados no son aún los esperados, pues esencialmente se ha profundizado en la dimensión ambiental que plantea el concepto.

Pasos importantes hacia la protección ambiental han sido dados a partir de la aprobación de leyes y decretos que regulan la política minera y el proceso de rehabilitación de los llamados pasivos ambientales. Estas regulaciones jurídicas en materia medioambiental consideran obligatorio los estudios de impacto ambiental en proyectos mineros, que tienen en el cierre de minas un componente fundamental (Montero-Matos, Otaño-Nogel & Guerrero-Almeida 2016).

Aunque existen regulaciones de aspectos específicos relacionados con el uso final de los recursos donde han cesado las labores de explotación, estas leyes presentan limitaciones que impiden que se realice un proceso sostenible de cierre de minas, en particular, el cierre de canteras.

En general, los documentos legales que existen en Cuba (Ley No. 76 1995; Decreto 222 1997; Ley No. 81 1997) solo se refieren a los tipos de cierre y a la obligatoriedad del cumplimiento de su ejecución, pero no explicitan la manera de regularlo mediante procedimientos normativos o metodologías que expongan los pasos para ejecutar el cierre.

En particular, la explotación de materiales para la construcción también se incluye dentro de las actividades mineras que afectan al medio ambiente cuando no se aplican planes efectivos de cierre (Montero-Matos & Otaño-

Nogel 2012). Sobre todo, si se tiene en cuenta que más del 60 % de los pasivos ambientales mineros cubanos son de este tipo de minería.

Aunque Cuba posee una larga tradición minera, se desconoce la existencia de precedentes que regulen el proceso de cierre de canteras. Particularmente para los yacimientos no metálicos no se incluye el proceso de cierre dentro del proceso de explotación, ni se tiene en cuenta el ciclo de vida de la cantera y solo se aplican varios artículos de la Ley de Minas (Capítulo XI, Artículos del 61 al 67) y de su reglamento (Capítulo XIV, Artículos del 81 al 86).

De acuerdo con lo anterior, se plantea como objetivo de esta investigación proponer, para el cierre sostenible de canteras de materiales para la construcción, una metodología que integre las dimensiones de la sostenibilidad, en el contexto del Modelo Económico Cubano (MEC) reflejado en los lineamientos de la política económica y social (PCC 2011), específicamente en los números 218 y 233 del Capítulo VIII Política industrial y energética.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

Para este trabajo se realizó un diagnóstico en 11 yacimientos perteneciente a la Empresa de Canteras en la provincia de La Habana en los cuales actualmente se explotan materiales para la construcción y se realizó una caracterización minero ambiental en la zona de estudio, teniendo en cuenta la secuencia lógica que imponen los procesos de identificación, caracterización y valoración de los impactos ambientales ocasionados por la explotación de estos yacimientos.

El análisis documental, estudios de caso y criterios de expertos (método Delphi) se aplicaron para revisar la información disponible de cada cantera, identificándose sus principales características y medidas técnicas a aplicar en cierres a realizar a futuro en las canteras.

De igual modo se consultaron los lineamientos de la política económica y social (PCC 2011), la conceptualización del MEC y el Programa Nacional de Desarrollo hasta el 2030 (PCC 2016). Así como también se examinaron investigaciones pertinentes (Montes de Oca-Risco & Ulloa-Carcassés 2013; Fuentes-Sardiñas & Hernández-Álvarez 2014; Ponce-Seoane & Díaz-Comesañas 2013; Hernández 2013; López-Kramer *et al.* 2015) y otros estudios relacionados con la caracterización geológica y minero ambiental de las canteras, suministrados por la dirección de las empresas mineras objeto de estudio.

Los fundamentos teóricos seguidos para la elaboración de la metodología para el cierre sostenible de canteras de materiales para la construcción, en el contexto del MEC, se muestran en el algoritmo de la Figura 1, que comprende el estudio del MEC, las dimensiones de la sostenibilidad y la determinación de 12 criterios para realizar un cierre sostenible de canteras de materiales para construcción a través del método Delphi (Eneko Astigarraga citado por Legrá-Lobaina & Silva-Díéguez 2015).

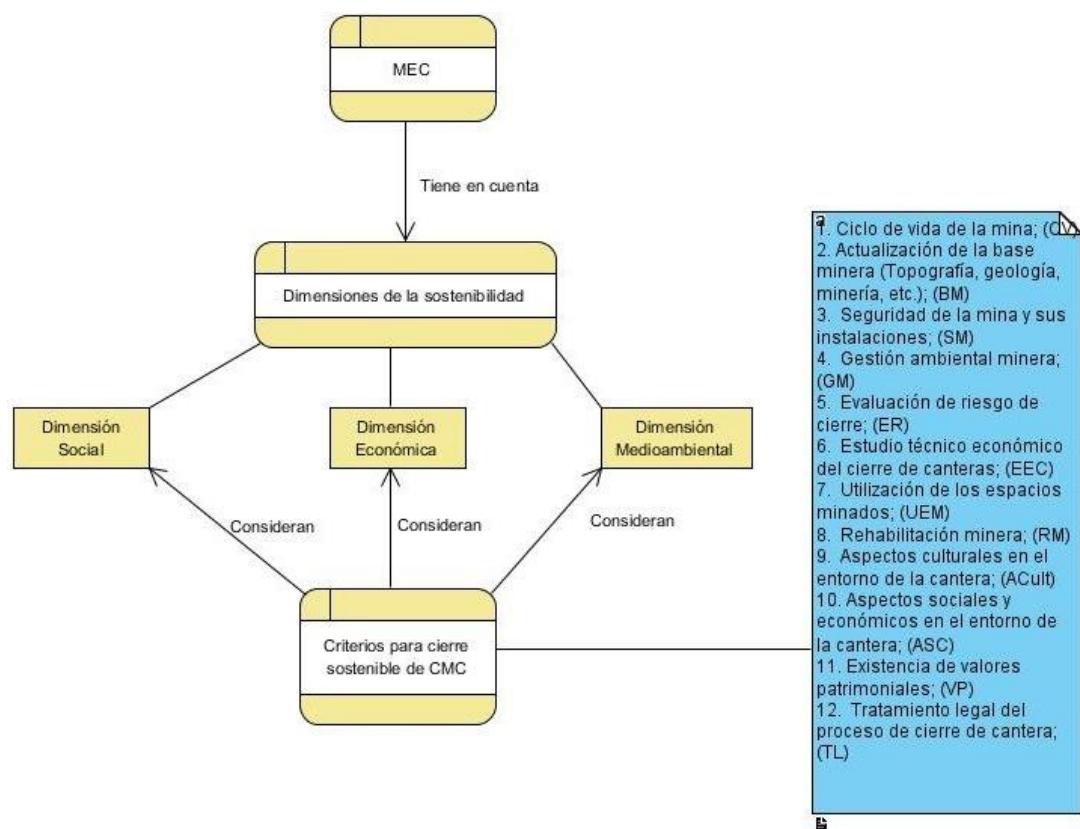


Figura 1. Algoritmo de fundamentos teóricos considerados para la elaboración de la metodología para el cierre sostenible de canteras de materiales para la construcción en el contexto del MEC.

2.1. Descripción del algoritmo

El algoritmo está conformado por cuatro pasos que se fundamentan en el MEC, la sostenibilidad, criterios para un cierre sostenible y la propuesta de una metodología.

Paso 1. Estudio del MEC

Se parte del análisis de las diferencias del modelo económico socialista en Cuba con respecto a los modelos económicos del resto del mundo. Este presta su mayor atención a la transformación de las fuerzas productivas como eje central del desarrollo del país. Funciona esencialmente con

empresas estatales y en el caso de las canteras el Estado cubano es su propietario. Ello determina que el cierre de estas sea una decisión colectiva.

Se analizan, además, los documentos programáticos de la proyección socioeconómica de la nación hasta el 2030 y se toma en cuenta los que le conciernen.

Paso 2. Estudio de las dimensiones de la sostenibilidad

Se realiza un análisis integral de las dimensiones de la sostenibilidad y lo que ellas aportan a la elaboración de una política sobre el cierre de canteras en Cuba; para ello se consideraron los lineamientos 21, 218, 133 y 233 de la política económica y social del Partido y la Revolución, relacionados con la protección ambiental, el uso racional de la materia prima, las estrategias para su uso sostenible, el uso futuro de los recursos y la reorientación de la actividad económica en función de las necesidades del territorio.

Para el caso de los recursos no renovables es imprescindible que, desde la etapa inicial del proyecto minero, se elabore una estrategia de cierre que tenga en cuenta hacia dónde se reinsertarán los recursos humanos empleados en la cantera cuando tenga lugar el cierre de esta.

Paso 3. Determinación a través del método Delphi de los criterios para realizar un cierre sostenible de canteras de materiales para la construcción

La identificación de los principales criterios ambientales, económicos y sociales que inciden en el proceso de cierre sostenible resulta novedoso debido a que los mismos constituyen la base para establecer una metodología, que permita realizar satisfactoriamente este proceso en las actuales y futuras explotaciones de canteras de materiales para la construcción, en función de las prioridades establecidas en el nuevo modelo económico cubano.

A partir del método Delphi se seleccionaron 12 criterios de los 17 sometidos a consulta:

1. Ciclo de vida de la mina (CV)
2. Actualización de la base minera :topografía, geología, minería, entre otros (BM)
3. Seguridad de la mina y sus instalaciones (SM)
4. Gestión ambiental minera (GM)
5. Evaluación de riesgo de cierre (ER)
6. Estudio técnico económico del cierre de canteras (EEC)

7. Utilización de los espacios minados (UEM)
8. Rehabilitación minera (RM)
9. Aspectos culturales en el entorno de la cantera (ACult)
10. Aspectos sociales y económicos en el entorno de la cantera (ASC)
11. Existencia de valores patrimoniales (VP)
12. Tratamiento legal del proceso de cierre de cantera (TL)

Una vez determinados los criterios para el cierre sostenible de canteras se interrelacionaron los mismos con la conceptualización del MEC, tal como se muestra en la Tabla 1.

Paso 4. Elaboración de la propuesta metodológica para efectuar el cierre de canteras

A partir del estudio de la problemática relacionada con el cierre de minas, en especial, el de canteras se elaboró una metodología para el cierre sostenible de canteras de materiales para la construcción en el contexto del MEC. Para ello se consideró la integración de los aspectos sociales, económicos, ambientales, técnicos y de riesgos del cierre, así como las particularidades del MEC y los criterios a tener en cuenta para realizar el cierre sostenible de canteras en Cuba.

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 muestra la metodología general resultante de este estudio para ejecutar el cierre sostenible de canteras.

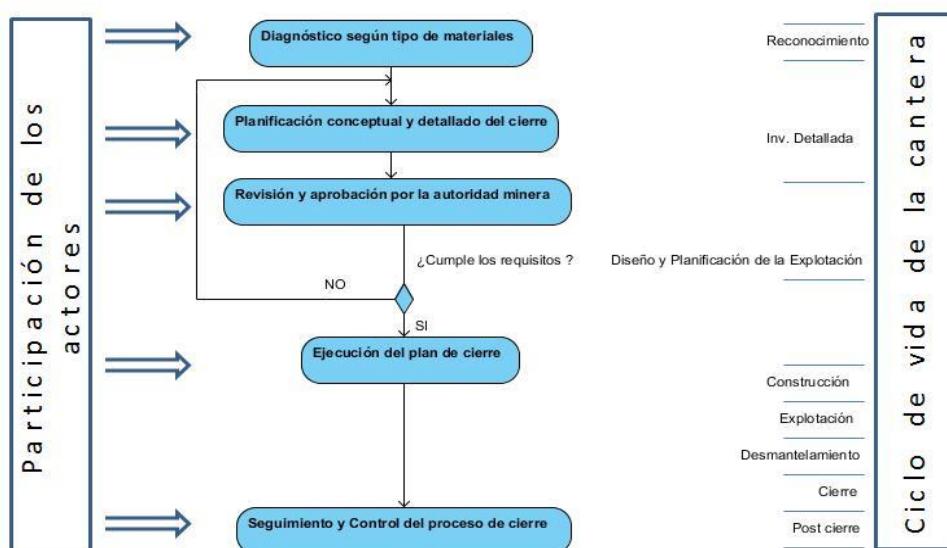


Figura 2. Metodología general para el cierre sostenible de canteras de materiales para la construcción.

3.1. Desarrollo de las etapas de la metodología

La metodología propuesta parte de la situación ideal en la que la planificación del cierre comienza en una fase temprana del ciclo de vida de la cantera y con la participación activa de los actores (comunidad-empresa-gobierno). Sin embargo, se reconoce que las canteras pueden haber atravesado un período de vida útil sin planes del cierre, como es el caso de Cuba. No obstante, la propuesta es válida, incluso bajo esas circunstancias, pero deberá aplicarse en un lapso de tiempo más corto.

La metodología se estructura en cinco etapas:

Etapa I. Diagnóstico según tipo de material a explotar

Etapa II. Planificación conceptual y detallada del cierre sostenible

Etapa III. Revisión y aprobación por la autoridad minera

Etapa IV. Ejecución del plan de cierre

Etapa V. Seguimiento y control del proceso de cierre.

I. Diagnóstico según tipo de material a explotar

Para realizar el diagnóstico, según el tipo de material, hay que considerar cuatro de los criterios determinados, con sus indicadores, para lograr una descripción detallada de la actividad minera realizada. Para esto, es necesario tomar como base la Ley 76 y su reglamento; el proyecto de explotación, capítulo 09 del manual de gestión empresarial (Sistema de Gestión Ambiental -SGA) y las siguientes investigaciones científicas (Aduvire-Pataca 1999; Aduvire & Aduvire 2008; Laurence 2001, 2006).

El desarrollo de esta etapa metodológica (Figura 3) comienza con el establecimiento del tratamiento legal del cierre de canteras y termina con la evaluación del riesgo del cierre, sub-etapas fundamentadas en el desarrollo íntegro de la metodología para lograr un buen plan de cierre de canteras. Esta etapa se lleva a cabo en fase de reconocimiento del ciclo de vida de la cantera.

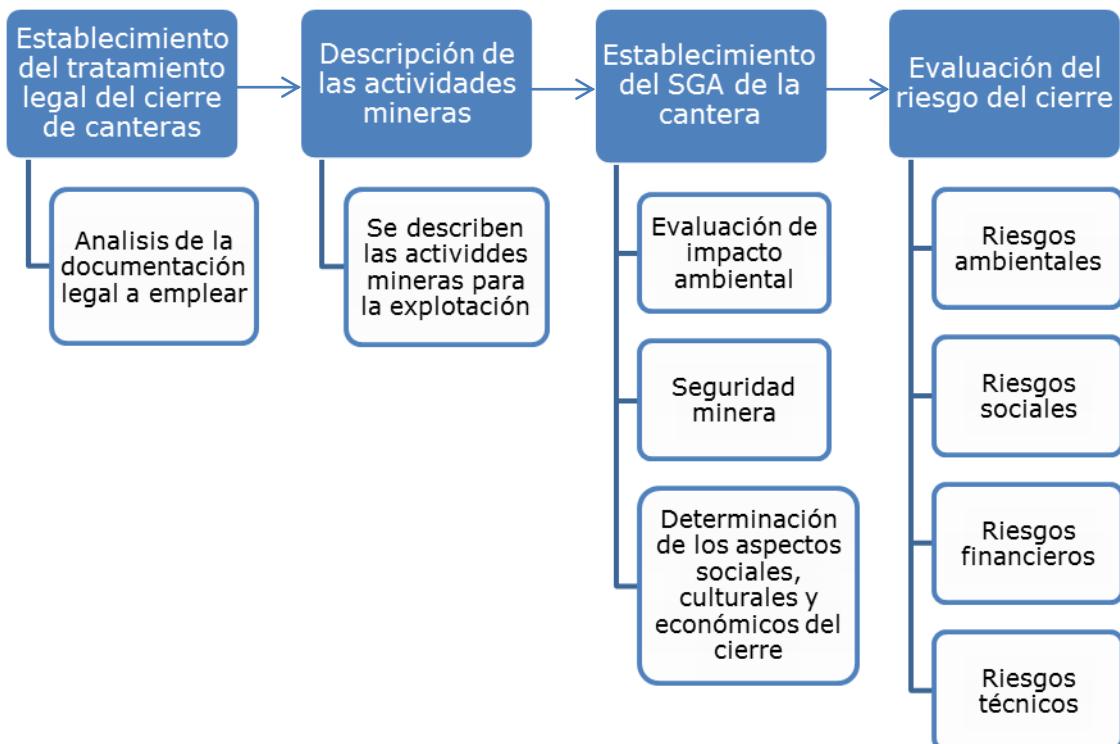


Figura 3. Diagrama representativo de la etapa 1 de la metodología del cierre de canteras.

II. Planificación conceptual y detallada del cierre sostenible

En la segunda etapa de la metodología se consideran cuatro sub-etapas (Figura 4) y el desarrollo de los siete criterios restantes con su sistema de indicadores que complementarán la realización del plan de cierre conceptual de cantera y permitirá la actualización de dicho plan en la medida que avance su ciclo de vida.

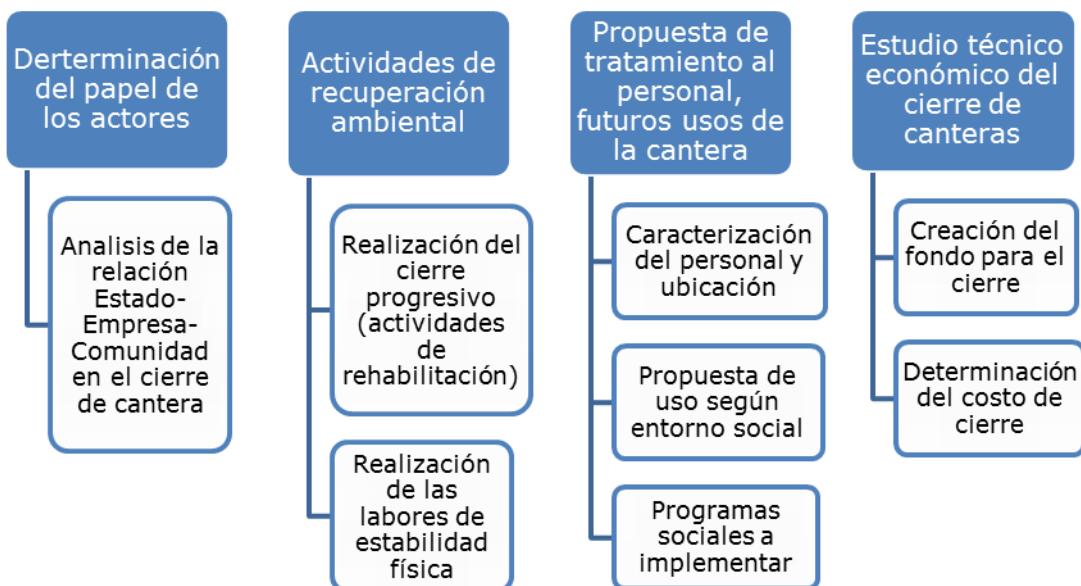


Figura 4. Diagrama representativo de la etapa 2 de la metodología del cierre de canteras.

Esta etapa se cumple relacionando el proyecto de explotación de la cantera con el plan de cierre de la misma, y considerando la participación de los grupos de interés en el cierre de cantera desde el inicio del ciclo de vida de la misma, como se muestra en las Figuras 5 y 6.

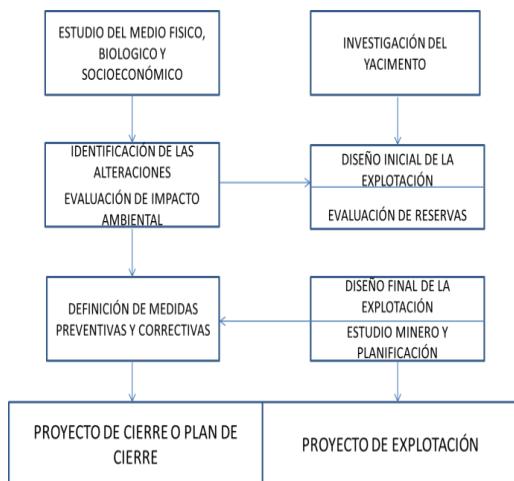


Figura 5. Interacción entre el plan de cierre y el proyecto de explotación de cantera. *Adaptado de Aduvire (2001)*

La planificación efectiva del cierre implica aunar los puntos de vista, inquietudes, aspiraciones, esfuerzos y conocimientos de diversos grupos de interés, tanto internos como externos, para alcanzar resultados que sean beneficiosos para la empresa en funcionamiento y la comunidad que la alberga (ICMM 2008). Permite la toma de decisiones plenamente



Figura 6. Planificación del cierre integral de cantera. *Adaptado de ICMM (2008)*

informadas, durante el ciclo de vida de la cantera y a través de la autonomía que da la nueva concepción del Modelo Económico Cubano a los gobiernos locales.

En estas sub-etapas se plantean acciones de restauración y rehabilitación de áreas dañadas por la minería, para el cierre final, a través de las medidas de restauración y rehabilitación del entorno dañado por la actividad en cantera y que garanticen la estabilidad física y biológica cuando ocurra el cierre final de la cantera. También se describen las actividades a realizar en las distintas fases del cierre y se determinará el uso futuro de las instalaciones y espacios. La propuesta de tratamiento al personal, de futuros usos de la cantera y programas sociales a implementar (Montero-Peña & Salazar-Pérez 2011; Salazar-Pérez & Montero-Peña 2014) y el estudio técnico económico del cierre, fundamentada en las investigaciones realizadas (Guerrero 2005; Guerrero *et al.* 2014; Barnes, Hawthorne & Willians 1999; Wilson, Milne & Dyhr 2003; Franco-Concha, Angulo & Cáceres 2011), garantizarán la factibilidad de implementación del plan de cierre de cantera.

III. Revisión y aprobación por la autoridad minera

Esta etapa se complementa por la autoridad minera durante las fases de investigación detallada y la de diseño y planificación de la explotación del ciclo de vida de la cantera. Si en el proceso de revisión se detectan incongruencias y errores la Oficina Nacional de Recursos Minerales (ONRM), como autoridad minera, hace sus críticas y entrega nuevamente al concesionario para que haga los arreglos pertinentes del plan de cierre. En las inspecciones que se realicen al yacimiento por parte de la ONRM se chequea el cumplimiento de las medidas de cierre aprobadas en el plan.

IV. Ejecución del plan de cierre

Se acomete en la medida que avance el ciclo de vida de la cantera y su ejecución comienza desde la etapa de construcción hasta el cierre definitivo de la cantera. En la medida que nuevas circunstancias aparezcan, el plan de cierre se actualizará para lograr los objetivos propuestos.

V. Seguimiento y control del proceso de cierre

La última etapa de la metodología propuesta (Figura 7) garantizará el chequeo del cumplimiento de las acciones realizadas en las etapas precedentes y de los objetivos del cierre planteados en el plan conceptual de este. Las acciones a realizar son:

1. Monitoreo al tratamiento dado al personal y a la comunidad
2. Monitoreo a las labores de rehabilitación y labores de estabilidad física
3. Elaboración y discusión del informe y propuestas de medidas complementarias de postcierre con los actores.

Con el establecimiento de estas tres sub-etapas se logra el monitoreo del tratamiento laboral y salarial dado al personal técnico y profesional que laboraba en las canteras, así como de la estabilidad física, química y biológica de la cantera; monitoreo de la calidad de las aguas y control estructural y mantención de obras.

3. CONCLUSIONES

- Considerando las características esenciales del MEC, las dimensiones de la sostenibilidad y a partir de la utilización del método Delphi con el criterio de los expertos se establecieron 12 criterios que inciden directamente en el cierre sostenible de canteras. Estos logran la integración de los actores fundamentales del cierre (comunidad-empresa-gobierno) en las diferentes etapas del ciclo de vida de la cantera y conciben, a partir del tratamiento legal a la actividad de cierre de canteras, las acciones fundamentales para disminuir los impactos ambientales, socio-económicos y culturales que provoca el cierre de una cantera en una región determinada.
- Se diseñó una metodología con un enfoque sistémico e integral que consta de cinco etapas y permite ejecutar el cierre de canteras de manera sostenible, además, representa una contribución para alcanzar uniformidad en la planificación y el diseño del cierre minero en yacimientos de materiales para la construcción cubanos. Esta metodología constituye una herramienta de trabajo para ONRM con el fin de proporcionar a los concesionarios una guía metodológica para efectuar el cierre de canteras a tono con los lineamientos de la política económica y social del partido y el Programa Nacional de Desarrollo hasta el 2030 en el contexto del MEC. Actualmente, es la metodología que rige el cierre de la cantera San José en la provincia de Mayabeque.

4. REFERENCIAS

- ADUVIRE, H. & ADUVIRE, O. 2008: Cierre y abandono de labores mineras para la protección de la salud y el medio ambiente. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/58578384/19-CIERRE-DE-MINAS>
- ADUVIRE-PATACA, H. 1999: *Metodología para la clausura y abandono de minas y evaluación del riesgo e impacto ambiental*. Carlos López Jimeno (Director). Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 200 p.
- BARNES, H.; HAWTHORNE, T. & WILLIANS, D. 1999: Estimation site closure costs-A critical tool for reclamation planning. *Minerals Council of Australia Environmental Workshop* (Vol. 83).
- DECRETO LEY No. 222. Reglamento de la Ley de Minas. 1997: Gaceta Oficial de la República de Cuba, La Habana, Cuba. Disponible en: <http://www.medioambiente.cu/legislacion/D-222.htm>
- FALERO-SALGADO, R. A. 2011: Consideraciones y propuesta de formato para la elaboración de planes de cierre de minas. En: IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, (GEOCIENCIAS'2011). Memorias [CD-ROM]. La Habana, Cuba, 19-23 marzo.
- FRANCO-CONCHA, P. P.; ANGULO, M. E. & CÁCERES, R. 2011: Tratamiento contable de la provisión por cierre de minas. *Journal of Business* 3(1): 25-43.
- FUENTES-SARDIÑAS, R. I. & HERNÁNDEZ-ÁLVAREZ, A. 2014: Procedimiento para la rehabilitación de canteras abandonadas de materiales para la construcción. *Anuario de la Sociedad Cubana de Geología* 2: 117-129. Disponible en: http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2015_AnuarioSCG2_FUENTES_YHERNANDEZ.pdf
- GUERRERO, D. 2005: Sistema de indicadores mineros para la explotación sostenible de los recursos minerales. *Minería & Geología* 21(2): 55.
- GUERRERO-ALMEIDA, D.; CHACÓN-PÉREZ, Y.; FONSECA-HERNÁNDEZ, D. & COURTPOTILLÉ, M. 2014: Metodología para la ejecución de un cierre de minas sustentable. *Minería & Geología* 30(3): 85-103.
- HERNÁNDEZ, A. 2013: Impacto ambiental sobre las aguas subterráneas de la explotación de canteras para la construcción. En: Taller Sociedad Económica Amigos del País. La Habana, Cuba. 38 p.
- ICMM. 2008: Planificación del Cierre Integrado de Minas: Equipo de Herramientas. Consulta: 24 mayo 2016. Disponible en: www.icmm.com
- JONES, H. 2008: Closure objectives, guidelines and actual outcomes. In: Third International Seminar on Mine Closure. Australian Centre for Geomechanics, Perth, p. 245-254.

- KABIR, S. Z.; RABBI, F.; CHOWDHURY, M. B. & AKBAR, D. 2015: A review of mine closure planning and practice in Canada and Australia. *World Review of Business Research* 5(3): 140-159.
- LAURENCE, D. 2001: Classification of risk factors associated with mine closure. *Mineral Resources Engineering* 10(03): 315-331.
- LAURENCE, D. 2006: Optimisation of the mine closure process. *Journal of Cleaner Production* 14(3-4): 285-298.
- LEGRÁ-LOBAINA, A. A. & SILVA-DIÉGUEZ, O. 2015: *Elementos teóricos y prácticos de la investigación científico-tecnológica*. Félix Varela, La Habana, 568 p.
- LEY No. 76, LEY DE MINAS. 1995: Gaceta Oficial de la República de Cuba, La Habana, Cuba. Disponible en: <http://www.medioambiente.cu/legislacion/L-76.htm>
- LEY No. 81. LEY DE MEDIO AMBIENTE. 1997: Gaceta Oficial de la República de Cuba, La Habana, Cuba. Disponible en: <http://www.medioambiente.cu/legislacion/L-81.htm>
- LÓPEZ, J.; ROCAMORA, E.; JAÍMEZ, E.; VALDEZ, G. & CAMPOS, M. 2012: Rehabilitación ambiental en zonas degradadas por la minería. *Revista Informativa Nuestro Pórtico de Calvista* 15(agosto): 10-11. Disponible en: <http://www.boletininformativonuestroporitico.com/>
- LÓPEZ-KRAMER, J. M.; JAIME-SALGADO, E.; GUERRA-OLIVIA, M. & BORRERO-OJEDA, N. M. 2015: Caracterización medioambiental de 12 canteras en explotación para materiales de construcción ubicadas en las provincias de La Habana, Artemisa y Mayabeque. *Ciencias de la Tierra y el Espacio* 16(1): 40-52.
- MONTERO-MATOS, J. & OTAÑO-NOGEL, J. 2012: Impacto socioeconómico y ambiental de la creación de un procedimiento para efectuar el cierre de canteras de materiales de construcción en Cuba. *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*, noviembre. Disponible en: <http://caribeña.eumed.net/impacto-socioeconomico-y-ambiental-de-la-creacion-de-un-procedimiento-para-efectuar-el-cierre-de-canteras-de-materiales-de-construccion-en-cuba/>
- MONTERO-MATOS, J. OTAÑO-NOGEL, J. & GUERRERO-ALMEIDA, D. 2016: Procedimiento para el cierre de canteras de materiales para construcción en Cuba. *Minería & Geología* 32(1): 106-120.
- MONTERO-PEÑA, J. M. & SALAZAR-PÉREZ, Y. 2011: La reinserción laboral tras el cierre de minas: una vía para lograr el desarrollo sustentable en la minería. *Minería & Geología* 27(4): 64-87.

- MONTES DE OCA-RISCO, A. & ULLOA-CARCASSÉS, M. 2013: Recuperación de áreas dañadas por la minería en la cantera Los Guaos, Santiago de Cuba, Cuba. *Luna Azul* (37): 74-78.
- OYARZÚN-MUÑOZ, J. 2008: Curso de Planes de cierre de minas. Universidad La Serena. Chile.
- PAREDES, A. 2003: *Evolución de las Prácticas Internacionales para el Planeamiento del Cierre de Minas*. Golder Associates Ltd, Perú.
- PARTIDO COMUNISTA DE CUBA (PCC). 2011: Lineamientos de la política económica y social del Partido y la Revolución. En: VI Congreso del PCC. La Habana.
- PARTIDO COMUNISTA DE CUBA (PCC). 2016: Conceptualización del Modelo económico Cubano y Programa Nacional de Desarrollo hasta el 2030: propuesta de visión de la nación, ejes y sectores estratégicos. Disponible en: www.granma.cu/file/pdf.
- PONCE-SEOANE, N. & DÍAZ-COMESAÑAS, J. 2013: Impactos y pasivos ambientales de la minería a cielo abierto en Cuba y propuestas de soluciones. Taller. IGP, Universidad de La Habana. Disponible en: <http://www.iga.cu/noticias/taller-iga-uh.html>. 20 p.
- RODRÍGUEZ, R. 2011: Los desafíos a que se enfrenta el cierre de minas en el siglo XXI. IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, (GEOCIENCIAS'2011). Memorias [CD-ROM], La Habana, Cuba, 19-23 marzo.
- SALAZAR-PÉREZ, Y. & MONTERO-PEÑA, J. M. 2014: La planificación del cierre de minas como parte de la sustentabilidad en la minería. *Observatorio de la Economía Latinoamericana* (199). Disponible en: <https://ideas.repec.org/a/erv/observ/y2014i19905.html>
- SANTANA-MAURELL, O. & SÁNCHEZ-CABRERA, M. 2001: El cierre de minas y el desarrollo sostenible. En: IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, (GEOCIENCIAS'2011). Memorias [CD-ROM], La Habana, Cuba, 19-23 marzo.
- VILLAS-BÔAS, R. & BARRETO, M. L. 2000: *Cierre de Minas: experiencias en Iberoamérica*. CYTED/MAAC/UNIDO, Rio de Janeiro, 581 p.
- VILLAS-BÔAS, R. & BEINHOFF, C. 2002: *Indicadores de Sostenibilidad para la Industria Extractiva Minera*. CNPq/CYTED, Rio de Janeiro, 564 p.
- WILSON, T. E.; MILNE, C. & DYHR, T. M. 2003: Cost Trends-Mine Closure. In: SME Annual Meeting. Cincinnati, Ohio, Feb. 24-26.

Julio Montero-Matos, jmmatos@ismm.edu.cu

Especialista en Gestión Ambiental. Profesor Auxiliar. Departamento de Minas.
Facultad de Geología y Minería. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Holguín, Cuba.

Oscar Jaime Restrepo-Baena, ojrestre@unal.edu.co

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Departamento de Materiales y Minerales
Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Medellín, Colombia
Instituto de Minerales (CIMEX)

José Otaño-Nogel, joseot@ismm.edu.cu

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Departamento de Minas.
Facultad de Geología y Minería. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Holguín, Cuba.

Caracterización estructural del macizo rocoso de la mina subterránea Oro Descanso

Oluwaseyi Adeoluwa-Olajesu
Rafael Noa-Monjes
Gilberto Quevedo-Sotolongo

Resumen

En el macizo rocoso donde se enclava la mina subterránea Oro Descanso se realizó una valoración de las propiedades físico-mecánicas de las rocas, del agrietamiento y la bloquicidad, con el fin de proponer medidas de laboreo seguro para las excavaciones mineras subterráneas empleando métodos empíricos apropiados. A partir de la evaluación realizada se concluyó que el macizo está compuesto por zonas de rocas de distinta calidad: buena, regular y mala. Se propone para la zona de calidad buena laborear excavaciones con avance completo, de longitud libre 1,0-1,5 m, empleando en la corona el soporte de anclas cementado de diámetro 20 mm, longitud 3 m y espaciado 2,5 m y aplicar hormigón lanzado 50 mm de grosor. Para la zona de calidad mala y regular se sugiere el laboreo en avance escalonado, de longitud libre de 1-3 m y después de cada voladura instalar, en la corona, anclas cementadas de diámetro 20 mm, longitud 4-5 m y espaciado 1-2 m, colocando en los lados malla metálica, con hormigón lanzado de 50-150 mm de grosor.

Palabras clave: minería subterránea; laboreo minero; oro; macizo rocoso.

Structural characterization of the rock mass of the underground mine Oro Descanso

Abstract

In the rocky massif where the Oro Descanso underground mine is located, an assessment was made of the physical-mechanical properties of rocks, cracking and blocking, in order to propose safe tillage measures for underground mining excavations using appropriate empirical methods. From the evaluation made it was concluded that the massif is composed of areas of rocks of different quality: good, fair and poor. It is proposed for the area of good quality to work excavations with complete advance, of free length 1.0-1.5 m, using in the crown the support of cemented anchors of diameter 20 mm, length 3 m and spaced 2.5 m and apply concrete released 50 mm thick. For the zone of bad and regular quality, it is suggested to work in stepwise progression, of free length of 1-3 m and after each blasting, to install in the crown, cemented anchors of diameter 20 mm, length 4-5 m and spacing 1-2 m, placing on the sides metallic mesh, with concrete cast 50-150 mm thick.

Keywords: underground mining; mining tillage; gold; rock mass.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se realizó en el municipio de Placetas, provincia de Villa Clara, en el macizo rocoso donde se ubica la mina subterránea Oro Descanso, perteneciente a la empresa Geominera Centro.

Una cuestión importante en la construcción de una excavación subterránea es definir las características y el comportamiento mecánico-estructural del macizo (Zhang 2016), aspecto este que tiene una marcada incidencia en el laboreo, sostenimiento y explotación de estas obras. En muchos casos estas se realizan sin tener en cuenta una fundamentación científica del comportamiento del macizo rocoso, lo que trae como consecuencia el encarecimiento de la obra (Noa-Monjes 2006).

El método empírico de clasificación de los macizos rocosos surgió desde la década del 40 del siglo XX y muchos investigadores lo han utilizado para proponer soluciones a diferentes problemas en minas y túneles (Bieniawski 1989, 2011). Al efecto los métodos empleados son los siguientes: método de Deere *et al.* (1967), basado en el RQD; método de Bieniawski (1989), basado en el RMR y el de Barton, Lien & Lunde (1974), basado en un índice Q. Todos ellos representan un gran número de experiencias prácticas sobre casos históricos que proporcionan un criterio técnico veraz y actual.

En Cuba el método empírico ha sido utilizado por Cartaya & Blanco (2000) para caracterizar varias minas subterráneas de la parte oriental; Noa-Monjes (2006) lo aplicó para elegir el método de arranque en la excavación subterránea y Diéguez-García, Otaño-Noguel & Sargentón-Romero (2014) lo utilizaron en el diseño de voladuras para excavaciones subterráneas.

Este estudio tiene el objetivo de aplicar los métodos empíricos de las clasificaciones ingenieriles para la caracterización del macizo donde se ubica la mina Oro Descanso y determinar así los parámetros para el diseño de las excavaciones.

1.1. Características geológicas del área de estudio

La zona de estudio de la mina Oro Descanso se encuentra en la estructura principal de sustrato plegado en la parte central de Cuba, de norte a sur. El depósito de Oro Descanso se localiza dentro de las rocas del complejo ofiolítico septentrional, las que están emplazadas de forma alóctona sobre las secuencias sedimentarias del margen continental y a su vez están sobre corridas por las vulcanitas del arco insular del Cretácico en su sección de Cuba central (Orestes *et al.* 2010). Las rocas serpentinitas masivas que componen el cuerpo encajante se caracterizan por la abundancia de

pequeños cuerpos, vetas y vetillas de gabro leucocrático, cuyas dimensiones oscilan entre los primeros metros hasta decenas de metros.

La zona mineral está vinculada a una zona tectónica conservada dentro de la cuña de serpentinita masiva y está afectada por varios sistemas de fallas y fracturas transversales con poco desarrollo por su longitud, las que no provocan desplazamiento por más de 0,2 m; al parecer son sistemas de fallas transcurrentes. De dichas fallas el sistema más antiguo tiene un azimut de buzamiento 250°–285°, con ángulo de 65° a 90°, al parecer pre-mineral; el sistema más joven parece ser el que tiene un azimut de buzamiento de 310°–330°, el cual tiene una componente rotatoria, lo que afectó el buzamiento general de la zona mineral (Orestes *et al.* 2010; Noa-Monjes, Adeoluwa-Olajesu & Quevedo-Sotovongo 2017).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se determinaron los valores de las propiedades físico-mecánicas siguientes: peso volumétrico, humedad y la resistencia a la compresión uniaxial.

2.1. Valoración del agrietamiento y la bloquicidad

Teniendo en cuenta la génesis de las rocas se identificaron tres tipos principales: serpentinita masiva, serpentinita cizallada y gabro. Para la valoración del agrietamiento se tomaron estaciones de medición en todo el sector de la mina. Los tramos analizados tenían una longitud que estaba en correspondencia con las características geólogo-estructural del macizo y el comportamiento de las rocas; todos estos análisis se realizaron en condiciones *in-situ*.

En los tramos establecidos, con el propósito de obtener todos los parámetros que permitieran hacer una valoración de cada sector, se analizó el número de familias de grietas, los elementos de yacencia, distancia entre grietas, espacio de las grietas, continuidad, tipo de relleno, rugosidad, la existencia de grietas complementarias y afluencia de agua.

Para la evaluación de la bloquicidad y la determinación del volumen de los bloques se empleó el método de Palmstrom (1982), que se basa en los valores de J_v obtenidos en el campo, basado en la norma de ISRM (1982) y empleando las siguientes ecuaciones:

$$V_b = \beta J_v^{-3} \frac{1}{\operatorname{sen}\gamma_1 \cdot \operatorname{sen}\gamma_2 \cdot \operatorname{sen}\gamma_3} \quad (1)$$

Donde:

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ - Ángulos entre las familias de grietas (grados).

$$\beta = \frac{(a_2 + (a_2 \cdot a_3) + a_3)^3}{(a_2 \cdot a_3)^3} \quad (2)$$

$$a_2 = \frac{S_2}{S_1} \quad (3)$$

$$a_3 = \frac{S_3}{S_1} \quad (4)$$

S_1, S_2, S_3 - promedios del espaciamiento entre las familias de grietas 1, 2 y 3 (m)

J_v - número volumétrico de diaclasas (m^{-3}) y se calcula por la siguiente expresión (Cartaya & Blanco 2000).

$$J_v = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} \quad (5)$$

Se hizo el cálculo del volumen de los bloques empleando el programa Excel 2007.

2.2. Evaluación geomecánica del macizo rocoso

Fueron empleadas las clasificaciones que más se adaptan al comportamiento mecánico-estructural del mismo, entre las que tenemos: evaluación del índice de calidad (RQD), propuesto por Deere (1989); el sistema de clasificación geomecánica del macizo rocoso (RMR), expuesta por Bieniawski (1989) y el índice (Q), formulado por Barton, Lien & Lunde (1974).

Para determinar el RQD se emplea la ecuación (6) que aparece a continuación:

$$RQD = 100\% \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{L} \quad (6)$$

Donde:

x_i - valores del testigo mayor que 10 cm.

n - número del espacio interceptado por la longitud de medición.

El valor del índice RMR se determina considerando los siguientes parámetros: la resistencia a compresión de la roca intacta, el RQD de Deere (1989), la separación entre las grietas, su estado, su orientación y presencia de agua; para este fin se aplica la tabla de clasificación geomecánica de Bieniawski (1989).

La determinación de los valores de Q se realizó considerando la ecuación (7) de Barton, Lien & Lunde (1974):

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \left(\frac{J_w}{SRF} \right) \quad (7)$$

Donde:

J_n - índice de diaclasado que contempla la cuantía de juntas

Jr - índice que caracteriza la rugosidad y continuidad de las juntas

Ja - grado de alteración de las juntas y características del relleno

Jw - factor de afluencia de agua

SRF - factor que tiene en cuenta la influencia del estado tensional en el macizo rocoso.

El valor de Q está relacionado con los requisitos de soporte de la excavación y la dimensión equivalente de la excavación (DE), que se determina por la siguiente expresión:

$$DE = \frac{\text{CLARO O ALTURA (m)}}{\text{ESR}} \dots \quad (8)$$

Donde:

ESR - relación de soporte de la excavación que depende del uso de la excavación, según Barton, Lien & Lunde (1974), para este caso de estudio, ESR = 1,6)

Se determina el claro máximo sin soporte por la expresión (9)

$$\text{Claro máx} = 2\text{ESR} \cdot Q^{0.4} \dots \quad (9)$$

La longitud (L) del perno se determina por la siguiente fórmula:

$$L = \frac{2+0.15B}{\text{ESR}} \dots \quad (10)$$

Donde:

B - es la anchura de la excavación.

La relación entre Q y la presión permanente de soporte (P_{roof}) se da por la expresión (10)

$$P_{\text{roof}} = \frac{2.0}{J_r} Q^{-1/3} \dots \quad (11)$$

3. RESULTADOS

Los valores promedios críticos de las propiedades físico-mecánicos analizados estadísticamente por la distribución de Student aparecen en la Tabla 1. En esta tabla se muestran rocas intactas de serpentinita masiva, serpentinita cizallada y gabro, y los valores de su resistencia a compresión uniaxial, peso específico y humedad.

Tabla 1. Propiedades físico-mecánicas de las rocas

Propiedades	Serpentinita masiva		Serpentinita cizallada		Gabro	
	Promedio	Coef. de variación	Promedio	Coef. de variación	Promedio	Coef. de variación
Compresión Uniaxial (Mpa)	35,70	0,38	65,64	0,36	77,81	0,41
Peso V (g/cm³)	2,78	0,04	2,88	0,36	2,98	0,03
Humedad (%)	0,42	0,86	0,44	0,41	0,33	0,45

Durante el estudio del campo se observan juntas continuas, lisas y, en ocasiones, con espejos de fallas, también; las juntas con paredes alteradas con películas deslizantes, finas, producto de la alteración de la serpentinita, que se desintegra fácilmente. El flujo de agua es inferior a 5 l por minutos. Se observa un goteo ligero y humedad en las paredes, lo que permite determinar las distancias entre grietas, RQD, J_v , volumen de bloque y forma de bloque; sus valores se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores del volumen de los bloques

Obras	Galería			Piquera		
	SM	SC	G	SM	SC	G
Tipo de rocas	SM	SC	G	SM	SC	G
Distancia entre grietas	0,24	0,25	0,21	0,26	0,19	0,33
RQD	73,83	58,76	81,01	22,92	29,42	35,07
J_v	13,51	13,13	11,31	11,69	14,95	9,64
Volumen de bloque	$1,10 \times 10^{-2}$	$9,71 \times 10^{-4}$	$6,6 \times 10^{-3}$	$2,15 \times 10^{-2}$	$2,57 \times 10^{-3}$	$1,24 \times 10^{-2}$
Interpretación	Medio	Pequeño	Pequeño	Medio	Pequeño	Medio
Forma de bloque	Alargado Tabular	Cúbicos	Alargado Prismát.	Alargado-Tabular	Alargado-Tabular	Alargado-plano

SM: serpentinita masiva; serpentinita cizallada; G: gabro.

Con los valores de las orientaciones de las juntas obtenidos del campo se proyectan los polos sobre el plano horizontal del diagrama estereográfico de área, donde se muestran grandes círculos de fallas y del promedio de grietas (Figura 1) así como el diagrama de Rosette (Figura 2), que muestra el rumbo y la densidad de las orientaciones.

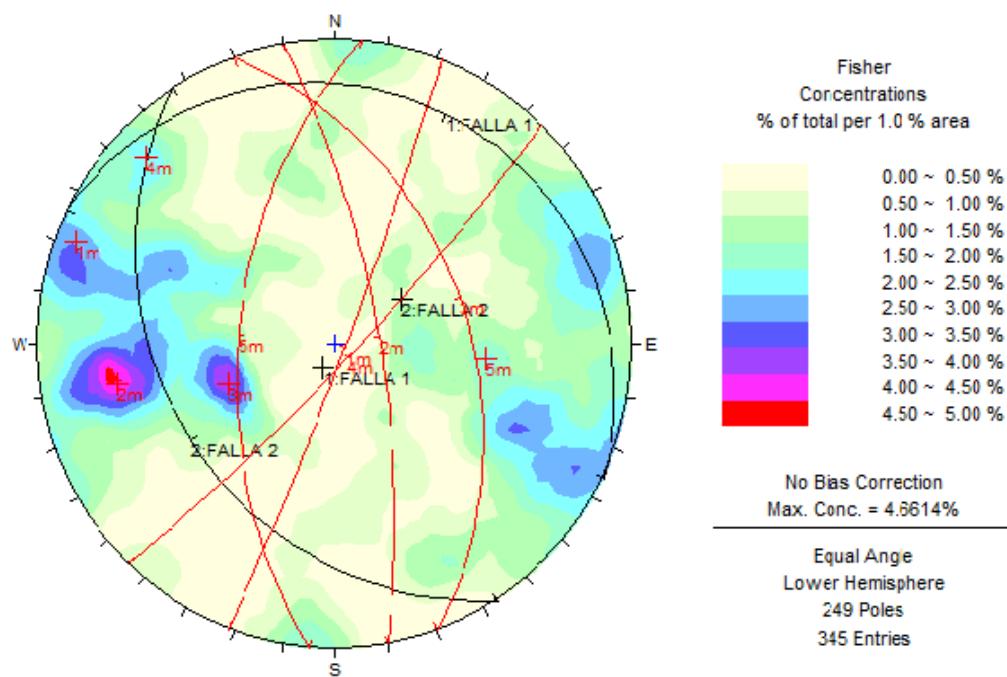


Figura 1. Diagrama de Schmidt para Oro Descanso.

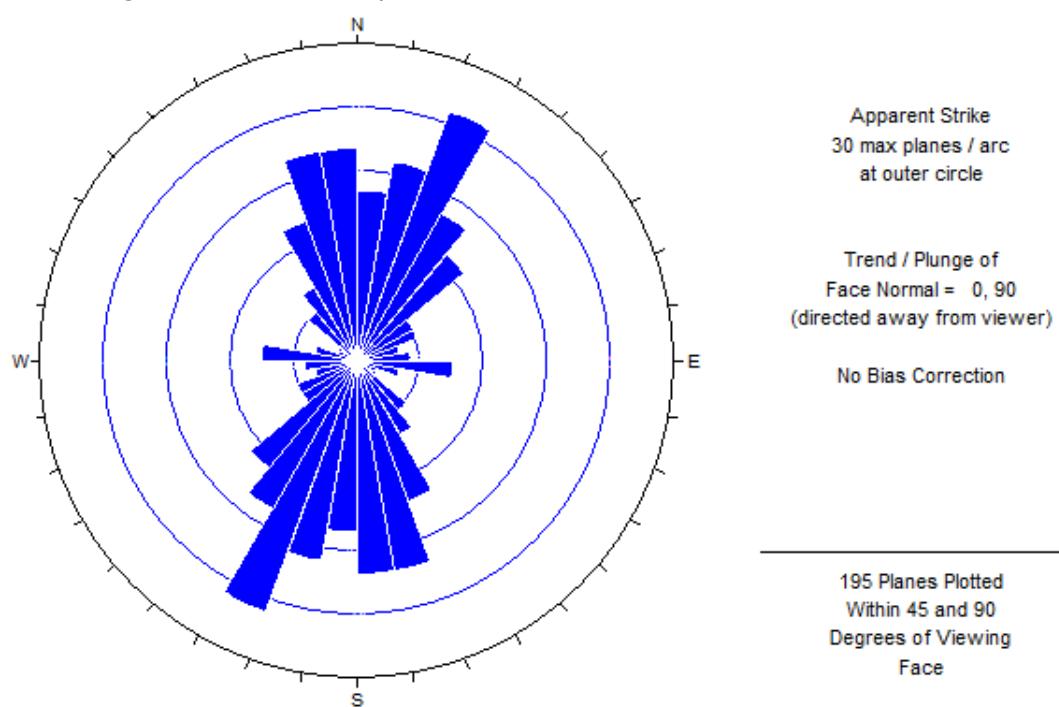


Figura 2. Diagrama de Roseta para Oro Descanso.

4. DISCUSIÓN

En la zona donde se ubica el yacimiento Oro Descanso se observan sistemas de fallas y grietas que son probablemente consecuencia de la alta actividad tectónica que se ha manifestado durante mucho tiempo en la región, siendo evidentes las variedades de litología y estructura.

Teniendo en cuenta los resultados que se muestran en los diagramas de grandes círculos y Roseta, donde se evalúa el agrietamiento que presenta el macizo, se observa en la Figura 1 los planos del promedio de juntas y planos de fallas presentes en el área de estudio, lo que representan las zonas de tensiones y de posible inseguridad que se puede poner de manifiesto al ubicar y diseñar las excavaciones subterráneas o realizar el diseños de la voladura. El diagrama de Roseta (Figura 2) muestra las orientaciones y la densidad de los planos de intersección con la superficie horizontal del círculo. Generalmente, se observa que el rumbo de las discontinuidades va del norte al sur.

Según los resultados que se muestran en la Tabla 2 el volumen de bloque va de pequeño a medio y la forma se comporta entre alargado, tabular, prismática, cúbica y plana; por tal razón ocurre la caída de pedazos de rocas, facilitando el desprendimiento y derrumbe de marcados sectores del macizo.

Dentro del sector analizado se encuentran rocas serpentinizadas de diferentes tipos, intercaladas de vetillas de gabro leucocrático. Por ende, se observan dos zonas principales: de pérdida de estabilidad por desprendimiento que ocurre por el agrietamiento, por los planos de clivaje y las fracturas que separa cierto volumen de rocas del macizo por su propio peso y cae, debido a que este peso es mayor que la resistencia al cortante de la roca; también se distinguen zonas estables sin necesidad del soporte, pero que en ella se perciben grietas de persistencia corta, la que es provocada por la deformación plástica del macizo.

En la Tabla 3 se observa que los valores de RQD determinados en la zona de galería son: 73,83 % para serpentinita masiva; 58,76 % para serpentinita cizallada y 81 % para gabro; según la valoración de Deere (1967) la galería contiene zona de rocas de calidad regular y buena. De acuerdo con esta valoración, el área donde se encuentran rocas serpentinita masiva y gabro no necesita soporte, pero el área de serpentinita cizallada requiere soporte de pernos aplicados a una distancia de 1,5 m a 1,8 m entre ellos. También en la zona de piquera que es más afectada por fallas los valores de RQD son 22,92 % para roca serpentinita; 29,42 % y 35 % de gabro; estos significan que la calidad de la roca en esta zona está entre muy pobre y pobre. En el área compuesta de roca serpentinita masiva se necesita soporte de cuadernos masivos o medios de acero circulares ubicados a un espacio de 0,6 a 0,9 m.

Tabla 3. Valores de RQD, RMR, Q y sus interpretaciones

Obras	Tipos de rocas	RQD	RMR	Q	INTERPRETACIÓN		
					RQD	RMR	Q
GALERÍA	SM	73,83	53,1	10,84	m	R	B
	SC	58,76	37,6	8,84	m	M	m
	G	81,01	55,8	11,80	B	R	B
PIQUERA	SM	22,92	44	1,36	M	R	M
	SC	29,42	59,4	1,74	M	R	M
	G	35,07	45,6	2,08	M	R	M

B: buena; R: regular; M: mala; m: media.

Debido a la limitaciones de RQD, de no considerar factores ingenierogeológicos más importantes del macizo y posible error en la medición basado en la inhabilidad de determinar la diferencia entre el agrietamiento natural y tecnológico, se necesita analizar el macizo con el criterio de RMR, con los que se obtuvieron los siguientes valores: en la zona de galería 53,1 % para la roca serpentinita masiva; 37,6 % para serpentinita cizallada y 55,8 % para el gábor y en la zona de píquería los valores de 44 % para serpentinita masiva; 59,4 % de serpentinita cizallada y 45 de gábor.

Según los valores de RMR se identifica el macizo en clases III y IV, de calidad regular y mala, con cohesión entre 200 kPa y 300 kPa, ángulo de fricción interna entre 25° y 35°, y de 100-200 kpa de cohesión y 15°-25° de ángulo de fricción, respectivamente. En la condición de clase III la excavación de 5 m de luz puede sostenerse por una semana sin soporte. La excavación se construye de forma escalonada con avance de 1,5-3 m desde la parte superior hacia el piso. Para su soporte se instala un sistema de pernos de 4 m de longitud, espaciado de 1,5-2 m en techo y las partes, con malla metálica en el techo. Además, se puede optar para el soporte la instalación de hormigón prefabricado de 50-100 mm de espesor por el techo y 30 mm por los lados.

En el área de clase IV la luz de 2,5 m puede auto-sostenerse por 10 horas, se excava de forma escalonada con un avance de 1,0-1,5 m, se instala el soporte de forma concurrente a distancia de 10 m del frente, en la corona se emplean pernos sistemáticos de longitud de 4-5 m, espaciados de 1-1,5 m y en la paredes se usa malla metálica. También se puede soportar la corona con hormigón lanzado, con un espesor 100-150 mm y paredes 100 mm.

Según Barton, Lien & Lunde (1974), los valores de Q (Tabla 4) en la zona de galería, las rocas formadas por serpentinita masiva y serpentinita cizallada, son de calidad regular y la de gabro de buena calidad. Se propone para esta zona un soporte de pernos sistemático de longitud de 1-1,5 m, cementado sin tensión y reforzado con concreto 2,3 cm de espesor; mientras que las rocas en la zona de píquería son de mala calidad y se propone soporte de pernos sistemático cementado de longitud 1 m, sin tensión, con 2,5-5 cm de concreto reforzado con malla.

Tabla 4. Determinación del tipo de soporte por rango de valores de Q y RQD

Obras	Parámetros de cálculo						
	Q	RQD	Jr/Jn	Luz/ES R (m)	P ^b (kg/cm ²)	Tipo de soporte	Longitud de perno l, (m)
GALERÍA	9,84- 10,80	58,76- 81,01	0,33	1,25	0,17	Pernos sistemático cementado de longitud 1-1,5 m, sin tensión más 2,3 cm de concreto,	1,44
PIQUERA	1,36- 2,08	22,92- 35,07	0,33	1,25	0,24	Pernos sistemático cementado de longitud 1 m, sin tensión más 2,5-5 cm de concreto reforzado con malla	1,40

5. CONCLUSIONES

- Con la aplicación de las clasificaciones geomecánicas, basadas en el RQD, el RMR y la Q, y según la norma de la Sociedad Internacional de la Mecánica de Roca (ISRM 1982), se obtiene que existen tres zonas de rocas de calidad mala, regular y buena. De estas se deriva que en la zona de rocas de buena calidad se laboren las excavaciones con avance completo, de longitud libre 1-1,5 m; empleando en la corona el soporte de anclas cementado de diámetro 20 mm, longitud 3 m y espaciado 2,5 m y se aplica hormigón lanzado de grosor 50 mm. Para la zona de calidad mala y regular que se laboren las excavaciones en avance escalonada de longitud libre de 1-3 m y después de cada voladura instalar en la corona anclas cementado de diámetro 20 mm, longitud 4-5 m y

espaciado 1-2 m y en los lados malla metálica, con hormigón lanzado del grosor 50-150 mm.

- En este estudio se observa que la dirección de las discontinuidades es generalmente de norte a sur, por lo que hay que prever la dirección de laboreo de las excavaciones.

6. REFERENCIAS

- BARTON, N.; LIEN, R. & LUNDE, J. 1974: Engineering Classification of Rock Mass for the Design of Tunnel Support. NGI Publication 106, Oslo. *Rock Mechanics* 6(4): 189-236.
- BIENIAWSKI, Z. T. 1989: *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering*. John Wiley & Sons.
- BIENIAWSKI, Z. T. 2011: Errores en la aplicación de las clasificaciones geomecánicas y su corrección. En: Conferencia magistral Adif-Geocontrol (Vol. 35).
- CARTAYA, P. M. & BLANCO, R. T. 2000: Caracterización geomecánica de los macizos rocosos en minas subterráneas de la región oriental del país. *Minería & Geología* 17(1): 66-74.
- DEERE, D. U. 1989: Rock Quality Designation (RQD) after Twenty Years. U.S. Army Corps of Engineers Contract Report GL-89-1, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- DEERE, D. U.; HENDRON, A. J.; PATTON, F. D. & CORDING, E. J. 1967: Design of Surface and Near Surface Construction in Rock. In: 8th U. S. Symposium Rock Mechanics AIME. New York, p. 237-302.
- DIÉGUEZ-GARCÍA, Y.; OTAÑO-NOGUEL, J. & SARGENTÓN-ROMERO, G. 2014: Diseño de voladuras de contorno en túneles. *Minería & Geología* 30(3): 49-66
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (ISRM) 1982: Suggested Methods: Rock Characterization, Testing and Monitoring. E. T. Brown, Pergamon, London, 211 p.
- NOA-MONJES, R. R. 2006: Indicaciones metodológicas para la elección del método de arranque de las rocas durante el laboreo de excavaciones subterráneas horizontales de pequeña y mediana sección en Cuba oriental. *Minería & Geología* 22(4): 50 p.
- NOA-MONJES, R. R.; ADEOLUWA-OLAJESU, O. & QUEVEDO-SOTOVONGO, G. 2017: Caracterización ingeniera del macizo de la mina subterránea Oro Descanso. En: VII Convención de Ciencias de la Tierra: VII Congreso de Minería (MINERÍA, 2017). La Habana, Cuba, 3-7 abril.
- ORESTES, R. L.; RENÉ, R. S.; SATURNINO, G. L. & GERARDO, M. C. 2010: Resumen y evaluación crítica de los trabajos anteriores. En: Ministerio

de la Industria Básica Grupo Empresarial Geominsal Empresa Geominera del Centro. Villa Clara, Cuba, 78 p.

PALMSTROM, A. 1982: The volumetric joint count -a useful and simple measure of the degree of rock jointing. In: 41st International Congress. Assoc. Eng. Geol. Delphi 5: 221-228.

ZHANG, L. 2016: *Engineering properties of rocks*. Butterworth-Heinemann, United Kingdom.

Oluwaseyi Adeoluwa-Olajesu, aoluwaseyi@ismm.edu.cu
Ingeniero de Minas. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba.

Rafael Noa-Monjes, rnoam@ismm.edu.cu
Doctor en Ciencias Técnicas. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba.

Gilberto Quevedo-Sotolongo, quevedo@uclv.edu.cu
Doctor en Ciencias. Facultad de Construcciones, Departamento de Ingeniería Civil.
Universidad Central de las Villas, Cuba.

Evaluación del acero AISI 420 en estado de fundición para fabricación de impelentes de turboaereadores

Miguel Ángel Muñiz-Nueva
Francisco Luis Hernández-Arias
Isnel Rodríguez-González
Julio Cesar Urbina-Herrán

Resumen

En las empresas productoras de níquel con tecnología Caron el desgaste en los impelentes de los turboaereadores provoca el acortamiento de la vida útil de estos equipos. El objetivo del presente trabajo es evaluar, en condiciones de abrasividad del mineral reducido sometido a lixiviación en el proceso Caron, la resistencia al desgaste del acero de alta resistencia AISI 420, con el fin de utilizarlo como sustituto del acero X27H20 (ASTM 314), del cual se fabrican actualmente estos impelentes. Para conocer la resistencia a la abrasión, en estado de fundición, y comparar los resultados se seleccionaron muestras de acero AISI 420 a las que se le aplicó un tratamiento térmico de temple y revenido, luego se sometieron a ensayos de desgaste, con el empleo del método gravimétrico, con tiempos de permanencia de una hora, previa toma del peso. Los resultados muestran que aunque existe una ligera diferencia entre la dureza del material en estado de fundición y con tratamiento térmico, la pérdida de peso presenta valores ínfimos, por lo que se llega a la conclusión de que el material propuesto y evaluado cumple con los requisitos técnicos establecidos, y exhibe un comportamiento conforme con las exigencias del fabricante.

Palabras clave: desgaste abrasivo; turboaereadores; impelentes; tecnología Caron; acero AISI 420; comportamiento microestructural.

Evaluation of the steel AISI 420 in foundry state for the production of agitator's impeller

Abstract

In companies producing nickel with Caron technology, the wear and tear on the impellers of the turbo-rods causes the shortening of the life of these equipment. The objective of the present work is to evaluate, under abrasion conditions of the reduced ore subjected to leaching in the Caron process, the wear resistance of AISI 420 high strength steel, in order to use it as a substitute for steel X27H20 (ASTM 314), of which these impellers are currently manufactured. To determine the abrasion resistance, in the melt state, and to compare the results, samples of AISI 420 steel were subjected to a tempering and tempering heat treatment, then subjected to wear tests, using the gravimetric method, with times of permanence of one hour, previous taking of the weight. The results show that although there is a slight difference between the hardness of the material in the melt state and with heat treatment, the weight loss has very low values, so that it is concluded that the material proposed and evaluated meets the requirements established, and exhibits behavior consistent with the manufacturer's requirements.

Keywords: abrasive wear; agitators; impellers; Caron technology; AISI 420 steel; microstructural behavior.

1. INTRODUCCIÓN

La industria cubana del níquel es uno de los pilares en los que se sustenta el desarrollo económico-industrial del país, inmerso en el perfeccionamiento empresarial como vía para lograr competitividad a nivel mundial; como proceso integral esto no puede estar ajeno al progreso de su tecnología, a partir de la aplicación consecuente de los avances de la ciencia y la técnica.

En el noreste de la provincia de Holguín se sitúan las dos empresas productoras de níquel y cobalto, una de las cuales emplea el proceso de lixiviación "carbonato amoniacial" conocido como Caron. Debido al fenómeno de abrasión en el área de lixiviación los impelentes de los turboaereadores sufren un desgaste que afecta la eficiencia de esta área, y por consiguiente, la capacidad productiva de la planta y de la empresa, con las correspondientes consecuencias económicas y productivas.

Los impelentes son elementos de gran tamaño y peso, con diámetro de 1 225 mm; se fabrican en este caso de acero X27H20 (ASTM 314) y operan bajo las siguientes condiciones:

1. Cargas de flexión provocadas por el movimiento de rotación, al remover la mezcla mecánica, y por el peso de la carga y el del elemento.
2. La mezcla mecánica está compuesta por una gran variedad de partículas abrasivas que provocan el desgaste prematuro de las paletas de los impelentes.
3. Temperaturas de hasta 54 °C producto de las reacciones químicas que tienen lugar en los turboaereadores.
4. Inyección de gran volumen de aire a presión que al combinarse con las partículas en suspensión de la mezcla provocan el desgaste (por erosión y abrasión) de los elementos.
5. Tiempos de operación prolongados bajo un régimen continuo de producción en las condiciones anteriormente expuestas.

Estas circunstancias demandan de un material con gran resistencia a la flexión, al desgaste y buena estabilidad química ante el medio (Ganguly & Choudki 2007). Algunos estudios han estado enfocados a resolver problemas en estos equipos y a evaluar otros materiales resistentes a la abrasión (Velázquez 2002; Caraballo 2007). El objetivo del presente es evaluar la resistencia al desgaste del acero AISI 420, en condiciones de abrasividad del mineral reducido, sometido a lixiviación en el proceso con tecnología Caron.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Muestras de acero AISI 420 se sometieron a ensayos de desgaste y de valoración de su resistencia a la abrasión en estado de fundición, unas y otras con tratamiento térmico de temple y revenido para poder comparar el resultado obtenido. La fusión se realizó en un horno de inducción ICHT-6 con revestimiento ácido de una tonelada de capacidad. El análisis químico se realizó por medio de un espectrómetro de masa Espectrolab 230, con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón.

Se seleccionaron tres muestras replicadas cada una para tratamiento térmico de temple en aceite y revenido bajo, de acuerdo con la norma SAE AMS – H 6875A (2006), que establece la temperatura de recocido entre 950 °C y 1 075 °C. En la Tabla 1 se muestran los parámetros de los tratamientos térmicos aplicados.

Tabla 1. Tratamientos térmicos aplicados a las muestras de acero AISI 420

Parámetros	Temple	Revenido
Temperatura de calentamiento (°C)	1 075	150
Tiempo de permanencia (min)	10	30
Medio de enfriamiento	Aceite	Aire tranquilo

En el enfriamiento, durante el temple, las probetas se agitaron intensamente para mejorar las condiciones de transferencia de calor al aceite y evitar que este se inflamara por el contacto con la pieza caliente; además de evitar la formación de zonas estancadas de temperatura, lo que puede conducir a la obtención de una dureza irregular en toda la superficie templada (Rodríguez 2013).

Se tomaron otras tres muestras más, en estado de fundición, con sus respectivas réplicas para someterlas a ensayos de dureza y análisis metalográfico, según la norma ASTM *International* E18-07 (2007). Se realizó la comprobación en tres puntos distintos de la pieza. Se efectuaron ensayos de dureza, según lo especificado por la norma ASTM E 92, y siguiendo las especificaciones de las normas NC 10-56:86 y ASTM E 384-89 para la evaluación de materiales metálicos. Se empleó un durómetro Rockwell Tokwel con penetrador de diamante en forma de cono, totalizándose tres mediciones en cada una de las muestras estudiadas.

El análisis microestructural se realizó siguiendo lo indicado por las normas NC 10-55:86, NC 10-56:86 y ASTM E 3-95, la que establece la forma de preparación de las probetas para la realización del ensayo. La microestructura resultante de la aleación tratada térmicamente y en estado de fundición se analizó empleando un microscopio óptico Olympus AX70,

con cámara fotográfica Sony (DXC-107/107P, 12 V CC) acoplada. Se emplearon combinaciones de objetivos y oculares para obtener magnificaciones de imágenes de 100 X a 1000 X. Se determinó, además, el tamaño del grano metálico según las normas NC 10-57:86 y ASTM E112, que describen los distintos métodos para la medición del tamaño del grano y, establecen la clasificación siguiente: procedimiento de comparación, planimétrico y de intersección.

Los ensayos de abrasión se realizaron aplicando el método gravimétrico (NC 04-79: 87 y ASTM: G 65-94), con tiempos de permanencia de una hora. El peso de las probetas se tomó utilizando una balanza digital Sartorius, con una precisión de 0,1 mg.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis químico de las muestras

La composición química de las muestras se tomó del promedio de tres análisis realizados en puntos diferentes, la que estuvo dentro del rango establecido para la aleación, como se muestra en la Tabla 2, según especificaciones técnicas de enero de 2007 y la composición real de la fundición en la Tabla 3.

Tabla 2. Composición química del acero AISI 420 (ASTM)

% C	% Cr	% Si	% Mn	% P	% S	Otros
0,43-0,50	12-14	≤ 1	≤ 1	≤ 0,03	≤ 0,03	0,8 Ni o Ti

Tabla 3. Composición química de las muestras

% C	% Cr	% Ni	% Si	% Mn	% P	% S
0,47	13,29	0,39	0,74	0,88	0,020	0,027

Como se puede apreciar, el porcentaje de carbono se encuentra en el rango establecido, lo que beneficia la obtención de un grano más fino y favorece, además, la dureza; el resto de los componentes se encuentran dentro de los rangos establecidos en las normas.

3.2. Comprobación de la dureza

La dureza de las muestras en estado de fundición y después de ser tratadas térmicamente fue de 53 HRC y 58 HRC, respectivamente. Estos valores de dureza son propicios para un buen comportamiento al desgaste, cuestión a corroborar en los ensayos de desgaste.

3.3. Análisis microestructural

Se observa una estructura dendrítica, típica de la microestructura del acero AISI 420 en estado de fundición. En la Figura 1 se muestra la micrografía

del mismo. El tamaño de grano en este caso es de 6 μm , el cual fue determinado según las normas NC10-57:86 y la ASTM E112, utilizando el método de comparación.



Figura 1. Microestructura del acero AISI 420 en estado de fundición (X 40).

Para el mismo material con tratamiento térmico (Figura 2, a y b) se revelan las franjas de fases secundarias en el borde de los granos, con una estructura martensítica en su interior, lo que caracteriza la resistencia al desgaste abrasivo, planteado también por Ganguly y Choudki (2007).

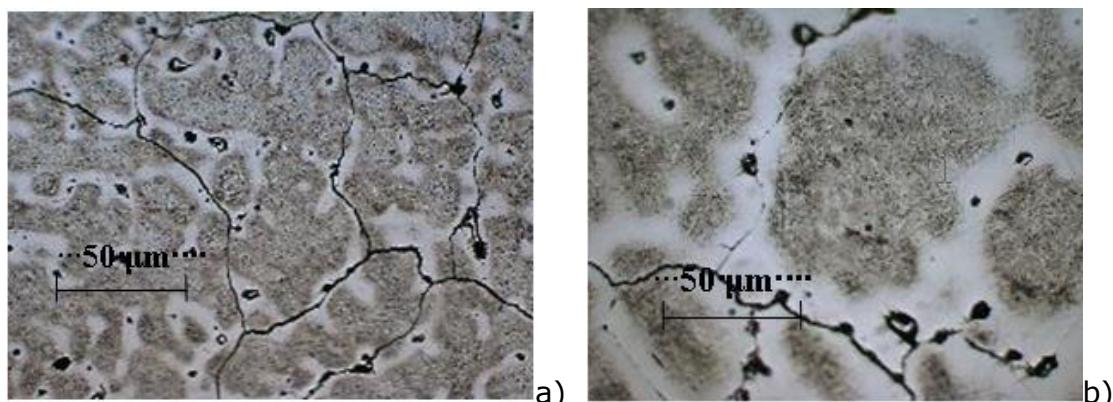


Figura 2. Microestructura del acero AISI 420, a) X 200 y b) X 400.

3.4. Evaluación de la resistencia al desgaste de la aleación

En la Figura 3 se presenta el comportamiento del desgaste. Se observa que aunque existe aparentemente una gran abertura entre ambas curvas la diferencia es relativamente pequeña, por lo que resulta más económico la utilización del acero AISI 420 en estado de fundición que con tratamiento térmico.

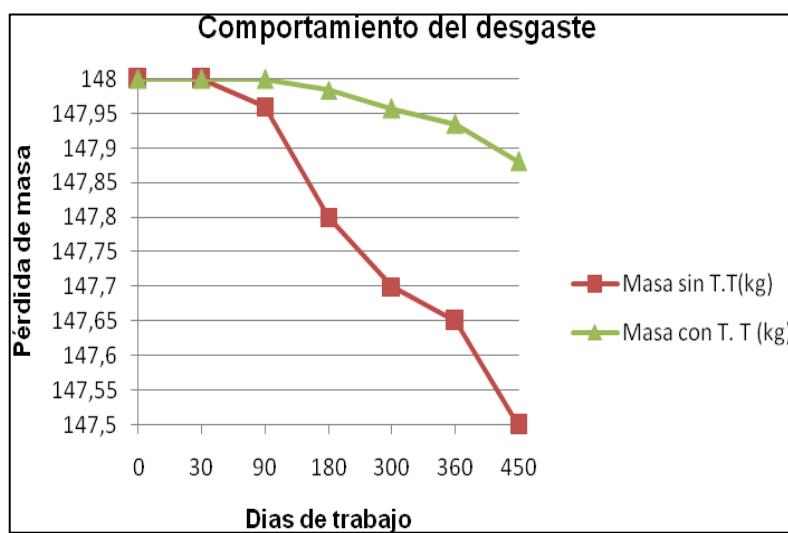


Figura 3. Pérdida de peso del impelente.

Como se aprecia en la Figura 4, la pérdida de peso disminuye en la medida en que se incrementa la dureza del AISI 420. Se puede observar que esta se comporta de manera similar, tanto en estado de fundición, como cuando se le realiza un temple a 1 075 °C y revenido a 300 °C, con una pérdida de peso de aproximadamente 0,037 g.

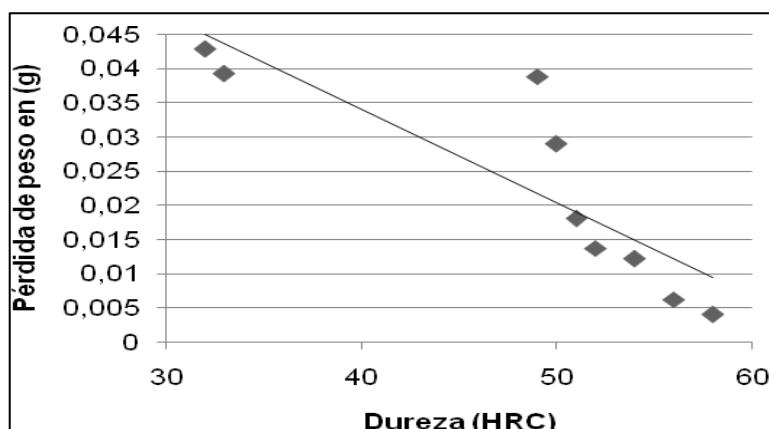


Figura 4. Pérdida de peso de las probetas en función de la dureza del AISI 420.

Se demostró que, si bien existe una diferencia de HRC 5 en los valores de dureza de las muestras sin tratamiento térmico (estado de fundición) y con tratamiento térmico, para el caso en que las muestras no han sido tratadas térmicamente, la pérdida de peso presenta valores ínfimos de alrededor de 0,011 g y 0,014 g diarios, para un promedio de 0,0125 g. La elevada dureza y resistencia al desgaste se garantiza, en estado de fundición, gracias a la combinación de la martensita con los carburos que aparecen en la matriz metálica, lo cual ha sido también reflejado por otros investigadores (Velázquez 2002; Medina, Serna & Padovose 2011).

Para el valor de dureza obtenido (53 HRC), la pérdida de peso reporta alrededor de 0,02 kg de material desgastado en un día, por lo que para 450 días (tiempo de remplazo) alcanzaría la cifra de unos 0,15 kg en cada paleta. Los valores de dicha pérdida de peso se consideran adecuados, toda vez que el costo del tratamiento térmico encarece la tecnología de obtención de los impelentes, con dureza y resistencia al desgaste superiores, expresado también por Newman y Skinner (1986).

La microestructura y dureza obtenidas, en estado de fundición, satisfacen los requerimientos de diseño y justifican la no realización del tratamiento térmico para el caso analizado, según lo planteado por Rodríguez (2013) y Ganguly & Choudki (2007).

En la Figura 5 se presentan imágenes de las paletas en estado de fundición, después de ocho meses de trabajo continuo, donde se puede apreciar que el desgaste es mínimo.



Figura 5. Impelentes después de 240 días de trabajo.

4. CONCLUSIONES

- La evaluación de la resistencia al desgaste de los impelentes, elaborados de acero AISI 420, permitió comprobar que aunque existe una ligera diferencia en la dureza del material en estado de fundición y con tratamiento térmico, la pérdida de peso presenta valores ínfimos.
- Se evidenció la existencia de martensita, con presencia de fases secundarias ubicadas alrededor de los cristales, lo que justifica la elevada dureza y resistencia al desgaste, por abrasión, del acero AISI 420, encontradas en las muestras en estado de fundición.

5. REFERENCIAS

- CARABALLO, M. A. 2007: Incidencia del endurecimiento mediante explosivos en el desempeño del acero Hadfield. *Revista Facultad de Ingeniería* 39: 89-99.
- GANGULY, A. & CHOUDKI, B. L. 2007: Heat treatment of AISI-420 grade martensitic stainles steel. Baltimore Convention Center, Maryland, USA.

- MEDINA, R.; SERNA, C. & PADOVOSE, L. 2011: Analisys of tempering steel by magnetic Barkhausen noise. Research grouppyrometallurgical and material. University of Antioquia. Medellín, Colombia.
- NEWMAN, P. T. & SKINNER, J. 1986: The high temperature sliding wear of Stainless Steels in CO₂ atmosphere -the effect of adding low concentration of oxygen. *Wear* 112(3): 291-325.
- RODRÍGUEZ, A. 2013: Estudio del efecto del tratamiento térmico del acero AISI 420F en las propiedades de resistencia a la corrosión en biocombustible E 100. Universidad Autónoma. Ciudad Juárez, México.
- VELÁZQUEZ, A. 2002: *Fragilización de la aleación HH por precipitación de la fase sigma*. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

Miguel Ángel Muñiz-Nueva, mnueva@cum.uho.edu.cu
Lic. en construcción de Maquinarias. Máster en Electromecánica
Universidad de Holguín *Oscar Lucero Moya*, Cuba

Francisco Luis Hernández-Arias, f hernandez@facing.uho.edu.cu
Doctor en Ciencias. Especialista en Ciencia e Ingeniería de los Materiales.
Universidad de Holguín *Oscar Lucero Moya*, Cuba

Isnel Rodríguez-González, irgonzalez@ismm.edu.cu
Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Departamento de Mecánica.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Holguín, Cuba

Julio Cesar Urbina-Herrán, jurbinah@cum.uho.edu.cu
Máster en Ciencias de la Educación.
Universidad de Holguín *Oscar Lucero Moya*, Cuba

Caracterización del acero 70XL empleado en la fabricación de bolas para la molienda del clinker

Eider Gresesqui-Lobaina
Isnel Rodríguez-González
Tomás Fernández-Columbié

Resumen

El presente artículo trata el desgaste de las bolas empleadas para la molienda del clinker en los procesos de obtención de cemento. Se confeccionaron tres probetas de distinto acero: una de acero AISI 4140, con el que se forjan bolas para el proceso de molienda; otra de acero 70XL (70 XL) con tratamientos térmicos de normalizado, temple y revenido; y la tercera, de igual material que la segunda pero sin tratamiento. Para la observación metalográfica las muestras se elaboraron con dimensiones de 10 mm de diámetro y 8 mm de espesor, revelándose para el acero AISI 4140 una estructura de tipo martensítica con alguna presencia de ferrita acicular. Para el acero 70XL sin tratamiento térmico se observó la presencia de ferrita y cementita, mientras que el acero 70XL con tratamiento térmico mostró en los límites de grano cementita libre en una matriz perlítica, lo que se tradujo en una mayor dureza (hasta de HRC 59,8) y un menor desgaste gravimétrico, en comparación con los otros materiales. Por ello se recomienda como el más adecuado para la fabricación de las bolas para la molienda de minerales el acero 70XL con tratamiento térmico.

Palabras clave: desgaste gravimétrico; dureza; molienda de minerales; microestructura; aceros; aleaciones.

Characterization of steel 70XL used in the manufacture of balls for the clinker's milling

Abstract

The present article deals with the wear of the balls used for the grinding of the clinker in the processes of obtaining cement. Three specimens of different steel were made: one of steel AISI 4140, with which balls are forged for the milling process; another 70XL steel (70 XL) with normalized, tempered and tempered thermal treatments; and the third, of equal material that the second but without treatment. For the metallographic observation the samples were made with dimensions of 10 mm in diameter and 8 mm in thickness, revealing for AISI 4140 steel a structure of martensitic type with some presence of acicular ferrite. For the 70XL steel without heat treatment the presence of ferrite and cementite was observed, while the steel 70XL with heat treatment showed in the limits of free cementite grain in a pearly matrix, which resulted in a higher hardness (up to HRC 59, 8) and lower gravimetric wear compared to other materials. Therefore it is recommended as the most suitable for the manufacture of balls for grinding minerals 70XL steel with heat treatment.

Keywords: Gravimetric wear; ball; milling; microstructure; hardness.

1. INTRODUCCIÓN

Los equipos de procesamiento de minerales, tales como los molinos de bolas para la trituración del clinker en las industrias del cemento, están sometidos a severas condiciones de desgaste y de impacto. En esta industria, al igual que en la minera, los consumos de cuerpos moledores ocasionan pérdidas económicas considerables que pueden alcanzar cientos de millones de dólares en el mundo. También los nuevos diseños de molinos con altas energías de impacto exigen incrementar los parámetros de trabajo, principalmente la tenacidad (Albertin *et al.* 2008).

Según Osorio, Restrepo & Marín (2009) para el tratamiento industrial de rocas y minerales es necesaria la preparación previa de los mismos, donde normalmente se requiere reducir el tamaño de la partícula. Además, estos investigadores plantean que existe una serie de elementos importantes que influyen en la molienda de los materiales, entre los que se encuentran la velocidad crítica, las relaciones entre los elementos variables de los molinos, el tamaño máximo de los elementos moledores, el volumen de carga, la potencia y el tipo de molienda (húmeda o seca). Estas operaciones son de aplicación habitual en los procesos de fabricación del cemento.

1.1. Características de las bolas en el molino

La carga de bolas en un molino consta de diversos diámetros y calidades de material que se distribuyen en cámaras diferentes dentro de los mismos (Rivera-Madrid 2013). Los tamaños máximo y mínimo de las bolas y la composición de estos tamaños dependen de varios factores como el tamaño máximo del material de alimentación a ser molido y la moliurabilidad y estructura mineralógica del material de alimentación.

Dependiendo del proceso y de la etapa de molienda que se trate, las bolas deben resistir las fuerzas de impacto entre ellas (especialmente en la molienda de gruesos con bolas grandes), el desgaste causado por las fuerzas de fricción entre las bolas y las placas de blindaje, el desgaste causado por materiales abrasivos y la corrosión (Alcántara-Valladares 2008).

1.2. Materiales para la elaboración de elementos de molienda

Los cuerpos moledores, por lo general, son fabricados por fundición o forjado. Como aleaciones hierro-carbono, tres de sus principales microconstituyentes son la austenita, la ferrita y la cementita, cada uno con características propias, que al adicionar otros elementos y alterar controladamente la temperatura, ayudan a mejorar sus propiedades mecánicas (Callister 2009; Belzunce 2001).

Algunos investigadores (Diez-Cicero *et al.* 2008; Putatunda & Bingi 2012) sugieren los hierros nodulares para la obtención de aleaciones con buenas propiedades de resistencia, debido a que son materiales ferrosos que han evolucionado a través del tratamiento térmico (tto) de austemperizado.

El austemperizado en estas aleaciones promueve la formación de microestructuras de ferrita acicular y austenita estable con altos contenidos de carbono, lo que proporciona una elevada combinación de resistencia y ductilidad en las bolas.

Para bola de aceros de alto contenido de carbono, la norma soviética Gost-977-75 propone tratamientos térmicos de normalizado, temple y revenido, según Silot-Montero (2014).

La derivación conclusiva de estos tratamientos térmicos es la obtención de una matriz de ferrita con una fina y bien distribuida dispersión de carburos. Al mismo tiempo, este cambio microestructural, asociado a una contracción dimensional, va unido a un fuerte aumento de la tenacidad del producto debido a una pérdida de dureza y de resistencia mecánica.

El Ni-Hard es una fundición blanca con contenidos aproximados de cromo y níquel de 2 % y 4 %, respectivamente, además de un bajo contenido de silicio. Es resistente al desgaste por deslizamiento, no siendo así para el desgaste por choque. Sin embargo, en investigación realizada por Duda (1977) se evidenció que hay bolas de este material a las que se le atribuye cuatro veces la duración de las bolas de acero forjado y endurecido.

En Cuba se llevan a cabo desde el año 2013 producciones de bolas fundidas de acero 70XL (AISI 8660) para la molienda del clinker en la producción de cemento. La composición química de estas aparece en la Tabla 1, distinguiéndose que existe un alto contenido de manganeso, cromo y níquel.

El análisis químico se realizó empleando un espectrómetro cuántico de masa Belec Compact Port (*Mobile Spectrometer for Metal Analysis*) en un laboratorio especializado de la Empresa Mecánica del Níquel (EMNi) de Moa "Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche". A cada muestra se les aplicaron tres chispazos separados uno del otro, para luego tomar una medida de los resultados obtenidos y realizar una comparación para verificar si los valores se encuentran dentro del rango establecido.

Tabla 1. Composición química del acero 70XL (AISI 8660)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0,588	0,368	0,736	0,0132	0,0382	0,8841	0,019
Ni	Al	Co	Cu	Ti	V	W
0,6541	0,0037	0,0097	0,2631	0,0020	0,01	0,01
Pb	Sn	As	Ce	B	Zn	Fe
0,0037	0,21	0,107	0,067	0,0010	0,076	96,356

1.3. Influencia del contenido de cromo sobre los elementos moledores

Según Albertin y demás investigadores (2008), el acero 70XL puede alcanzar dureza de HRC 50-65, aplicando tratamientos térmicos de normalizado, temple y revenido. Este material está clasificado dentro de los aceros de baja aleación, siendo el elemento aleante el cromo, el que ejerce una gran influencia sobre las propiedades físicas y mecánicas del acero. Dentro de sus beneficios está el elevar la resistencia al desgaste, la dureza y la templabilidad.

Los elementos moledores que poseen bajo contenido de cromo son producidos por el método de fundición y se usan principalmente para molienda por vía húmeda. Debido a las considerables variaciones de calidad de estos elementos, por lo general son aplicados a molinos de diámetro menor a 3,5 m (Silot-Montero 2014). Por su parte, las bolas con alto contenido de cromo son los elementos moledores más resistentes al desgaste. Se obtienen por método de fundición y son muy utilizadas en molienda por vía seca.

La tecnología de fabricación de bolas por el método de fundición con aleaciones de aceros es extremadamente complicada por el hecho de que la geometría de la pieza (forma esférica) genera, durante su solidificación, un tipo de nucleación independiente con un amplio intervalo de solidificación. Esto está dado por la aleación, donde se propicia la porosidad dispersa, difícil de erradicar; en parte influenciado, además, por la solidificación primeramente de todo su contorno, creando una coraza metálica y concentrando en su interior los gases que propician defectos.

Por tal complejidad son pocas las empresas que fabrican bolas de acero por fundición y utilizan más ampliamente el método de laminación o forja y reservan la fundición para bolas de hierro con variada composición de cromo, aprovechando las mejores propiedades de fundición que presentan los hierros (Sampén-Armas 2003).

Se define como objetivo analizar la dureza, la microestructura y el comportamiento gravimétrico del acero 70XL, material con el cual se fabrican bolas para la molienda en la industria cementera.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Obtención de las probetas metálicas

Para el desarrollo de la investigación se prepararon tres probetas. Una a partir de una bola forjada de acero AISI 4140, con tratamiento térmico de temple y un posterior revenido para eliminar las tensiones generadas durante el forjado y templado; además, otras dos de acero 70XL, material del cual se fabrican las bolas en la Empresa Mecánica del Níquel (EMNi) de Moa.

La fusión de la aleación se realizó en un horno de inducción con crisol de alta frecuencia, que posee capacidad de una tonelada. La temperatura de vertido del acero 70 XL en el molde fue de 1 500 °C-1 480 °C.

A una de las probetas de acero 70 XL se le realizaron tratamientos térmicos de normalizado, temple y revenido para caracterizar luego el material con condiciones microestructurales similares a las de las bolas que muelen el clinker en la producción de cemento. Para realizar dichos procesos se introdujo la probeta en un horno, calentándolas hasta temperaturas entre 820-840 °C, 840-860 °C y 150-180 °C para el normalizado, el temple y el revenido, respectivamente, durante un tiempo de dos horas para los dos primeros procesos y tres horas para el último. A la otra probeta de acero 70XL no se le realizaron tratamientos térmicos para mantenerla con la misma forma microestructural y comparar los cambios ocurridos.

2.2. Preparación de las muestras

Las muestras se toman a partir de los mismos materiales de las probetas obtenidas, con dimensiones de 10 mm de diámetro y 8 mm de espesor. Las operaciones de preparación y pulido se realizan usando papel abrasivo, variando su granulometría (No. 350; 500; 600 y 800), desde la más gruesa hasta la más fina. El pulido se llevó a cabo en una pulidora metalográfica modelo Rathenow-43, usando paños de fieltro y una solución de pasta abrasiva de óxido de cromo con granulometría de 3 µm. La microestructura se observa con la ayuda de un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM-100, empleando aumento de 200X.

2.3. Ensayos de desgaste gravimétrico

El ensayo de desgaste gravimétrico se realizó en una pulidora automática (PM 52 D. Automatic Metalographic Sample Grinding and Polishing Machine) marca echoLAB. Para esto, se colocó primeramente en el disco rotatorio de

la pulidora metalográfica, un papel abrasivo con granos de óxido de silicio de grado 180 como sustancia abrasiva. Se fijaron las probetas (previamente pesadas) en el portaprobetas del equipo. Luego de encender la máquina de ensayos se aplicó una carga de 5,88 N y se activó el cronómetro para un tiempo de 15 minutos. Pasado este tiempo se retiraron las probetas para realizar un primer pesaje. Después se volvieron a colocar en el portaprobetas para ejecutar el segundo proceso de desgaste gravimétrico en las mismas condiciones. Culminado el tiempo de 15 minutos se retiraron las probetas y se realizó el segundo control de la masa de las mismas.

La pérdida de peso se determinó utilizando la expresión 1 (Rojas-Fernández 2011).

$$\Delta P = G_i - G_f \quad (1)$$

Donde:

ΔP - variación de la masa por desgaste abrasivo gravimétrico (g);

G_i - peso inicial (g);

G_f - peso final (g).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis microestructural de las muestras

El análisis microestructural consistió en la observación e identificación de las características de la estructura metalográfica en los materiales ensayados, con el objetivo de determinar la forma, tamaño y distribución de las inclusiones de grafito, así como el contenido de la masa metálica, basado en la norma ASTM A 247-67 (1998).



Figura 1. Microestructura del acero AISI 4140.

La Figura 1 muestra la microestructura del acero AISI 4140, este presenta una estructura del tipo martensítica. Se observa, además, que existen colonias de estructura de agujas, las cuales son propias del proceso de

fundición. En la parte superior se puede apreciar una franja de granos de martensita revenida más finos, con alguna presencia de ferrita acicular, la cual disminuye su espesor a medida que se incrementa la profundidad desde la superficie hacia el núcleo. En esta franja de pequeño espesor es donde las agujas de martensita son más finas.

La formación de martensita es producto del tratamiento térmico del acero desde su temperatura de austenización. Esto demuestra que el semiproducto usado para el forjado de las bolas primeramente se obtienen del proceso de fundición, que justifica la presencia de carburos de cromo en la parte inferior. Luego se someten a un proceso de forjado en caliente donde se modifica el tamaño del grano y la estructura. También existe disminución del tamaño del grano por el efecto de la acritud, ya que en el proceso de molienda, independiente de la función de las bolas de triturar el mineral, también chocan unas con otras.

La morfología de granos más grandes en la parte inferior es motivada a que los procesos de transformaciones que ocurren en la superficie por efecto del tratamiento de forjado y de acritud no afectan el núcleo de las bolas. La formación de la ferrita es por la cantidad de carbono contenido en la aleación.

En la Figura 2 se observa que en la muestra de acero 70XL sin tratamiento térmico existe presencia de ferrita y cementita; la primera se forma producto del proceso difusivo en la obtención de la aleación, donde provoca esta aparición el carbono como elemento alfágeno. La cementita se forma por la presencia del elemento níquel.

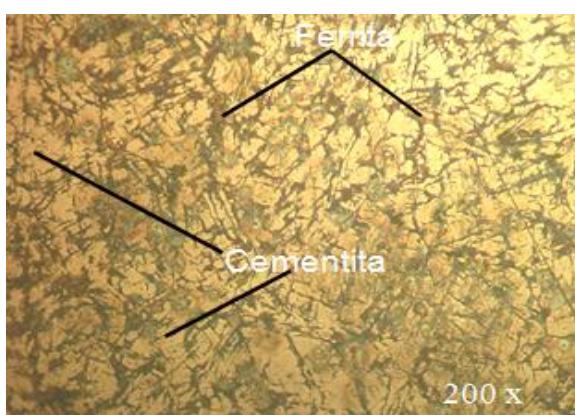


Figura 2. Microestructura del acero 70XL (AISI 8660) sin tratamiento térmico.

En la microfotografía de la Figura 3 se muestra, en los límites de grano cementita libre en una matriz perlítica, que a diferencia de la microestructura sin tratamiento térmico la disminución del tamaño de los granos es por el efecto de la acritud. Luego del tratamiento aplicado a la muestra, la aparición de la cementita es producida por el exceso de carbono

sobre el límite de la solubilidad de la austenita (formado por el elemento níquel). La cementita, por ser un compuesto duro y frágil, le infiere a la aleación elevada dureza, la cual puede ser hasta de HRC 68.

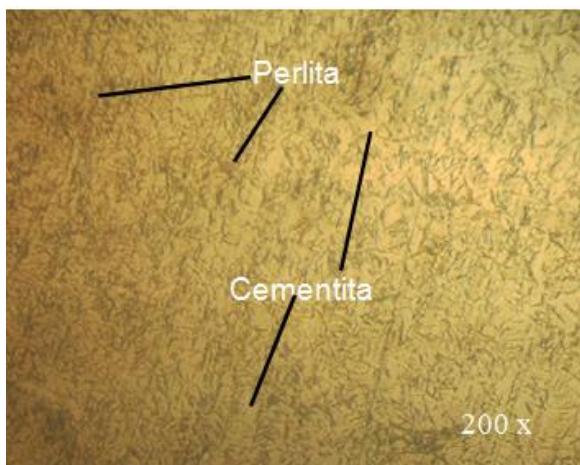


Figura 3. Microestructura del acero 70XL con tratamiento térmico.

3.2. Análisis de la dureza de las muestras

El ensayo de dureza se desarrolló en cinco puntos diferentes de cada una de las probetas, con el empleo de un durómetro digital modelo HRS-ISO (*Digital Rockwell Hardness Tester*), utilizando como penetrador un cono de diamante con un ángulo de 136°. La carga aplicada fue de 1471 N en un tiempo de 15 segundos. La dureza promedio de las probetas se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores de dureza obtenidos

Probetas	Valores de dureza en HRC					Dureza promedio (HRC)
70XL (con tto)	56,6	59,8	59,0	59,8	58,6	58,76
70XL (sin tto)	49,5	48,1	47,3	49,8	47,3	48,42
AISI 4140	46,5	46,4	45,9	47,1	45,89	46,7

En estos resultados se observa que existe un incremento en la dureza de la aleación de acero 70XL con tratamiento térmico y que, además, posee mayor contenido de carbono (0,588 %) con relación a los resultados de dureza mostrados por el mismo material, sin tratamiento térmico y por el material de la bola forjada (0,192 % C).

3.3. Comportamiento o desgaste del material de las bolas

En la Tabla 3 se muestran los valores de los pesajes realizados a las diferentes probetas durante el ensayo gravimétrico. Se evidencia que el desgaste del acero 70 XL con tratamiento térmico es menor en relación al

el mismo material sin el proceso químico-metalúrgico y al acero AISI 4140 correspondiente a la bola forjada.

Tabla 3. Valores de los pesajes realizados a las probetas

Material	Pesaje 1 (g)	Pesaje 2 (g)	Pesaje 3 (g)
70XL (Con TT)	254,81	254,75	254,69
70XL (Sin TT)	249,00	248,85	248,73
AISI 4140	80,09	79,83	79,53

La Tabla 4 refleja el promedio de material desgastado en función de la masa, calculado a partir de los datos expuestos en la Tabla 3.

Tabla 4. Resultados del análisis gravimétrico

Material	ΔP 1 (g)	ΔP 2 (g)	Promedio de ΔP (g)
70XL (Con TT)	0,06	0,06	0,06
70XL (Sin TT)	0,15	0,12	0,135
AISI 4140	0,26	0,30	0,28

La variación de masa (ΔP) correspondiente a estos aceros se calculó a partir de la expresión cedida por Rojas-Fernández (2011), que relaciona la masa inicial y la final como la substracción de la mayor menos la menor, tal como se muestra en la Figura 4.

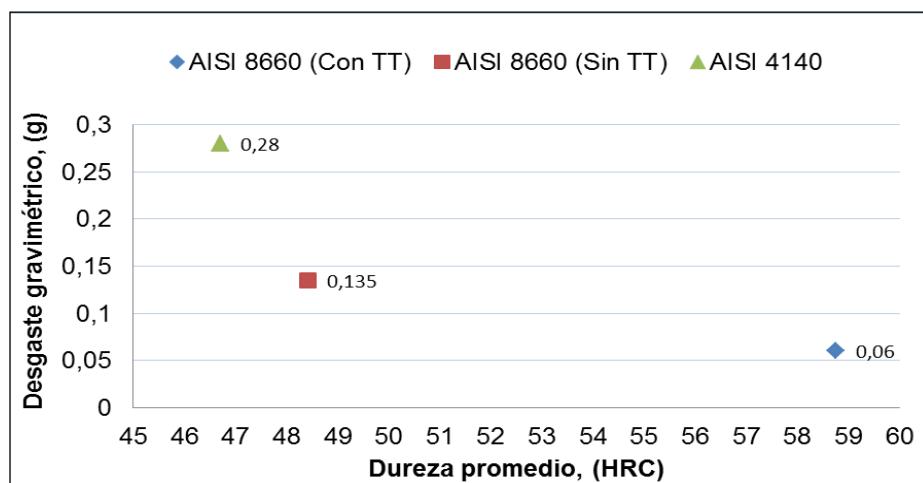


Figura 4. Comportamiento del desgaste gravimétrico con respecto a la dureza del material.

Se observa que para un valor de la dureza de HRC 46,7, correspondiente al acero AISI 4140 (bola forjada), el valor del desgaste gravimétrico es de 0,28 g.

Para el acero 70 XL sin tratamiento térmico y con dureza de HRC 48,42, el valor de ΔP es de 0,135 g. Por su parte, se observa que el menor grado de desgaste ocurre para el acero 70 XL con tratamiento térmico, con dureza de HRC 58,76; el valor de ΔP para este acero es de 0,06 g.

Teniendo en cuenta los resultados logrados en los disímiles ensayos realizados a las aleaciones en estudio, bajo las condiciones presentadas, se puede asegurar que el comportamiento del acero 70XL con tratamiento térmico (mayor dureza y menor desgaste gravimétrico) se debe a que luego del proceso químico-metalúrgico aparece cementita producida por el exceso de carbono sobre el límite de la solubilidad de la austenita. Esto le infiere a la aleación elevada dureza, que puede ser hasta de HRC 59,8; lo cual no se comprobó para el acero AISI 4140 ni para el acero 70XL sin tratamiento térmico, lo que valida al acero 70XL con tratamiento térmico como material adecuado para su utilización en ambientes donde predomine el desgaste abrasivo.

4. CONCLUSIONES

- La cementita libre en una matriz perlítica que muestra la microfotografía del acero 70XL con tratamiento térmico es producida por el exceso de carbono sobre el límite de la solubilidad de la austenita.
- El acero 70XL con tratamiento térmico reveló las mejores propiedades mecánicas debido a que presenta menor grado de desgaste gravimétrico (0,06 g) y una dureza de HRC 58,76.

5. AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Juan Ramón Castillo Matos, técnico del Laboratorio de Ciencias de los Materiales del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

6. REFERENCIAS

- ALBERTIN, E.; SINATORA A.; PITALUGA, G. & PARADA, A. 2008: Relación entre factores micro-estructurales e impacto repetido en aleaciones de alto cromo para bolas de molino. *Ingeniería Mecánica* 11(1): 57-62.
- ALCÁNTARA-VALLADARES, J. R. 2008: *Diseño práctico de un molino de bolas*. Henri Guerra Sotelo (Tutor). Tesis de grado. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad profesional Azcapotzalco. 123 p.
- BELZUNCE, F. J. 2001: Aceros y fundiciones: estructuras, transformaciones, tratamientos térmicos y aplicaciones. Asturias, Universidad de Oviedo, 208 p. Disponible en: <http://www.aceroplatea.es/docs/documento138.pdf>
- CALLISTER, W. D. 2009: *Materials Science and Engineering. An Introduction*. 5 ed. Félix Varela, La Habana, 871 p.

- DIEZ-CICERO, C. J.; FIGUEROA-HERNÁNDEZ, C. R.; ORDÓÑEZ-HERNÁNDEZ, U.; FERNÁNDEZ-LÓPEZ, G. R. & MONDELO-GARCÍA, F. 2008: Influencia de los factores microestructurales en la resistencia al desgaste por deslizamiento de las fundiciones nodulares austemperadas. *Ingeniería Mecánica* 11(3): 21-28.
- DUDA, W. 1977: *Manual tecnológico del cemento*. Romargraf S. A., Barcelona, 345 p.
- OSORIO, A; RESTREPO, G. & MARÍN, J. 2009: Molienda de clinker de cemento: evaluación de la influencia de la velocidad de giro del molino, el tiempo de residencia y la carga de los medios de molienda. *Dyna* 76(158): 69-77.
- PUTATUNDA, S. & BINGI, G. 2012: Influence of step-down austempering process on the fracture toughness of austempered ductile iron. *Journal of Materials Science and Engineering with Advanced Technology* 5(1): 39-70.
- RIVERA-MADRID, I. E. 2013: *Balance poblacional en un molino de bolas para una ley de desgaste de tipo exponencial e hiperbólico en tiempos largos*. Moises Oswaldo Bustamante Rúa (Tutor). Tesis doctoral. Universidad Nacional de Colombia. 84 p.
- SAMPÉN-ARMAS, L. 2003: Pautas para el diseño de partes metálicas resistentes al desgaste. *Industrial data* 6(2): 74-78.
- ROJAS-FERNÁNDEZ, M. V. 2011: *Resistencia al desgaste de la aleación ni-resist con adición de aluminio como elemento de aleación*. Alberto Velázquez Del Rosario & Félix Ariel Morales Rodríguez (Tutores). Tesis de maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 78 p.
- SILOT-MONTERO, Y. 2014: *Obtención de bolas para la molienda del clínker a partir de una nueva tecnología de fundición*. Yunior Correa Cala (Tutor). Tesis de grado. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 63 p.

Eider Gresesqui-Lobaina, egresesqui@ismm.edu.cu
Ingeniero mecánico. Profesor instructor. Departamento de Mecánica.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Holguín, Cuba

Isnel Rodríguez-González, irgonzalez@ismm.edu.cu
Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Departamento de Mecánica.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Holguín, Cuba

Tomás Fernández-Columbié, tfernandez@ismm.edu.cu
Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Departamento de Mecánica.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba

Problemas ambientales asociados a las inundaciones por fuertes lluvias en el Consejo Popular Veguita: Propuesta de una estrategia de mitigación

Alianna Corona-Rodríguez
Yandro Jiménez-Brizuela
Yudemir Cruz-Pérez
Yolidannis Estrada-González

Resumen

El objetivo de este estudio fue elaborar una estrategia de prevención-mitigación-preparación ante las inundaciones producidas por el desbordamiento del río Buey debido a la ocurrencia de intensas lluvias en el municipio de Yara (provincia de Granma). Las metodologías empleadas estuvieron fundamentadas en el análisis histórico-tendencial de los principales elementos del área de estudio, la observación científica sistemática y participativa, los análisis estadísticos y la evaluación de los estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgo. Estos elementos sirvieron de base para diseñar una estrategia a partir de lineamientos silvícolas, de ordenación territorial y de educación ambiental, principalmente dirigida a la conservación de los medios no estructurales afectados por las inundaciones.

Palabras clave: inundaciones; estrategia ambiental; vulnerabilidad y riesgo; Consejo Popular Veguita.

Environmental problems associated with floods due to abundant rains in the Veguita People's Council: Proposal for a mitigation strategy

Abstract

The objective of this study was to elaborate a strategy of prevention-mitigation-preparation in the floods caused by the overflow of the River Buey due to the occurrence of intensive rains in the municipality Yara (Granma province). The methodologies used were based on the historical-trend analysis of the main elements of the study area, systematic and participatory scientific observation, statistical analysis, and the evaluation of risk, vulnerability and hazard studies. These elements served as a basis for designing a strategy based on forestry, land use and environmental education guidelines, mainly aimed at the conservation of non-structural means affected by floods.

Keywords: floods; environmental strategy; vulnerability and risk; Veguita People's council.

1. INTRODUCCIÓN

Identificar las causas de los problemas ambientales y los efectos que estos provocan es una tarea compleja que precisa del concurso de diferentes disciplinas, a fin de elaborar estrategias que frenen o minimicen estos problemas.

La Directiva 01/2005 del Presidente del Consejo de Defensa Nacional plantea la ejecución de los estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgo a la Agencia de Medio Ambiente y a su vez a las Delegaciones Territoriales del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA); estos estudios se desarrollan desde el año 2008 abordándolos, ya sea desde la causa del problema o desde su consecuencia. La percepción de riesgo en la economía, el medio ambiente y la sociedad se valora atendiendo a la influencia de eventos propios del área geográfica como los huracanes, o los sismos; este último por la cercanía a la zona sismogeneradora, originada por el contacto entre las placas del Caribe y la de Norteamérica, que acarrea una amenaza sísmica constante (Lozano 2009).

En Cuba la educación ambiental recibe un tratamiento especial y así consta en la política del estado, acorde al desarrollo político, económico y social del país. Está plasmado en la Constitución de la República, el programa del Partido Comunista de Cuba, la Ley 81 del Medio Ambiente (1997) y el Plan de Acción y la Estrategia Nacional de Educación Ambiental, propia del Ministro de Educación (1993), que tienen como propósito el desarrollo económico y sostenible en la Isla y constituyen, además, la base que integra e instrumenta otros programas y planes de corte ambiental.

Entre los principales problemas tratados en la Estrategia Ambiental Nacional (EAN) (2011-2015) figuran la degradación de los suelos, afectaciones a la cobertura forestal, contaminación, pérdida de diversidad biológica, carencia y dificultades con la disponibilidad y calidad del agua, así como impactos del cambio climático.

Teniendo en cuenta lo anterior se llevan a cabo programas como el Hidráulico Nacional y el de Enfrentamiento al Cambio Climático, aprobado por el Consejo de Ministros en 2007, cuyo objetivo fundamental consiste en introducir el inventario periódico de los gases de efecto invernadero como herramienta interna de evaluación ambiental y priorizar y concluir los estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgo (PVR) en el ciclo de reducción de desastres.

En la actualidad en la provincia de Granma se aprecia la existencia de programas de diagnósticos de peligro, vulnerabilidad y riesgo, entre ellos: riesgos provocados por intensas lluvias, estudios sobre deslizamiento,

fuertes vientos, penetraciones del mar y de enfrentamiento a intensas sequías, entre otros (Cruz & Arencibia 2006).

En el caso del Consejo Popular de Veguita se han realizado estudios de diagnósticos que lo clasifican con riesgo de alto a moderado, en cuanto al peligro de inundaciones por intensas lluvias y rupturas de embalses. Además, presenta de forma general una vulnerabilidad moderada debido a las inundaciones (Francisco 2007).

A pesar de los estudios realizados, en la bibliografía consultada no se verificaron referencias sobre una estrategia para mitigar los efectos de las inundaciones sobre el medio ambiente en el Consejo Popular Veguita, que permita el buen funcionamiento de las estructuras de la comunidad, la cual se ve afectada por el aumento del caudal del río Buey; situación que provoca afectaciones directas o indirectas sobre la flora, fauna y elementos estructurales y no estructurales. Por esta razón, el objetivo principal que tiene este estudio es elaborar una estrategia de prevención-mitigación-preparación ante las inundaciones producidas por el río Buey en el municipio de Yara de la provincia de Granma, Cuba.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar la investigación se tuvo en cuenta el criterio de varios autores (De Armas, Lorences & Perdomo 2003; García & Expósito 2003; Rodríguez del Castillo & Rodríguez-Palacios 2008), los cuales plantean que para evaluar una estrategia ambiental hay que tener en cuenta tres fases:

- Fase de obtención de información y de diagnóstico
- Fase de caracterización de momento deseado, de programación, implementación y de ejecución
- Fase de evaluación: en esta fase se evalúa la diversidad de medios y factores ambientales potencialmente afectados y la complejidad de las interacciones entre factores y el entorno, con el propósito de prevenir, reducir y finalmente eliminar los impactos negativos que estos procesos causan al medio ambiente, asegurando la protección y preservación de los recursos naturales sobre los cuales se sustenta la producción de bienes y servicios.

Para ello se utilizó el método para identificación de impactos, donde se desarrollaron las siguientes acciones:

- Caracterización del área de estudio.
- Determinación de los componentes y factores ambientales que deben ser evaluados. Específicamente, evaluación de la flora (muestreo y

levantamiento de parcela, estructura horizontal del bosque, análisis de conglomerado jerárquico, índice de valor de importancia) y la fauna.

- Determinar los posibles impactos ambientales. Se evaluó por el método de encuesta: observación científica participativa, encuesta semi-estandarizada.
- Diseño de la estrategia.

La aplicación de esta metodología, como se describe a continuación, conllevó a estudiar los subsistemas del sistema ambiental (físico biótico y abiótico, socio-económico), y dentro de cada uno de ellos establecer los recursos a ser impactados para, posteriormente, determinar los impactos ambientales principales.

2.1. Caracterización físico-geográfica del área

La investigación se realizó en los meses de enero a abril de 2014 en el Consejo Popular de Veguita, en lo adelante CPV. Los datos de la caracterización del área se tomaron del resultado de las encuestas semi-estandarizadas aplicadas al 10 % de la población que vive en el área de estudio, además del Plan General de Ordenamiento Territorial y Urbano del municipio de Yara.

El CPV pertenece al municipio de Yara, provincia Granma (Figura 1). Cuenta con una superficie de 16,31 *ha* y limita al norte con el asentamiento Los Guineos, al sur con el núcleo urbano de Veguita, al este con la carretera Bayamo-Manzanillo y al oeste con los asentamientos La Toyada y El Aguacate. El asentamiento poblacional es disperso y está compuesto por 59 172 habitantes; ocupa un área de 571,40 km^2 (Plan General de Ordenamiento Territorial y Urbano del municipio de Yara 2008).

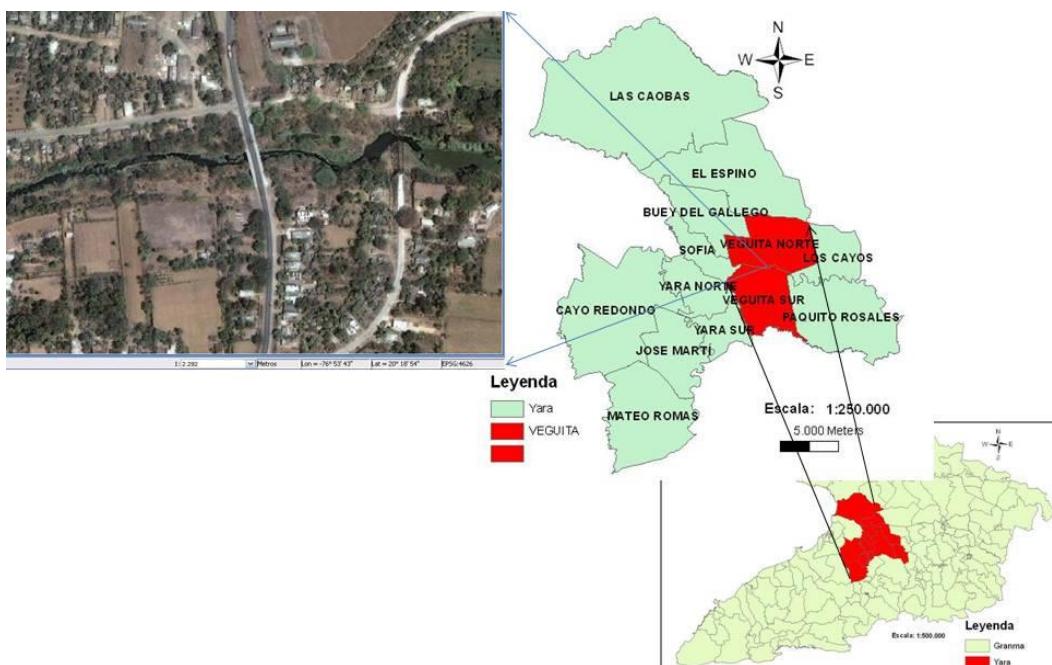


Figura 1. Ubicación geográfica del Consejo Popular Veguita.

2.2. Muestreo y levantamiento de parcela

Para determinar el tamaño de la muestra del área de estudio se utilizó la metodología utilizada por Álvarez (2003), la cual se basa en el empleo de la siguiente fórmula: $N = A/a^1$:

Donde:

N- Tamaño de la muestra,

A- área total de la población y a- área de la parcela de muestreo.

Se levantaron parcelas de $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ (100 m^2).

Para listar las especies se realizó un inventario florístico, mediante un muestreo aleatorio; con los datos obtenidos se procedió a la determinación de los parámetros dasométricos (altura, diámetro, área basal y volumen), con el propósito de tener una primera idea de las características de las especies presentes. Otros aspectos a tener en cuenta son: el estado ambiental del área de estudio y el grado de explotación a que ha sido sometida; ubicándose de sur a norte.

2.2.1. Análisis de conglomerado jerárquico

Se realizó un dendrograma con el objetivo de mostrar la similitud entre especies florísticas por localidades, utilizando el paquete BioDiversityPro profesional (1997). Se utilizó el índice de afinidad de distancia euclíadiana y el método de ligamiento de promedio entre grupos.

2.2.2. Estructura horizontal del bosque

Para el análisis de la estructura horizontal del bosque se determinaron los indicadores ecológicos vinculados a los estudios de diversidad, que contribuyeron a la caracterización del área y a determinar la composición florística presente en la misma; se empleó la metodología propuesta por Mostacedo y Fredericksen (2000).

2.2.3. Índice de Valor de Importancia (IVI)

El IVI se determinó según los criterios de Curtis y McIntosh (1950) con el objetivo de conocer el valor de las especies y la importancia ecológica relativa de cada especie en el ecosistema estudiado, así como identificar las especies que están mejor adaptadas al área de estudio. Este índice se expresa de la siguiente manera:

$$VI = (AR + FR + DR) / 3$$

Donde:

AR=Abundancia relativa (%), FR=Frecuencia relativa (%), DR=Dominancia relativa (%).

2.2.4. Inventario faunístico

Se evaluó también la fauna existente en el área, empleando métodos de muestreo; en este caso de observación. Se valoró el uso de la vegetación y la adaptación de las especies al ocurrir la pérdida de las diferentes especies forestales, tanto por la deforestación antrópica como por las inundaciones.

2.2.5. Análisis estadístico

La metodología propuesta responde a un análisis estadístico no paramétrico, según la metodología propuesta por Mostacedo y Fredericksen (2000). Los datos obtenidos del muestreo realizado fueron procesados en el paquete estadístico Biodiversity Pro. Versión 8.0.

2.3. Método empírico de investigación, observación científica participativa y encuesta

El diagnóstico se realizó mediante la recolección de información de fuentes secundarias, con el objetivo de identificar los riesgos, basados en la infraestructura de las inundaciones provocadas por eventos hidrometeorológicos. También se tomó información de series cronológicas, estadísticas, anuarios e informes del Centro de Gestión para la Reducción del Riesgo Provincial.

Con el propósito de obtener información sobre el experimento del manejo de la comunidad se caracterizó y seleccionó la técnica de cuestionario, en este caso de tipo grupal, según Cruz-Pérez & González-Pérez (2012). Dicho

cuestionario contiene un encabezamiento con una solicitud de cooperación y veracidad, el cual se aplicó en el lugar y momento apropiados para una mayor colaboración; el lenguaje utilizado estuvo adecuado al nivel intelectual de los encuestados.

2.4. Diseño de la estrategia ambiental para mitigar el efecto de las inundaciones

La estrategia se desarrolló a partir de los problemas ambientales y los impactos que más afectan el área de estudio; siendo la deforestación del fragmento de la cuenca el mayor problema. Además, esta sirvió de instrumento para planificar las acciones y definir los objetivos a largo, mediano y corto plazo, según y se fundamentó en tres lineamientos:

- Fomento forestal
- Ordenamiento territorial
- Educación ambiental

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Muestreo y levantamiento de parcela

Se encontraron 42 especies de plantas pertenecientes a 23 familias botánicas; donde la mayoría de las familias presentan una, dos o tres especies y solamente dos familias tienen más de tres especies. Las más representadas según la cantidad de individuos son: *Mimosaceae* con 312 individuos, en el caso de la *Asteraceae* específicamente con la especie *Trixis radialis L.* (namú) 1 535, *Fabaceae* con 1 775, *Sapindaceae* con 624 y *Poaceae* con 769.

En la Figura 2 se muestra la cantidad de especies por familias, de las 23 familias la más representativa es la *Mimosaceae* con siete especies, seguida de *Boraginaceae* con cuatro, las *Euphorbiaceae*, *Meliaceae* y *Sapindaceae* con tres, que aún con ser las más representativas no son suficientes ya que sufren de la tala ilícita provocada por el hombre para el beneficio propio, sin un manejo adecuado de las mismas. Las *Asteraceae*, *Cucurbitaceae*, *Caesalpiniaceae* y *Poaceae* con dos especies y *Anacardiaceae*, *Bignoniaceae*, *Fabaceae*, *Combretaceae*, *Vervenaceae*, *Cyperaceae*, *Papilionaceae*, *Nictaginaceae*, *Turneraceae*, *Rubiaceae*, *Annonaceae*, *Ciateaceae*, *Tiliaceae* y *Solanaceae* con una, son las menos representadas ya que se encuentran en las orillas del río y son fuertemente afectadas por las inundaciones.

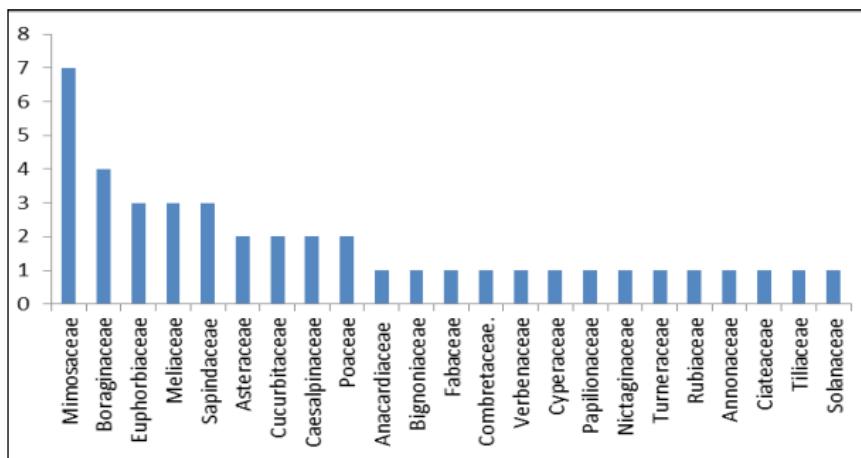


Figura 2. Cantidad de especies por familias.

3.2. Análisis del conglomerado jerárquico

La Figura 3 muestra la similitud entre parcelas; para un 50 % de similitud el primer grupo representa las parcelas 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 14, 15 y 19, pues tienen similitud en cuanto a especies presentes y cantidad en cada parcela.

En un segundo grupo están las parcelas 10, 11, 12, 13, 17 y 20, que son similares debido a las mismas especies presentes y a la cantidad en el área. Se encuentran en esa misma similitud pero con menor presencia de especies en el grupo tres, las parcelas 16 y 18, y en un cuarto grupo la representación de la parcela 2, que contiene especies que no aparecen en las demás parcelas como el *Cordia collococca L.* (Ateje rojo). La principal diferencia entre un grupo de parcelas y otro está relacionada con la cantidad de especies presentes en cada una. Estos resultados concuerdan con los de Herrero-Echevarría (2003).

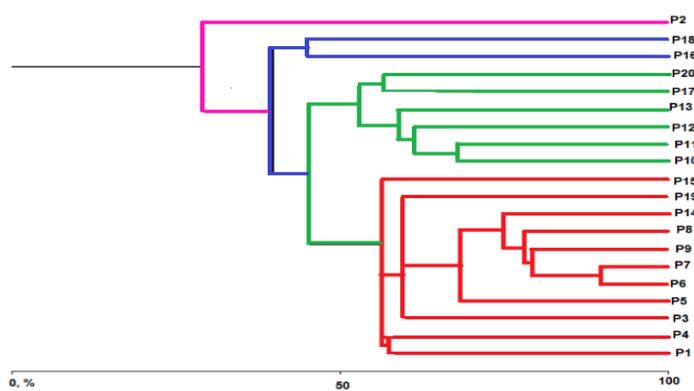


Figura 3. Análisis de Cluster de Bray-Curtis.

3.3. Índice de Valor de Importancia (IVI)

El índice de valor de importancia permitió comparar el peso ecológico de las especies dentro de la comunidad vegetal. Resultaron las de mayor peso las

siguientes: *Trixis radialis*, *Aralia Regina*, *Alsophila myosuroides*, *Gouania lupolooides*, *Serjania diversifolia* (Jacq.), *Samanea saman* (Jacq.) Merr., *Cassia tora* L., *Tournefortia graphaloper*, *Leucaena leucocephala* (Lam.) y *Erterolobium cyclocorpum*, con valores de 64,641; 43,388; 26,506; 23,385; 17,250; 15,610; 10,332; 10,277; 8,541; respectivamente, ya que ellos representan la mayor cantidad de especies por parcela.

3.4. Análisis de la fauna silvestre

Para determinar las especies presentes en el área se realizó un estudio mediante la observación minuciosa, en el que se determinó la existencia de 17 especies entre las que se destacan: *Chlorostilbon ricordii* (Zunzún), *Dendroica pityophila* (Bijirita del pinar), *Aramus guarauna* (Guareao) y lagartijas del género *Anolis*, las cuales usan la vegetación existente como alimento y refugio.

3.5. Análisis de los resultados de los métodos empíricos

3.5.1. Encuestas

A partir de las encuestas se pudo constatar que los habitantes de la zona presentan un rango de edad entre 24 y 50 años, caracterizado por una población adulta, donde resalta el sexo femenino con 55 %.

Se demuestra, además, que solo el 30 % de los habitantes utilizan el agua del río para los quehaceres domésticos; el otro 70 % consumen agua de pozos de sus viviendas, los cuales se contaminan cuando ocurren inundaciones al subir el nivel del manto freático que es el que alimenta los pozos.

El centro de atención de la economía local radica en el sector ganadero y el tabaco, así como en las industrias azucarera y arrocera.

3.5.2. Observación científica participativa

Teniendo en cuenta el criterio de expertos el principal problema detectado fue la deforestación del fragmento de la cuenca en casi su totalidad, por lo que se propuso una estrategia de reforestación para evitar la pérdida de muchas especies, tanto florísticas como faunísticas. Además, se identificaron otros problemas como la pérdida de la biodiversidad biológica y el deterioro del fragmento de la cuenca a gran escala.

Los datos se obtuvieron a partir de la realización de recorridos y de la observación científica de los elementos del fragmento de la cuenca, en la que se registraron 27 microvertederos (Figura 4), emisores al aire libre de residuales domésticos y el vertimiento directo de residuales procedentes de fosas y tanques sépticos.

La suma de los elementos relatados durante la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos provoca avenidas de probabilidad de ocurrencia baja, acompañadas de arrastres de sedimentos y la acumulación del mismo en las periferias de sus márgenes.



Figura 4. Focos contaminantes en el CPV (2013).

La acción antrópica se verifica en la totalidad del área estudiada (tala ilícita, introducción a pequeña y mediana escala de cultivos agrícolas, pastoreo y la deforestación), reforzada por el grado de deterioro que presenta la faja hidrorreguladora que amerita trabajos silvícolas intensivos que reviertan la situación (Jiménez 2007).

3.6. Diseño de la estrategia ambiental para mitigar el impacto de las inundaciones

El modelo metodológico y el plan de actividades que comprende la estrategia están basados en el diseño de Canut-Cedeño (2004). La misma proyecta un sistema de acciones a corto (1 año), medio (3 años) y a largo (5 años) plazo, que procuran la transformación de procesos, teniendo como base sus componentes para lograr los objetivos propuestos en tiempo concreto. En esas acciones participan la Unidad Empresarial de Base Silvícola Yara (UEBS Yara), Unidad Medio Ambiente Granma, Universidad de Granma y el Servicio Estatal Forestal (SEF). Las acciones fundamentales son las siguientes:

- Establecer especies forestales en la faja hidrorreguladora del río Buey.

- Realizar una gestión integrada en la cuenca hidrográfica.
- Hacer un análisis de la degradación de los suelos (por erosión, acidez, salinización y compactación).
- Ubicar los nuevos asentamientos y construir las viviendas.
- Actualizar los planes de la población en áreas de riesgo de inundaciones por intensas lluvias.
- Implementar la protección o reubicación de los equipos de suministro eléctrico, centros de evacuación y aquellos de atención a la salud, ubicados en áreas de peligro.
- Confeccionar y ejecutar programas de educación ambiental para las unidades de base y las comunidades circundantes, sobre el uso correcto de las leyes, el manejo adecuado del bosque y su protección.

La poca profundidad de los suelos sobre los que se desarrolla el Consejo Popular Veguitas, conjuntamente con la deforestación activa en el proceso erosivo laminar, es un fenómeno que provoca, durante el periodo lluvioso, la incidencia mecánica directa de las gotas sobre el suelo desnudo. De igual forma, el arrastre de sedimentos complejiza la ocurrencia de la avenida en volumen y poder destructivo.

Evidencia de ello es la poca representatividad de especies de árboles característicos de la zona, como *Cordia collococca* (Ateje rojo), que han sido devastadas, tanto por el hombre como por las inundaciones provocadas por eventos meteorológicos ocurridos en el área de estudio. Las especies que mayor dominancia presentan son la *Trixis radialis* y *Aralia Regina*, que son especies invasoras encontradas en las orillas del río.

De acuerdo con las características del área de estudio, se infiere que en otras áreas de esta localidad se encuentra la misma cantidad de especies; teniendo en cuenta lo planteado por Mostacedo y Fredericksen (2000), es poco probable que en otras áreas con las mismas condiciones ambientales se encuentren muchas más especies que las ya determinadas.

Esto trae consigo que la fauna existente en el área se vea afectada al ocurrir la pérdida de las diferentes especies, tanto por la deforestación antrópica como por las inundaciones, lo que amerita una mayor atención para evitar la disminución de la fauna endémica.

Por lo tanto, la existencia de dificultades que ocasionan insuficiente manejo y disposición final de los desechos sólidos requiere hacer un banco de problemas con sus impactos y posibles soluciones para así lograr que la estrategia mitigue los daños por inundación en el CPV.

4. CONCLUSIONES

- La vulnerabilidad total refleja que para las inundaciones el CPV alcanza la categoría de vulnerabilidad media, a pesar de existir impactos negativos en el ecosistema.
- Los principales problemas ambientales del CPV identificados a partir del taller con los expertos fueron: deforestación del fragmento de la cuenca en casi su totalidad, pérdida de la diversidad biológica y deterioro del fragmento de la cuenca a gran escala, así como sus impactos negativos en el ecosistema del río Buey.

5. REFERENCIAS

- ÁLVAREZ, O. 2003: *Introducción a la Agrosilvicultura*. Félix Varela, La Habana, 203 p.
- CANUT-CEDEÑO, L. 2004: Ordenamiento físico ambiental del río Buey. Departamento Provincial de Planificación Física Granma. 70 p.
- CRUZ-PÉREZ, Y. & GONZÁLEZ-PÉREZ, M. 2012: Diagnóstico del subsistema marketing En las empresas forestales de cuba. *Revista Avances* 14(3): 206.
- CRUZ, J. A. L. & ARENCIBIA, A. S. 2006: La apreciación de los peligros de desastres en Cuba: tarea de toda la sociedad. *Entorno Geográfico* (4): 89-105. Disponible en: <http://entornogeografico.com/index.php/EntornoGeografico/article/view/33>
- CURTIS, J. T. & MCINTOSH, R. P. 1950: The Interrelations of Certain Analytic and Synthetic Phytosociological Characters. *Ecology* 31(3): 434–455.
- DE ARMAS, N.; LORENCE, J. & PERDOMO, J. M. 2003: Caracterización y diseño de los resultados científicos como aportes de la investigación educativa. En: Evento Internacional Pedagogía 2003. Memorias [CD-ROM], La Habana, 9 p.
- DIRECCIÓN MUNICIPAL DE PLANIFICACIÓN FÍSICA YARA. 2008: Plan General de Ordenamiento Territorial y Urbano del municipio de Yara. Centro de Gestión para la Reducción del Riesgo.
- FRANCISCO, J. O. 2007: Introducción al manejo de Cuencas Hidrográficas. Curso Manejo de Cuencas. Turrialba, CR, CATIE. Turrialba, Costa Rica.
- GARCÍA, C. F. & EXPÓSITO, 2003: Complicación de algunos aspectos importantes a tener presente en la Metodología de Investigación de Educación. Material para elaboración de textos. Universidad de Holguín, Cuba.
- HERRERO-ECHEVARRÍA, J. A. 2003: *Fajas Forestales Hidrorreguladoras*. Agroinfor, La Habana, 52 p.

- JIMÉNEZ, O. 2007: Diagnóstico de Cuencas Hidrográficas. Turrialba, Costa Rica, 13 p.
- LEY 81 DEL MEDIO AMBIENTE. 1997: *Gaceta Oficial de la República de Cuba*, edición extraordinaria 7: 47-68, La Habana, 11 de julio.
- LOZANO, C. 2009: Metodología para el análisis de Vulnerabilidad y Riesgo ante inundaciones y sismos de las Edificaciones de Centros Urbanos. *La gestión del riesgo urbano en América Latina: Recopilación de artículos* (pp. 59-85). NU. Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (UN/EIRD).
- MCALEECE, N.; GAGE, J. D. G.; LAMBSHEAD, P. J. D.; PATERSON, G. L. J. 1997: BioDiversity Professional statistics analysis software. Jointly developed by the Scottish Association for Marine Science and the Natural History Museum London.
- MOSTACEDO, B. & FREDERICKSEN, T. S. 2000: *Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal*. El País, Santa Cruz, Bolivia, 87 p.
- RODRÍGUEZ DEL CASTILLO, M. A. & RODRÍGUEZ-PALACIOS, A. 2008: *La estrategia como resultado científico de la investigación educativa*. Félix Varela, La Habana.

Alianna Corona-Rodríguez, acoronar@udg.co.cu
Master en Ciencias Geológicas. Profesora Asistente
Universidad de Granma. Cuba

Yandro Jiménez-Brizuela, yjimenezb@udg.co.cu
Licenciado en Geografía. Profesora Asistente
Universidad de Granma. Cuba

Yudemir Cruz-Pérez, ycruzp@udg.co.cu
Doctor en Ciencias Forestales. Profesor Auxiliar
Universidad de Granma. Cuba

Yolidannis Estrada-González
Ingeniera Forestal. Técnica Superior
Unidad de Base Sílvicola de Yara. Cuba