

Clinoptilolita natural intercambiada con hierro: caracterización y actividad catalítica en la reducción de monóxido de nitrógeno

Daria Tito-Ferro
Inocente Rodríguez-Iznaga
Beatriz Concepción-Rosabal
Fernando Chávez-Rivas
Vitalii Petranoskii
Arbelio Penton-Madrigal
Felipe Castellón-Barraza

Resumen

El propósito fue caracterizar la clinoptilolita natural del yacimiento de Tasajeras, Cuba, una vez modificada por intercambio iónico hidrotermal con disoluciones de hierro(II) y hierro(III) en medio ácido, y evaluar su actividad catalítica en la reducción de monóxido de nitrógeno con monóxido de carbono/propeno, en presencia de oxígeno. La caracterización se realizó por métodos de adsorción y espectroscopías Mössbauer y de reflectancia difusa en la región ultravioleta-visible. Los resultados indican que, en las muestras intercambiadas, el hierro divalente y el trivalente incorporados se encuentran como cationes de compensación extraenrejados; coordinados octaédricamente en los canales de la clinoptilolita y en forma de oxi-hidróxidos originados por hidrólisis de estos cationes. En la muestra intercambiada con hierro(II) existe, adicionalmente, sulfato de hierro(II) adsorbido; la intercambiada con hierro(III) tiene una mayor cantidad de aglomerados de partículas de oxi-hidróxidos de hierro. La actividad catalítica en la reducción de monóxido de nitrógeno es mayor en las zeolitas modificadas que en la de partida, siendo la muestra intercambiada con hierro(II) la que presenta la mayor actividad catalítica. Esto indica que los principales centros activos catalíticamente están asociados con el hierro divalente.

Palabras clave: zeolita natural; clinoptilolita; reducción química; monóxido de nitrógeno; hierro.

Natural clinoptilolite exchanged with iron: characterization and catalytic activity in nitrogen monoxide reduction

Abstract

The aim of this work was to characterize the natural clinoptilolite from Tasajeras deposit, Cuba, modified by hydrothermal ion-exchange with solutions of iron (II) sulfate and iron (III) nitrate in acid medium. Besides this, its catalytic activity to reduce nitrogen monoxide with carbon monoxide/propene in the presence of oxygen was evaluated. The characterization was performed by Mössbauer and UV-Vis diffuse reflectance spectroscopies and adsorption measurements. The obtained results lead to conclude that in exchanged samples, incorporated divalent and trivalent irons are found in octahedral coordination. Both irons should be mainly in cationic extra-framework positions inside clinoptilolite channels as charge compensating cations, and also as iron oxy-hydroxides resulting from limited hydrolysis of these cations. The iron (III) exchanged samples has a larger amount of iron oxy-hydroxides agglomerates. The iron (II) exchanged samples have additionally iron (II) sulfate adsorbed. The catalytic activity in the nitrogen monoxide reduction is higher in the exchanged zeolites than starting. Among all samples, those exchanged of iron (II) has the higher catalytic activity. This lead to outline that, main catalytically active centers are associated with divalent iron.

Keywords: natural zeolite; clinoptilolite; chemical reduction; nitrogen monoxide; iron.

1. INTRODUCCIÓN

Los óxidos de nitrógeno (NO_x) son gases nocivos para la salud y el medio ambiente, que contribuyen a la formación de la lluvia ácida y niebla tóxica fotoquímica. Estos gases son expulsados a la atmósfera por diferentes fuentes móviles (automotores) y estacionarias (industrias petroleras y plantas químicas) y, en general, por todo sistema en que se expongan N₂ y O₂ a altas temperaturas.

La reducción de las emisiones de NO_x es uno de los grandes desafíos en materia de protección medioambiental, estando reportado el monóxido de nitrógeno (NO) como uno de los principales contaminantes atmosféricos. El descubrimiento de la reducción catalítica selectiva (SCR, por sus siglas en inglés) de NO_x con hidrocarburos, en exceso de oxígeno, involucró el uso de zeolitas en el área de catálisis, resultando como ventajas de las zeolitas la existencia de poros y cavidades, coexistencia de cationes, acidez y fenómenos de difusión de gran significado para estos procesos catalíticos (Pârvulescu, Grange & Delmon 1998; Yahiro & Iwamoto 2001).

La modificación de zeolitas con metales de transición proporciona catalizadores para la reducción catalítica selectiva de óxidos de nitrógeno (SCR-NO_x) y otras impurezas nocivas en los gases de escape. La SCR-NO_x es un interesante e importante proceso, que requiere del desarrollo de catalizadores eficientes (Moura *et al.* 2009; Bacher *et al.* 2013; Metkar, Harold & Balakotaiah 2013; Palash *et al.* 2013; Sultana *et al.* 2013; Wang, Li & Guan 2013; Wang *et al.* 2013; Ghasemian, Falamaki & Kalbasi 2014). Entre otros metales, el hierro llama la atención debido a sus propiedades catalíticas y a su bajo costo. Las zeolitas naturales son también atractivas a causa de sus propiedades de intercambio iónico, estabilidad térmica, disponibilidad y bajo precio.

Cuba cuenta con un gran número de yacimientos zeolíticos, en los cuales los tipos principales de zeolitas presentes son la mordenita y la clinoptilolita. Un yacimiento cubano importante, representativo y estudiado, es el de Tasajeras, donde prevalece la clinoptilolita (Rodríguez-Fuentes *et al.* 2008). Sin embargo, es escasa la información disponible sobre la actividad catalítica en la reducción de NO de este material zeolítico, modificado o no. El propósito de este trabajo es caracterizar a la clinoptilolita natural del yacimiento de Tasajeras modificada, vía intercambio iónico con cationes Fe²⁺ y Fe³⁺, así como evaluar la actividad catalítica de las muestras intercambiadas en la reducción de NO con monóxido de carbono (CO) y propeno (C₃H₆), en presencia de oxígeno.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales

Material zeolítico: se utilizó una muestra representativa de la zeolita del yacimiento de Tasajeras, beneficiada gravimétrica y magnéticamente, con clase de tamaño de partícula de +38-74 μm (en lo adelante denominada como ZT). Esta zeolita está compuesta mayoritariamente por clinoptilolita-heulandita (78 %); contiene, además, un 4 % de mordenita y un 17 % cuarzo, feldespato, montmorillonita y óxido de hierro.

Disoluciones de hierro: sulfato de hierro(II) [FeSO_4] y nitrato de hierro(III) [$\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$], ambas con concentración de 0,05 N.

2.2. Métodos

2.2.1. Preparación de las formas de ZT modificadas con Fe^{2+} y Fe^{3+}

Para la preparación de las formas modificadas o enriquecidas con Fe^{3+} y Fe^{2+} , se pusieron en contacto 10 g de ZT con 0,2 L de las disoluciones de $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ y FeSO_4 , de forma separada, respectivamente, a temperatura de 80 °C por 24 h con agitación sistemática y cambiando la disolución intercambiadora después de las 12 h. Luego de concluido el tratamiento anterior, las muestras fueron filtradas, lavadas exhaustivamente (primero con agua destilada acidulada y luego con agua destilada) hasta ausencia de aniones nitrato y sulfato, secadas a 100 °C y colocadas en desecadora para adquirir una masa constante. Estas formas de ZT enriquecidas con hierro se denominaron como Fe^{2+}ZT y Fe^{3+}ZT .

2.2.2. Caracterización de ZT y sus formas enriquecidas con Fe^{2+} y Fe^{3+}

La composición elemental de las muestras se determinó por fotometría de llama (para Na y K) y por espectrometría de emisión atómica con plasma inductivamente acoplado (para Si, Al, Fe, Ca y Mg), usando el fotómetro de llama Corning 400 y el espectrómetro EPECTROFLAME Modula F, respectivamente.

Las medidas de adsorción de las muestras fueron llevadas a cabo en un equipo Micromeritics TriStar II provisto con herramientas para determinación de área superficial y porosidad. Previo a las mediciones de adsorción, las muestras fueron sometidas a un pretratamiento térmico a 350 °C por 8 h y aplicando vacío. Este pretratamiento térmico se realizó en un sistema de desgasificación Micromeritics TriStar VacPrep 061, que permitió eliminar contaminantes adsorbidos (como agua y gases) en la superficie de las muestras.

Los espectros de reflectancia difusa en la región ultravioleta-visible (UV-Vis) fueron obtenidos con un espectrofotómetro Perkin Elmer 330, equipado con una unidad de reflectancia difusa estándar y usando como referencia al sulfato de bario.

Para la obtención del espectro Mössbauer las medidas fueron realizadas a temperatura ambiente en un equipo de la marca Halder en geometría de transmisión, con 512 canales. La fuente radiactiva fue de ^{57}Co en matriz de rodio (Rh) con una actividad de 35 mCi. Todos los corrimientos isoméricos son relativos al $\alpha\text{-Fe}$. Los espectros fueron ajustados mediante el programa Normos 95.

2.2.3. Medidas de actividad catalítica en reducción de NO

Para la determinación de la actividad catalítica de ZT, Fe^{2+}ZP y Fe^{3+}ZP en la reacción de reducción de NO con $\text{CO}/\text{C}_3\text{H}_6$, en presencia de oxígeno, se utilizó un reactor de cuarzo en forma de U, un horno y un termopar para medir la temperatura. La salida de los gases del reactor se conectó a un analizador de flujo, marca CAI ZRE ANALYZER, para cuantificar su contenido.

Para obtener los perfiles de actividad catalítica se colocaron 100 mg de la muestra en el reactor y se sometieron a un pretratamiento térmico, en un intervalo desde la temperatura ambiente hasta 350 °C, con una velocidad de calentamiento de 5 °C/min, bajo un flujo de N_2 (50 mL/min). Una vez alcanzada dicha temperatura se apaga el horno hasta que se alcanza la temperatura ambiente. Se cierra la entrada de gases al reactor. Se prepara la mezcla de gases de reacción $\text{NO}(0,09\ \%)$, $\text{C}_3\text{H}_6(0,22\ \%)$, $\text{CO}(1,179\ \%)$ y $\text{O}_2(0,46\ \%)$ diluidos en N_2 , partiendo de flujos individuales de NO/N_2 , $\text{CO}/\text{C}_3\text{H}_6$ y O_2/N_2 con 9,15 mL/min y 48,2 mL/min, respectivamente.

Una vez estabilizada la composición de esta mezcla se hace fluir por el reactor y la muestra. Cuando se estabiliza nuevamente la composición inicial de la mezcla de gases de reacción se da inicio a la reacción de reducción de NO para determinar la actividad catalítica de las muestras, en un intervalo desde la temperatura ambiente hasta 500 °C, con una velocidad de calentamiento de 5 °C/min.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización de las formas de la zeolita ZT modificadas con Fe^{2+} y Fe^{3+}

3.1.1. Composición elemental

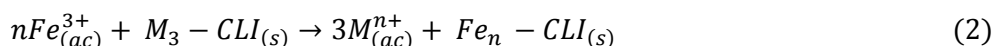
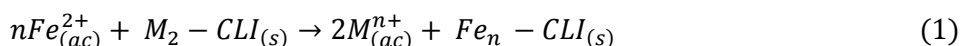
La composición elemental de la zeolita ZT y de sus formas modificadas con hierro se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición elemental y relación silicio/aluminio de ZT y sus formas intercambiadas con Fe^{2+} y Fe^{3+}

Muestra	K (%)	Na (%)	Ca (%)	Mg (%)	Fe (%)	Si (%)	Al (%)	Si/Al
ZT	0,76	1,42	3,23	0,40	1,18	30,23	6,21	4,87
Fe^{2+}ZT	0,70	0,91	2,25	0,34	2,05	29,27	6,02	4,86
Fe^{3+}ZT	0,76	0,74	2,36	0,37	2,31	29,82	5,94	5,02

Si/Al representa la relación molar entre el silicio y el aluminio de ZT.

En la tabla se puede observar el incremento en el contenido de hierro en las muestras Fe^{2+} ZT y Fe^{3+} ZT, logradas mediante el intercambio iónico (vea ecuaciones de reacción 1 y 2) que se realizó bajo las condiciones antes apuntadas. Además, se puede inferir que el Na^+ y el Ca^{2+} son los cationes naturales de ZT que en mayor cuantía intervienen en estos procesos de intercambio de Fe^{2+} y Fe^{3+} , y que el intercambio de K^+ y Mg^{2+} está muy limitado.



Donde: $M=Ca^{2+}, Na^+$

3.1.2. Parámetros superficiales

En la Tabla 2 se muestran los parámetros superficiales de ZT y sus formas intercambiadas, determinados a partir de las isotermas de adsorción-desorción de N_2 a 77 K. En los resultados destaca un incremento en el valor de todos los parámetros superficiales determinados para las muestras, luego de intercambiadas con Fe^{2+} y Fe^{3+} , con respecto a ZT. Este resultado se explica considerando que los procesos de intercambio iónico aplicados con las disoluciones de las sales de hierro tienen un efecto de limpieza de impurezas de la superficie de los cristales de la zeolita. Además, con los procesos de intercambio iónico (vea ecuaciones de reacción 1 y 2) son reemplazados cationes Na^+ por cationes divalentes (Fe^{2+}) y trivalentes (Fe^{3+}).

Los reemplazos se realizan de equivalente a equivalente, es decir, dos y tres Na^+ son reemplazados por cada catión divalente y trivalente intercambiado, respectivamente. Esto incrementa el espacio disponible en la estructura de la zeolita, lo que conlleva a un incremento de su capacidad de adsorción, área superficial, volumen y área de microporos. Al comparar estas magnitudes entre las muestras intercambiadas se tiene que los

mismos son mayores para Fe^{3+}ZT en comparación con Fe^{2+}ZT , lo que está en correspondencia con los argumentos antes expuestos.

Tabla 2. Parámetros superficiales de ZT y sus formas intercambiadas con Fe^{2+} y Fe^{3+} , calculados a partir de las isotermas de adsorción-desorción de N_2 a 77 K

Muestra	S_{BET} (m^2/g)	S_{L} (m^2/g)	S_{EXT} (m^2/g)	V_{mic} (cm^3/g)	A_{mic} (m^2/g)
ZT	80,64	103,54	13,62	0,0301	67,01
Fe^{3+}ZT	155,55	203,80	24,65	0,0599	130,90
Fe^{2+}ZT	122,27	160,80	14,07	0,0499	108,19

3.1.3. Espectroscopía UV-Vis de reflectancia difusa

En la Figura 1 se pueden observar nuevas bandas en las muestras intercambiadas, las cuales han sido asociadas a las especies de hierro incorporadas. En la región entre 210–400 nm se observa una absorción para las muestras Fe^{2+}ZT y Fe^{3+}ZT , las cuales están centradas a 296 nm y 337 nm, respectivamente. Por encima de los 400 nm, las muestras también manifiestan absorción, con máximos centrados a 469 nm, 572 nm y 873 nm para Fe^{2+}ZT , y a 482 nm y 873 nm para Fe^{3+}ZT . La interpretación y asignación de estas bandas es compleja debido a su variedad, lo cual es común en zeolitas que contienen hierro.

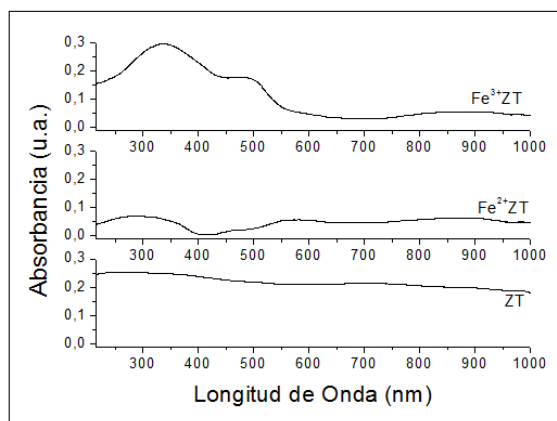


Figura 1. Espectros de reflectancia difusa UV-Vis de ZT y sus formas intercambiadas con Fe^{2+} y Fe^{3+} .

Teniendo en cuenta lo reportado por algunos investigadores (Tuel, Arcon & Millar 1998; Berlier *et al.* 2002; Høj *et al.* 2009; Chávez *et al.* 2013 y Tito *et al.* 2016) las bandas observadas en la región de 210–400 nm del espectro de las muestras intercambiadas han sido esencialmente asignadas a especies de hierro altamente dispersas, principalmente dentro de los canales zeolíticos. Estas bandas pueden estar relacionadas con transferencias de cargas complejas O-Fe y transiciones d-d, asociadas a los

cationes intercambiados y clústeres en posiciones extraenrejados; además, pueden guardar relación con la contribución de clústeres oligoméricos del tipo FexO_y .

El incremento en la adsorción por encima de los 400 nm, observado en ambas muestras modificadas, ha sido asociado a aglomerados de partículas de oxi-hidróxidos de hierro localizados sobre la superficie externa de la zeolita. Esto podría explicarse por una reacción parcial de las especies de hierro intercambiadas con el oxígeno atmosférico y grupos OH retenidos (adsorbidos u ocluidos) sobre el material zeolítico que son liberados durante el intercambio iónico. Tal reacción puede tener lugar con formación de óxidos, hidróxidos y/o oxi-hidróxidos de hierro sobre la fase zeolítica.

Numerosos estudios están disponibles en la literatura sobre la ocurrencia de procesos de formación de dichos compuestos de hierro, principalmente durante el intercambio iónico (Inglezakis, Zorpas & Loizidou 2003; Čapek *et al.* 2005; Rodríguez-Iznaga *et al.* 2007; Tito *et al.* 2016). Atendiendo a la intensidad de estas bandas, los resultados sugieren que Fe^{3+}ZT tiene mayor cantidad de aglomerados de partículas de oxi-hidróxidos de hierro que Fe^{2+}ZT . Además, es válido hacer notar que la banda de adsorción más intensa de estas muestras está centrada a una longitud de onda ligeramente más baja para la muestra intercambiada con Fe^{2+} (296 nm) que para la intercambiada con Fe^{3+} (337 nm), siendo para esta última más intensa. Esto puede ser considerado como un indicio de la naturaleza diferente del catión intercambiado. Así, la diferencia de carga entre estos dos cationes trae aparejado diferencias en su fuerza de interacción con el enrejado de la clinoptilolita y la intensidad de estas bandas.

3.1.4. Espectroscopía Mössbauer

En la Figura 2 se muestran los espectros Mössbauer para ZT, Fe^{2+}ZT y Fe^{3+}ZT , obtenidos a temperatura ambiente. Estos espectros se deconvolucionaron como la suma de las contribuciones de tres dobletes para ZT y Fe^{3+}ZT y cuatro dobletes para Fe^{2+}ZT . Los parámetros de estos dobletes aparecen en la Tabla 3. Un análisis de los mismos, atendiendo a lo reportado en la literatura (Czakó *et al.* 1988; Roque *et al.* 1990; Marco *et al.* 1995; Tito *et al.* 2016) permite plantear que en estas muestras están presentes hierro divalente y trivalente.

Los valores del corrimiento isomérico (IS) de los dobletes 1 y 2 indican que el hierro se encuentra en estado trivalente. La magnitud del desdoblamiento cuadrupolar (QS) del doblete 1, así como su IS, son característicos de una posición tetraédrica, mientras que para el doblete 2 señalan una asignación de la simetría octaédrica. En el caso de los dobletes 3 y 4 (este último solo

presente para Fe^{2+}ZT), los valores de IS significan la presencia de hierro en estado divalente. La magnitud de IS y QS de los dobletes 3 y 4 son características de una coordinación octaédrica.

En el caso de Fe^{2+}ZT , el doblete 4 puede indicar que parte del hierro está en forma de FeSO_4 , lo cual se corresponde con lo reportado por Concepción-Rosabal, Rodríguez-Fuentes & Simón-Carballo (2000) en estudios sobre la clinoptilolita del yacimiento Tasajeras modificada con disoluciones de hierro(II).

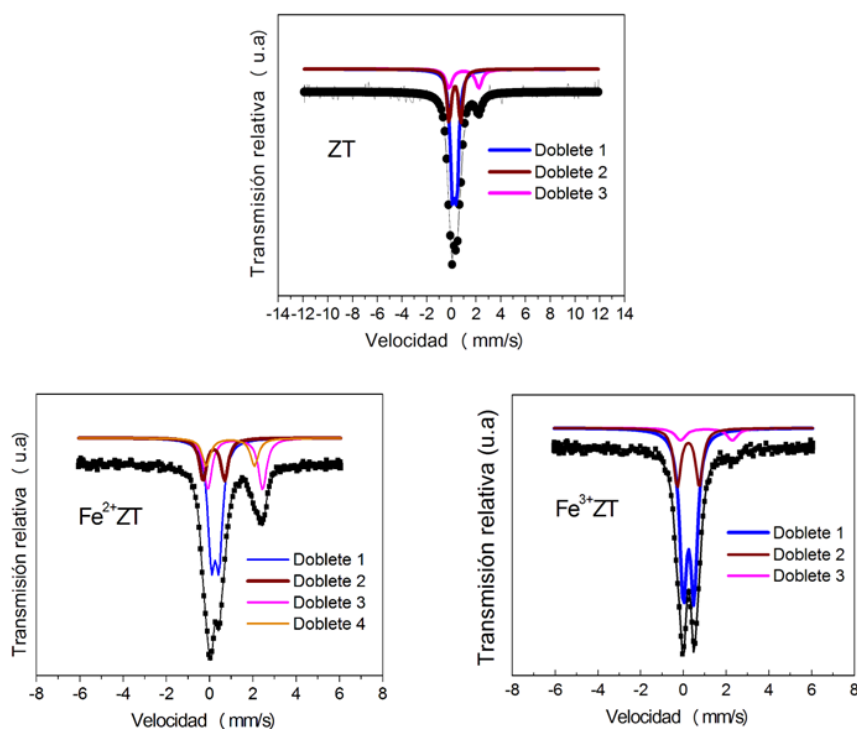


Figura 2. Espectros Mössbauer obtenidos a temperatura ambiente para ZT y sus formas intercambiadas Fe^{2+}ZT y Fe^{3+}ZT .

Para la zeolita ZT estos resultados coinciden con lo confirmado por Roque *et al.* (1990), respecto a la presencia de hierro trivalente. Sin embargo, el autor no reportó la presencia de hierro divalente en esta zeolita natural.

Tabla 3. Parámetros Mössbauer de ZT y las muestras intercambiadas con Fe^{2+} y Fe^{3+}

Doblete	Parámetros Mössbauer	ZT	Fe^{2+}ZT	Fe^{3+}ZT
1	IS (mm/s)	0,38	0,35	0,36
	QS (mm/s)	0,35	0,35	0,50
	W (mm/s)	0,40	0,40	0,40
	A (%)	57,0	46,0	67,0

2	IS (mm/s)	0,41	0,30	0,35
	QS (mm/s)	0,93	1,00	1,03
	W (mm/s)	0,40	0,40	0,40
	A (%)	28,0	17,0	25,0
3	IS (mm/s)	1,14	1,08	1,20
	QS (mm/s)	2,42	2,23	2,42
	W (mm/s)	0,45	0,45	0,60
	A (%)	15,0	13,0	8,0
4	IS (mm/s)	...	1,30	...
	QS (mm/s)	...	2,53	...
	W (mm/s)	...	0,45	...
	A (%)	...	24,0	...

Teniendo en cuenta los valores de las áreas relativas (A en Tabla 3) el hierro que se encuentra en mayor proporción, en todas las muestras, es el Fe^{3+} en coordinación tetraédrica, seguido por el mismo en posición octaédrica. Al comparar las muestras intercambiadas con respecto a ZT se observan cambios en el contenido de estas especies. En Fe^{2+} ZT se produce una disminución del hierro trivalente, tanto en posición tetraédrica como octaédrica, en 9 % y 11 %, respectivamente, y el Fe^{2+} octaédrico también disminuye, aunque solo en un 2 %.

En el caso de Fe^{3+} ZT se tiene que el hierro trivalente en posición tetraédrica se incrementa en un 10 %, mientras que el porcentaje del Fe^{3+} y Fe^{2+} octaédricos disminuyen en 3 % y 7 %, respectivamente. Todos estos descensos en los contenidos de hierro han sido asociados, fundamentalmente, a disolución de fases no zeolíticas relacionadas con hierro provocado por la acción del medio ácido en que se desarrollan los intercambios y, en menor medida, a intercambios de cationes del hierro en posiciones octaédricas.

Los parámetros Mössbauer obtenidos brindan información sobre la valencia y coordinación del hierro en esta zeolita, pero no permiten realizar una asignación de la localización de estas especies en el material en estudio. Teniendo en cuenta las posibles localizaciones del hierro en las zeolitas, consideramos que el Fe^{2+} incorporado en Fe^{2+} ZT y el Fe^{3+} incorporado en Fe^{3+} ZT deben estar en forma de cationes de compensación extraenrejado coordinados octaédricamente en los canales de la clinoptilolita, oxi-hidróxidos originados por hidrólisis parcial de estos cationes y en el caso de Fe^{2+} ZT, además, como FeSO_4 adsorbido en esta zeolita.

3.2. Actividad catalítica en reducción de NO con CO/C₃H₆

Con el objetivo de estudiar las potencialidades catalíticas de las formas intercambiadas Fe²⁺ZT y Fe³⁺ZT en la reducción de NO, se realizaron pruebas usando la reacción modelo de reducción de NO con CO/C₃H₆ en presencia de O₂ (ver ecuación de reacción 3), que simula lo que sucede, por ejemplo, en los tubos de escapes de los automóviles en presencia de O₂ atmosférico. Para la ocurrencia de esta reacción, sin un catalizador, se requiere una elevada temperatura. De aquí el empeño de reducir catalíticamente el NO en esta mezcla de gases, donde el CO y C₃H₆ actúan como agentes reductores del NO y el O₂ promueve el desarrollo de este proceso.



Los resultados obtenidos son mostrados en las Figuras 3 a y b, que reflejan la disminución de la concentración y el porcentaje de conversión de NO, respectivamente. Los resultados revelan que Fe²⁺ZT y Fe³⁺ZT tienen una actividad catalítica mayor en la reducción de NO que ZT. Además, las muestras intercambiadas solamente con Fe²⁺ (Fe²⁺ZT) tienen una actividad catalítica mayor que las intercambiadas con Fe³⁺. Esto permite plantear que los centros activos de mayor actividad catalítica para la reducción de NO están relacionados con el hierro divalente.

Un análisis más detallado de estos gráficos revela que luego de prevalecer el proceso catalítico (por encima de los 200 °C) las curvas de ambas muestras modificadas presentan cambios de pendiente que indican la presencia de centros activos de diferente naturaleza. Fe²⁺ZT exhibe dos cambios de pendiente, uno a 200 °C y otro a 370 °C, mientras que Fe³⁺ZT presenta tres cambios de pendiente: a 200 °C, 370 °C y 450 °C. Para Fe²⁺ZT, la máxima conversión de NO a N₂ (40 %) se alcanza alrededor de los 370 °C, valor a partir del cual se observa el cambio más notable de pendiente.

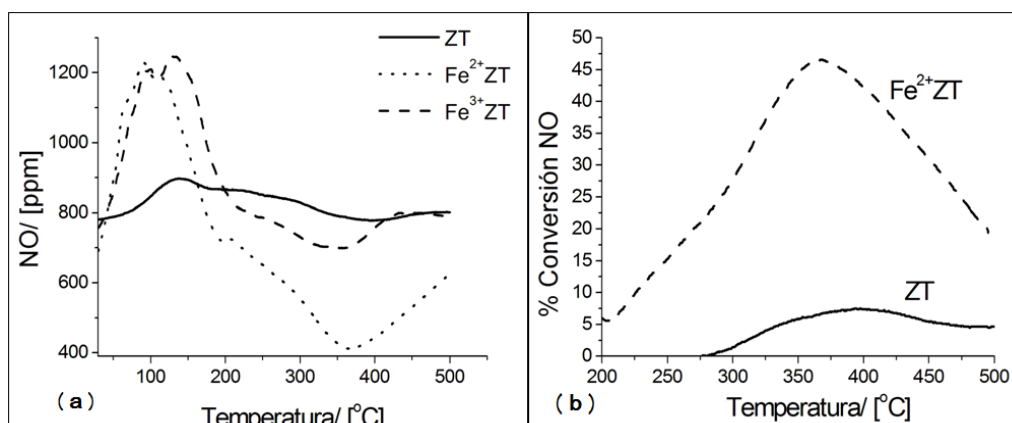


Figura 3. Reducción (a) y % de conversión (b) de NO con CO/C₃H₆ como una función de la temperatura.

La mayor actividad catalítica que posee Fe²⁺ZT está en correspondencia con un mayor contenido de especies catiónicas (cationes Fe²⁺ aislados) que Fe³⁺ZT, lo cual se comprobó por UV-Vis. Para el caso de Fe³⁺ZT también se evidenció la mayor formación de oxi-hidróxidos de hierro. Partículas como estas son las que están presentes, fundamentalmente, en ZT y no manifiestan una actividad catalítica como en las muestras intercambiadas con Fe²⁺ y Fe³⁺. Los incrementos en la concentración de NO observados hasta alrededor de 200 °C se deben a la desorción térmica del NO que fue previamente adsorbido en las muestras durante la estabilización de la mezcla gaseosa en el reactor a temperatura ambiente. Esto es un reflejo de la naturaleza porosa y la capacidad de adsorción de las muestras, evidenciado en los parámetros superficiales antes reportados.

El mecanismo que involucra la reducción catalítica del NO con CO/C₃H₆ en presencia de oxígeno es complejo. Además de las reacciones que implican a los reactivos y productos, son consideradas reducciones y oxidaciones de las especies catiónicas metálicas activas catalíticamente con su consecutiva reoxidación o reducción según corresponda. Otro aspecto considerado es la formación de sitios ácidos Brönsted (OH⁺, O-H⁺) de significativa actividad catalítica. Estos sitios pueden ser originados por la disociación de las moléculas de agua provocadas por los iones intercambiados y por el intercambio de iones hidronio (Parvulescu, Grange & Delmon 1998; Praliaud *et al.* 1998; Wang, Li & Guan 2013; Wang *et al.* 2013). En nuestro caso, para explicar la actividad catalítica, partimos de considerar que sobre los centros activos para la catálisis, ligados a los cationes de hierro y a los sitios ácidos originados, se establece una interacción entre las moléculas de NO con estas especies. Esta interacción debe entrañar, también, una adsorción química, con la consecuente formación de un complejo activado de menor energía que el que se formaría en la reacción sin catalizador. Este complejo

activado facilita la transferencia electrónica al NO, necesaria para su reducción, con la consecuente formación de los productos de la reacción a una menor temperatura. Estudios realizados por FTIR con moléculas sondas de NO han permitido valorar *in situ* la adsorción de esta molécula a temperatura ambiente sobre zeolitas ZSM-5, FER, BEA y MFI, modificadas con especies catiónicas de hierro (Lezcano, Kovalchuk & D'itri 2001; Čapek *et al.* 2005; Ivanova *et al.* 2010; Hadjiivanov *et al.* 2010). En tales estudios se reportó que, además de las bandas características de la adsorción física típica de NO observadas en las zeolitas no modificadas, en las muestras modificadas con hierro se percibieron nuevas bandas que están asociadas con la formación de grupos mononitrosilos y dinitrosilos sobre los sitios iónicos ocupados por cationes aislados del hierro.

La presencia de sitios ácidos Brønsted en las muestras intercambiadas debe estar reforzada por los originados del intercambio paralelo de H_3O^+ , principalmente para Fe^{2+}ZP , lo que acentúa su actividad catalítica.

Los resultados obtenidos revelan la capacidad potencial que posee esta zeolita modificada, con estos cationes de hierro, para desarrollar catalizadores eficientes y baratos para la reducción de NO.

4. CONCLUSIONES

- Los resultados de la caracterización permiten plantear que en las muestras intercambiadas el hierro divalente y trivalente incorporados se encuentran como cationes de compensación extraenrejado, coordinados octaédricamente en los canales de la clinoptilolita y en forma de oxi-hidróxidos originados por hidrólisis de estos cationes. En la muestra intercambiada con Fe^{2+} existe, adicionalmente, FeSO_4 adsorbido y la intercambiada con Fe^{3+} tiene una mayor cantidad de aglomerados de partículas de oxi-hidróxidos de hierro.
- La actividad catalítica en la reducción de NO es mayor en las zeolitas modificadas que en la de partida, siendo la muestra de zeolita intercambiada con hierro(II) la que presenta la mayor actividad catalítica. Esto permite plantear que los principales centros activos para la catálisis están asociados con el hierro divalente.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue apoyada por los proyectos UNAM-PAPIIT (México) IN110713 y IN106715. Se agradece a Eloisa Aparicio, Israel Gradilla, Juan Peralta, Erik Flores y Pablo Munayco (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Río de Janeiro) por el soporte técnico.

6. REFERENCIAS

- BACHER, V.; PERBANDT, C.; SCHWEFER, M.; SIEFERT, R. & TUREK, T. 2013: Kinetics of the NO/NO₂ equilibrium reaction over an iron zeolite catalyst. *Applied Catalysis B: Environmental* 134: 55–59.
- BERLIER, G.; SPOTO, G.; BORDIGA, S.; RICCHIARDI, G.; FISICARO, P.; ZECCHINA, A.; ROSSETTI, I.; SELLI, E.; FORNI, L.; GIAMELLO, E. & LAMBERTI, C. 2002: Evolution of extra-framework iron species in Fe silicalite. 1. Effect of Fe content, activation temperature, and interaction with redox agents. *Journal of Catalysis* 208(1): 64–82.
- ČAPEK, L.; KREIBICH, V.; DEDECEK, J.; GRYGAR, T.; WICHTERLOVÁ, B.; SOBALIK, Z.; MARTENS, J. A.; BROSIUS, R. & TOKAROVÁ, V. 2005: Analysis of Fe species in zeolites by UV-Vis-NIR, IR spectra and voltammetry. Effect of preparation, Fe loading and zeolite type. *Microporous and Mesoporous Materials* 80(1): 279–289.
- CHÁVEZ, F.; RODRÍGUEZ-FUENTES, G.; RODRÍGUEZ-IZNAGA, I.; PETRANOVSKII, V.; ZAMORANO, R. & COLLUCIA, S. 2013: Evidence for controlled insertion of Fe ions in the framework of clinoptilolite natural zeolites. *Microporous Mesoporous Materials* 167: 76–81.
- CONCEPCIÓN-ROSABAL, B.; RODRÍGUEZ-FUENTES, G. & SIMÓN-CARBALLO, R. 1997: Development and featuring of the zeolite active principle FZ: A glucose absorbent. *Zeolites* 19(1): 47-50.
- CZAKÓ, I.; VÉRTES, A.; CZÁRÁN, E. & PAPP, J. 1988: Mössbauer spectroscopic characterization of some Hungarian Zeolites utilized as catalysts. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry Letters* 128(1): 9–14.
- GHASEMIAN, N.; FALAMAKI, C. & KALBASI, M. 2014: Clinoptilolite zeolite as a potential catalyst for propane-SCR-NO: Performance investigation and kinetic analysis. *Chemical Engineering Journal* 236: 464–470.
- HADJIIVANOV, K.; IVANOVA, E.; KEFIROV, R.; JANAS, J.; PLESNIAR, A.; DZWIGAJ, S. & CHE, M. 2010: Adsorption properties of Fe-Containing dealuminated BEA zeolites as revealed by FTIR spectroscopy. *Microporous Mesoporous Materials* 131(1): 1-12.
- HØJ, M.; BEIER, M. J.; GRUNWALDT, J. D. & DAHL, S. 2009: The role of monomeric iron during the selective catalytic reduction of NO_x by NH₃ over Fe-BEA zeolite catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental* 93(1): 166–176.
- IVANOVA, E.; MIHAYLOV, M.; HADJIIVANOV, K.; BLASIN-AUBÉ, V.; MARIE, O.; PLESNIAR, A. & DATURI, M. 2010: Evidencing three distinct Fe^{II} sites in Fe-FER zeolites by using CO and NO as complementary IR probes. *Applied Catalysis B: Environmental* 93(3–4): 325–338.

- INGLEZAKIS, V. J.; ZORPAS, A. A. & LOIZIDOU, M. D. 2003: Simultaneous removal of metals Cu^{2+} , Fe^{3+} and Cr^{3+} with anions SO_4^{2-} and HPO_4^{2-} using clinoptilolite. *Microporous and Mesoporous Materials* 61(1-3): 167–171.
- LEZCANO, M.; KOVALCHUK, V. I. & D'ITRI, J. L. 2001: FTIR study of the interaction of nitric oxide with Fe-ZSM-51. *Kinetics and Catalysis* 42(1): 104-111.
- MARCO, J. F.; GARCÍA, M.; GARCEDO, J. R.; GONZÁLEZ, T.; ARCOYA, A. & SEOANNE, X. L. 1995: On the state of iron in a clinoptilolite. *Hyperfine Interactions* 95(1): 53–70.
- METKAR, P. S.; HAROLD, M. P. & BALAKOTAIAH, V. 2013: Experimental and kinetic modeling study of NH_3 -SCR of NO_x on Fe-ZSM-5, Cu-chabazite and combined Fe- and Cu-zeolite monolithic catalyts. *Chemical Engineering Science* 87: 51–66.
- MOURA, M. L.; MONTEIRO, C.; MORENO, R.; LÓPEZ, T.; JIMÉNEZ, A. & RODRÍGUEZ, E. 2009: Simulation of SCR equipped vehicles using iron-zeolite catalyts. *Applied Catalysis A: General* 366(1): 13–21.
- PÂRVULESCU, V. I.; GRANGE, P. & DELMON, B. 1998: Catalytic removal of NO. *Catalysis Today* 46(4): 233-316.
- PALASH, S. M.; MASJUKI, H. H.; KALAN, M. A.; MASUM, B. M.; SANJID, A. & ABIDIN, M. J. 2013: State of the art of NO_x mitigation technologies and their effect on the performance and emission characteristics of biodiesel-fueled performance and emission characteristics of biodiesel-fueled compression ignition engines. *Energy Conversion and Management* 76: 400–420.
- PRALIAUD, H.; MIKHAILENKO, S.; CHAJAR, Z. & PRIMET, M. 1998: Surface and bulk properties of Cu-ZSM-5 and $\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3$ solids during redox treatments. Correlation with the selective reduction of nitric oxide by hydrocarbons. *Applied Catalysis B: Environmental* 16(4): 359–374.
- RODRÍGUEZ-FUENTES, G.; DE MÉNORVAL, L. C.; REGUERA, E. & CHÁVEZ, F. 2008: Solid state multinuclear NMR study of iron species in natural and modified clinoptilolite from Tasajera deposit (Cuba). *Microporous and Mesoporous Materials* 111(1): 577-590.
- RODRÍGUEZ-IZNAGA, I.; PETRANOVSKII, V.; RODRÍGUEZ-FUENTES, G.; MENDOZA, C. & BENÍTEZ-AGUILAR, A. 2007: Exchange and reduction of Cu^{2+} ions in clinoptilolite. *Journal of Colloid and Interface Science* 316(2): 877–886.
- ROQUE, R.; DÍAZ, C.; REGUERA, E.; FUNDORA, J.; LÓPEZ, L. & HERNÁNDEZ, M. 1990: The state of iron in natural zeolites: A Mössbauer study. *Zeolites* 10(7): 685-689.

- SULTANA, A.; SASAKI, M.; SUZUKI, K. & HAMADA, H. 2013: Tuning the NO_x conversion of Cu-Fe/ZSM-5 catalyst in NH₃-SCR. *Catalysis Communications* 41: 21-25.
- TITO, D.; RODRÍGUEZ-IZNAGA, I.; CONCEPCIÓN-ROSABAL, B.; BERLIER, G.; CHÁVEZ, F.; PENTON, A.; CASTILLÓN, F. F. & PETRANOVSKII, V. 2016: Iron exchanged natural mordenite: UV-Vis diffuse reflectance and Mössbauer spectroscopy characterisation. *International Journal of Nanotechnology* 13(1-3): 112-125.
- TUEL, A. ; ARCON, I. & MILLET, J. M. 1998 : Investigation of structural iron species in Fe-mesoporous silicas by spectroscopic techniques. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions* 94(23): 3501-3510.
- WANG, J.; LIU, Z.; FENG, G.; CHANG, L. & BAO, W. 2013: In situ synthesis of CuSAPO34/cordierite and its selective catalytic reduction of nitrogen oxides in vehicle exhaust: The effect of HF. *Fuel Processing Technology* 109: 101-109.
- WANG, T.; LI, L. & GUAN, N. 2013: Combination catalyst for the purification of automobile exhaust from lean-burn engine. *Fuel Processing Technology* 108:41-46.
- YAHIRO, H. & IWAMOTO, M. 2001: Copper ion-exchanged zeolite catalysts in deNO_x reaction. *Applied Catalysis A: General* 222: 163-181.

Daria Tito-Ferro, dariat@uo.edu.cu

Máster en Química. Profesor Asistente
Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado (CNEA)
Universidad de Oriente, Cuba

Inocente Rodríguez-Iznaga, inocente@imre.oc.uh.cu

Doctor en Ciencias Químicas
Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales (IMRE)
Universidad de La Habana, Cuba

Beatríz Concepción-Rosabal, beatriz@imre.oc.uh.cu

Doctor en Ciencias Físicas
Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales (IMRE)
Universidad de La Habana, Cuba

Fernando Chávez-Rivas, fchavez@esfm.ipn.mx

Doctor en Ciencias Físicas
Escuela Superior de Física y Matemáticas (ASFM)
Instituto Politécnico Nacional (IPN), México

Vitalii Petranoskii, vitalii@cnyn.unam.mx

Doctor en Ciencias Químicas
Centro de Nanociencias y Nanotecnología (CNyN)-UNAM, México

Arbelio Penton-Madrigal, arbelio@fisica.uh.cu

Doctor en Ciencias Físicas
Facultad de Física. Universidad de La Habana. La Habana, Cuba

Felipe Castellón-Barraza, ffcb@cnyn.unam.mx

Doctor en Ciencias Químicas
Centro de Nanociencias y Nanotecnología (CNyN)-UNAM, México

Influencia de la concentración de sólido en la velocidad de sedimentación de lodo de la industria de áridos

Benigno Leyva-de la Cruz
Yulexis Guillen-Campo
Danienkis Suárez-Columbié
Rodney Martínez-Rojas
Raúl Izquierdo-Pupo

Resumen

El propósito del estudio fue determinar, para el lodo generado en el proceso de lavado de la planta procesadora de áridos del Jobo de Sagua de Tánamo, cómo afecta el porcentaje de sólido a la velocidad de sedimentación teórica que se predice por medio de la ley de velocidad de Stokes. Muestras de la tubería de descarga y del área de sedimentación del lodo fueron analizadas desde el punto de vista granulométrico, densimétrico y de concentración del sólido. La variable porcentaje de sólido (S) se estudió a cuatro niveles (4, 12, 20 y 28 %) y el tiempo (t) se evaluó a intervalos de veinte minutos durante cinco horas. El comportamiento de la sedimentación del lodo se caracterizó por medio de la velocidad de sedimentación. Los resultados indican que en este caso la ley de velocidad de Stokes no es válida para predecir la velocidad de sedimentación del lodo, para un nivel de confianza del 95 %, por lo que se obtiene una función de corrección para la ley de velocidad de Stokes, expresada a través de un modelo matemático polinómico de segundo grado.

Palabras clave: ley de Stokes; lodos industriales; velocidad de sedimentación.

Influence of solids concentration on the sedimentation rate of the mud in the aggregate industry

Abstract

The objective of this investigation is to determine, for the mud resulting from the wash process in the Jobo community arid industry in Sagua de Tánamo, the impact of solids percent on the theoretical sedimentation velocity that is predicted by the Stokes velocity Law. Samples of the discharge pipeline and the mud sedimentation area were analyzed from granulometric, density and solids concentration points of view. The solids percentage variable (S) was analyzed in four scenarios (4, 12, 20 and 28 %) and time (t) was evaluated at intervals of 20 minutes for 5 hours. The behavior of mud sedimentation was characterized through the sedimentation velocity. The results indicate that the Stokes velocity law does not apply for estimating the mud sedimentation velocity with a 95% confidence. Therefore, a correction function is obtained for the Stokes velocity law expressed through the polynomial mathematical model of second degree.

Keywords: Stokes law; industrial mud; sedimentation velocity.

1. INTRODUCCIÓN

En la planta procesadora de áridos del Jobo (municipio de Sagua de Tánamo) el lodo resultante del proceso de lavado es conducido a través de tuberías hacia una laguna de sedimentación. Para conseguir reciclar el agua al proceso se está considerando la colocación de un equipo que permita la separación de la fase líquida de la fase sólida, lo que redundaría en un uso más racional del agua y de la energía en la planta de áridos.

La selección correcta del equipo más racional para estos fines requiere de estudios de sedimentación del lodo para conocer la influencia de las características del mismo sobre el sistema de tratamiento que se elija.

La sedimentación de partículas en un fluido es un fenómeno que ha sido utilizado con fines prácticos desde épocas muy remotas; actualmente es de especial relevancia en las industrias de tecnologías de descontaminación, farmacéuticas, de procesos, en la elaboración de revestimientos de todo tipo, de materiales cerámicos de alta resistencia, concentración de suspensiones minerales, entre otras (Cerpa 1999).

Bajo el término sedimentación se designan genéricamente las operaciones de separación parcial de sistemas líquido-sólido, en virtud de la fuerza de gravedad o la centrífuga (Perry 2000).

El lodo proveniente de la planta de áridos es una suspensión líquido-sólido cuyas propiedades dependen fundamentalmente de la fuente o cantera de la cual se extrae la materia prima, de la tecnología utilizada para la clasificación del árido, de la vía de separación de la parte líquida, de las condiciones técnicas para el lavado y de los requerimientos del producto final (Leyva *et al.* 2014).

Diferentes investigaciones han sido desarrolladas para determinar las causas que afectan la sedimentación. Beyrís y Falcón (2000) exponen que el comportamiento de la sedimentación en pulpas lateríticas del proceso de lixiviación ácida varía en función de su composición granulométrica, observando que al aumentar el contenido de la clase gruesa disminuye la zona de caída libre y se obtienen sólidos más concentrados; sin embargo, con el aumento de partículas finas ocurre lo contrario: se retarda la sedimentación y la concentración de sólido durante el espesamiento es menor.

Falcón y otros investigadores (1997) plantean que la composición iónica del lodo es un parámetro a tener en cuenta al estudiar la sedimentación, pues la presencia de determinados iones en bajas concentraciones influye en los fenómenos de dispersión y coagulación de las partículas pequeñas durante

la sedimentación, lo cual se puede lograr con el uso de sustancias químicas electrolíticas.

Valdés (1983) estudia la influencia del pH en la sedimentación, determinando un rango óptimo de $\text{pH}=6,6-7,6$ (cercano al punto isoeléctrico), lo que más tarde fue corroborado en otras investigaciones (Beyrís & Falcón 2000; Falcón *et al.* 1997).

Nebot (1969) no llega a resultados favorables al estudiar el efecto del magnetismo en la sedimentación, aplicando un campo magnético con intensidad desde 0 hasta 4 000 Gauss. Por otra parte, Ponce *et al.* (1983) analiza muestras de pulpa con 45 % de sólido del proceso metalúrgico del níquel, logrando explicar la relación entre la composición mineralógica y la química, así como la posibilidad de que sus variaciones influyan en la sedimentación de la pulpa laterítica. Sin embargo, no establece comparaciones con otros valores de concentración que permitan detectar y explicar las diferencias. Beyrís y Falcón (2007) explican la influencia que tiene la composición mineralógica de la mena en el proceso de sedimentación de las pulpas de mineral laterítico.

Para el análisis físico de la sedimentación se han propuesto varios modelos. Uno de ellos, difundido universalmente, es el que se basa en la ley de Stokes, según lo reportado por Pavlov (1981) y por Mariño, Mora y Chang (2009), que establece la dependencia entre la velocidad de sedimentación, la granulometría, la densidad aparente del sólido y la viscosidad del medio dispersante. Este modelo, en general, es válido en el movimiento de partículas esféricas pequeñas que se mueven a velocidades bajas, esto es: número de Reynolds menor de 0,5 (Kasatkin 1987).

Robinson (1926), Steinour (1944) y Hawks-Ley (1950) (citados todos por Jiménez 2014) proponen sendos modelos que consideran la influencia del porcentaje de sólido en la velocidad de sedimentación. Las fórmulas propuestas por ellos se basan en la ley de velocidad de Stokes. Robinson cambia las variables densidad y viscosidad dinámica del medio dispersante por la densidad y viscosidad de la mezcla e introduce un coeficiente de corrección. Steinour (1994) realiza el cambio de la variable viscosidad del medio dispersante por la viscosidad de la mezcla e inserta una función de corrección para tener en cuenta la influencia de la porosidad. Hawks-Ley utiliza un método parecido al empleado por Steinour y obtiene similar resultado.

Para poder aplicar las expresiones de estos modelos es necesario disponer de todos los datos involucrados en el análisis, algunos de los cuales pueden no estar al alcance para una determinada aplicación, por lo que es

conveniente disponer de otros modelos que aumenten las posibilidades de cálculo de la velocidad de sedimentación.

Por lo anteriormente planteado este trabajo tiene como objetivo determinar cómo afecta el porcentaje de sólido en la velocidad de sedimentación teórica para el lodo generado en el proceso de lavado de áridos de la planta de beneficio de Sagua de Tánamo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Análisis experimental

Se utilizaron muestras de lodo y de arcilla tomadas en dos puntos del proceso tecnológico de la planta procesadora de árido: el primero en la tubería de descarga (M1) y el segundo en la laguna de sedimentación (M2).

Para la muestra M1 se hizo un compósito del lodo evacuado por la tubería, tomando muestras parciales de un litro cada dos horas durante dos días. El lodo se homogenizó y almacenó en cantidad de cinco litros para la realización de los experimentos.

La muestra M2 se conformó, mediante el método de puntos propuesto por Mitrofanov (1984), a partir de la arcilla contenida en el lodo sedimentado en la laguna de sedimentación, hasta obtener un volumen de 4 kg.

2.1.1. Granulometría

La granulometría se obtuvo con un analizador de partículas compacto 22 (*Analysette 22 Compact*). Este método puede utilizarse como alternativo al tamizado por la vía húmeda propuesto por Andreiev, Perov y Zverìevich (1987), ya que la muestra a analizar contiene un alto porcentaje de partículas finas. Dicho analizador posee un rango de medición de 0,3 μm a 300 μm .

2.1.2. Densidad de la arcilla

La densidad de la arcilla se obtuvo por el método del picnómetro, siguiendo el procedimiento propuesto por Heny, Fred y Stephen (1959). Para ello se utilizó un juego de picnómetros de 25 ml, una pipeta, una balanza digital con precisión $\pm 0,0001$ g y una estufa de temperatura hasta 100 °C. Finalmente, la densidad de la arcilla se obtiene como producto del peso específico relativo del sólido por la densidad del agua.

2.1.3. Densidad del lodo

Para determinar esta propiedad se utilizó el método volumétrico, a través del procedimiento siguiente: se tomó una probeta de capacidad 250 ml y se pesó; se tomó la muestra del lodo y se homogenizó mediante agitación; se

vertió el lodo en la probeta hasta el volumen de 25 ml y se pesó la probeta con el lodo, obteniéndose los resultados en gramos.

2.2. Diseño del experimento

Para la determinación de la influencia que ejerce el porcentaje de sólido contenido en el lodo sobre la velocidad de sedimentación teórica se utilizó un diseño de experimento factorial completo. Las variables de entrada consideradas fueron: porcentaje de sólido (S) y tiempo (t). El porcentaje de sólido se estudió a cuatro niveles (4, 12 y 20 y 28 %) y el tiempo se evaluó a intervalos de veinte minutos durante cinco horas.

2.2.1. Selección de las variables de entrada y sus niveles

Los cuatro niveles de porcentaje de sólido se escogieron atendiendo a consideraciones prácticas y teóricas. En la instalación, el lodo que se evacúa por la tubería de descarga posee un 4 % de sólido (Leyva *et al.* 2014) y se evalúa la posibilidad de incrementar el porcentaje de sólido contenido en el lodo hasta un 28 %, con el propósito de aumentar la disponibilidad de agua en la instalación (García, Leyva y Laurencio 2014) y se incluyen dos niveles intermedios, espaciados uniformemente, para un mejor estudio del comportamiento de la sedimentación.

Las pruebas de sedimentación para el 4 % de sólido se realizaron para la muestra M1, mientras para la muestra M2 se ensayaron los restantes porcentajes de sólido (12 %, 20 % y 28 %).

La variable tiempo y sus niveles se definieron sobre la base de la característica del instrumento de la prueba y la del lodo, de manera tal que fuese posible definir la curva que exprese el comportamiento de la interface en un diagrama de altura de sedimentación (Z), en función del tiempo.

2.2.2. Caracterización de la variable de salida

El comportamiento de la sedimentación en el lodo se caracterizó por medio de la velocidad de sedimentación, la cual se definió, desde el punto de vista matemático, como la rapidez con que varía la altura de la interface en la unidad de tiempo.

Las curvas de sedimentación se realizaron de forma experimental para ambas muestras por separado, tomando el tiempo de sedimentación y la altura de la interfase para cada tiempo en una probeta de 1 000 ml. De esta manera se graficó la curva de sedimentación del lodo para cada porcentaje de sólido.

Para el análisis físico-matemático del proceso de sedimentación se tuvo en cuenta lo planteado por Pavlov (1981) y por Mariño, Mora y Chang (2009).

El modelo propuesto (ley de velocidad de Stokes) para la determinación de la velocidad de sedimentación se refiere a continuación:

$$\omega_{sed} = \frac{d^2(\rho_s - 1)g}{18 \cdot \nu_m} \quad (1)$$

Donde:

ω_{sed} – velocidad de sedimentación en caída libre, cm/s;

d - diámetro medio de las partículas de mayor tamaño, cm;

ρ_s – densidad aparente del sólido, g/cm³;

ν_m - coeficiente cinemático de viscosidad del medio dispersante, cm²/s;

g – aceleración de caída libre, cm/s².

Los resultados de la velocidad de sedimentación para los distintos porcentajes de sólido fueron comparados con los valores teóricos predichos por la ecuación 1.

2.2.3. Matriz de planificación del experimento

En total, se efectuaron 192 pruebas, 64 experimentos y dos réplicas por cada uno. Los 64 experimentos se identificaron con números del 1 al 4, siguiendo el nivel del porcentaje de sólido, la letra **a** para la primera repetición y la letra **b** para la segunda.

2.2.4. Elaboración de los resultados

Para aumentar la representatividad y considerar la incertidumbre de los resultados en la determinación de los parámetros del lodo se efectuaron tres mediciones para cada parámetro, las cuales se analizan sobre la base de criterios estadísticos. Las expresiones matemáticas y procedimientos que se utilizaron en el análisis son las que se plantean a continuación.

Muestro aleatorio simple

La cantidad de réplicas a realizar para evaluar la tendencia se determinó tomando como referencia el siguiente modelo para el cálculo, de acuerdo con lo expuesto por Miller, Freun & Richar (2005):

$$n = \left[Z_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{E} \right]^2 \quad (2)$$

$Z_{\alpha/2}$ - estadístico de la distribución normal;

α – nivel de significancia;

σ – desviación típica poblacional;

E- error máximo de estimación.

Aseguramiento de la normalidad

El análisis estadístico de la medida de la tendencia central se efectuó aplicando las expresiones matemáticas que se refieren a continuación (Miller, Freun & Richar 2005):

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} X_i}{n} \quad (3)$$

$$LT_{Xm\acute{a}x} = \bar{X} + t_{\alpha/2} \cdot S \quad (4)$$

$$LT_{Xm\acute{i}n} = \bar{X} - t_{\alpha/2} \cdot S \quad (5)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (6)$$

Donde:

\bar{X} – media aritmética de las mediciones realizadas;

$LT_{Xm\acute{a}x}$ – límite superior de tolerancia;

$LT_{Xm\acute{i}n}$ – límite inferior de tolerancia;

S- desviación típica muestral;

t - estadístico de la distribución probabilística de Student;

n - total de observaciones.

Se eliminaron aquellos casos donde existieron valores anormales, siguiendo las indicaciones de Hernández (1986).

Ajuste de curva por regresión

El ajuste de curva por regresión se basó en el método de mínimo cuadrado; el cual consiste en ajustar una curva al conjunto de puntos ordenados, de tal forma que se logra minimizar la distancia existente entre los puntos definidos por la recta ajustada y los puntos correspondientes. El método de mínimo cuadrado se expresa por un sistema de ecuaciones normales (Miller, Freun & Richar 2005). Dicho sistema se muestra a continuación:

$$\sum_{i=1}^n Y_i = a \cdot n + b \cdot \sum_{i=1}^n X_i \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n X_i \cdot Y_i = a \cdot \sum_{i=1}^n X_i + b \cdot \sum_{i=1}^n X_i^2 \quad (8)$$

Donde:

X_i - variable que adquiere los valores de la abscisa;

Y_i - variable que adquiere los valores de la ordenada;

n - conjunto de pares ordenados;

- a. intersección de la línea ajustada con el eje de la ordenada;
- b. pendiente de línea ajustada.

El ajuste de curva por regresión se realizó en el Tabulador Microsoft Excel utilizando la herramienta para análisis de datos. La bondad del ajuste realizado con el método de mínimo cuadrado se verificó mediante el criterio del coeficiente de determinación, el de Student y el de Fischer.

Determinación del error relativo

Esto se aplicó para determinar la validez de los resultados que se obtienen cuando se aplica el procedimiento utilizado y los que son universalmente reconocidos como correctos, se expresa como la diferencia porcentual entre el valor obtenido y el "valor correcto" (Hernández 1986).

El error relativo puntual se calculó a través de la siguiente expresión, la cual fue tomada de Hernández (1986):

$$E_{rel} = \left| \frac{X_1 - X_2}{X_2} \right| \cdot 100\% \quad (9)$$

Donde:

X_1 - valor obtenido;

X_2 - valor correcto;

E_{rel} - error relativo puntual, %.

Prueba de hipótesis estadística relativa a una media

Este procedimiento se aplicó con el objetivo de determinar si las variaciones mostradas entre los valores de la velocidad de sedimentación determinada por la ecuación 1 y la velocidad real obtenida para distintos porcentajes de sólido son significativas.

1. Definición de las hipótesis

Hipótesis nula (H_0): No existen diferencias significativas entre las medias de las velocidades y su valor esperado ($\mu_0 = \mu$).

Hipótesis alterna (H_1): Existen diferencias significativas entre las medias de las velocidades y su valor esperado ($\mu_0 \neq \mu$).

2. Nivel de significancia: α
3. Criterio de rechazo de la hipótesis nula: Se rechaza la hipótesis nula si $t < -t_{\alpha/2}$ o $t > t_{\alpha/2}$ con $v = n - 1$ grados de libertad, donde $t_{\alpha/2}$ es el estadístico de la distribución de Student, n es la cantidad de observaciones consideradas en el cálculo y t se determina por la siguiente fórmula (Miller, Freun & Richar 2005):

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{S / \sqrt{n}} \quad (10)$$

Donde:

μ - es la media poblacional, los demás parámetros ya se definieron anteriormente.

4. Cálculo: El cálculo para la prueba se efectuó utilizando la herramienta de análisis de datos en el programa tabulador Microsoft Excel.
5. Decisión: La decisión se tomó sobre la base del criterio de rechazo definido en el paso 3 del procedimiento

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El valor promedio de las tres mediciones correspondiente a cada parámetro y el rango de normalidad para cada experimento, para lo cual se utilizaron las ecuaciones desde la 2 hasta la 6, indican que todos los resultados están bajo control estadístico, al no mostrarse valores fuera de los rangos calculados.

3.1. Granulometría

Como puede apreciarse en la Figura 1 el d_{80} se corresponde con el diámetro de partícula igual a 0,039 mm, lo cual indica que el 80 % de la muestra presenta un diámetro inferior a este valor. Este tamaño de partículas da lugar a suspensiones con un comportamiento típico de los sistemas de hidromezclas estructurales (Turro 2002).

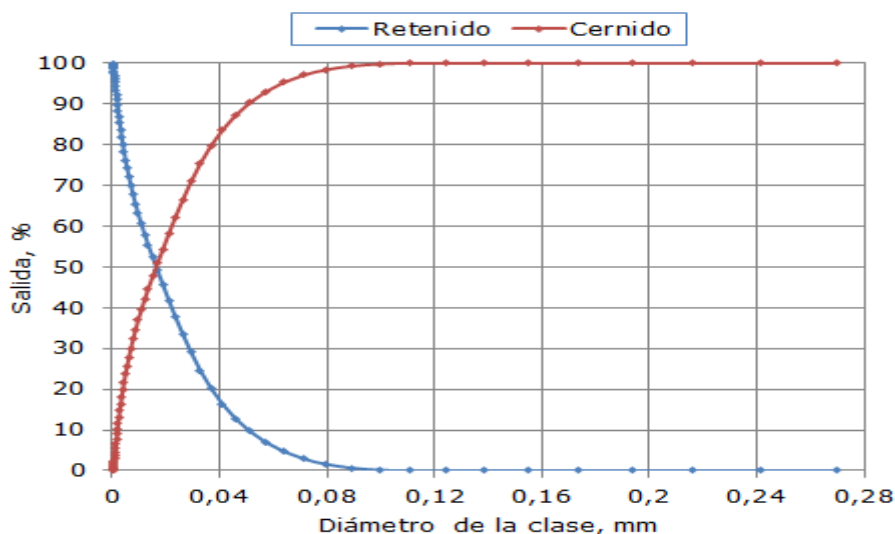


Figura 1. Curva de características granulométricas sumarias de la arcilla analizada.

3.2. Densidad de la arcilla

Existe una probabilidad del 95 % de que si se realizan las mediciones de la densidad de la arcilla (muestra M2) bajo condiciones similares a las que existieron en este trabajo el resultado se obtenga en el rango de 1,599 a 2,374 g/cm³; con valor para la media aritmética normal de 1,982 g/cm³.

3.3. Densidad del lodo

La densidad del lodo es de 1,021 g/cm³, con una probabilidad de ocurrencia del 95 %. La Tabla 1 resume los resultados obtenidos para cada porcentaje de sólido.

Tabla 1. Valores de los parámetros del lodo para ambas muestras

Muestras	S, %	Densidad del lodo, kg/m ³	Concentración volumétrica, %
M1	4	1 021,31	2
M2	12	1 063,21	6
M2	20	1 109,98	11
M2	28	1 161,06	16

3.4. Velocidad de sedimentación del lodo

La curva de sedimentación del lodo se muestra en la Figura 2. Puede observarse que la tangente de la curva correspondiente a la fase de caída libre disminuye con el aumento del porcentaje de sólido, ocurriendo lo contrario en la fase de caída contrariada. Ello se explica por el aumento del choque entre partículas según aumenta el contenido de sólido, lo que acentúa la violación de los supuestos de la ley de Stokes.

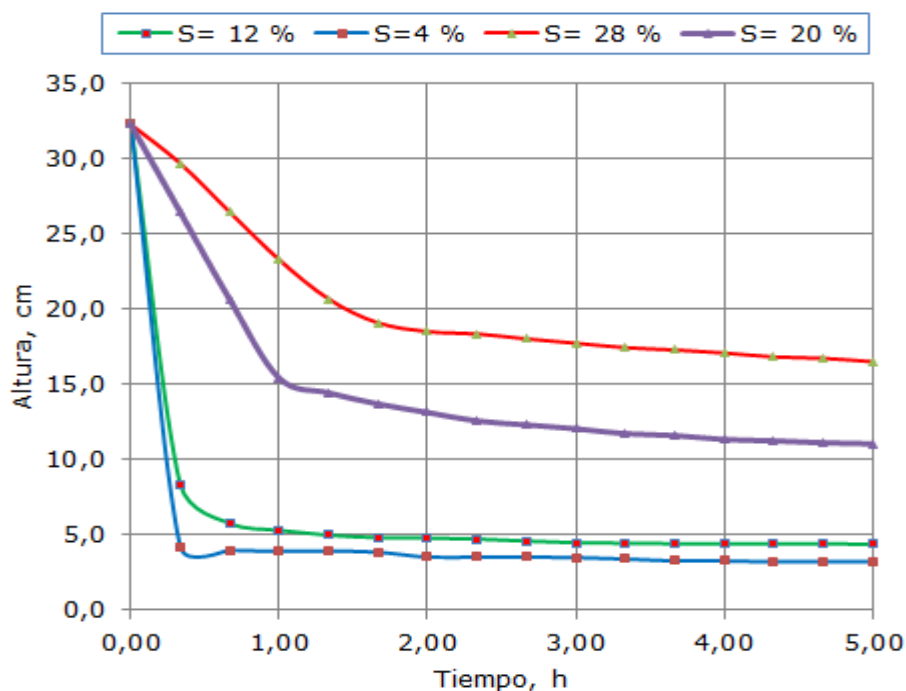


Figura 2. Curvas de sedimentación del lodo.

La Tabla 2 muestra los ocho modelos matemáticos obtenidos para establecer la tendencia del comportamiento de la altura de sedimentación en función del tiempo y la velocidad de sedimentación correspondiente.

Tabla 2. Tendencias de la altura de sedimentación

No.	Modelos obtenidos	Criterio de idoneidad	Condición de validez	$V_{sed} \cdot t$ cm/h
1	$Z = 32,30 - 84,12 \cdot t$	$R^2 = 0,999'$	S = 4 %	84,12
2	$Z = 4,17 - 0,232 \cdot t$	$R^2 = 0,925$	S = 4 %	0,232
3	$Z = 32,30 - 71,73 \cdot t$	$R^2 = 0,999'$	S = 12 %	71,73
4	$Z = 5,70 - 0,39 \cdot t$	$R^2 = 0,92$	S = 12 %	0,39
5	$Z = 32,19 - 16,93 \cdot t$	$R^2 = 0,999$	S = 20 %	16,93
6	$Z = 14,95 - 0,86 \cdot t$	$R^2 = 0,912$	S = 20 %	0,86
7	$Z = 32,13 - 8,23 \cdot t$	$R^2 = 0,991$	S = 28 %	8,23
8	$Z = 20,08 - 0,74 \cdot t$	$R^2 = 0,977$	S = 28 %	0,74

Los resultados mostrados en la Tabla 2 indican que los modelos propuestos son idóneos para la predicción de la altura de sedimentación en función del tiempo, puesto que para todos los casos el coeficiente de determinación está próximo a la unidad y se cumple el criterio de Fisher y el de Student (el

Fisher calculado es mayor que el crítico y la probabilidad para t es menor que el nivel de significancia).

Comparando los resultados de la velocidad de sedimentación expuestos en la Tabla 2 con los que se predicen, a través de la ecuación 1, mediante el empleo de la ecuación 9, se obtiene que el error relativo puntual varía de un 71 % a un 97 % para la fase de caída libre y de un 99,7 % a un 99,9 % para la fase de caída contrariada, según aumenta el porcentaje de sólido en el rango de 4 % a 28 %; esto es asumiendo un diámetro de partícula de 0,0039 cm (d_{80} cernido).

De manera complementaria se aplica la ecuación 10, determinándose que existen diferencias significativas entre los valores de las velocidades que se comparan, al nivel de significancia del 0,05, puesto que el valor de t fue igual a -12,94 y -1981,18 para la fase de caída libre y contraria, respectivamente, el cual es menor que -3,18 (el valor de t en 0,025 con tres grados de libertad). Esto sugiere que la ecuación 1 debe estar afectada por un término que tenga en cuenta la influencia del porcentaje de sólido.

Resulta conveniente, desde el punto de vista práctico, sustituir la descripción de la influencia de la concentración de sólido en dependencia de los factores que fenomenológicamente influyen (pH, porosidad, viscosidad del lodo, entre otros) por la descripción empírica que integran estos factores en una función de la concentración. Esto es válido si se asume que la variabilidad de los factores esenciales no inutiliza la referida función de la concentración.

3.5. Función de corrección

La ecuación 1 es afectada por una función que considera la influencia del porcentaje de sólido en la velocidad de sedimentación teórica; esto es equivalente a decir que se dividen los resultados que se predicen de la velocidad de sedimentación teórica entre los que se obtienen de una función del porcentaje de sólido para poder hallar la velocidad de sedimentación real. La estructura de tal arreglo se muestra a continuación en la ecuación 11.

$$v_{sed} = \frac{d^2(\rho_s - 1)g}{18 \cdot \nu_m} \cdot \frac{1}{f(S)} \quad (11)$$

Donde: $f(S)$ -es una función que tiene en cuenta la influencia que ejerce el contenido de sólido en la velocidad de sedimentación teórica.

La Figura 3 muestra el comportamiento de la función de corrección en función del porcentaje de sólido. Se observa que la tendencia para la fase de caída libre y para la fase de caída contrariada puede ser representada

significativamente (coeficiente de determinación próximo a 1) por un modelo polinómico de segundo grado.

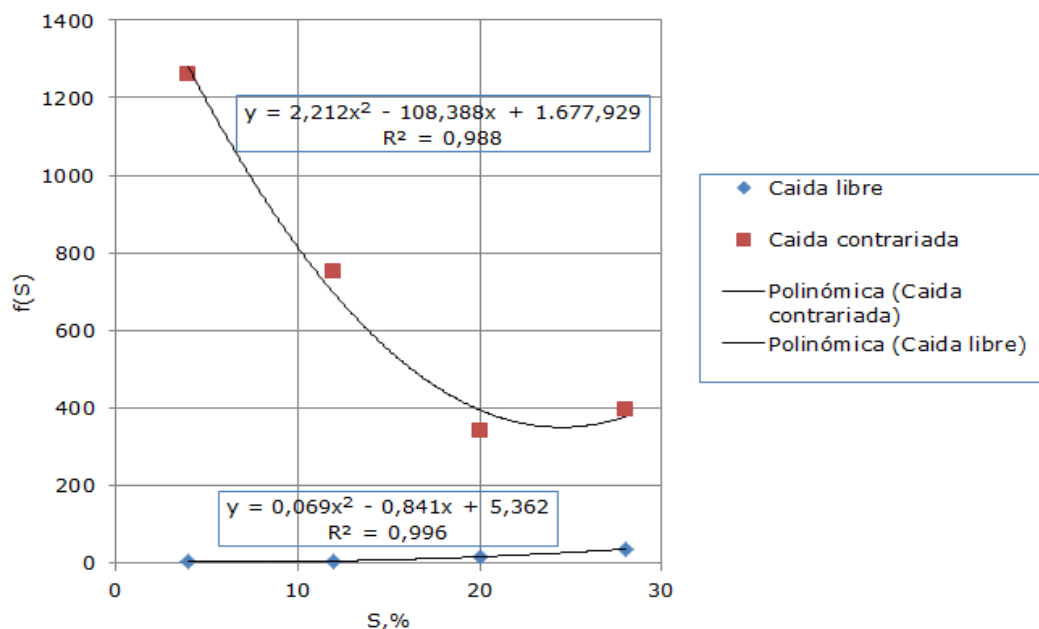


Figura 3. Comportamiento de la función de corrección.

La expresión de la función establecida para describir cómo afecta el porcentaje de sólido a la velocidad de sedimentación teórica se muestra a continuación:

$$f(S) = aS^2 + bS + c \quad (12)$$

Donde:

a , b y c - son coeficientes empíricos que dependen de las propiedades de la suspensión.

Para la zona de caída libre los coeficientes a , b y c adquirieron en este caso el valor de 0,069, -0,841 y 5,362, en ese mismo orden; mientras que para la zona de caída contrariada los valores son: 2,212, -108,388 y 1 637,929, respectivamente. Los resultados mostrados se fundamentan en un coeficiente de determinación (R^2) de 0,996 para caída libre y 0,988 para caída contrariada.

El comportamiento de la función de corrección se explica por el hecho de que con el incremento del porcentaje de sólido en el lodo se acentúa la violación de los supuestos que sustentan la ley de velocidad de Stokes.

4. CONCLUSIONES

Mediante la función de corrección obtenida para la ley de Stokes en este estudio se describe cómo afecta la velocidad de sedimentación teórica el

contenido de sólido en el lodo generado en el proceso de lavado de la planta procesadora de áridos del Jobo de Sagua de Tánamo. Esta función expresa, a través de un modelo matemático polinómico de segundo grado, el hecho de que con el aumento del contenido de sólido en el lodo la velocidad de sedimentación real en la fase de caída libre disminuye, mientras aumenta en la fase de caída contrariada

5. REFERENCIAS

- ANDREIEV, S.; PEROV, V. & ZVERIÈVICH, V. 1987: *Trituración, desmenuzamiento y cribado de minerales*. Pueblo y Educación, La Habana, 536 p.
- BEYRÍS, M. P. E. & FALCÓN, H. J. 2000: Consideraciones del efecto de la composición granulométrica en el proceso de sedimentación. En: Evento CINAREM'2000. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa.
- BEYRÍS, M. P. & FALCÓN, H. J. 2007: Sedimentación de pulpas minerales lateríticas en la tecnología de lixiviación ácida a presión: incidencia de la composición mineralógica. *Minería & Geología* 23(1): 1-14.
- CERPA, A. 1999: Mineral content and particle size effects on the colloidal properties of concentrate lateritic suspensions. *Clays and Clay Minerals* 47(4): 555-520.
- FALCÓN, J.; BEYRÍS, P.; FERRER, E. & MONTERO, M. 1997: Sedimentación de las pulpas crudas de minerales lateríticos de la planta Moa Nickel S.A. *Minería & Geología* 14(1): 31-36.
- GARCÍA, E.; LEYVA, B. & LAURENCIO, H. 2014: Sistema de sedimentación para la recuperación de aguas residuales del proceso de lavado de áridos en la UEB del Jobo. *Ciencia & Futuro* 4(4): 22-41.
- HENY, K.; FRED, H. & STEPHEN, L. 1959: *Mineralogía*. Edición revolucionaria, La Habana.
- HERNÁNDEZ, S. 1986: *Metrología dimensional*. Editorial ISPJAE, La Habana.
- JIMÉNEZ, M. 2014: *Sedimentación de pulpas minerales lateríticas en la tecnología carbonato amoniaco y su influencia en el consumo de energía de los sedimentadores*. Tesis de grado. Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- KASATKIN, A. 1987: Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química. Segunda parte. Pueblo y Educación, La Habana, p. 262-366.
- LEYVA, B.; GUILLEN, Y.; TORRES, E. & LAURENCIO, H. 2014: Pronóstico de la velocidad crítica de transportación de lodo residual. En: Enermoa. CD-Rom. Instituto Superior Minero Metalúrgico.

- MARIÑO, A.; MORA, L. & CHANG, A. 2009: *Equipos de la metalurgia no ferrosa*. Felix Varela, La Habana, 238 p.
- MILLER, R.; FREUN, J. E. & RICAR, J. 2005: *Probabilidad y Estadística Para Ingeniero*. Félix Varela, La Habana, p. 25–30.
- MITROFANOV, L. 1984: *Investigación de las capacidades de enriquecimiento de los minerales*. MIR, Moscú.
- NEBOT, M. 1969: Prueba de sedimentación con pulpas sometidas a un campo magnético. Trabajo de investigación. E.C.P.S.A. Moa.
- PAVLOV, K. 1981: *Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química*. MIR, Moscú.
- PONCE, N.; HERNÁNDEZ, N.; INFANTE, G.; CABRERA-DÍAZ, I.; HIDALGO, M. 1983: Posible influencia de la composición mineralógica en la sedimentación de la pulpa cruda de Moa. *Minería & Geología* 1(3): 215-238.
- PERRY, K. 2000: *Perry's chemical engineers' handbook*. 2 t. Editorial Revolucionaria, La Habana.
- TURRO, A. 2002: *Estudio del hidrotransporte de las colas en el proceso carbonato amoniaco*. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 95 p.
- VALDÉS, G.F. 1983: *Principios químicos coloidales de la sedimentación de las pulpas altamente dispersas de mineral laterítico de la fábrica de Moa*. Tesis Doctoral. Moscú, 1983.

Benigno Leyva-de la Cruz bleyva@ismm.edu.cu

Profesor Asistente. Máster en Electromecánica, Departamento de Ingeniería Mecánica
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba.

Yulexis Guillen-Campo yguillenc@aei-ucmbybat.co.cu

Ingeniero Hidráulico. Holguín, Cuba.

Daniesky Suárez Columbié. dsuarez@ismm.edu.cu

Asistente técnico docente. Departamento de Ingeniería Metalúrgica.
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba.

Rodney Martínez Rojas rmartinez@ismm.edu.cu

Profesor Asistente. Máster en Electromecánica. Departamento de Ingeniería Mecánica.
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba

Raúl Izquierdo Pupo rizquierdo@ismm.edu.cu

Profesor Titular. Doctor en Ciencia Técnicas. Departamento de Ingeniería Mecánica.
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín,
Cuba.

Evaluación de modelos 2D de variables geotecnológicas en un bloque de un yacimiento laterítico cubano. Quinta parte: Optimización combinatoria del método UPD

Arístides A. Legrá-Lobaina
Aliet Lamorú-Reyes
Alexei Cala-Hinojosa

Resumen

En el trabajo, mediante búsquedas exhaustivas, se estudia la optimización combinatoria de la modelación UPD bidimensional de las variables: espesor y concentraciones de níquel, hierro y cobalto en un bloque de un yacimiento laterítico cubano. El método UPD es un estimador numérico con parámetros q , δ y ε que a partir de un conjunto de datos permite obtener un modelo de mallas que representa el comportamiento de una propiedad U de algún objeto natural o tecnológico que se investiga en cierto dominio espacial. Conocido un conjunto de n puntos $(P_i; U_i)$, que expresan los valores U_i para las correspondientes coordenada espaciales P_i , este método permite estimar el valor de U para cualquier coordenada P de su dominio, como una combinación lineal de potencias q de las distancias euclidianas

Palabras clave: modelación; yacimiento laterítico; red de muestreo; estimación; método UPD; optimización combinatoria; búsqueda exhaustiva.

Assessing the 2D models of geotechnical variables in a block of a Cuban lateritic site. Fifth part: combinatorial optimization of the UPD method

Abstract

In the work, through exhaustive searches, we study the combinatorial optimization of two - dimensional UPD modeling of the variables: thickness and concentrations of nickel, iron and cobalt in a block of a Cuban lateritic deposit. The UPD method is a numerical estimator with parameters q , δ and ϵ that from a set of data allows to obtain a mesh model that represents the behavior of a property U of some natural or technological object that is investigated in a certain spatial domain. For a set of n points $(P_i; U_i)$, which express the values U_i for the corresponding spatial coordinates P_i , this method allows to estimate the value of U for any coordinate P of its domain, as a linear combination of powers q of euclidian distances.

Keywords: modeling; lateritic ore body; sampling network; estimate; UPD method; combinatorial optimization; exhaustive search.

1. INTRODUCCIÓN

Para su exploración y explotación el yacimiento Punta Gorda fue dividido en 88 bloques cuadrados de 300m×300m (Cuador-Gil 2005; Martínez-Vargas & Pérez-Melo 2006). Cada bloque fue explorado en dos etapas:

1. En la primera se realizó un campaña de muestreo nombrada Red de Exploración (R_1), donde en cada bloque se perforaron hasta 81 pozos equidistantes, a una distancia de 33,33 m uno de otro en cada dirección este-oeste y sur-norte.
2. En la segunda se desarrollo una segunda campaña de muestreo denominada Red de Explotación (R_2), donde en cada bloque se perforaron hasta 361 pozos, a una distancia de $D=16,16$ m uno de otro en cada dirección este-oeste y sur-norte.

En particular, durante el estudio del bloque O48 (agotado en la actualidad) se realizó una nueva red (R_3) de hasta 1 369 pozos equidistantes, a una distancia de $D=8,33$ m uno de otro en cada dirección geográfica. Los modelos de recursos y de reservas preliminares a la explotación del bloque O48 se obtuvieron considerando la red R_1 .

Aunque es preferible la modelación 3D (Hillier *et al.* 2014) de una propiedad de interés U en un yacimiento (generalmente las concentraciones porcentuales de ciertos componentes del mineral), en ocasiones se realizan modelaciones 2D considerando los valores promedios verticales de la propiedad de interés en cada punto de cierto dominio acotado del plano.

El objetivo del presente trabajo es determinar, mediante los errores relativos absolutos, la efectividad de la optimización combinatoria del método UPD que pronostica 2D los valores de L (espesor de la corteza de mineral útil) y de la concentración porcentual de Ni, Fe y Co en el bloque O48 del yacimiento Punta Gorda

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Datos propuestos para la investigación

A partir de los datos de la concentración de Ni, Fe y Co tabulados en R_3 se determinó una tabla que contiene 1 262 filas con 6 columnas (Legrá-Lobaina, Guilarte-Noa y Guevara-Pérez 2015):

3. X (coordenada en la dirección este-oeste)
4. Y (coordenada en la dirección sur-norte)
5. L (longitud o grosor de la corteza útil)
6. Ni (concentración porcentual del níquel)

7. Fe (concentración porcentual del hierro)

8. Co (concentración porcentual del cobalto)

En la tabla mencionada se tiene una red de 8,33 m×8,33 m y de este se han identificado los datos de las otras redes R₁ y R₂.

Los resultados del análisis estadístico básicos de los datos son (Legrá-Lobaina, Caballero-Nuñez y Jiménez-Roche 2015):

Tabla 1: Resultados estadísticos básicos de los valores de los datos

Red	Variable	Estadígrafos Básicos				
		Mínimo	Máximo	Media aritmética	Desviación estándar	Coefficiente de variación
R ₁ (D=33,33 m) 78 puntos	Ni	0,63	1,81	1,19	0,17	0,15
	Fe	16,76	45,99	36,89	6,8	0,18
	L	12	42	23,44	6,13	0,26
	Co	0,029	0,163	0,075	0,03	0,41
R ₂ (D=16,16 m) 308 puntos	Fe	16,76	50,4	41,0	5,65	0,14
	Ni	0,58	1,81	1,13	0,17	0,15
	L	3	44	19,88	6,00	0,30
	Co	0,029	0,188	0,088	0,029	0,33
R ₃ (D=8,33 m) 1 262 puntos	Fe	16,76	50,4	40,58	4,86	0,12
	Ni	0,43	2,2	1,12	0,18	0,16
	L	3	44	19,99	5,76	0,29
	Co	0,01	0,201	0,078	0,028	0,35

Nótese que para cada red las variables están ordenadas por el coeficiente de variación (de menor a mayor) y se evidencia que la magnitud de mayor variabilidad es el Co, siguiéndola L, Ni y Fe.

2.2. Modelos de mallas

Sean x_i , $i=1,\dots,n$ variables independientes numéricas componentes del vector P ; y sea U la variable dependiente numérica en una relación $U=F(P)$ donde la expresión F es desconocida pero se conoce su dominio $\Omega \subseteq R^n$.

Sea f un modelo de F basado en el conocimiento práctico y teórico disponible acerca de las relaciones entre U y P .

Sea un conjunto G que contiene r puntos de R^n tales que pertenezcan a Ω y supóngase que para cada punto de G con coordenadas P_k se puede obtener la estimación $U_k=f(P_k)$. Al conjunto M de los r puntos $(P_k;U_k)$ se le denomina Modelo de malla de la relación $U=F(P)$.

Estos modelos de malla (Victoria-Nicolás 2006) son muy útiles para el estudio del comportamiento de U bajo diferentes escenarios definidos por los comportamientos de las componentes de P .

Los tres tópicos que determinan que el modelo de malla sea un sustituto eficaz de F son:

1. Los datos disponibles acerca de P y de U en Ω deben ser aptos para aportar información y conocimiento capaces de acercarse suficientemente las estimaciones $f(P)$ a los valores reales $U=F(P)$.
2. Las propiedades funcionales del estimador f deben ser coherentes con las propiedades funcionales de F , de manera que se conserven las propiedades de los objetos y procesos que se modelan.
3. El conjunto G debe ser suficientemente denso y bien distribuido respecto a las características del comportamiento local y general de U en Ω .

El primer elemento está relacionado con la práctica del muestreo que es esencialmente la acción de medir los valores reales U_i en un conjunto \mathbf{W} de m puntos P_i . Cuando W es un conjunto de m puntos $(P_i; U_i)$ entonces se le denomina **Datos** y constituye la fuente principal de información sobre el comportamiento real, local y general, de U en el dominio Ω .

El estimador f se escoge, generalmente, con propiedades funcionales que garantice, por ejemplo, que el modelo de malla:

9. Sea exacto, o sea: para cualquier dato $(P_k; U_k)$ se cumple que $f(P_k)=U_k$
10. Sea acotado, o sea: saber que si se estima en cualquier coordenada $P \in \Omega$, el resultado $f(P)$ pertenece al dominio definido por los datos U_k
11. Es óptimo con respecto a sus propiedades, forma y topología.

2.3. Modelo UPD

Este método, introducido en un trabajo preliminar de Legrá-Lobaina (2015), es parte de una familia de métodos que estiman el valor de la variable dependiente U como una función de la distancia euclidiana suavizada (Bronshtein *et al.* 2007) a la que en lo que sigue se nombra \mathbf{d} .

En la práctica computacional la distancia entre dos coordenadas P_i y P_j de R^n se denomina d_{ij} y está dada por:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_{i1} - x_{j1})^2 + \dots + (x_{in} - x_{jn})^2 + \delta^2} \quad (1)$$

Donde se nombra factor de suavización (Franke y Nielson 1980) al parámetro $\delta \in \mathbb{R}$.

En particular la distancia suavizada entre la coordenada P_i y la coordenada $P_e=(x_{e1}; \dots; x_{en})$ se define por:

$$d_{ie} = \sqrt{(x_{i1} - x_{e1})^2 + \dots + (x_{in} - x_{en})^2 + \delta^2} \quad (2)$$

Dados los datos W y prefijado el parámetro q (potencia) se define la matriz cuadrada $[A]$.

$$[A] = \begin{bmatrix} d_{11}^q & \dots & d_{1m}^q \\ d_{21}^q & \dots & d_{2m}^q \\ \dots & \dots & \dots \\ d_{m1}^q & \dots & d_{mm}^q \end{bmatrix} \quad (3)$$

El valor de $q \neq 0$ debe escogerse de manera que garantice la existencia de la inversa de $[A]$.

A partir de los datos también se define el vector $[U]$:

$$[U] = \begin{bmatrix} U_1 - \varepsilon(P_1) \\ U_2 - \varepsilon(P_2) \\ \dots \\ U_m - \varepsilon(P_m) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Donde $\varepsilon(P)$ es una función que depende de P y se denomina deriva o desplazamiento de U y usualmente se toma como una constante (polinomio de grado 0) o como un polinomio de grado 1 o 2. Esta deriva constituye un parámetro del método UPD.

Para obtener el valor de U_e como una estimación del valor de U en las coordenadas P_e perteneciente a G , entonces se define el vector $[E]$.

$$[E] = [d_{P_e P_1}^q \quad d_{P_e P_2}^q \quad \dots \quad d_{P_e P_m}^q] \quad (5)$$

También se determina el vector $[L]$ resolviendo el sistema $[A][L]=[U]$. Entonces la expresión para estimar U_e se define por:

$$U_e = UPD(P_e) = [L][E] + \varepsilon(P_e) \quad (6)$$

Equivalente a:

$$U_e = \sum_{i=1}^m L_i d_{P_e P_i}^q + \varepsilon(P_e) \quad (7)$$

Puede notarse que el nombre de Método UPD proviene del hecho de que la variable dependiente U se estima como combinación lineal de Potencias de las Distancias (PD) y constituye una familia de interpoladores exactos basada en las variaciones de sus parámetros q , δ y $\varepsilon(P)$.

2.4. Un criterio para evaluar la eficacia del método UPD

Siguiendo el planteamiento de Legrá-Lobaina, Guilarte-Noa y Guevara-Pérez (2015), a partir de los datos de la red R_1 (en este caso R_1 es el conjunto de datos W con $m=78$ puntos) se estima por el método UPD, para los valores escogidos de q , δ y ε , el valor de cada magnitud U de interés (L , Ni , Fe y Co) en los puntos P_i de la red R_3 , de manera que se obtiene el conjunto G con 1 262 puntos.

Considerando los valores de cada variable dependiente U en R_3 y los correspondientes resultados obtenidos en G se calculan los errores absolutos relativos de los valores estimados $UPD(P_i)$, respecto a los valores medidos U_i , expresados porcentualmente y denominados V_{MERi} (Miller, Freund & Johnson 2005), tal como se muestra en la ecuación 8:

$$V_{MERi} = 100 \frac{|U_i - UPD(P_i)|}{|U_i|} \quad (8)$$

A continuación para cada variable se cuentan las frecuencias de aparición de valores "buenos" ($V_{MER} \leq 30$), "regulares" ($30 < V_{MER} \leq 66$) y "malos" ($V_{MER} > 66$).

Si se realiza este procedimiento para diferentes combinaciones de los valores de q , δ y ε entonces se considera mejor variante aquella donde la suma de valores buenos sea mayor (aunque otros criterios pudieran ser considerados).

2.5. Optimización combinatoria del método UPD (OC-UPD)

El problema de optimización que se plantea es el siguiente:

¿Cómo escoger los valores de los parámetros q , δ y ε para maximizar los valores buenos de V_{MER} al realizar un procedimiento de estimación de los puntos de la red R_3 a partir de los datos de la red R_1 ?

Para resolver este problema, planteado para valores continuos de q , δ y ε , puede establecerse un espacio discreto de los valores de estos parámetros

con lo cual el problema de optimización se convierte en combinatorio (Blum & Roli 2003).

El procedimiento para obtener los valores discretos de los parámetros q , δ y ε tiene los siguientes pasos:

1. Establecer los intervalos de valores posibles de cada parámetro:

- $[q_{\min} ; q_{\max}]$
- $[\delta_{\min} ; \delta_{\max}]$
- $[\varepsilon_{\min} ; \varepsilon_{\max}]$

2. Establecer para cada parámetro los valores posibles:

- $q_1 = q_{\min}, q_2, q_3, \dots, q_{kq} = q_{\max}$
- $\delta_1 = \delta_{\min}, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_{k\delta} = \delta_{\max}$
- $\varepsilon_1 = \varepsilon_{\min}, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \dots, \varepsilon_{k\varepsilon} = \varepsilon_{\max}$

Estos valores se pueden obtener fácilmente si se definen los tamaños de cada red: n_q , n_δ y n_ε . Entonces el paso entre valores consecutivos de cada parámetro se calcula como la diferencia entre sus valores extremos dividida por el correspondiente tamaño de red.

3. Enumerar el espacio discreto de búsqueda (EDB) formado por un número n_h finito y representativo de combinaciones de valores posibles de q , δ y ε .

En la Tabla 2 se muestran los valores de los parámetros para obtener una red discreta para el caso de estudio que se investiga.

Tabla 2: Valores de los parámetros para obtener una red discreta

Variable	L	Ni	Fe	Co
q_{\min}	0,1	0,1	0,1	0,1
q_{\max}	5,1	5,1	5,1	5,1
n_q	501	501	501	501
δ_{\min}	0	0	0	0
δ_{\min}	16	16	16	16
n_δ	17	17	17	17
ε_{\min}	L_{\min}	Ni_{\min}	Fe_{\min}	Co_{\min}
ε_{\max}	L_{\max}	Ni_{\max}	Fe_{\max}	Co_{\max}
n_ε	51	51	51	51

Nótese que en cada caso se tienen 434 367 combinaciones posibles de las cuales se consideran factibles aquellas donde existe la matriz $[A]^{-1}$.

2.6. Método exhaustivo para resolver OC-UPD

Sin perder generalidad se describe a continuación un método exhaustivo (Parberry 2001) para obtener la malla óptima para una función objetivo $\Psi(q, \delta, \varepsilon)$ que debe maximizarse, tal que se cumplan las restricciones $\xi_h(q, \delta, \varepsilon)$, $h=1, \dots, n_h$. Tiene los siguientes pasos:

1. Fijar un valor no óptimo extremo para η , posible óptimo de Ψ .
2. Para cada combinación de EDB:
 - a. Comprobar que se cumplen las restricciones $\xi_h(q, \delta, \varepsilon)$, $h=1, \dots, n_h$. Si así fuera:
 - b. Calcular el valor Ψ^* de la función objetivo para la combinación que se prueba.
 - c. Si $\Psi^* > \eta$ entonces se tiene un nuevo valor máximo $\eta = \Psi^*$ de la función objetivo que se guarda junto a la tríada $(q; \delta; \varepsilon)$ que la origina.
3. Al finalizar se informan los resultados.

Si se trata de minimizar la función objetivo entonces se hacen las variaciones correspondientes en el método.

En el caso de estudio de la presente investigación, para todas las variables se propuso que el valor inicial de η sea: -100.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Algunos resultados obtenidos al aplicar el método UPD

Tomando $q=1$; $\delta=0$ y $\varepsilon=1,187$ y considerando como datos la red R_1 , el modelo UPD de la magnitud N_i tiene como ecuación 7 a la expresión:

$$N_i = (-0,000676808194672745) d_{1e} + (0,00352346414697857) d_{2e} + (0,00452864807902448) d_{3e} + (0,00229969563085957) d_{4e} + (-0,00216259793425248) d_{5e} + (0,00346559748253815) d_{6e} + (-0,00111829514729021) d_{7e} + (-0,00304310027880771) d_{8e} + (-0,000470189823745994) d_{9e} + (0,0099285067485336) d_{10e} + (-0,022702509498776) d_{11e} + (-0,00440745235680873) d_{12e} + (0,00581737522707372) d_{13e} + (-0,00720591633414236) d_{14e} + (0,00567613008922743) d_{15e} + (0,00677792724990328) d_{16e} + (-0,00606992613266686) d_{17e} + (-0,0030381284475939) d_{18e} + (0,0139745266164271) d_{19e} + (0,00364466211279109) d_{20e} + (-0,00198327796214088) d_{21e} + (0,00096771929514091) d_{22e} + (0,00246171212185484) d_{23e} + (-0,00983146619749909) d_{24e} + (-0,0105096623224632) d_{25e} + (-0,00565632000227112) d_{26e} +$$

$$\begin{aligned}
 &(0,00373916948896927) d_{27e} + (-0,00701469261708321) d_{28e} + \\
 &(-7,43351653887535E-6) d_{29e} + (-0,00658889663141307) d_{30e} + \\
 &(0,00855414859865287) d_{31e} + (-0,00917748372393035) d_{32e} + \\
 &(0,0196544862886943) d_{33e} + (0,00246862847362692) d_{34e} + \\
 &(0,00418175307576178) d_{35e} + (0,00680058031966742) d_{36e} + \\
 &(0,007919159767337) d_{37e} + (-0,00746590673028834) d_{38e} + \\
 &(0,0124697809604037) d_{39e} + (-0,005465732949459) d_{40e} + \\
 &(0,0048950906992173) d_{41e} + (-0,0169515730853729) d_{42e} + \\
 &(0,00358930871320331) d_{43e} + (0,00436522399070991) d_{44e} + \\
 &(-0,0112912281527797) d_{45e} + (-0,0037334366237322) d_{46e} + \\
 &(0,00278037583020529) d_{47e} + (-0,0026462866517283) d_{48e} + \\
 &(-0,00146046906040597) d_{49e} + (-0,0027030276809102) d_{50e} + \\
 &(0,00777566543206475) d_{51e} + (0,00376999538864651) d_{52e} + \\
 &(-0,0046515351971991) d_{53e} + (0,00340596647328741) d_{54e} + \\
 &(-0,00292141133897384) d_{55e} + (0,0026462162889801) d_{56e} + \\
 &(-0,00545157995435395) d_{57e} + (0,0044620186135147) d_{58e} + \\
 &(-0,0053511640592785) d_{59e} + (-0,0016437652321483) d_{60e} + \\
 &(-0,0048286730760322) d_{61e} + (0,00529213450762795) d_{62e} + \\
 &(-0,0030855276498385) d_{63e} + (0,0052340108402144) d_{64e} + \\
 &(-5,84346760984788E-5) d_{65e} + (0,00786924649454743) d_{66e} + \\
 &(-0,00737086283546257) d_{67e} + (0,0177687723318212) d_{68e} + \\
 &(-0,00617454588148114) d_{69e} + (0,0045219120973486) d_{70e} + \\
 &(0,0014812676865696) d_{71e} + (-0,00396730880746735) d_{72e} + \\
 &(0,00252705039617375) d_{73e} + (-0,0025407637108889) d_{74e} + \\
 &(-0,0072396278851517) d_{75e} + (0,00012678793722874) d_{76e} + \\
 &(0,00324472662688799) d_{77e} + (-0,0056135255513148) d_{78e} + \\
 &1,187
 \end{aligned}$$

A modo de ilustración, en la Figura 1 se muestra mediante un gráfico de isofranjas el comportamiento de las estimaciones y en la Figura 2 se expone un gráfico de barras con las frecuencias de V_{MER} .

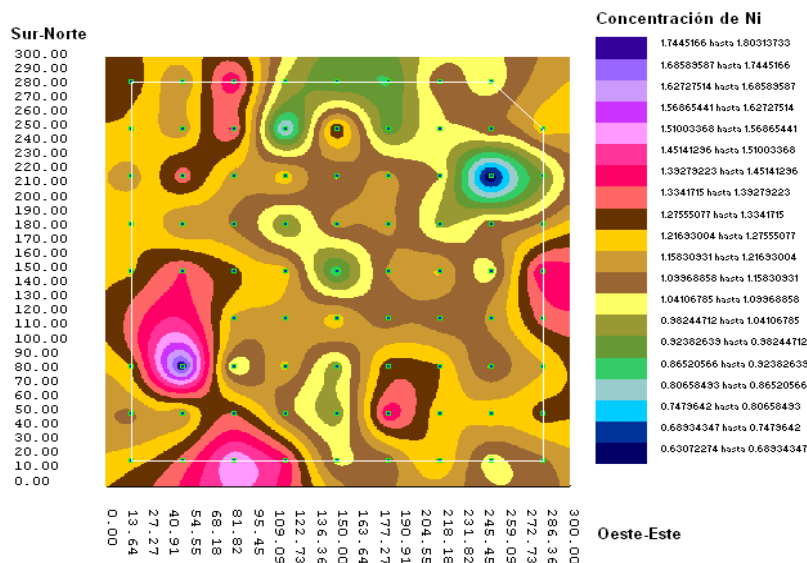


Figura 1. Modelación de Ni dentro de la frontera de R_3 .

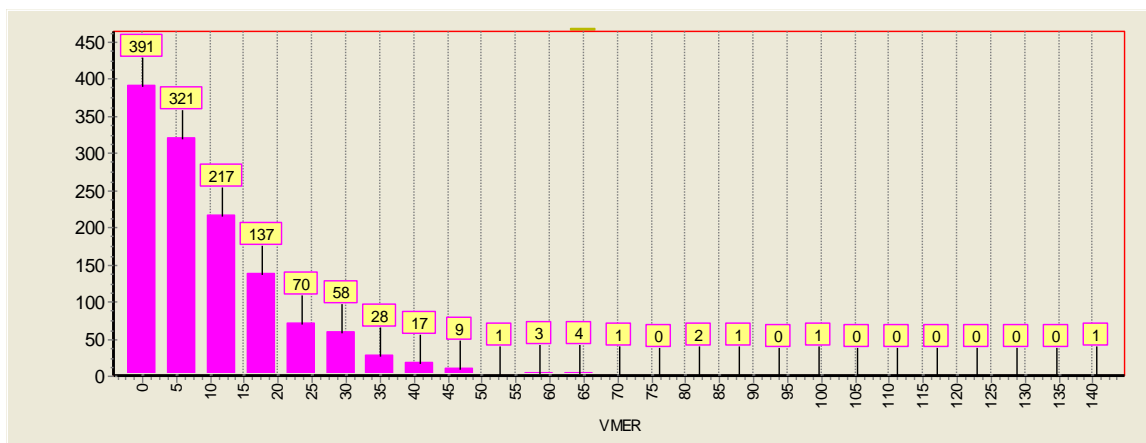


Figura 2. Frecuencias de los valores V_{MER} en el modelo de Ni.

3.2. Resultados obtenidos al optimizar

Después de aplicar el método exhaustivo al espacio de búsqueda definido para cada variable se obtuvieron resultados coherentes que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de buenas, regulares y malas después de aplicar el método exhaustivo para obtener los valores de q , δ y ϵ donde se alcanza la mayor cantidad de estimaciones buenas

Variable	L	Ni	Fe	Co
q_{opt}	2,4	0,27	0,1	0,13
δ_{opt}	4	0	0	0
ϵ_{opt}	13,2	1,595	16,76	0,0959
$\eta =$ Buenas	881	1 154	1 246	884
Regulares	251	100	14	313
Malas	130	8	2	65

Agregando los valores óptimos a la Tabla 7 del trabajo de Legrá-Lobaina, Atanes-Beatón y Silva-Diéguez (2016) se obtiene la Tabla 4, que permite visualizar la eficacia de los cinco métodos de estimación que se han estudiado.

Tabla 4. Frecuencias de resultados malos, regulares y buenos para las variables L, Ni, Fe y Co

Variable	Resultado			
	Método	Malos	Regulares	Buenos
L	K	134	268	860 (68,15 %)
	ID	146	265	851 (67,43 %)
	FBR	126	272	864 (68,46 %)
	MPL	152	248	862 (68,30 %)
	UPD _{opt}	130	251	881 (69,81 %)
Ni	K	9	118	1 135 (89,94 %)
	ID	10	106	1 146 (90,81 %)
	FBR	9	125	1 128 (89,38 %)
	MPL	13	108	1 141 (90,41 %)
	UPD _{opt}	8	100	1 154 (91,44 %)
Fe	K	3	111	1 148 (90,97 %)
	ID	2	47	1 213 (96,12 %)
	FBR	5	138	1 119 (88,69 %)
	MPL	10	68	1 184 (93,82 %)
	UPD _{opt}	2	14	1 246 (98,73 %)
Co	K	81	338	843 (66,80 %)
	ID	79	329	854 (67,67 %)
	FBR	119	413	730 (57,85 %)
	MPL	134	307	821 (65,06 %)
	UPD _{opt}	65	313	884 (70,05 %)

En la Tabla 4 puede observarse que aun cuando el método UPD_{opt} proporciona mejores resultados, estos no son ostensiblemente superiores a los obtenidos por otros métodos. Es más lógico pensar que la calidad de cualquier modelación de una variable está más relacionada con su variabilidad.

3.3. Comparación de los resultados estadísticos obtenidos por cinco métodos

A partir de los resultados del presente trabajo y del producto de los estudios de algunos investigadores (Legrá-Lobaina, Guilarte-Noa y Guevara-Pérez 2015; Legrá-Lobaina, Quevedo-Mejías & Pupo-Mulgado 2015; Legrá-Lobaina, Atanes-Beatón & Silva-Diéguéz 2016), la Tabla 5 resume los parámetros estadísticos básicos de los valores de los errores absolutos relativos en % para los métodos de kriging (K), inverso del cuadrado de la

distancia (ID), funciones básicas radiales según el modelo multicuadrático (FBR), método de polinomios lineales (MPL) y UPD óptimo, tal como se ha explicado en la presente investigación.

Tabla 5. Resumen de los parámetros estadísticos obtenidos por cinco métodos para las variables L, Ni, Fe y Co (agrupados por variable)

Variable	Modelo	Parámetros estadísticos				
		Mínimo	Máximo	Media aritmética	Desviación estándar	Coefficiente de variación
L	K	0	696,25	28,72	36,62	1,38
	ID	0	668,27	29,33	40,13	1,36
	FBR (MC)	0	734,33	28,26	38,72	1,37
	MPL	0,0004 6	683,25	28,096	36,12	1,29
	UPD _{opt}	0	757,58	28,277	39,34	1,39
Ni	K	0	138,84	13,52	13,09	0,96
	ID	0	144,32	13,14	13,03	0,99
	FBR (MC)	0	133,5	14,02	13,47	0,96
	MPL	0,029	138,74	13,62	12,77	0,94
	UPD _{opt}	0	145,45	12,897	12,69	0,984
Fe	K	0	94,77	12,96	11,81	0,91
	ID	0	90,47	11,83	9,52	0,81
	FBR (MC)	0	105,65	13,66	12,86	0,94
	MPL	0,0201	149,42	13,06	11,97	0,92
	UPD _{opt}	0	92,84	11,169	8,254	0,739
Co	K	0	891,02	27,24	40,91	1,5
	ID	0	926,69	27,21	42,62	1,57
	FBR (MC)	0	1 169,31	32,86	53,16	1,62
	MPL	0,047	1 044,69	31,48	51,51	1,64
	UPD _{opt}	0	838,995	25,996	39,29	1,51

El análisis básico de los resultados que se muestran en la Tabla 5 indica que el método UPD_{opt}, respecto a la media aritmética y a la desviación estándar, presenta resultados semejantes a los demás, quizás ligeramente superiores para Ni, FE y Co.

4. CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos permiten afirmar que el método UPD es capaz de estimar eficientemente las magnitudes L, Ni, Fe y Co.
- La calidad de los resultados obtenidos por el método UPD lo equipara con la calidad de los otros cuatro métodos estudiados.
- La Tablas 4 y 5 muestran que a pesar de que en particular algunos métodos proporcionan mejores o peores resultados, los valores porcentuales de estimar dependen más de la variabilidad de cada magnitud modelada (Tabla 1) que de la elección del método. Sin embargo, la elección del método y sus correspondientes parámetros es un recurso metodológico que no puede obviarse porque permite refinar y confirmar la calidad de la modelación.
- En el caso de que no se tengan disponibles redes de muestreo densificadas para optimizar la selección de modelos se puede acudir a criterios basados en minimizar los errores de estimación o aplicar el método de validación cruzada reportado en 1998 por Deutsch y Journel.

5. REFERENCIAS

- BLUM, A. & ROLI, A. 2003: Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys* 35(3): 268–308. Consultado: 3 octubre 2014. Disponible en: <http://kursinfo.himolde.no/forskningsgrupper/optimering/phdkurs/Metaheuristics%20in%20Combinatorial%20Optimization.pdf>.
- BRONSHTAIN, I. N.; SEMENDYAYEV, K. A.; MUSIOL, G. & MÜHLIG, H. 2007: *Handbook of Mathematics*. Springer-Verlag, Berlin, 1163 p.
- CUADOR-GIL, J. Q. 2005: Estudios de estimación y simulación geoestadística para la caracterización de parámetros geólogo-industriales en el yacimiento laterítico Punta Gorda. *Minería y Geología* 21(4): 1-48.
- DEUTSCH, C. V. & JOURNEL, A. G. 1998: *GSLIB: Geoestatistical software library and User's Guide*. Oxford University Press, New York, 369 p.
- FRANKE, R. & NIELSON, G. 1980: Smooth Interpolation of Large Sets of Scattered Data. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 15: 1691-1704. Consultado: 28 mayo 2015. Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/nme.1620151110/epdf>
- HILLIER, M. J.; SCHETSELAAR, E. M.; DE KEMP, E. A. & PERRON, G. 2014: Three-dimensional modelling of geological surface using generalized interpolation with Radial Basis Function. *Mathematical Geosciences* 46(8): 931-953.

- LEGRÁ-LOBAINA, A. A. 2015: Método UPD-L para estimar valores de una variable geomínica medidos en un conjunto de puntos de R^n . *Minería y Geología* 31(1): 1-12.
- LEGRÁ-LOBAINA, A. A.; GUILARTE-NOA, A. M. & GUEVARA-PÉREZ, T. 2015: Evaluación de modelos de variables geo-tecnológicas en un bloque de un yacimiento laterítico cubano: Primera parte: Kriging e Inverso de la Distancia. *Minería y Geología* 31(1): 29-51.
- LEGRÁ-LOBAINA, A. A.; CABALLERO-NUÑEZ, J. L. & JIMÉNEZ-ROCHE, K. 2015: Evaluación de modelos de variables geo-tecnológicas en un bloque de un yacimiento laterítico cubano: Segunda parte: Influencia de la densidad de la red de muestreo en el variograma. *Minería y Geología* 31(2): 1-20.
- LEGRÁ-LOBAINA, A. A.; QUEVEDO-MEJÍAS, R. & PUPO-MULGADO, M. 2015: Evaluación de modelos de variables geo-tecnológicas en un bloque de un yacimiento laterítico cubano: Tercera parte: Funciones Básicas Radiales. *Minería y Geología* 31(3): 11-25.
- LEGRÁ-LOBAINA, A. A.; ATANES-BEATÓN, D. M. & SILVA-DIÉGUEZ, O. R. 2016: Evaluación de modelos de variables geo-tecnológicas en un bloque de un yacimiento laterítico cubano: Cuarta parte: Método de Polinomios Locales. *Minería y Geología* 32(3): 11-25.
- MARTÍNEZ-VARGAS, A. & PÉREZ-MELO, N. 2006: ¿Cuál es el mejor método para estimar variables en yacimientos lateríticos de níquel y cobalto? *Minería y Geología* 22(3): 1-21.
- MILLER, I.; FREUND, J. & JOHNSON, R. 2005: Probabilidades y Estadísticas para ingenieros. Volumen I y II de la Cuarta Edición. Prentice-Hall Hispanoamericana S.A., México, 624 p.
- PARBERRY, I. 2001: *Lecture notes on algorithm analysis and computational complexity*. Fourth Edition. Department of Computer Sciences, University of North Texas, USA. Consultado: 20 julio de 2016. Disponible en: <http://hercule.cssi.unt.edu/ian/books/free/license.html>.
- VICTORIA-NICOLÁS, M. 2006: *Optimización de forma y topología con malla fija y algoritmos genéticos*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena. Consultado: 17 septiembre 2015. Disponible en: <http://www.upct.es/~deyc/tesis/tesisMVN.pdf>

Aristides Alejandro Legrá Lobaina, alegra@ismm.edu.cu

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Auxiliar. Departamento de Matemáticas.
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

Aliet Lamorú Reyes, alamoru@ismm.edu.cu

Licenciado en Ciencia de la Computación. Profesor Asistente. Departamento de Matemáticas.
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

Alexei Cala Hinojosa, acala@ismm.edu.cu

Ingeniero Informático. Instructor. Departamento de Matemáticas.
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

Cálculo del gradiente de presión en el hidrotransporte de pulpa laterítica en régimen laminar a través de una tubería horizontal

Michel Rodríguez-Ismar
Raúl Izquierdo-Pupo
Reineris Montero-Laurencio
Mario Daniel Williams-Rey

Resumen

Se estudió el comportamiento reológico de pulpas lateríticas con 44 % de sólido en peso y a temperatura de 27 °C para determinar los gradientes de presión en una tubería horizontal y en régimen laminar a fin de validar, en función del comportamiento reológico, la metodología de cálculo de los gradientes para este tipo de fluido. Se realizaron experimentos (granulométricos, reológicos y de gradiente de presión) y se compararon los valores de los gradientes obtenidos por esta vía con los valores teóricos de la metodología utilizada. Los resultados revelaron un tamaño medio de las partículas de 2,8 μm en la pulpa, lo que explica el comportamiento plástico de la misma, así como que el modelo Herschel-Bulkley describe en un 87 % su comportamiento reológico. Para las condiciones específicas establecidas en este estudio la metodología aplicada es efectiva, con un error máximo absoluto puntual de 8,8 %.

Palabras clave: mecánica de fluidos; modelo Herschel-Bulkley; pulpa laterítica; gradiente de presión; régimen laminar.

Calculation of pressure gradient in laterite slurry hydrotransport through horizontal pipelines in laminar flow

Abstract

The rheological behavior of laterite slurries with 44% solids and at a temperature of 27 °C was analyzed to determine the pressure gradients in a horizontal pipeline in laminar flow in order to validate the gradient calculation methodology for this type of fluid based on the rheological behavior. Experiments (particle size, rheological and pressure gradient) were carried out. The resulting gradient values were compared with theoretical values from the methodology used. The results revealed an average particle size of 2,8 μm in the slurry, which explains the plastic behavior of the slurry. In addition the Herschel-Bulkley model describes 87% of the slurry's rheological behavior. The methodology applied is considered to be effective for the specific conditions established for this investigation with a maximum absolute error of 8,8 %.

Keywords: rheology; Herschel-Bulkley model; laterite slurry; pressure gradient; laminar flow

1. INTRODUCCIÓN

La selección de cualquier sistema de bombeo debería considerar el análisis reológico del fluido a ser transportado. En la industria cubana productora de níquel y cobalto, al seleccionar los sistemas de bombeo, la pulpa laterítica (mezcla de agua industrial + mineral laterítico) ha sido considerada generalmente como un fluido newtoniano, lo cual trae aparejado una ineficiencia energética que afecta el flujo productivo.

La selección correcta de modelos matemáticos apropiados para la evaluación técnica de la pulpa depende de la granulometría, la densidad y las características reológicas, entre otras (Martínez, Izquierdo & Pompa 2014).

Experimentos realizados a escala semi-industrial confirman la racionalidad de utilizar el criterio de Reynolds (Re^*) para la generalización de los datos experimentales, al determinar el coeficiente de pérdidas hidráulicas para regímenes de movimiento estructural y transitorio, obteniendo que para el mineral laterítico se ajustan perfectamente a la línea $\lambda = 64/Re^*$ (Izquierdo, Turro & Nikolaev 2001). Sin embargo, los cálculos para determinar el gradiente de presión del fluido en un tramo recto de tubería se realizaron utilizando la ecuación generalizada de Buckingham-Reiner, la cual es aplicable a un fluido cuyo comportamiento se ajusta aproximadamente al modelo de Bingham (Skelland 1970; Bird, Stewart & Lidtfoot 1992; Steffe 1996).

Otros autores (Pérez & Garcell 2006; Pérez *et al.* 2008, 2010; Hernández *et al.* 2015) al estudiar la pulpa laterítica, desde el punto de vista reológico, con un viscosímetro rotacional demuestran, sin embargo, que la pulpa se comporta como un fluido no newtoniano, ajustándose al modelo Herschel-Bulkley en su totalidad, debido a que está formada fundamentalmente por partículas finas (menores de 0,045 mm) y no existe una dependencia lineal entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad.

Se han realizado trabajos (Slatter 1997; Laurencio *et al.* 2012; Martínez, Izquierdo & Pompa 2014; Cabral *et al.* 2010) para obtener modelos de caída de presión referentes al transporte de fluidos con comportamiento reológico no newtoniano, los cuales establecen correlaciones entre modelos teóricos y experimentales en función de la clasificación reológica.

Gardea (2008a, 2008b) señala en su investigación que aún no se ha resuelto el problema específico del cálculo de la caída de presión en una tubería que transporta un fluido Herschel-Bulkley, pero sí plantea un procedimiento apoyándose en investigaciones de Levenspiel, que consiste

en descomponer este fluido en un plástico Bingham y el pseudoplástico simple.

En las investigaciones referenciadas en este artículo se determinan los gradientes de presión ($\Delta P/L$), a partir de los datos experimentales obtenidos para cada situación específica de otros fluidos que no incluyen la pulpa laterítica. Las relaciones entre las variables flujo volumétrico, diámetros del tubo, temperaturas de operación y propiedades físicas de los fluidos se describen mediante ecuaciones empíricas, que son válidas únicamente para las condiciones particulares existentes durante la realización de los experimentos. Para otras condiciones (geometrías, fluidos, temperaturas, entre otras), dichas ecuaciones no serían aplicables en absoluto.

El objetivo del presente trabajo es evaluar la efectividad de la metodología de cálculo del gradiente de presión durante el hidrotransporte en régimen laminar de la pulpa laterítica en un tramo recto horizontal de tubería, a partir del comportamiento reológico y granulométrico de este fluido.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Material

Se empleó pulpa laterítica de 44 % de sólido en peso. La muestra inicial se dividió en varios compósitos, con el objetivo de realizar los experimentos granulométricos y reológicos.

2.2. Análisis granulométrico

Se utilizó un analizador de partículas Fritsch Particle Sizer Analysette 22, de rayos láser X convergente, con sensor fotosensible. Se realizaron tres ensayos para cada muestra.

2.3. Análisis reológico de la pulpa laterítica

El método utilizado fue la determinación directa de la relación entre los esfuerzos cortantes y los gradientes de velocidad, sometiendo la muestra a un gradiente de velocidad uniforme desde 1,17 a 279,40 s^{-1} en un viscosímetro rotatorio (RHEOTEST 2) para obtener una medición del esfuerzo cortante correspondiente (Skelland 1970).

2.4. Caída de presión en una sección de tubería

Se ubicaron dos manómetros analógicos, separados a 36 m de longitud, en un tramo de tubería recta de 400 mm de diámetro nominal, perteneciente a la línea de descarga de las bombas centrífugas.

La metodología de cálculo propuesta (Skelland 1970; Bird, Stewart & Lidtfoot 1992; Garcell, Díaz & Surís 2011) para determinar la distribución de la densidad de flujo, de cantidad de movimiento de un fluido isotérmico

en régimen laminar y estacionario en un tubo circular de radio (r) y longitud (L), como se muestra en la Figura 1, viene dada por la siguiente ecuación:

$$\tau_{rz} = \frac{(-\Delta P)}{2 \cdot L} r \quad (1)$$

Donde:

ΔP - Caída de presión medida por los manómetros $P0$ y $P1$ (Pa);

τ_{rz} - Esfuerzo cortante en la pared de la tubería (Pa);

r - Radio interior de la tubería (m);

L - Longitud de la tubería (m).

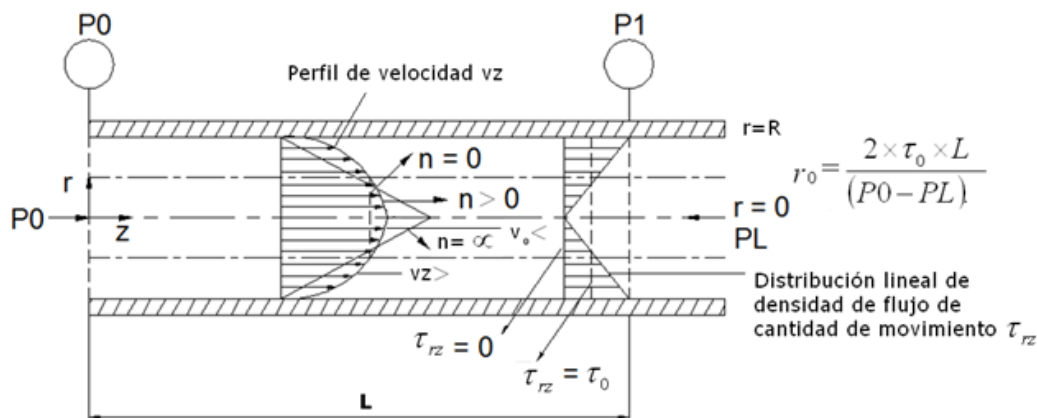


Figura 1. Flujo de un fluido Herschel-Bulkley en régimen laminar a través de un tubo circular (Bird, Stewart & Lidfoot 1992; Garcell, Díaz & Surís 2011).

El gradiente de velocidad para un fluido Herschel-Bulkley es cero mientras la densidad de flujo de cantidad de movimiento sea menor de un cierto valor τ_0 (esfuerzo cortante inicial). Como es de esperar el perfil de velocidad es parabólico y dependiente del valor $n > 0$ (índice de flujo) (Figura 1), cuando $n=0$ existe una región de flujo de tapón que se ajusta muy bien a un plástico Bingham, mientras que cuando $n=\infty$ se convierte en un triángulo isósceles. Para este tipo de fluido la densidad de flujo de cantidad de movimiento y el gradiente de velocidad están relacionados por la ecuación 2:

$$\tau_{rz} = \tau_0 + k \left(-\frac{dv}{dr} \right)^n \quad (2)$$

Donde:

τ_o – Esfuerzo cortante inicial (Pa);

k – Índice de consistencia (adimensional);

n – Índice de flujo (adimensional);

τ_{rz} – Densidad de flujo de cantidad de movimiento (Pa).

Según Steffe (1996), puede utilizarse el mismo procedimiento para determinar el perfil de velocidad, tanto en fluidos tipo Bingham como en un fluido Herschel-Bulkley; sin embargo, para este último el perfil de velocidad se calcula según la ecuación 3:

$$v_z = \frac{2L \cdot \left[(\tau_{rz} - \tau_o)^{1+\frac{1}{n}} - \left(\frac{(\Delta P) \cdot r}{2 \times L} - \tau_o \right)^{1+\frac{1}{n}} \right]}{(\Delta P) \left(1 + \frac{1}{n} \right) \cdot k^{\frac{1}{n}}} \quad (3)$$

La velocidad del flujo tapón (zona central) puede ser determinada usando la ecuación 3, igualando r a r_o .

El flujo volumétrico para un fluido Herschel-Bulkley se calcula usando el mismo método descrito para el plástico Bingham mediante la ecuación 4:

$$Q = \int_0^{2\pi} \int_0^R v_z \cdot r \cdot dr \cdot d\theta \quad (4)$$

Donde:

$d\theta$ – Integral definida en función del ángulo (coordenadas cilíndricas);

dr – Integral definida en función del radio (coordenadas cilíndricas);

R – Distancia del centro a la pared interior de la tubería (radio interior de la tubería (m));

v_z – Perfil de velocidad (componente de la velocidad en z para coordenadas cilíndricas) $\left(\frac{m}{s}\right)$;

Q – Flujo volumétrico $\left(\frac{m^3}{s}\right)$.

Por lo tanto, si la ecuación 3 se inserta en esta definición y se integra el flujo volumétrico puede calcularse por la ecuación 5:

$$Q = \left[\frac{\pi \cdot R^3}{256} \right] \left[\left(\frac{4 \cdot n}{3 \cdot n + 1} \right) \left(\frac{\tau_{rz}}{k} \right)^{1/n} \left(1 - \frac{\tau_0}{\tau_{rz}} \right)^{1/n} \left[1 - \frac{\left(\frac{\tau_0}{\tau_{rz}} \right)}{2 \cdot n + 1} \left[1 + \frac{2 \cdot n}{n + 1} \left(\frac{\tau_0}{\tau_{rz}} \right) \left(1 + \frac{n \cdot \tau_0}{\tau_{rz}} \right) \right] \right] \right] \quad (5)$$

En los cálculos de ingeniería no es práctico diseñar sistemas de flujo utilizando los valores de las velocidades puntuales. En estos casos resulta conveniente usar un valor medio, representativo del perfil de velocidad, que se conoce como velocidad media o velocidad promedio.

La expresión de la velocidad promedio puede obtenerse a partir de la ecuación 6:

$$\langle v_z \rangle = \frac{Q}{\pi \cdot R^2} \quad (6)$$

Sustituyendo la ecuación 5 en la 6, la velocidad promedio para un fluido plástico real se determina por la ecuación 7:

$$\langle v_z \rangle = \left[\frac{R}{256} \right] \left[\left(\frac{4 \cdot n}{3 \cdot n + 1} \right) \left(\frac{\tau_{rz}}{k} \right)^{1/n} \left(1 - \frac{\tau_0}{\tau_{rz}} \right)^{1/n} \left[1 - \frac{\left(\frac{\tau_0}{\tau_{rz}} \right)}{2 \cdot n + 1} \left[1 + \frac{2 \cdot n}{n + 1} \left(\frac{\tau_0}{\tau_{rz}} \right) \left(1 + \frac{n \cdot \tau_0}{\tau_{rz}} \right) \right] \right] \right] \quad (7)$$

Para la comprobación de la caída de presión en el tramo de tubería recta desde P_0 hasta P_1 (Figura 1) se realizaron las pruebas experimentales, las cuales arrojaron resultados de las presiones puntuales para varios caudales, utilizando la regulación de la bomba por un variador de velocidad. Posteriormente, se realizaron los cálculos teóricos de las pérdidas por la ecuación 8:

$$\Delta P = \frac{\rho_m \cdot f \cdot L \cdot \langle v_z \rangle^2}{2 \cdot D} \quad (8)$$

Donde:

f - Factor de fricción (adimensional);

D - Diámetro interior de la tubería (m);

$\langle v_z \rangle$ - Velocidad media de transportación de la pulpa laterítica ($\frac{m}{s}$);

ρ_m - Densidad de la pulpa (mezcla) ($\frac{k_g}{m^3}$).

Cuando el régimen de flujo es laminar puede conocerse el número de Reynolds modificado para el fluido plástico real por la ecuación 9 (Shanshi 2004):

$$R_{em} = 8 \left(\frac{n}{6n+2} \right)^n \cdot \rho_m \cdot D^n \cdot \left(\frac{(v_z)^{2-n}}{k} \right) \quad (9)$$

Donde:

R_{em} - Número del Reynolds modificado del fluido, adimensional.

Teniendo el número de Reynolds modificado puede obtenerse el factor de fricción de Darcy por la ecuación 10:

$$f = \frac{64}{R_{em}} \quad (10)$$

2.4.1. Gradiente de presión durante el hidrot transporte

La pendiente hidráulica o gradiente de presión (Pa/m), teórico para el flujo de la pulpa, se determinó por la ecuación 11; despejando la longitud de la ecuación 8 de pérdida de presión se obtiene:

$$\frac{\Delta P_{teó}}{L} = \frac{\rho_m \cdot f \cdot \langle v_z \rangle^2}{2 \cdot D} \quad (11)$$

$\frac{\Delta P_{teó}}{L}$ - Pendiente hidráulica (gradiente de presión) teórico $\left(\frac{Pa}{m} \right)$.

La pendiente hidráulica experimental se determina por la ecuación 12:

$$\frac{\Delta P_{exp}}{L} = \frac{P_0 - P_1}{L} \quad (12)$$

P_0 - Presión puntual a la entrada (Pa);

P_1 - Presión puntual a la salida (Pa).

El gradiente de presión se determinó para diferentes velocidades medias entre 0,18 m/s y 0,77 m/s. La validez de los resultados experimentales con el modelo teórico se confirmó a través de la diferencia entre el módulo del valor experimental X_{exp} del gradiente de presión y el valor teórico $X_{teó}$ (error relativo), obtenido por el modelo para las mismas condiciones del experimento. El error absoluto puntual (E_p) se calculó por la expresión 13:

$$E_p = \left| \frac{X_{\text{exp}} - X_{\text{teó}}}{X_{\text{exp}}} \right| \cdot 100. \quad (13)$$

La cantidad de mediciones a realizar se determinó según la metodología estadística propuesta por Miller y Freun (2005). Para determinar el tamaño de una muestra en un muestreo aleatorio simple se ha propuesto la ecuación 14:

$$m = \left[Z_{\alpha/2} \cdot \frac{S}{E} \right]^2. \quad (14)$$

Donde:

m - Tamaño de la muestra;

$Z_{\alpha/2}$ - Estadístico de la distribución probabilística de Gauss de 1,96, con un nivel de significancia (α) de 0,05;

S - Desviación estándar de la muestra;

E - Error máximo de estimación. Se determina despejando en la ecuación 14.

La elaboración de los datos experimentales permitió confirmar que para un 95 % de confiabilidad es necesario tomar tres datos para cada medición.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Granulometría de la pulpa laterítica

Como puede apreciarse (Figura 2), en la pulpa laterítica existe, de forma general, un predominio de las fracciones finas, donde el 50 % de la salida del material (punto donde se cruzan las curvas características) corresponde a un diámetro de partículas de 0,002865 mm (2,8 μm). Esto demuestra que la pulpa laterítica se caracteriza como un sistema coloidal de alta dispersión, confirmándose las propiedades plásticas del fluido, que forma sistemas polidispersos (Pérez & Garcell 2006; Pérez *et al.* 2008, 2010; Hernández *et al.* 2015), constituidos por partículas de diferentes dimensiones. En este sistema, como dimensión representativa se utiliza un tamaño medio de las partículas de 2,8 μm , el cual se determinó de la contribución relativa de las distintas dimensiones de las partículas que los constituyen.

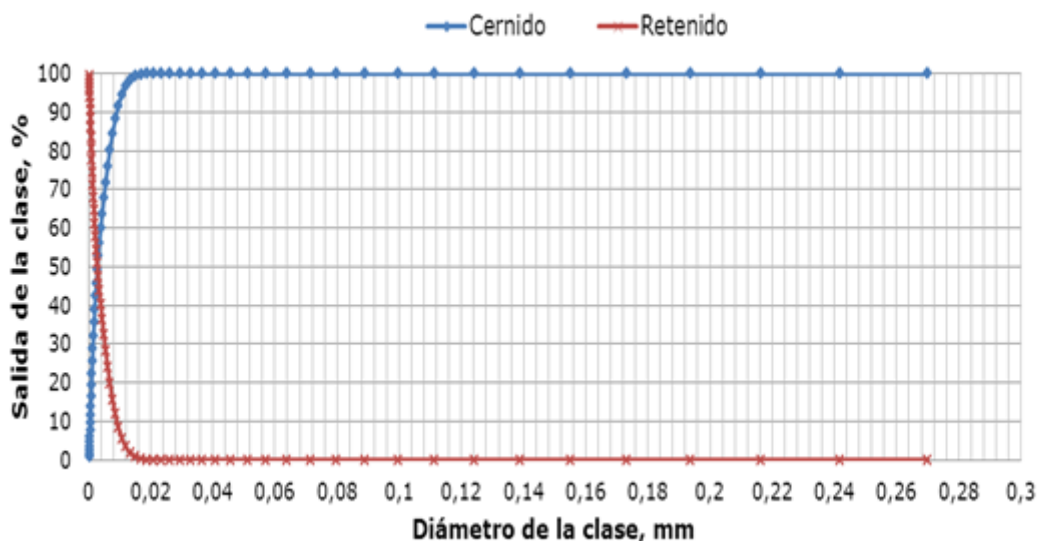


Figura 2. Distribución del tamaño de partícula.

3.2. Comportamiento reológico de la pulpa laterítica

La Figura 3 representa, de forma gráfica, la dependencia entre el gradiente de velocidad y el esfuerzo cortante para la pulpa laterítica, con un 44 % de sólido en peso.

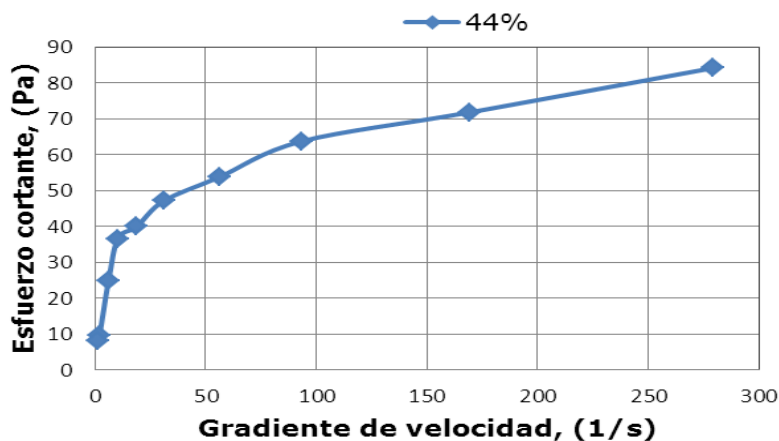


Figura 3. Curva de flujo de la pulpa laterítica.

Por la forma de la curva representada en la Figura 4 se observa que el modelo reológico al que corresponde este comportamiento es el de Herschel-Bulkley. Los valores se ajustan a un polinomio de orden dos; se determinó este comportamiento mediante una regresión utilizando el software Microsoft Excel. El coeficiente de determinación (R^2) de la curva fue de 0,87. En la Tabla 1 se resumen los parámetros reológicos y el modelo obtenido para la pulpa laterítica a la temperatura ambiente de 27 °C.

Tabla 1. Parámetros de la pulpa laterítica y modelo reológico

Porcentaje de sólido en peso C_w (%)	44
Modelo reológico	$\tau_{rz} = \tau_0 + K \left(-\frac{dvz}{dr} \right)^n$
Modelo obtenido	$\tau_{rz} = 20,842 + 0,582 \left(-\frac{dvz}{dr} \right)^{0,587}$
Esfuerzo cortante inicial τ_0 , (Pa)	20,842
Índice de consistencia k , (a dim)	0,582
Índice de flujo n , (a dim)	0,587

El modelo reológico obtenido mostró un comportamiento plástico real, lo cual confirma los resultados de algunos investigadores (Pérez & Garcell 2006, 2011; Pérez *et al.* 2008, 2010), no siendo así para otros estudios donde la pulpa es clasificada, ajustándose al modelo plástico ideal (Izquierdo, Turro & Nikolaev 2001).

Estos resultados pudieran variar, en dependencia de los puntos de explotación de la materia prima y de las distintas composiciones mineralógicas en diferentes yacimientos. Esto tiene incidencia en la viscosidad de la pulpa, influyendo también en el comportamiento reológico. Además, los diferentes porcentajes de sólido de las muestras analizadas y su granulometría intervienen directamente en el esfuerzo cortante necesario para romper el estado de inercia de la mezcla.

3.3. Resultados de los cálculos del gradiente de presión

En la Tabla 2 se muestran los valores de los datos experimentales y teóricos, obtenidos a partir de la relación pendiente hidráulica y velocidad promedio ($\Delta P/L = f\langle v \rangle$), para diferentes flujos volumétricos de la pulpa laterítica en un tramo horizontal de tubería recta.

Tabla 2. Resultados de los cálculos del gradiente de presión

$\langle v_z \rangle$ (m/s)	P0 (Pa)	P1 (Pa)	$\Delta P_{exp}/L$ (Pa/m ³)	$\Delta P_{teó}/L$ (Pa/m ³)	Ep (%)	Rem	f
0,18	75 000	55 000	555,56	520,98	6,22	260	0,25
0,43	185 000	155 000	833,33	880,58	5,67	919	0,07
0,77	229 000	180 000	972,22	1 240,23	8,88	2 093	0,03

El Reynolds modificado ($260 \leq Rem \leq 2 093$), obtenido para las velocidades experimentales, confirma que la pulpa en la tubería se encuentra en el régimen de flujo laminar.

Los gradientes de presión, obtenidos de forma experimental y teórica, para la pulpa laterítica a temperatura ambiente (27 °C) por cada 36 m de longitud de tubería recta, aparecen en la Figura 4.

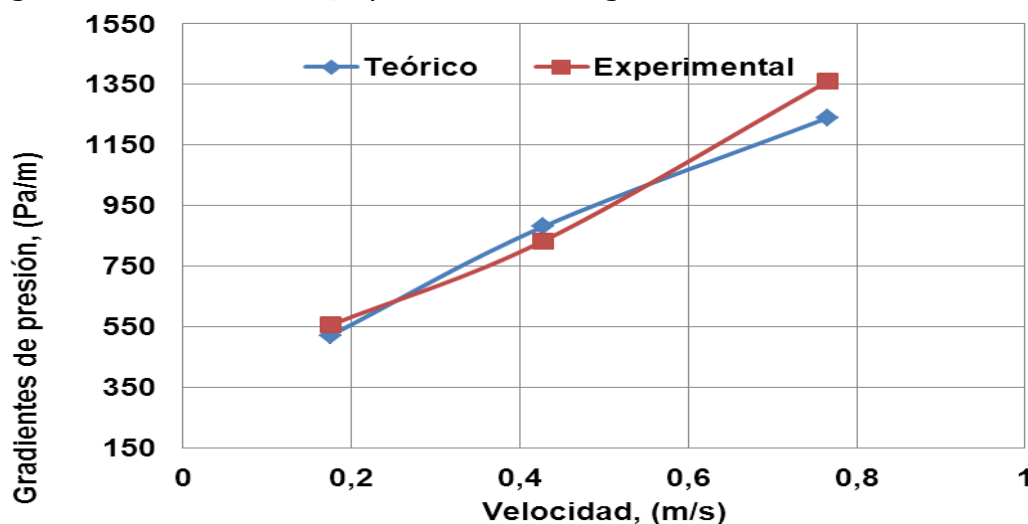


Figura 4. Comportamiento del gradiente de presión experimental y teórico.

El error absoluto puntual del gradiente de presión teórico, en función de la clasificación reológica de la pulpa ajustada al modelo Herschel-Bulkley, no superó el 8,8 % con respecto al experimental, obteniéndose una probabilidad de efectividad del 91 %, lo que confirma la validez de la metodología aplicada.

4. CONCLUSIONES

- El tamaño medio de las partículas (2,8 μm) en la pulpa explica el comportamiento plástico de la misma y los resultados reológicos muestran que el modelo Herschel-Bulkley describe en un 87 % este comportamiento a temperatura ambiente de 27 °C.
- La metodología aplicada es efectiva para las condiciones específicas establecidas en este estudio, con un error máximo absoluto puntual de 8,8 %.

5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración de los compañeros de la planta de Espesadores de Pulpa de la fábrica Comandante Pedro Sotto Alba por el apoyo brindado en las mediciones de presión y durante el muestreo, así como a los compañeros del laboratorio del Centro de Investigaciones del Níquel y de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara por su labor en la caracterización granulométrica y reológica de la pulpa laterítica. Por último, agradecer a todos aquellos que contribuyeron a la revisión del trabajo.

6. REFERENCIAS

- BIRD, R.; STEWART, W. & LIDTFoot, E. 1992: *Fenómenos de transporte*. 2 ed. Editorial reverté S. A., Barcelona, 300 p.
- CABRAL, R. A.; GUT, J. A. W.; TELIS, V. R. N.; TELIS, J. 2010: Non-Newtonian flow and pressure drop of pineapple juice in a plate heat exchanger. *Brazilian Journal of Chemical Engineering* 27(04): 563-571.
- GARCELL, L.; DÍAZ, A. & SURÍS, G. 2011: *Transferencia de cantidad de movimiento, color y masa*. 2 ed. Félix Varela, La Habana, 345 p.
- GARDEA, H. 2008a: *Bombeo de Fluidos no newtonianos. Caso de los lodos residuales*. Rafael Bernardo Carmona Paredes (Tutor). Tesis doctoral. Universidad Nacional Autónoma de México. 171 p.
- GARDEA, H. 2008b: Dos propuestas para el proyecto del bombeo de fluidos no newtonianos. Caso de los lodos residuales de plantas de tratamiento de aguas negras. *Ingeniería, Investigación y Tecnología* IX(2): 87-97.
- HERNÁNDEZ, G.; MARTÍNEZ, R.; DURÁN, C. & PÉREZ, O. 2015: Eficiencia energética en sistemas de bombeo de hidromezclas. *Minería y Geología* 31(3): 109-127.
- IZQUIERDO, R.; TURRO, A. & NIKOLAEV, A. 2001: Hidrotransporte del mineral laterítico en régimen estructural. *Minería y Geología* 18(2): 53-59.
- LAURENCIO, H. L.; FALCÓN, J.; RETIRADO, Y. & PÉREZ, O. 2012: Modelo para cálculo de pérdida de presión en tuberías conductoras de petróleo pesado (11⁰ API). *Minería y Geología* 28(3): 70-86.
- MARTÍNEZ, R.; IZQUIERDO, R. & POMPA, M. 2014: Pérdida de carga durante el transporte en régimen laminar de pulpas de cieno carbonatado. *Minería y Geología* 30(1): 80-94.
- MILLER, J. & FREUN, J. 2005: *Probabilidad y Estadística para Ingenieros*. Felix Varela, La Habana, 737 p.
- PÉREZ, L. & GARCELL, L. 2011: Análisis del efecto de las principales variables que determinan el comportamiento reológico de suspensiones limoníticas. *Tecnología Química* XXXI(3): 106-118.
- PÉREZ, L. & GARCELL, L. 2006: Efecto de la granulometría y de las propiedades superficiales sobre la reología de las suspensiones concentradas de laterita. *Tecnología Química* XXVI(1): 40-47.
- PÉREZ, L.; CARDERO, Y.; LAMOTH, Y. & GARCELL, L. 2008: Estudio del comportamiento reológico de una suspensión industrial de laterita. *Tecnología Química* XXVIII(1): 22-33.
- PÉREZ, L.; GARCELL, L.; ROJAS-PURÓN, A. R. & SIMONES, R. 2010: Mineralogía y reología de suspensiones minerales del proceso de lixiviación ácida a presión en Moa, Cuba. *Minería y Geología* 26(4): 16-35.

- SHANSHI, M. 2004: *Piping calculation manual*. Mc Graw-Hill, New York, 659 p.
- SKELLAND, A. 1970: *Now Newtonian flow and head transfer*. Ediciones Revolucionarias, La Habana, 400 p.
- STEFFE, J. 1996: *Rheological methods in food process engineering*. 2ed. Freeman Press, 428 p.

Michel Rodríguez-Ismar, mrismar@ismm.edu.cu

Ingeniero Mecánico. Profesor Instructor. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba

Raúl Izquierdo-Pupo, rizquierdo@ismm.edu.cu

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

Reineris Montero-Laurencio, rmontero@ismm.edu.cu

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

Mario Daniel Williams-Rey

Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba.

Evaluación de arcillas caoliníticas de Moa para la producción de cemento de base clínquer–arcilla calcinada–caliza (LC³)

Roger S. Almenares-Reyes
Adrián Alujas-Díaz
Lisandra Poll-Legrá
Pedro R. Bassas-Noa
Sergio Betancourt-Rodríguez
José F. Martirena-Hernández
Carlos A. Leyva-Rodríguez

Resumen

Se analizaron materiales arcillosos procedentes de dos afloramientos de la región de Moa para determinar su potencialidad de uso como material cementicio suplementario en la producción de cementos ternarios de base clínquer–arcilla calcinada–caliza. Las arcillas se caracterizaron mediante espectroscopía de absorción atómica (EAA), difracción de rayos X (DRX), espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) y análisis termogravimétrico (ATG). Estos métodos revelaron en las arcillas alto contenido de aluminio, moderado contenido de caolinita, una estructura desordenada y presencia de impurezas. La solubilidad del aluminio y el silicio en álcali y la resistencia a la compresión de los sistemas LC³ es proporcional a su contenido en la arcilla, siendo superior para la de mayor contenido de caolinita y mayor desorden estructural (afloramiento D1), aunque la arcilla de ambos afloramientos pueden constituir materiales cementicios suplementarios en la producción de cementos ternarios de base clínquer–arcilla calcinada–caliza. El rango de activación térmica adecuado para ambas arcillas se ubica entre los 650 °C y 850 °C.

Palabras clave: arcillas calcinadas; actividad puzolánica; cemento LC³; solubilidad alcalina; materiales cementicios.

Evaluation of kaolinite clays of Moa for the production of cement based clinker-calcined clay-limestone (LC³)

Abstract

Clay materials from two outcrops of the Moa region were analyzed to determine their potential use as supplementary cementitious material in the production of ternary cements based on limestone-calcined clay. The clays were characterized by atomic absorption spectroscopy (EAA), X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and thermogravimetric analysis (ATG). These methods revealed high aluminum in clays, moderate kaolinite content, a disordered structure and the presence of impurities. The solubility of aluminum and silicon in alkali and the compressive strength of LC³ systems is proportional to their content in clay, being higher for the one with higher kaolinite content and greater structural disorder (outcrop D1), although the clay of both outcrops may constitute supplementary cementitious materials in the production of ternary cements based clinker-calcined clay-limestone. The suitable thermal activation range for both clays is between 650 ° C and 850 ° C.

Keywords: calcined clays; pozzolanic activity; LC³ cement; alkaline solubility; cementitious materials.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de arcillas calcinadas como material puzolánico ha recibido considerable atención en años recientes. Este particular interés es debido a la expansión de estrategias de sustitución de clínquer por materiales cementicios suplementarios (MCS) para minimizar el impacto medioambiental provocado por las emisiones de CO₂ durante la producción de cemento (WBCSD/IEA 2009; Lothenbach, Scrivener & Hooton 2011; Juenger *et al.* 2012; Teklay *et al.* 2014).

Se conoce que el uso de MCS mantiene o incrementa la resistencia mecánica y la durabilidad de la matriz cementicia (Sabir, Wild & Bai 2001; Samet, Mnif & Chaabouni 2007; Alujas *et al.* 2015a) y al mismo tiempo favorece la disminución del consumo energético por cantidad de aglomerante (Habert *et al.* 2009; Alujas *et al.* 2015a).

De acuerdo con estudios precedentes, los materiales arcillosos presentes en las cortezas de intemperismo no ferroniquelíferas de la región de Moa han sido recomendados como materia prima de productos refractarios y de ladrillos cerámicos para la construcción (Pons y Leyva 1996; Pons *et al.* 1997; Njila *et al.* 2010a, 2010b; Njila & Díaz-Martínez 2016), sin embargo, sus potencialidades pueden ir más allá de los usos y aplicaciones señaladas.

Poll y otros investigadores (2016) muestran la posibilidad de empleo del material arcilloso existente en el depósito ferroniquelífero La Delta como sustituto parcial del cemento, lo cual ha abierto el camino para el desarrollo de investigaciones con vistas a evaluar los recursos de la región con posibilidades de ser empleados como MCS en el desarrollo futuro de la infraestructura socio-económica de la región.

Se ha reportado el desarrollo y uso de un nuevo sistema cementicio mediante la combinación de materiales arcillosos multicomponentes: caliza y clínquer que permite la sustitución del 50 % del clínquer (Vizcaíno *et al.* 2015). Este sistema es denominado cemento de bajo carbono, mejor conocido por *Limestone Calcined Clay Cement* (LC³), de acuerdo con su designación en idioma inglés y se presenta como alternativa para ser producida no solo a escala industrial, sino también a pequeña escala. La evaluación de materias primas para este uso se considera un factor fundamental para potenciar el desarrollo de sistemas cementicios LC³.

El objetivo de esta investigación fue valorar las potencialidades de dos afloramientos arcillosos presentes en la región de Moa, como fuente de MCS para la producción de cemento LC³, a través de la evaluación de la influencia del contenido de alúmina y caolinita y del orden estructural de la

arcilla natural sobre la reactividad puzolánica de los productos de calcinación

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Muestreo

Se evaluaron dos afloramientos arcillosos (D1 y D2, Figura 1) con potencia superior a 10 m, ubicados dentro del depósito La Delta y localizados al sureste de la localidad de Moa, provincia de Holguín.

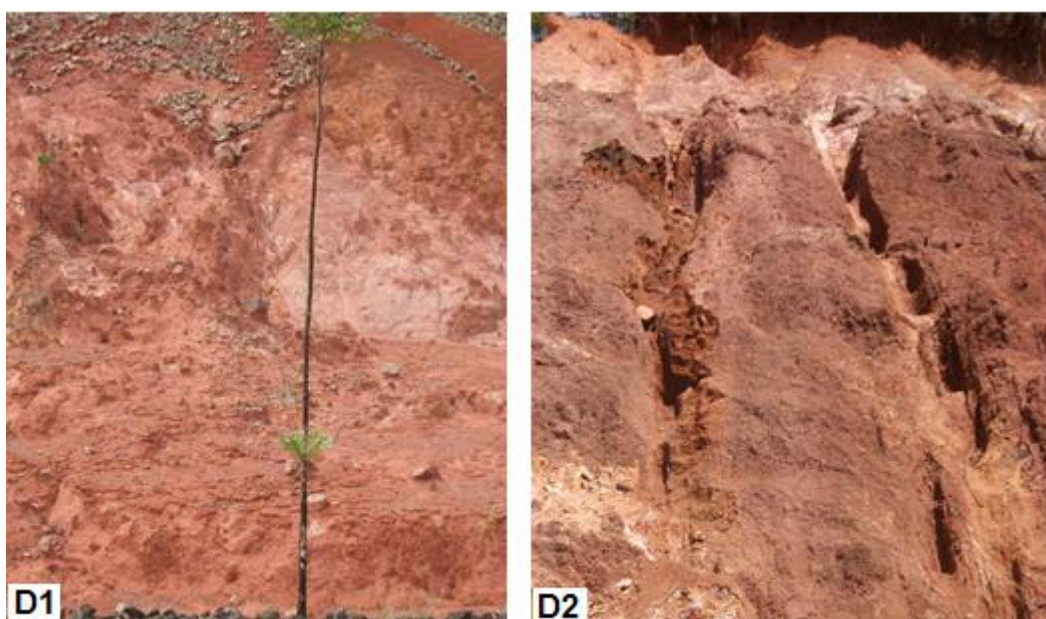


Figura 1. Fotografía del corte de los afloramientos evaluados.

De cada afloramiento se seleccionaron 10 muestras por el método de surco continuo, de modo que se abarcara toda la potencia. De cada surco fueron tomados alrededor de 5 kg y mezclados para conformar una muestra compósito de 50 kg de cada sector.

2.2. Caracterización de la materia prima natural

La observación de campo sirvió para caracterizar cualitativamente los afloramientos arcillosos. La composición química y mineralógica de las muestras fue determinada mediante espectrometría de absorción atómica (EAA), difracción de rayos X (DRX) y espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR).

El orden estructural de la caolinita en el material arcilloso fue evaluado mediante el índice FWHM-002, obtenido por DRX (Aparicio & Galan 1999; He *et al.* 2005; Tironi *et al.* 2014) y P_0 determinado por FTIR (Bich, Ambroise & Péra 2009; Tironi *et al.* 2014).

El contenido de caolinita fue calculado como la pérdida de masa en el intervalo de deshidroxilación de la caolinita entre 400 °C y 600 °C, mediante análisis termogravimétrico (TGA), de acuerdo con la metodología reportada por Avet y otros investigadores (2016).

2.3. Activación térmica

Las muestras de arcilla natural fueron calcinadas en un horno de laboratorio J.P. SELECTA, a temperaturas de 650 °C, 750 °C y 850 °C, rango que corresponde con la ventana de activación comúnmente estudiada para la caolinita (Murat & Comel 1983) y a 950 °C, temperatura cercana a la cual ocurre el fenómeno de recristalización o reorganización estructural (He, Makovicky & Osback 1994; Földvári 2011; Alujas *et al.* 2015a).

Los productos calcinados fueron sometidos a un proceso de molienda en un molino de bolas de laboratorio, hasta alcanzar aproximadamente 90 % de partículas de tamaño menor de 90 µm.

Para las determinaciones por EAA, DRX, FTIR, ATG, activación térmica y la molienda se siguió el mismo procedimiento descrito previamente por Poll y demás colaboradores (2016).

2.4. Evaluación de la actividad puzolánica

La medición de sílice y alúmina solubles en álcali ha sido sugerida como un método simple y rápido para la evaluación de la actividad puzolánica (He, Makovicky & Osback 1994; He, Osback & Makovicky 1995). Basado en el método descrito por He, Makovicky y Osback (1994) fue evaluada la actividad puzolánica. Dos gramos de cada producto calcinado fueron introducidos en 100 mL de una solución de NaOH al 0,5 N y calentados hasta estado de ebullición durante tres minutos. La cantidad de aluminio y silicio disueltos en álcali fueron medidos por espectroscopía de absorción atómica.

2.5. Determinación de resistencia a la compresión en cementos de base clínquer-arcilla calcinada-caliza

Fueron preparados morteros normalizados para determinar la evolución de la resistencia a la compresión de los sistemas cementicios LC³-50 (50 % de clínquer, 30 % de arcilla calcinada y 15 % de caliza), según lo reportado por Avet y demás colaboradores (2016). La composición del clínquer, la caliza y el yeso se presentan en la Tabla 1. Los morteros se prepararon con una relación agua/aglomerante de 0,5 de acuerdo con la norma NC 506:2013 (NC/CTN22 2013). La resistencia a la compresión se midió en prismas de mortero normalizado de 40x40x160 mm a los 3, los 7 y 28 días después de fundidos. Los aglomerantes fueron denominados por la sigla

LC³, más el nombre del depósito de arcilla y la temperatura de activación; por ejemplo, para la arcilla D1 calcinada a 750 °C, la designación del aglomerado es LC³-D1 750. Como referencia se utilizó cemento Portland P-35.

Tabla 1. Composición química del yeso, clínquer y caliza utilizados

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	PPI	SO ₃	RI
Clínquer	20,81	5,01	4,37	65,70	0,90	0,50	0,34	0,21
Yeso	8,10	2,03	1,97	30,27	2,81	20,91	31,39	9,91
Caliza	3,02	0,94	0,49	51,49	0,71	41,74	---	...

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización de las arcillas

La observación de campo reveló que los afloramientos arcillosos evaluados son resultado de la meteorización de los gabros, formando potentes cortezas ricas en arcillas de coloración variada, desde el rosado hasta el rojo intenso y, en ocasiones, abigarrado, de aspecto terroso-arcilloso. Desde la base hasta la superficie se observa un incremento gradual de la meteorización.

En los patrones de difracción de rayos X de los materiales arcillosos de ambos afloramientos se identificaron las fases minerales (Figura 2). Los materiales estudiados presentan un carácter multicomponente, por lo que no es posible asignar los picos a una sola fase. La arcilla D1 está compuesta por caolinita, hematita, gibsita y goetita. En la muestra D2 no se identificó gibsita mediante DRX.

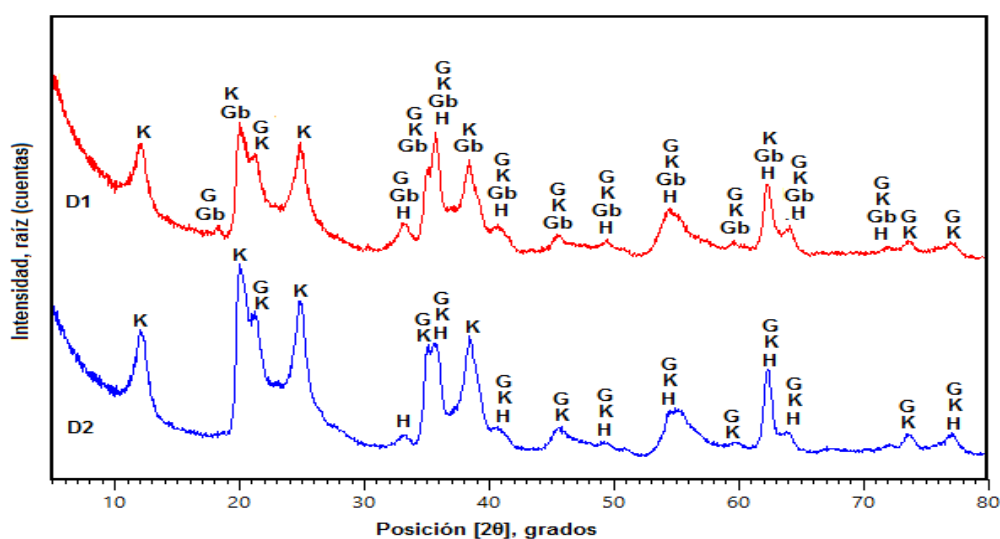


Figura 2. Patrones de difracción de las arcillas naturales D1 y D2.; K: caolinita; Gb: gibsita; G: goetita; H: hematita.

La presencia de caolinita fue confirmada por FTIR (Figura 3), identificada por las bandas de absorción entre $3\ 620\ \text{cm}^{-1}$ y $3\ 696\ \text{cm}^{-1}$ (Russell & Fraser 2012) y la presencia de una sola banda intermedia a los $3\ 656\ \text{cm}^{-1}$ para D1 y a los $3\ 654\ \text{cm}^{-1}$ para D2, que sugiere la presencia de una caolinita con estructura desordenada; desorden que podría estar dado por pequeñas cantidades de dickita o nacrita apiladas en la estructura de la caolinita (Russell & Fraser 2012).

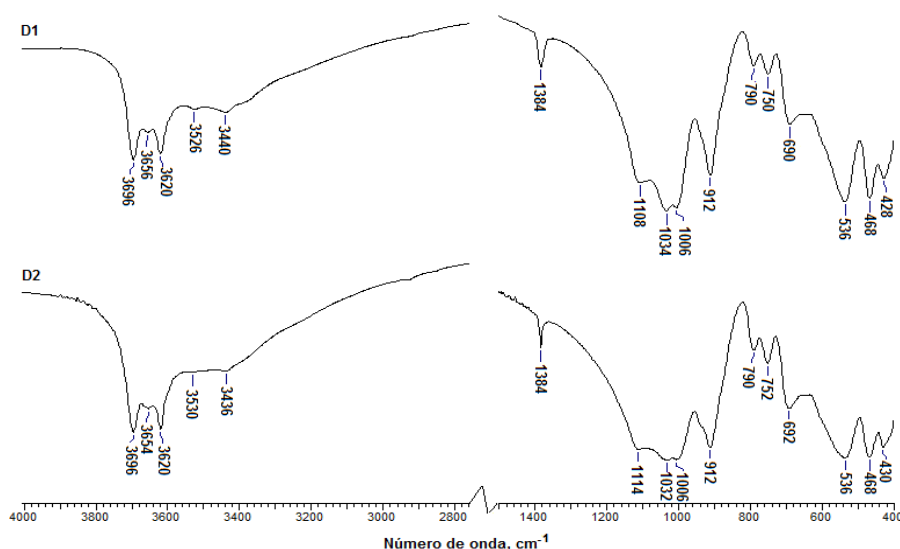


Figura 3. Espectro infrarrojo de los materiales arcillosos D1 y D2.

La presencia de bandas a los $3\ 526\ \text{cm}^{-1}$ y $3\ 440\ \text{cm}^{-1}$ confirma la presencia de gibsita en la muestra D1, sin descartar la presencia de cierta cantidad de goetita (Yusiharni & Gilkes 2010), mientras que la baja intensidad de las bandas $3\ 536\ \text{cm}^{-1}$ y $3\ 430\ \text{cm}^{-1}$, casi imperceptibles, demuestra que es insignificante la presencia de gibsita en la muestra D2.

Los resultados de orden estructural y el contenido de caolinita se presentan en la Tabla 2. Ambas arcillas poseen cristalinidad y contenido de caolinita similar, siendo, ligeramente más desordenada y con mayor contenido de caolinita, la arcilla D1.

Tabla 2. Índice de cristalinidad y contenido de caolinita

	D1		D2	
	Valor	Cristalinidad	Valor	Cristalinidad
índice P_0	0,89	desordenada	0,90	desordenada
índice FWHM-002	0,59	desordenada	0,44	desordenada
Contenido de caolinita, %	64,04		63,51	

La composición química de las arcillas en su estado natural (Tabla 3) muestra un alto contenido de Al_2O_3 que está relacionado con la presencia de

minerales arcillosos del grupo de la caolinita y en la muestra D1 está también enlazado a la presencia de la gibsita. La relación Al_2O_3/SiO_2 igual a 0,81 y 0,78 para D1 y D2, respectivamente, confirma la presencia de fases arcillosas del grupo 1:1. Los altos contenidos de Fe_2O_3 se asocian a la presencia de óxidos e hidróxidos de hierro, según se indica en los patrones de DRX.

Tabla 3. Composición química y pérdida por ignición

Sector	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PPI
D1	39,38	31,83	9,88	0,04	0,55	0,07	0,11	0,13	0,11	14,26
D2	37,99	29,47	13,20	0,05	0,56	0,06	0,08	0,12	0,14	13,37

La identificación positiva de minerales arcillosos del grupo 1:1, con contenido de caolinita superior a 60 % (Castillo *et al.* 2010; Fernández, Martirena & Scrivener 2011; Alujas *et al.*, 2015a), estructura desordenada (Tironi *et al.* 2014) y un alto contenido de alúmina (Alujas *et al.* 2015b) fundamenta las potencialidades de utilización de los afloramientos arcillosos evaluados como fuente de MCS en la producción de cementos de base clínquer-arcilla calcinada-caliza.

3.2. Evaluación química de la actividad puzolánica

Los minerales arcillosos estudiados están compuestos, predominantemente, por alúmina y sílice que al ser calcinados a temperaturas adecuadas se transforman a un estado amorfo inestable desordenado (Toledo Filho *et al.* 2007). La reacción puzolánica tiene lugar bajo condiciones alcalinas (He, Makovicky & Osback 1994) y describe la reacción del aluminio y el silicio disueltos con el hidróxido de calcio producto de la hidratación del cemento (Garg & Skibsted 2014).

La disolución de estos compuestos en álcali proporciona una información valiosa para el estudio de la actividad puzolánica de las arcillas. En la Figura 4 se muestra la solubilidad del silicio y aluminio en álcali para los dos materiales arcillosos estudiados. El aluminio comienza a reaccionar más bruscamente que el silicio debido a la solubilidad de la alúmina en álcali. En ambos casos, después de que el material ha sido calcinado hasta 650 °C, los valores de silicio y aluminio disueltos se incrementan. Se observa que desde 650 °C a 850 °C hay un ligero incremento de los valores de aluminio y silicio solubles, un poco más acentuados en el rango de 750 °C a 850 °C para el aluminio. Para ambas arcillas existe la misma tendencia. La solubilidad de los dos componentes es proporcional a su contenido en la arcilla en su estado natural y es superior para el material arcilloso con

mayores contenidos de caolinita y desorden estructural. El aluminio se comporta como el componente activo mayoritario.

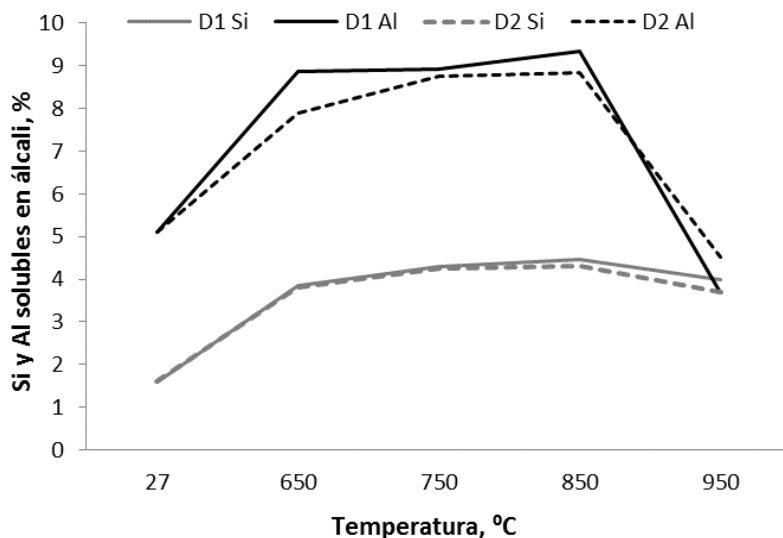


Figura 4. Contenido de aluminio y silicio solubles en álcali en función de la temperatura.

A 950 °C la cantidad de aluminio disuelto cae abruptamente, mientras que el silicio decrece ligeramente; fenómenos dados posiblemente por la reorganización de nuevas fases cristalinas (He, Makovicky & Osback 1994; He, Osback & Makovicky 1995) que conducen a la pérdida de reactividad.

De acuerdo con los resultados de este ensayo se puede concluir que los materiales arcillosos evaluados pueden comportarse con carácter puzolánico en el rango de temperatura de 650 °C a 850 °C, con la máxima reactividad a 850 °C. La medición de la actividad puzolánica mediante solubilidad alcalina demostró ser un método rápido y confiable para la evaluación de materiales puzolánicos ricos en aluminio.

3.3. Comportamiento de la resistencia a la compresión de los aglomerantes de base clínquer-arcilla calcinada-caliza

La Figura 5 presenta la evolución de la resistencia a la compresión para los morteros de sistemas cementicios del tipo LC³. Con el aumento de la temperatura de calcinación desde 650 °C a 850 °C se incrementa la resistencia, sin embargo, cuando se calcina hasta 950 °C, ambos sistemas arcillosos muestran una ligera caída de resistencia, comportamiento similar al observado en el ensayo de solubilidad alcalina, lo cual puede estar dado fundamentalmente por la recristalización de nuevas fases de transición (metacaolinita a mullita) del tipo espinela que tiene lugar entre los 925 °C y 1 075 °C (Brindley & Nakahira 1959a, 1959b).

Ambos sistemas cementicios presentan similar desarrollo de resistencia a la compresión. El sistema con desempeño ligeramente superior en todo el rango de temperatura evaluado es el LC³-D1, lo cual corresponde con mayores contenidos de alúmina y caolinita y mayor desorden estructural. La máxima resistencia se alcanza a los 850 °C.

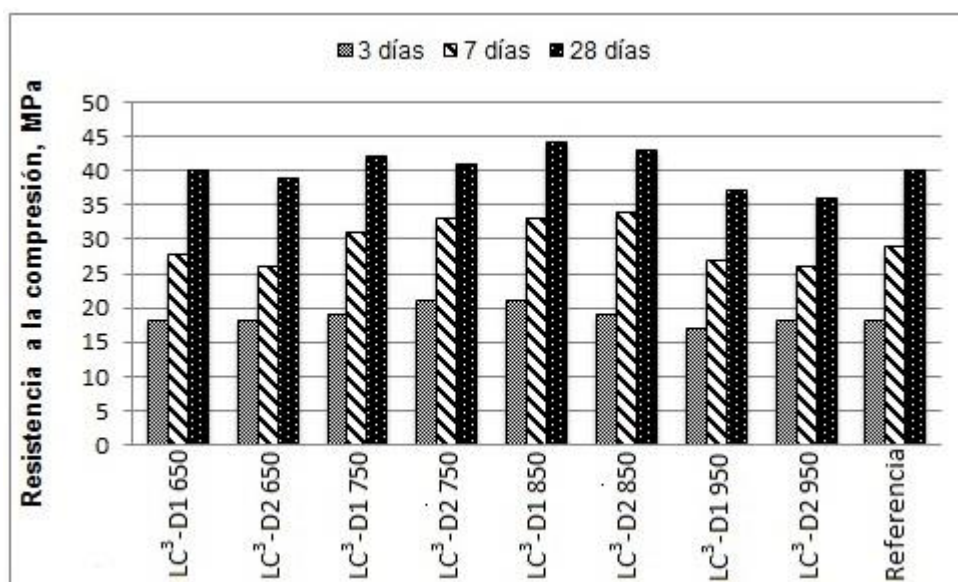


Figura 5. Resistencia a la compresión de los morteros de cemento.

Los sistemas ternarios donde se emplea como material puzolánico arcilla calcinada de los afloramientos D1 y D2 clasifican como P-35, de acuerdo con la NC 95 (NC/CTN22 2011).

4. CONCLUSIONES

- Los dos afloramientos arcillosos de origen primario de la región de Moa presentan potencialidades como fuente de material puzolánico para la producción de cemento ternario de base clínquer-arcilla calcinada-caliza.
- La solubilidad del aluminio y el silicio en álcali y la resistencia a la compresión de los sistemas LC³ es proporcional a su contenido en la arcilla, siendo superior para la de mayor contenido de caolinita y mayor desorden estructural.
- El intervalo de temperaturas de calcinación adecuado se ubica entre los 650 °C y 850 °C. El incremento de la temperatura de activación hasta 950 °C provoca la disminución de la reactividad y de la resistencia a la compresión.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración en los ensayos químicos y mineralógicos al equipo del Laboratorio del Centro de Investigaciones del Níquel (CEDINIQ), Moa, Cuba y al equipo del Proyecto *Low Carbon Cement* del Laboratorio de Materiales de Construcción, Escuela Politécnica Federal de Lausana, Suiza.

6. REFERENCIAS

- ALUJAS, A.; FERNÁNDEZ, R.; QUINTANA, R.; SCRIVENER, K. L. & MARTIRENA, F. 2015a: Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays : Influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration. *Applied Clay Science* 108: 94–101.
- ALUJAS, A.; ALMENARES, R. S.; BETANCOURT, S. & LEYVA, C. 2015b: Pozzolanic Reactivity of Low Grade Kaolinitic Clays: Influence of Mineralogical Composition. In: K. SCRIVENER & A. FAVIER (editors). *Calcined Clays for Sustainable Concrete RILEM Book*. Springer Netherlands, Lausanne, p. 339–345.
- APARICIO, P. & GALAN, E. 1999: Mineralogical interference on kaolinite crystallinity index measurements. *Clays and Clay minerals* 47(1): 12–27.
- AVET, F.; SNELLINGS, R.; ALUJAS, A.; BEN, M. & SCRIVENER, K. 2016: Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays. *Cement and Concrete Research* 85: 1–11.
- BICH, C.; AMBROISE, J. & PÉRA, J. 2009: Influence of degree of dehydroxylation on the pozzolanic activity of metakaolin. *Applied Clay Science* 44(3): 194–200.
- BRINDLEY, G. W. & NAKAHIRA, M. 1959a: The Kaolinite-Mullite Reaction Series: II, Metakaolin. *Journal of the American Ceramic Society* 42(7): 314–318.
- BRINDLEY, G. W. & NAKAHIRA, M. 1959b: The Kaolinite-Mullite Reaction Series: III, The High-Temperature Phases. *Journal of the American Ceramic Society* 42(7): 319–324.
- CASTILLO, R.; FERNÁNDEZ, R.; ANTONI, M.; SCRIVENER, K.; ALUJAS, A. & MARTIRENA, J. F. 2010: Activación de arcillas de bajo grado a altas temperaturas. *Revista Ingeniería de Construcción* 25(3): 329–352.
- FERNÁNDEZ, R.; MARTIRENA, F. & SCRIVENER, K. L. 2011: The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. *Cement and Concrete Research* 41(1): 113–122.

- FÖLDVÁRI, M. 2011: *Handbook of thermogravimetric system of minerals and its use in geological practice.*
- GARG, N. & SKIBSTED, J. 2014: Thermal Activation of a Pure Montmorillonite Clay and Its Reactivity in Cementitious Systems. *The Journal of Physical Chemistry C* 118(21): 11464-11477.
- HABERT, G.; CHOUPAY, N.; ESCADEILLAS, G.; GUILLAUME, D. & MONTEL, J. M. 2009: Clay content of argillites : Influence on cement based mortars. *Applied Clay Science* 43(3): 322-330.
- HE, C.; MAKOVICKY, E. & OSBACK, B. 1994: Thermal stability and pozzolanic activity of calcined kaolin. *Applied Clay Science* 9(3): 165-187.
- HE, C.; OSBAECK, B. & MAKOVICKY, E. 1995: Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: Activation, reactivity assessments and technological effects. *Cement and Concrete Research* 25(8): 1691-1702.
- HE, H.; YUAN, P.; GUO, J.; ZHU, J. & HU, C. 2005: The influence of random defect density on the thermal stability of kaolinites. *Journal of the American Ceramic Society* 88(4): 1017-1019.
- JUENGER, M. C. G.; PROVIS, J. L.; ELSÉN, J.; MATTHES, W.; HOOTON, R. D.; DUCHESNE, J.; COURARD, L.; HE, H.; MICHEL, F.; SNELLINGS, R. & DE BELIE, N. 2012: Supplementary cementitious materials for concrete: characterization needs. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 1-15.
- LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K. & HOOTON, R. D. 2011: Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research* 41(12): 1244-1256.
- MURAT, M. & COMEL, C. 1983: Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals III. Influence of calcination process of kaolinite on mechanical strengths of hardened metakaolinite. *Cement and Concrete Research* 13(5): 631-637.
- NC/CTN22. 2013: NC 506 Cemento hidráulico. Método de ensayo. Determinación de la resistencia mecánica. Oficina Nacional de Normalización, La Habana, Cuba.
- NC/CTN22. 2011: NC 95 Cemento Portland. Especificaciones. Oficina Nacional de Normalización, La Habana, Cuba.
- NJILA, T. & DÍAZ-MARTÍNEZ, R. 2016: Estudio químico-mineralógico de los perfiles lateríticos ferrosialíticos en los sectores Téneme, Farallones y Cayo Guam en el noreste de Cuba. *Revista Geológica de América Central* 54: 67-83.
- NJILA, T.; DÍAZ, R.; OROZCO, G. & ROJAS, L. A. 2010a: Un acercamiento a las cortezas de meteorización no níquelíferas del nordeste de Cuba. *Minería y Geología* 26(2): 14-34.

- NJILA, T.; DÍAZ, R.; PROENZA, J. & OROZCO, G. 2010b: Evaluación mineralógica semi-cuantitativa de las cortezas de meteorización no niquelíferas en la región nororiental de Cuba. *Minería y Geología* 26(4): 1–15.
- POLL, L.; ALMENARES, R. S.; ROMERO, Y.; ALUJAS, A.; LEYVA, C. A. & MARTIRENA, J. F. 2016: Evaluación de la actividad puzolánica del material arcilloso del depósito La Delta Moa, Cuba. *Minería y Geología* 32(1): 15–27.
- PONS, J. & LEYVA, C. 1996: Empleo de las arcillas ferrocaoliniticas–gibbsíticas de la región de Moa en los talleres de fundición. *Minería y Geología* 13: 93–97.
- PONS, J.; PÉREZ, O.; RAMÍREZ, B. & RAMÍREZ, M. 1997: Caracterización de las arcillas refractarias de la zona de Cayo Guam y su empleo en la fundición. *Minería y Geología* 14: 19–23.
- RUSSELL, J. D. & FRASER, A. R. 2012: Infrared methods. In: M. H. REPACHOLI (editor). *Clay Mineralogy: Spectroscopic and Chemical Determinative Methods*. Springer Netherlands, p. 11–67.
- SABIR, B.; WILD, S. & BAI, J. 2001: Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: A review. *Cement and Concrete Composites* 23(6): 441–454.
- SAMET, B.; MNIF, T. & CHAABOUNI, M. 2007: Use of a kaolinitic clay as a pozzolanic material for cements: Formulation of blended cement. *Cement and Concrete Composites* 29(10): 741–749.
- TEKLAJ, A.; YIN, C.; ROSENDAHL, L. & BØJER, M. 2014: Calcination of kaolinite clay particles for cement production: A modeling study. *Cement and Concrete Research* 61–62: 11–19.
- TIRONI, A.; TREZZA, M. A.; SCIAN, A. N. & IRASSAR, E. F. 2014: Potential use of Argentine kaolinitic clays as pozzolanic material. *Applied Clay Science* 101: 468–476.
- TOLEDO FILHO, R. D.; GONÇALVES, J. P.; AMERICANO, B. B. & FAIRBAIRN, E. M. R. 2007: Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil. *Cement and Concrete Research* 37(9): 1357–1365.
- VIZCAÍNO, L.; SÁNCHEZ, S.; PÉREZ, A.; DAMAS, S.; SCRIVENER, K. & MARTIRENA, F. 2015: Industrial trial to produce low clinker, low carbon cement. *Materiales de Construcción* 65(317): e045.
- WBCSD/IEA. 2009: Cement Technology Roadmap 2009. Carbon emissions reductions up to 2050. IEA Publications, Paris, 36 p.
- YUSIHARNI, B. E. & GILKES, R. 2010: Do heated gibbsite, kaolinite and goethite rehydroxylate? In: 21 St Australian Clay Minerals Conference. Brisbane, Australia, p. 131–134.

Roger S. Almenares-Reyes, ralmenares@ismm.edu.cu

Máster en Metalurgia. Profesor Asistente.
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, Cuba.

Adrián Alujas-Díaz, adrianad@uclv.edu.cu

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Auxiliar.
Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba.

Lisandra Poll-Legrá, lplegra@ismm.edu.cu

Máster en Metalurgia. Profesora Instructora
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, Cuba

Pedro R. Bassas-Noa, pbassas@cil.moa.minem.cu

Máster en Ciencias. Director U. P Laboratorio
Centro de Investigaciones del Níquel “Alberto Fernández Montes de Oca”, Moa, Cuba.

Sergio Betancourt-Rodríguez, sbetancourt@uclv.edu.cu

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular.
Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba.

José Fernando Martirena-Hernández, f.martirena@enet.cu

Doctor en Ciencias. Profesor Titular.
Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba.

Carlos Alberto Leyva-Rodríguez, cleyva@ismm.edu.cu

Doctor en Ciencias Geológicas. Profesor Titular.
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, Cuba.

Evaluación morfotectónica del sector Verraco-Punta Barlovento, Guantánamo, Cuba

Sandra Rosabal-Domínguez
Alina Rodríguez-Infante
José A. Zapata-Balanqué

Resumen

Con el empleo de métodos morfométricos, tales como el trazado de la red fluvial, el nivel base de erosión hasta el tercer orden, el análisis de las pendientes y la disección vertical se identificaron y caracterizaron las principales estructuras tectónicas, los bloques morfotectónicos y el fallamiento reciente, a esta última se le evaluó el carácter activo. Como resultado se obtiene el esquema morfotectónico del sector Verraco-Punta Barlovento a escala 1:25000, que contiene los posibles fenómenos inducidos por sismos de gran intensidad; así como se muestra la presencia de fallas simples y con secciones.

Palabras clave: fallas activas; métodos morfométricos; bloques morfotectónicos; fenómenos inducidos.

Morphotectonic evaluation of the Barracuda-Punta Barlovento sector, Guantánamo, Cuba

Abstract

By using morphometric, such as the route of the river network, the erosion base level to the third order, analysis of slopes and vertical dissection methods were identified and characterized the major tectonic structures, morphotectonic blocks and recent fault, the latter was assessed for active status. As a result, the morphotectonic scheme of the Verraco-Punta Barlovento sector is obtained at scale 1: 25000, which contains the possible phenomena induced by high intensity earthquakes; as well as the presence of simple faults and sections.

Keywords: active faults; morphometric methods; morphotectonic blocks; induced phenomena.

1. INTRODUCCIÓN

El sector Verraco-Punta Barlovento se sitúa en la costa S del oriente cubano y se destaca por altos parámetros de aceleración máxima del terreno a esperar, de 0,15-0,20 g (NC:46-1999) con una intensidad equivalente de VII-VIII MSK-EMS; debido a su posición geográfica cercana al contacto entre las placas tectónicas de Norteamérica y el Caribe (falla transformante Bartlett-Caimán u Oriente).

Las evaluaciones geomorfológicas y morfotectónicas recientes han dedicado sus esfuerzos a detectar fallas activas para contribuir a los estudios del peligro sísmico; ejemplo: Sunye y otros investigadores 2015 realizan un análisis geomorfológico y estructural en el graben de Acambay e identifican la falla San Mateo en México y con un estudio paleosísmico demuestran actividad reciente y estiman su potencial sismogénico. Noriega y Caballero (2015), con una evaluación morfotectónica, señalan deformaciones recientes en la falla Abriaquí y, considerando datos de sismicidad histórica, la asocian con el sismo de 1903 en Frontino, Antioquia, Colombia.

Como resultado a enfatizar de investigaciones previas se tiene el esquema de diferenciación morfotectónica del territorio, el mapa de lineamientos por datos geólogo-geofísicos y evidencias geomorfológicas, así como los límites tectónicos activos (Hernández et al. 1991). Sin embargo, no fue valorada la relación entre la morfotectónica y la ocurrencia de movimientos en masa.

Valoración de la incidencia geomorfológica en la ocurrencia de deslizamientos de la carretera de Beltrán, provincia de Guantánamo, con la aplicación de métodos geomorfológicos (disección vertical, máximas alturas y clasificación del relieve) y enfoque de evaluación de peligros geotécnicos de grado uno (Siyahi & Ansal 1999). Se identifican zonas con similares parámetros, proclives a deslizamientos (Rosabal, Zapata & Gómez 2009). Los autores no consideraron otros tipos de movimientos en masa.

El objetivo principal del trabajo consiste en identificar las estructuras tectónicas y fallas activas, realizar una breve caracterización de los bloques morfotectónicos y fenómenos inducidos por la actividad sísmica para contribuir con los estudios de prevención de desastre.

1.1. Ubicación geográfica

El sector Verraco-Punta Barlovento se ubica en el litoral sur de las provincias de Santiago de Cuba y de Guantánamo (Figura 1), desde la localidad de Verraco, al E de la ciudad de Santiago de Cuba, hasta Punta Barlovento, al E de la bahía de Guantánamo. Limita al S con las aguas del mar Caribe, al N con los pueblos de Boquerón y La Lombriz, al E con la

sierra de la Gran Piedra y al O con la sierra del Maquey. Abarca un área aproximada de 2 675 km². Los principales asentamientos humanos son Honduras, Salvador, Costa Rica, Jamaica, Manuel Tames y la ciudad de Guantánamo.

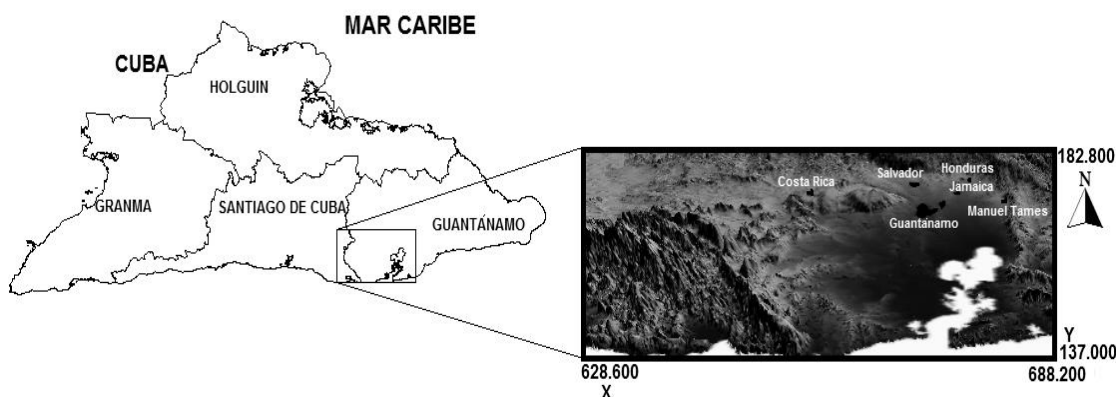


Figura 1. Ubicación geográfica del sector Verraco-Punta Barlovento. Coordenadas planas. X: 628,600-688,200; Y: 137,000-182,800. Proyección cónica conforme de Lambert.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Como materiales bases se emplearon el esquema geológico digital de Cuba Oriental (IGP 2003) y el modelo digital del terreno (MDT) (Geocuba 2006), a escalas 1:100000 y 1:25000, respectivamente. Siendo el primero utilizado para caracterizar los bloques morfotectónicos y determinar las condiciones geológicas que favorecen la ocurrencia de los movimientos en masa y licuación de los suelos.

Se aplicaron los métodos morfométricos de la red fluvial, el nivel base de erosión hasta el tercer orden, las pendientes y la disección vertical, para obtener los diferentes esquemas equivalentes; apoyados en un sistema de información geográfica (SIG) se trazaron los principales alineamientos. Se evaluó el carácter activo de las fallas detectadas por morfometría a través del método de Haller, Machette y Dart 1993.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los principales resultados de la aplicación de los métodos morfométricos en el sector Verraco-Punta Barlovento se muestran a continuación:

Red de drenaje: Se caracteriza por ser paralela y subparalela en casi toda el área. La orientación de los ríos es NS, NO-SE. El drenaje radial se localiza al NO en las colinas y en el SO en la sierra de la Gran Piedra.

Nivel base de erosión de segundo orden: Se observan veinte cierres positivos máximos y zonas de inflexión de isobasitas con dirección N y NO, que se asocian con posibles estructuras tectónicas (Figura 2).

Nivel base de erosión de tercer orden: Se obtienen doce cierres positivos máximos e inflexiones negativas con dirección NO y NE, dadas por la presencia de fallas (Figura 3)

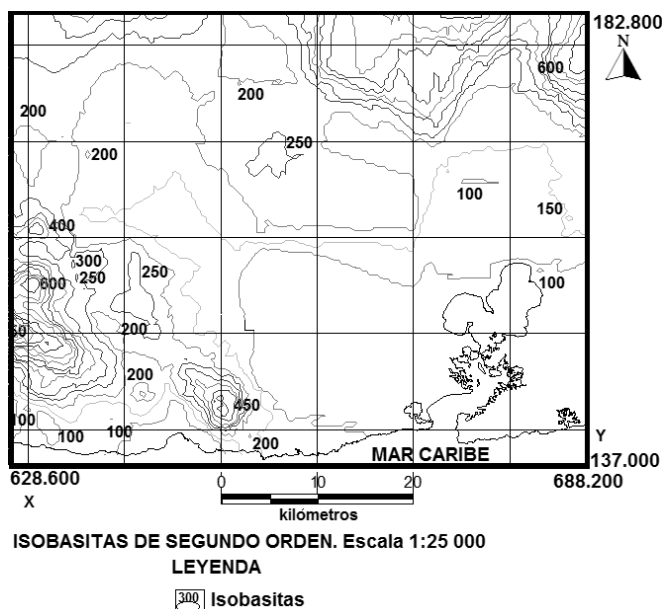


Figura 2. Nivel base de erosión (isobasitas) de segundo orden.

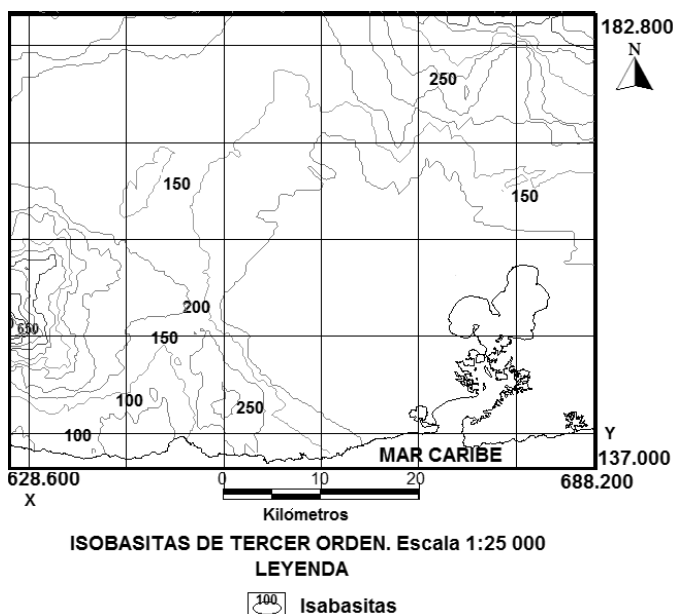


Figura 3. Nivel base de erosión (isobasitas) de tercer orden.

Modelo Digital del Terreno (MDT): Se distinguen tres categorías básicas del relieve, montañas, lomeríos y llanuras. Esta última incluye los alrededores de la laguna de Baconao, las cercanías del litoral, los cursos fluviales y el valle de Guantánamo. Las montañas bajas se sitúan al SO y la máxima elevación presente es Pico Mogote con 1 000 m.

Un relieve de meseta con más de 600 m representado por Santa María del Loreto al O en las cercanías de la localidad de Las Yaguas. Zona de premontañas (colinas montañosas), con altitudes entre 500 m y 1000 m; ubicadas al SO y NO, en forma de una franja estrecha próximo al Tibet y El Ramón. Al E un escarpe alineado de N a S, con pendientes mayores de 40° en contacto con las de bajos ángulos ($0-10^\circ$); al S, cercano a la bahía de Guantánamo, este tipo de relieve separa las formaciones San Luis y Maquey. Las lomas: La Plata, Los Malones y Las Guásimas, con 300 m de altitud, se localizan al SE.

Pendientes: Mayores de 40° se distribuyen al SO en la sierra de la Gran Piedra, en la meseta de Santa María del Loreto, en El Tibet y en sectores pequeños de las colinas montañosas. Los valores de este parámetro oscilan entre 30° y 60° al E en el escarpe y en los lomeríos. Hacia la costa, los cursos fluviales, la laguna de Baconao y la bahía Guantánamo fluctúan entre 0° y 10° .

Disección vertical: Los máximos valores se ubican al O del sector con 176-300 y 301-500 m/km^2 (Figura 4), indicando actividad neotectónica de ascenso y susceptibilidad de moderada a media a movimientos en masa (Mora & Vahrson 1994).

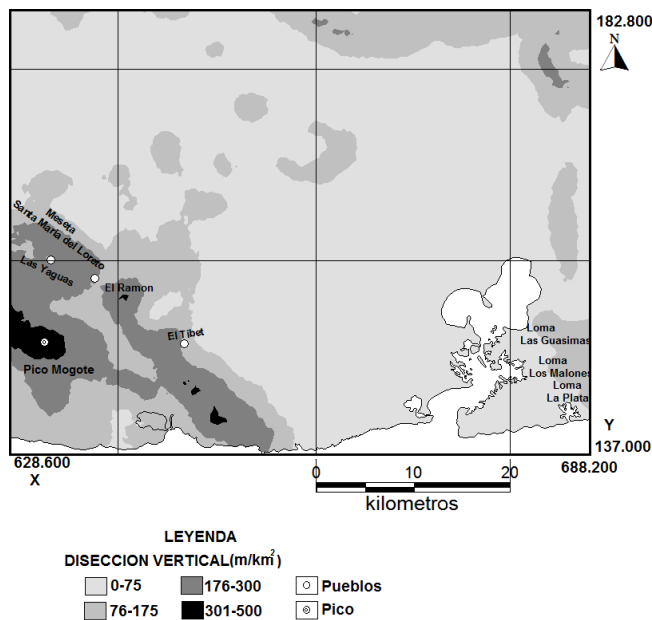


Figura 4. Disección vertical a escala 1:25000.

3.1. Principales estructuras tectónicas

Se describen las principales fallas detectadas por morfometría. En estudios precedentes se caracterizaron algunas de ellas, tales como Baconao, Mal Paso, Guantánamo y La Yaya (Hernández et al. 1991), nombradas de esta

forma por la actual investigación. A continuación se exponen los criterios que permitieron reconocerlas (Tabla 1).

Tabla 1. Criterios de identificación de fallas y fallamiento activo

Criterios de identificación de fallas									Criterios de identificación de fallamiento activo	
Estructuras	Tramos rectos de ríos y arroyos	Anomalías Gravimétricas	Alineación de cursos fluviales	Contacto brusco lineales entre dos materiales distintos	Alteración de valores morfológicos	Campo magnetométrico anómalo	Cambios del nivel del campo radiométrico	Alineación brusca del relieve	Formación de escarpes rectilíneos con pendientes mayores a 30° en contacto con zonas de pendientes	Actividad sísmica
Baconao	xx	x	x	xx	xx	x	x			x
Maquey								xx	xx	
La Higuera				xx				xx		
La Güira				xx						
Jaibo	xx									
La Yaya								xx	xx	
Mal Paso			xx					xx		

La Tabla 1 muestra xx para la descripción de la actual investigación y x para estudios precedentes.

Diversos investigadores definieron a la estructura Baconao como activa con segmentos (Cotilla, Franzke & Cordoba 2007; Arango 2014); zona sismogénica (Chuy et al 1997); asociada a terremotos históricos (5 de marzo de 1927 con I=6MSK) y perceptibles (Chuy 1999), con I=4 MSK (23-10-1984; 01-09-1985; 07-01-1986 y 07-07-1987).

Los autores, al aplicar el procedimiento de Haller, Machette y Dart (1993), detectaron una carencia de datos que caracterizan a los segmentos sismogénicos independientes, tales como trincheras paleosísmicas sobre cada uno de los segmentos o sobre una parte considerable de ellos; control estratigráfico de la falla y superficie histórica de ruptura de fallamiento sobre una parte de la estructura; por lo que los segmentos propuestos (Cotilla, Franzke & Cordoba 2007 y Arango 2014) aquí son considerados como "secciones" y se confirman los criterios de Magaz, Díaz y Hernández (1998).

Se presentan limitantes para la realización de estudios a escala detallada y determinar el potencial sismogenerador de la tectónica activa expresada por morfometría (Tabla 2), a pesar de la evolución de la red sísmica cubana, que permitió optimizar la calidad en la determinación y precisión de los parámetros sismológicos de los sismos (Diez et al. 2014). Las fallas La Yaya y Maquey se clasifican como "simple falla" por insuficiente información, tales como la geometría, el desplazamiento, entre otros.

3.2. Bloques morfotectónicos del sector Verraco-Punta Barlovento

Para el sector Verraco-Punta Barlovento se establecen tres bloques morfotectónicos: Siboney, Guantánamo y Maquey (Figura 5). A continuación se realiza una breve caracterización de cada uno de ellos.

Bloque Siboney: Se ubica al O del sector en la sierra de la Gran Piedra, limitado por la falla Baconao con dirección NO-SE. El relieve característico es de montañas bajas. Posee altos valores de pendientes, disección vertical, isobasitas de segundo y tercer órdenes (Tabla 3). Refleja los mayores movimientos neotectónicos de ascenso. Predominan rocas del arco volcánico del Paleógeno (Grupo El Cobre), dioritas cuarcíferas, gabros y basaltos. La dirección del agrietamiento es en dos direcciones: E-O y NE-SO.

Este bloque tiene condiciones geológicas, geomorfológicas para el desarrollo de movimientos en masa (Rosabal 2013). Las rocas se encuentran muy intemperizadas y agrietadas, en estas zonas pueden ocurrir deslizamientos.

Los sedimentos aluviales de edad Holoceno, ubicados en tramos y desembocadura del río Baconao y en los alrededores de la laguna homónima, tienen susceptibilidad a la licuación de los suelos (Rosabal 2014). Estos depósitos, por lo general, presentan un nivel freático alto. Las arenas no superan el máximo valor del rango para este fenómeno (1,5 mm), ni altos valores de aceleración horizontal que favorecen al desarrollo del proceso (Siyahi & Ansal 1999; Rodríguez & Ortiz 2015).

Bloque Guantánamo: Se ubica al centro del sector, limitado por las fallas Baconao al O, Maquey al E, Mal Paso y límites morfométricos al N. Se caracteriza por movimientos neotectónicos relativos de descenso en comparación con el resto del área de estudio (Tabla 3).

Este bloque está constituido por las formaciones geológicas Camarones, Charco Redondo, Puerto Boniato, San Luis, Río Maya, Jaimanitas, Depósitos Aluviales y Palustres.

Su relieve, de forma general, es de llanuras, pero al O se observan la meseta Santa María del Loreto y las colinas montañosas. Por los valores de

las pendientes en estas zonas puntuales pueden surgir caídas de rocas y desprendimientos (Rosabal 2013).

Tabla 2. Resultados de la evaluación del método de Haller, Machette & Dart (1993) a las principales fallas

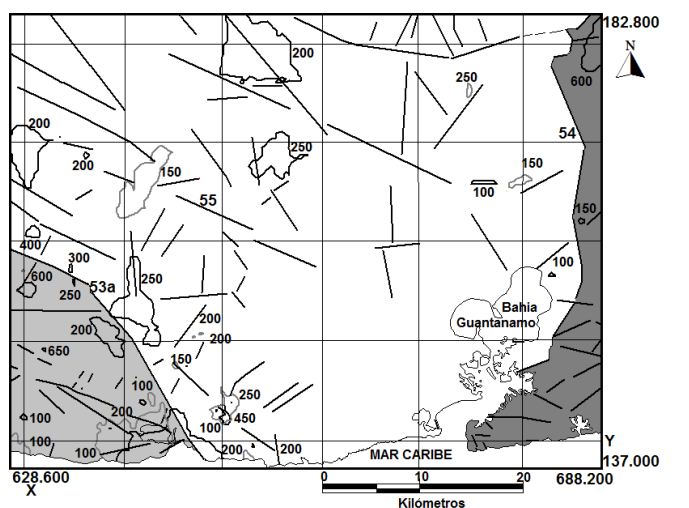
Nombre de la estructura o nombre de la sección	Baconao	Maquey	La Yaya
Número de la estructura o número de sección	53a y referida como falla 07 en Magaz, Díaz & Hernández (1998)	54	55
Clasificación	Falla con secciones	Simple estructura	Simple estructura
Comentario	Ubicación a lo largo del río Baconao hasta cerca de El Cristo	Se localiza de N a S al E de la bahía de Guantánamo	Se sitúa al S del embalse La Yaya
Compilador y afiliación	Rosabal, S; CENAI	Rosabal, S; CENAI	Rosabal, S; CENAI
Provincia	Santiago de Cuba	Santiago de Cuba	Santiago de Cuba
País	Cuba	Cuba	Cuba
Fidelidad de localización	Buena	Buena	Buena
Situación geológica	Separa las rocas carbonatadas de la formación Puerto Boniato de las formaciones San Luis y Camarones	Al S de la bahía de Guantánamo separa la formación San Luis de Maquey	Separa las formaciones San Luis y Camarones
Sentido de movimiento	Normal	Normal	Normal
Expresión geomorfológica	Gran escalón en el relieve y alineación del río	Alineación brusca del relieve de N a S. Contacto de Pendientes $\geq 30^\circ$ con las de bajos ángulos	Escarpe rectilíneo con pendientes $\geq 30^\circ$ en contacto con las de bajos grados
Azimut	desconocido	desconocido	desconocido
Desplazamiento	desconocido	desconocido	desconocido
Orientación	dirección NO-SE	dirección N-S	dirección NO-SE
Longitud:	37.39 km en el sector	28.60 km en el sector	8.70 km en el sector
X:	X: 647500-621400	X: 683400-683000	X:645100-653000
Y:	Y: 138900-164000	Y:150600-177400	Y:164000-161100
Escala del mapa	1:25000	1:25000	1:25000
Proyección	Proyección cónica conforme de Lambert	Proyección cónica conforme de Lambert	Proyección cónica conforme de Lambert
Edad	Eoceno medio	Mioceno inferior	Eoceno superior
Tipo de línea	sólida	sólida	sólida

Los sedimentos aluviales de edad Holoceno en los ríos Guaso, Jaibo y Guantánamo, así como en los alrededores de la bahía, son suelos susceptibles a licuar (Rosabal 2014).

Bloque Maquey: Se localiza al E del sector y se extiende de N a S, limitado por la estructura Maquey, donde aflora la formación geológica de igual nombre. Posee movimientos neotectónicos de ascenso.

El relieve característico es de lomeríos y exhibe altos valores de pendientes y disección vertical. Presenta alta susceptibilidad a deslizamientos con antecedentes de tipo rotacional (Rosabal, Zapata & Gómez 2009) y, además, existen condiciones geológicas y geomorfológicas que hacen que estos movimientos en masa no sean raros.

Hacia la parte N, sobre un tramo del río Yateras, existe alta susceptibilidad a la licuación de los suelos (Rosabal 2014), dado por la presencia de suelos aluviales de edad Holoceno.



ESQUEMA MORFOTECTÓNICO DEL SECTOR GUANTÁNAMO. Escala 1:25 000.

LEYENDA			
Bloques	Isobasitas	Fallas principales	Otras fallas
■ Siboney	▭ Segundo Orden	53a Falla normal Baconao	▭ Otras fallas
■ Guantánamo	▭ Tercer Orden	54 Falla normal Maquey	▭ Límites morfométricos
■ Maquey		55 Falla La Yaya	

Figura 5. Esquema morfotectónico del sector Verraco-Barlovento. Escala 1:25000.

En el sector Verraco-Punta Barlovento se reportan sismos perceptibles y fuertes (Chuy 1999), de estos, una cantidad significativa han tenido intensidades de IV-V MSK-EMS y otros su epicentro en la Zona Sismogénica Oriente, que se han sentido dentro de sus límites. Igualmente, terremotos con hipocentro en las provincias vecinas de Holguín y de Santiago de Cuba se han reportado en este territorio. De los últimos temblores se destaca el del 20 de marzo de 2010, en el que las localidades de mayor perceptibilidad fueron Guantánamo (V MSK-EMS) y Caimanera (VI MSK-EMS).

En los bloques Siboney, Guantánamo y Maquey es posible que ocurran deslizamientos inducidos por la actividad sísmica (Tabla 4), demostrado por el criterio magnitud distancia recomendado (Siyahi & Ansal 1999), teniendo

en cuenta las zonas sismogeneradoras Oriente (con magnitud 8,0 Richter), Baconao, Sabana (con 7,0) y Purial (con 6,5), que afectan al sector (Chuy et al. 1997).

Pueden ocurrir fallos destructivos de taludes a las distancias epicentrales de 20 km (Baconao y Sabana 1), 48 km (Oriente) y 12 km (Purial) y fallo de taludes a 150 km (Baconao y Sabana 1), 280 km (Oriente) y 72 km (Purial), teniendo mayor incidencia los terremotos ubicados en la zona sismogeneradora Oriente.

En resumen, en este sector pueden aparecer los fenómenos inducidos de la actividad sísmica, tales como: deslizamientos, caídas y desprendimientos de rocas; fallo destructivos de taludes y fallo de estos últimos, así como la licuación de los suelos. Estos efectos inducidos incrementan la vulnerabilidad en las carreteras del primer y segundo orden y construcciones que no cumplen con las normas sismorresistentes ubicadas en estas áreas de peligro.

Tabla 3. Características de los bloques morfotectónicos del sector Verraco-Punta Barlovento

Bloques	Red drenaje	Máximo orden	Relieve	Isob de 2do orden (m)	Isob de 3er orden (m)	Pendiente (°)	Licuación	Mov. en masa	Tendencia mov. relativos
Siboney	Paralela, subparalela	6to	Montaña baja	100 a 950	100	> 40°	Alta	Alta	Ascenso
Guantá namo	Radial Paralelo subparalelo	7mo	Llanura lomerío y colina	200 a 450	150 ^a a 250	De 2° a >40°	Alta	Alta	Descenso relativos
Maquey	Paralelo subparalelo	4to	Lomerío	150 a 650		> 40°	Alta	Alta	Ascenso

Tabla 4. Zona de fallo destructivo de taludes (Clase 1) y zona de fallo de taludes (Clase 2), según las zonas sismogeneradoras (Chuy et al. 1997) que afectan el sector Verraco-Punta Barlovento. Ms, magnitud máxima (Siyahi & Ansal 1999)

Zonas	Ms	Clase 1 (km)	Clase 2 (km)
Baconao	7,0	20	150
Sabana	7,0	20	150
Purial	6,5	12	72
Oriente 1	8,0	48	280

4. CONCLUSIONES

- En el sector Verraco-Punta Barlovento existen condiciones geológicas, geomorfológicas y sismológicas que favorecen el desarrollo de los fenómenos inducidos por la actividad sísmica, tales como: los deslizamientos, caídas, desprendimientos de rocas y licuación de los suelos.
- El esquema morfotectónico del sector Verraco-Punta Barlovento, está constituido por tres bloques: Siboney, Maquey y Guantánamo. El primero, limitado por la estructura Baconao y se caracteriza por movimientos neotectónicos de ascenso. Maquey, definido por la falla de igual nombre y con tendencias similares al primero. Por último, Guantánamo, con preferencias por el descenso relativo y establecido por las estructuras tectónicas Baconao, Maquey, Mal Paso y límites morfométricos.
- En las estructuras Maquey, La Yaya y Baconao se estableció por morfometría, criterio de fallamiento activo, así como clasificadas como "simple falla" por el método de Haller, Machette y Dart (1993), las dos primeras y la última como "con secciones", por carencia de estudios detallados, como las trincheras paleosísmicas.
- Por la distancia epicentral a las zonas sismogénicas, que afectan al sector en los bloques morfotectónicos, pueden ocurrir fallos destructivos de taludes y fallos de taludes, donde se destaca la zona Oriente.

5. REFERENCIAS

- ARANGO, E. 2014: *Análisis sismotectónico del territorio oriental de Cuba a partir de la integración del modelo de corteza 3D de datos gravimétricos con datos sismológicos y geodésicos*. Tesis doctoral. Centro de Investigaciones Científicas y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. México. 146 p.
- COTILLA, M.; FRANZKE, H. & CORDOBA, D. 2007: Seismicity and seismoactive faults of Cuba. *Russian Geology and Geophysics* 48(6): 505-522.
- CHUY, T. J.; ORBERA, L.; HERNÁNDEZ, J. R.; MAGAZ, A.; SÁNCHEZ, F.; PÉREZ, C.; GONZÁLEZ, E.; FUNDORA, M.; RUBIO, M.; ÁLVAREZ, J. L.; COTILLA, M.; ARANGO, D.; ITURRALDE-VINENT, M.; RODRÍGUEZ, J.; MARQUETTI, M. C. & RAMÍREZ, R. 1997: Dictamen Conclusivo. Comisión Ad-hoc para la determinación de las Zonas Sismogénicas de la región Oriental de Cuba y zonas aledañas. *Ciencia en su PC* 2(2).
- CHUY, T. J. 1999: *Macrosísmica de Cuba y su aplicación en los estimados de peligrosidad y microzonación sísmica*. Tesis doctoral. CENAI. La Habana. 273 p.

- DIEZ, E.; CUTIÉ, M.; MONTENEGRO, C.; PALAU, R.; POVEDA, V.; YINXING, Z.; YANG, CH.; FENGXIA, W. 2014. Modernización de la red sísmica Cubana. Instalación, calibración y puesta a punto. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela* 29(2): 69-78.
- GEOCUBA. 2006: Met 30-03: Metodología para la creación del modelo digital del terreno. Agencia Geomática. UCT GEOCUBA IC.
- HALLER, K. M.; MACHETTE, M. N.; DART, R. L. 1993: Guidelines for US database and map for the maps of the major active faults, Western Hemisphere. International Lithosphere Program (ILP), Project II-2 US Department of Interior, US Geological Survey, U.S.A. 45 p.
- HERNÁNDEZ, J. R.; DÍAZ, J. J.; MAGAZ, A. R.; GONZÁLEZ, R.; PORTELA, A.; ARTEAGA, F. 1991: Criterios geomorfológicos para la clasificación morfotectónica de Cuba Oriental. En: *Morfotectónica de Cuba Oriental*. Ed. Academia, La Habana, 43 p.
- MAGAZ, A.; DÍAZ, J.; HERNÁNDEZ, J. 1998: Elementos geomorfológicos básicos para el análisis y determinación de zonas de fallamiento activo en las condiciones de Cuba. *Investigaciones geográficas* 35: 9-83.
- MAPA GEOLÓGICO DIGITAL DE LA REPÚBLICA DE CUBA. 2003: Instituto de Geología y Paleontología. Escala 1:100000.
- MORA, S. & VAHRSON, W. 1994: Macrozonation methodology for landslide hazard determination. *Environmental & Engineering Geoscience* 31(1): 49-58.
- NORIEGA, S. & CABALLERO, J. H. 2015: Morfotectónica de la falla Abriaquí y sismicidad histórica asociada con el sismo de 1903 en Frontino, Antioquia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 39(150): 100-110.
- OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (CUBA). 1999: NC 46:1999: Construcciones Sismorresistentes. Requisitos Básicos para el Diseño y Construcción. La Habana. 95 p.
- RODRÍGUEZ, L. G. & ORTIZ, E. Q. 2015: Modeling the specific seismic risk considering the weight of determining variables. *Open Access Library Journal*, 2:e1157. <http://dx.doi.org.10.4236/oalib.1101157>
- ROSABAL, S. Y.; ZAPATA, J. A.; GÓMEZ, J. 2009: Incidencia de la geomorfología en los deslizamientos de la carretera de Beltrán, Guantánamo, Cuba. *Revista Geos* 29(2). ISSN: 0186-1891.
- ROSABAL, S. Y. 2013: Peligro geológico por deslizamientos en sectores de la provincia de Santiago de Cuba. En: IV Simposio de riesgos geológicos y sismicidad. X Congreso Cubano de Geología (Geología 2013). Memorias [CD-ROM]. La Habana, Cuba, 4-8 abril.
- ROSABAL, S. Y. 2014: Zonación preliminar de licuación de los suelos en la región Cuba Oriental. Disponible en:

<http://www.monografias.com/trabajos101/zonacion-preliminar-licuacion-suelos-region-cuba-oriental/zonacion-preliminar-licuacion-suelos-region-cuba-oriental.shtml>

- SUNYE, I.; LACAN, P.; ORTUÑO, M.; VILLAMOR, P.; AUDIN, L.; ZUÑIGA, F.; LANGRIDGE, R.; AGUIRRE, G.; LAWTON, T. 2015: La falla San Mateo: nuevas evidencias paleosísmicas de fallamiento activo en el graben de Acambay, México. *Revista Mexicana de ciencias geológicas* 32(3): 361-376.
- SIYAH, B. G. & ANSAL, A. 1999: Manual for zonation on seismic geotechnical hazards. Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering. *Technical Committe* 4: 68-70.

Sandra Rosabal-Domínguez, sandra@cenais.cu

Máster en Manejo Integrado de Zonas Costeras.
Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, Cuba.

Alina Rodríguez-Infante, rinfante@ismm.edu.cu

Doctora en Ciencias Geológicas. Profesora Titular.
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba.

José A. Zapata-Balanqué, zapata@citmasc.ciges.inf.cu

Doctor en Ciencias. Delegación Territorial del CITMA de Santiago de Cuba, Cuba.

Evidencia geodésica de movimientos verticales recientes en la zona sismogeneradora de Acambay, México

Luis Miguel Espinosa-Rodríguez
José Ramón Hernández-Santana
Ana Patricia Méndez-Linares

Resumen

La región central mexicana está conformada por un complejo sistema de fallas, fosas tectónicas y pilares y manifestaciones volcánicas (estratovolcanes, campos monogenéticos y coladas fisurales), que atraviesan al Cinturón Volcánico Transversal. En este contexto y de manera particular, el sistema disyuntivo que constituye a la región de Acambay, en el estado de México, ha mostrado evidencia de actividad sismogeneradora desde hace casi un siglo hasta el presente. De acuerdo con lo anterior y basados en el análisis geomorfológico y las mediciones geodésicas, se mostró la dinámica que presentan estas morfoestructuras en un estudio comparativo multitemporal (1998/2003 al 2011). Las velocidades de los movimientos tectónicos verticales recientes reflejan valores de ascenso, que oscilan entre +7,3 y +12,8 mm/año, en el horst septentrional Santa María Tixmadejé, mientras que en el graben central de Acambay los ascensos son muy débiles, del orden de +0,4 a +0,5 mm/año.

Palabras clave: Acambay; sistema volcánico transmexicano; geodinámica; tectónica; movimientos verticales; mediciones geodésicas.

Geodetic proof of vertical recent movements at the seism generating zone of Acambay, Mexico

Abstract

The central territorial belt oriented west-east and located along the parallel 19^o in the Mexican Republic, is composed of a complex system of faults, that respond to the consequent morphology of a tension arched system, which has been erected to the Volcanic Transmexican or Transversal Belt. This region evidences the dynamics and evolution of a graben and horst tectonic system, as well as volcanic manifestations characterized by stratovolcanoes, monogenetic fields and fisural flows, among others. In particular, in the center of the Mexican regional complex, the fault system which delimits the region of Acambay in the state of Mexico, had showed evidences of seismogenerating activity during a century until the present time. According to the above and based on the geomorphological analysis and the geodetic measurements, the dynamic presented by these morphostructures in a multitemporal comparative study (1998/2003 to 2011) is showed. The rates of vertical tectonic movements reflect recent rise values ranging from + 7,3 to 12,8 mm/year in the northern horst of Santa María Tixmadejé, while in the central graben of Acambay are very weak, of the order of + 0,4 to + 0,5 mm/year.

Keywords: Acambay; trans-mexican volcanic system; geodynamic; tectonic; vertical movements; geodetic measurements.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las unidades geotectónicas, geomorfológicas y geodinámicas más interesantes del territorio mexicano lo constituye el sistema volcánico transmexicano, el cual se extiende, con dirección oeste-noroeste a este-sureste, desde las costas del océano Pacífico hasta el golfo de México. Según diversos autores (Nixon 1982; Ponce *et al.* 1992; Pardo & Suárez 1993; Norini *et al.* 2010), se trata de un arco volcánico continental activo, resultado del mecanismo de subducción de las placas Cocos y Rivera, bajo la placa Norteamericana. La actividad tectónica, volcánica y sísmica de este comenzó a partir del Mioceno superior (Ferrari 2000), aunque Garduño y otros investigadores (2009) consideran que el sistema de fallas longitudinales surgió en el Mioceno temprano.

De acuerdo con Aguayo y Trápaga (2013), el sistema tiende a separarse en una dirección generalizada norte-sur, encontrándose en un proceso de emersión afectado por esfuerzos distensivos, que generan sistemas estructurales complejos de fosas y pilares, cuyo arreglo geomorfológico corresponde al desarrollo de valles escalonados hacia el centro, como ocurre en el sistema de horst y graben del área estudiada. De acuerdo con los patrones estructurales de fallamiento y el vulcanismo asociado, Ego y Ansan (2002) lo dividieron en tres regiones: la occidental, en Jalisco, conformada por una zona de junta triple; la central, entre los 102° y los 99° de longitud oeste, con un patrón de fallas normales de rumbo este a oeste; y la oriental, desde Puebla hasta el golfo de México, con un diseño NNW-SSE de fallas normales.

Estas regiones han sido investigadas de manera diferenciada, predominando gran parte de los estudios en la parte central, donde se extienden las depresiones de tipo graben de Cuitzeo y de Acambay. Esta última estructura presenta unas dimensiones de 80 km de largo por 15 km a 30 km de ancho y se encuentra limitada por cuatro fallas normales notables (Persaud *et al.* 2006; Roldán, Aguirre & Rodríguez 2011): Epitacio Huerta y Acambay-Tixmadejé (al norte) y Venta de Bravo y Pastores (al sur), todas con actividad tectónica y sísmica actual (Figura 1). Según algunos investigadores (Suter, Quintero & Johnson 1992; Suter *et al.* 1995b; García, Macías & Garduño 2000) estas depresiones centrales están delimitadas por una red principal de fallas normales, a menudo dispuestas en dirección WNW-ESE a W-E, de desplazamiento lateral-derecho, en sistemas escalonados con estructuras de tracción, por ejemplo, las fallas Venta de Bravo, Pastores y Tenango.

La falla de Acambay-Tixmadejé posee escarpes que forman el bloque levantado, alcanza alturas relativas de 400-500 m, con respecto a la parte central del graben. El plano de falla presenta echados de 60° y 70° hacia el

sur (Quintero 2002). En la porción oriental se han identificado dos edificios volcánicos de dimensiones importantes: el volcán Temascalcingo y el volcán Altamirano (Aguirre 1995). La sismicidad y la formación de sismodislocaciones en las referidas fallas regionales han sido sostenidas, desde fines del Terciario hasta el Holoceno, incluyendo su etapa más reciente. Algunos autores sostienen que el borde norte del graben presenta mayor actividad sismotectónica (Suter *et al.* 2001) y significativas deformaciones tectónicas de su relieve (Ramírez 1998). La cinemática de las fallas atestigua la posibilidad de sismos con magnitud mayor a siete grados Richter (Suter *et al.* 1995a), así como la deformación de depósitos lacustres y rocas volcánicas plioceno-cuaternarias. En los registros sismoestadísticos históricos aparecen dos eventos significativos: el terremoto de Acambay (19-11-1912), con $M_s=7,0$ y el de Maravatío (22-febrero-1979), con $M_s=4,9$ (Astiz 1980).

En otro orden de ideas, debido a la extensión y complejidad del territorio mexicano, no son numerosos los estudios emprendidos sobre la expresión estructuro-geológica en el relieve y, mucho menos aún, sobre las velocidades y tendencias de los movimientos tectónicos verticales recientes de la corteza terrestre, mediante el empleo de la información de los registros geodésicos sobre el control vertical del país. Solo a los efectos de establecer modelos de desplazamientos de la placa Norteamericana y los efectos de los ciclos sísmicos en México, Márquez y De Mets (2009) estudiaron las deformaciones, mediante un registro continuo de 13 estaciones de la Red Nacional Geodésica Activa, con GPS de alta precisión, existiendo la estación TOLU ($19,293^\circ$ N; $99,644^\circ$ E), en Toluca, ciudad capital del estado mexiquense, relativamente cercana al área de estudio. Los resultados de las deformaciones transitorias en dicha estación indicaron movimientos hacia el norte, con valores de $-2,0 \pm 0,8$ mm/año y hacia el este, con valores de $-5,3 \pm 0,6$ mm/año. Es así que la historia sísmica de la región, el carácter morfoestructural y dinámico de su relieve sugieren una elevada inestabilidad tectónica reciente y una notable actividad sismogeneradora del tipo intraplaca, a lo largo de la falla Acambay-Tixmadejé y otras del sistema Chapala-Tula.

De acuerdo con lo anterior, la presente investigación tuvo como objetivo central la búsqueda de las evidencias que manifiesten la dinámica de dicha estructura regional (porción septentrional del sistema de horst Santa María Tixmadejé y graben de Acambay), a través de la comparación multitemporal (1998/2003 a 2011) de los valores de los signos geodésicos de primer orden, mediante el empleo comparativo de su registro altimétrico de precisión y del levantamiento GPS en condiciones de campo, con vistas a determinar las magnitudes y tendencias de las velocidades de los movimientos tectónicos verticales recientes de la corteza terrestre local. Estos resultados

geodinámicos complementan, de cierta manera, el conocimiento geocientífico acumulado en tan singular región por numerosos especialistas en las últimas décadas.

1.1. Área de estudio

El área estudiada se localiza en el municipio de Acambay de Ruiz Castañeda, al noreste del estado de México y constituye el sector nororiental del graben homónimo. Las coordenadas del área municipal son $19^{\circ} 50'$ y $20^{\circ} 05'$, de latitud norte y $99^{\circ} 40'$ y $100^{\circ} 05'$, de longitud oeste; ocupa una superficie de $492,13 \text{ km}^2$ (Figura 2).

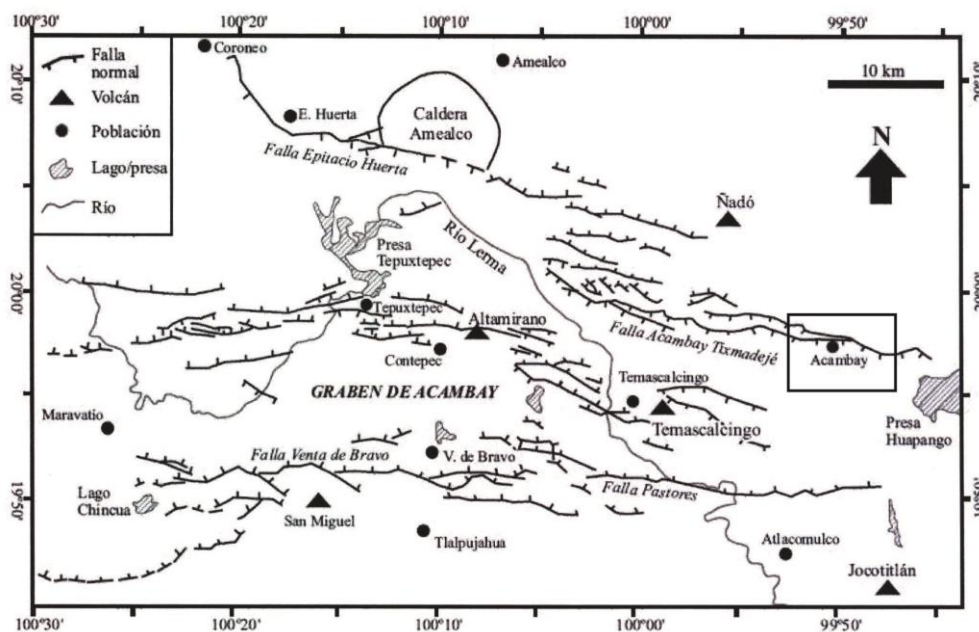


Figura 1. Principales estructuras del graben de Acambay (Suter *et al.* 1995b). Área de estudio enmarcada en el cuadro central derecho de la figura.

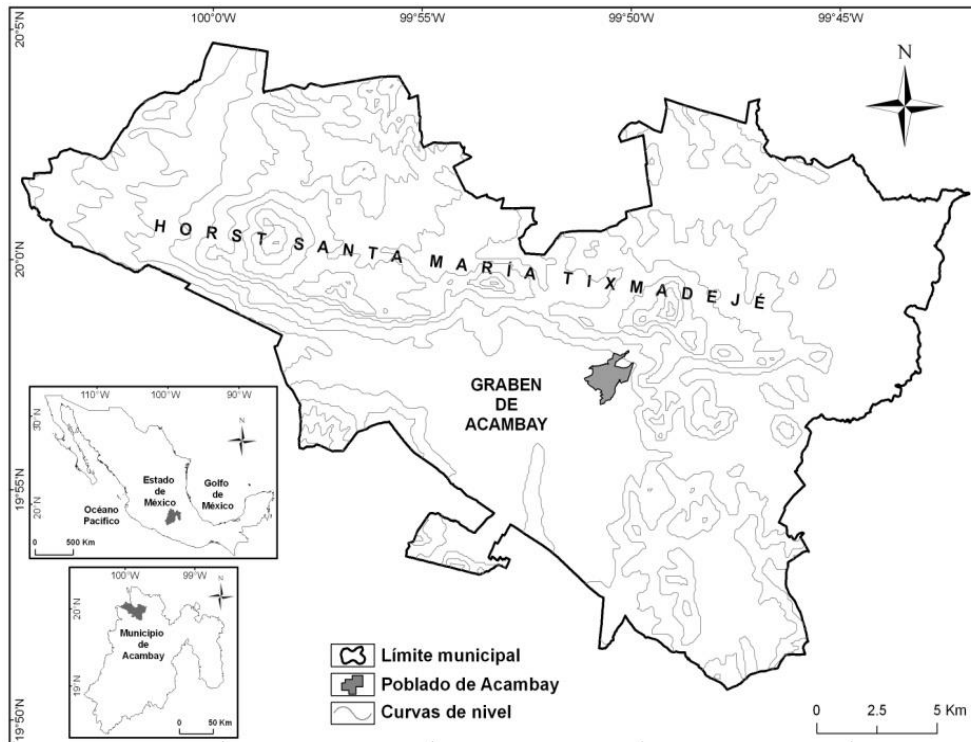


Figura 2. Localización geográfica del área de estudio.

La constitución geológica está representada por tobas de composición andesítica del Mioceno medio-superior, flujos de lava basáltica y rocas piroclásticas del Pleistoceno-Holoceno; los depósitos aluviales del Pleistoceno superior-Holoceno están integrados por fragmentos de rocas volcánicas (gravas) y arenas y arcillas (SECOFI 1996).

De manera particular, la mayor parte del municipio de Acambay se encuentra asentada en el techo de una falla normal dentro de un graben, mientras que el restante territorio discurre entre piedemontes, lomeríos asociados a domos de obturación y taludes, formados en la base de la falla norte de la municipalidad.

En el año de 1912 se registró un movimiento sísmico de magnitud 7,4° y el epicentro se localizó dentro del municipio, provocando la muerte de 161 personas y daños a la infraestructura. Los mayores efectos del movimiento se encontraron en la porción septentrional del graben, afectando a poblaciones como Temascalcingo, San Pedro El Alto, Venta San Lucas y San Andrés Timilpan, situadas en la parte central del graben de Acambay y, por último, las que se ubican en la porción meridional; mientras que como efectos secundarios, localidades como Santa María Tixmadejé, Dongú y San Pedro Potla, experimentaron el desprendimiento y caída de bloques provenientes de los escarpes de la falla (Urbina & Camacho 1913).

1.2. Desplazamientos tectónicos y geodesia aplicada: actualidad internacional

En las últimas décadas, el desarrollo de las investigaciones geodésicas instrumentales y el empleo de la tecnología GPS permitieron revelar y evaluar la dirección, velocidad y tendencias de los movimientos tectónicos recientes de la corteza terrestre, tanto verticales como horizontales, en grandes territorios continentales (Europa centro-oriental y mediterránea, Norteamérica, África, Asia Central, Sudamérica) e insulares (Islandia, islas del mar Egeo, Cuba, Japón), por citar algunos casos.

Los reportes más antiguos sobre estudios geodinámicos, aplicando las re-nivelaciones, se localizan en la parte europea de Rusia (Enman & Nikonov 1993), con análisis cartográficos de los levantamientos geodinámicos de 1958, 1963, 1971 y 1986, donde se reportan, en general, valores extremos de descensos de -4,3 mm/año y de ascensos de +14,6 mm/año. Estudios geodésicos emprendidos por Papazachos, Kiratzi y Papazachos (1992), a lo largo de la región costera de Albania, Yugoslavia y Grecia occidental, reflejaron ascensos de +2 mm/año; en las islas Jónicas, +10 mm/año, en dirección E-W y 11 mm/año en dirección N-S y en el arco helénico (sur del Peloponeso, Creta y Rodos) fue de +6 mm/año. En el mar Egeo y sus alrededores las deformaciones son de +5 mm/año; en Anatolia noroccidental y las zonas de fallas del Egeo norte los valores alcanzaron los +19 mm/año a +22 mm/año. En otros sitios mediterráneos y centrales de Europa, como la región geotermal italiana de Travale y el centro de la antigua república checoslovaca, se reportan valores de subsidencia entre -20 mm/año a -25 mm/año (Geri, Perusini & Rossi 1984) y de -40 mm/año (1943-1976), respectivamente (Zeman 1988).

Investigaciones de Finko (1992), en el escudo kasajo, en Asia central, reflejaron ascensos de + 20 mm/año a + 23 mm/año en las montañas Kent y Karkaraly; mientras Rontogianni (2010) reportó, mediante 18 campañas GPS (1994-2000), ascensos entre +30 mm/año a +35 mm/año en Ática, Evia, Peloponeso oriental, islas del Egeo y Patras. En las condiciones insulares cubanas, Lilienberg y otros investigadores (1988) encontraron contrastes geodinámicos (+10 mm/año a +30 mm/año) en la región oriental (1956-1976), donde las montañas de la Sierra Maestra, Gran Piedra, Meseta del Guaso y Sagua de Tánamo alcanzaron valores de +5 mm/año a +10 mm/año; mientras la subsidencia en las depresiones circundantes (depresiones del Cauto, Central y Guantánamo) experimentó descensos entre -10 mm/año a -15 mm/año. Garduño y demás colaboradores (2001) detectaron tasas de desplazamientos verticales por las fallas, entre 4 cm/año

y 6 cm/año, debido a la sobreexplotación de acuíferos en la región de Morelia, en México.

En la República de Yibuti, en África oriental, entre los años 1979 y 1983, el rift del lago Assal arrojó una expansión de +60 mm/año, perpendicular a las fallas normales que lo bordean, las que mostraron ascensos entre +5 mm/año y +10 mm/año (Kasser, Ruegg & Lopine 1987), mientras que en el valle de rift de Kenia, la expansión alcanzó +2 mm/año (Rostom 1991). Otros resultados sobre movimientos expansivos fueron reportados por Völksen y otros investigadores (2009), en Islandia, durante 9 años de monitoreo con estaciones GPS, revelando desplazamientos horizontales de +20 mm/año y verticales en la región central de la isla de +25 mm/año. Otros datos sobre desplazamientos horizontales reflejan magnitudes importantes en la porción oriental de la zona de la falla Anatolia norte (Ozener *et al.* 2010), del orden de +16 mm/año a +24 mm/año, con respecto a Eurasia; mientras en la zona de la falla dextral Boconó, en Colombia, Molina (2006) determinó movimientos horizontales del orden de +12 mm/año y Argus y Gordon (2001) desplazamientos sostenidos de +39 mm/año en la falla San Andrés.

1.3. Antecedentes geodinámicos y sísmicos en la región de Acambay

Diversos han sido los estudios realizados en torno a la falla y al municipio de Acambay, debido a los reportes sísmicos regionales y locales. De acuerdo con Langride y otros investigadores (2000), el graben se relaciona, por lo menos, con cuatro eventos sísmicos ocurridos en el Pleistoceno y otros más de edad holocénica, relacionados todos con la dinámica intra-arco, que dejaron evidencias morfológicas en columnas estratigráficas, donde se destacan cuñas coluviales rellenas, grietas de erosión truncadas y corrimiento de unidades estratigráficas, entre otras. Estos autores destacan valores de desplazamiento sinistral con un promedio aproximado de 105 cm +/- 10 cm, que se correlacionan con los últimos tres eventos en la llanura de Huamango y una tasa de deslizamiento de 0,17 mm al año, que se presenta con una recurrencia aproximada de 3 600 años para los grandes terremotos, calculados a partir de excavaciones y valores; toda vez que refieren la correlación del sismo de 1912, que conformó un vector con orientación NNE y rupturas aproximadas a los 60 cm.

Otros autores (Garduño *et al.* 2001) correlacionan la actividad sísmica con un par de complejos sistemas de fallas orientadas, en primer término, en dirección NNW-SSE, que se han reactivado y, por otra parte, un sistema con rumbo E-W, originado en el período terminal hace unos ocho millones de años en el Mioceno. La analogía entre los sistemas de graben en el centro-occidente del Cinturón Volcánico se correlaciona con sismos históricos, que en promedio,

presentan magnitudes iguales o superiores a 7,0 grados en la escala Richter y otros de menor intensidad, pero que en conjunto se relacionan con la dinámica de Tlalpuhahua y la falla de Venta de Bravo, motivo por el cual algunos autores (Astiz 1980; Suter *et al.* 1995a; Suter, Carrillo & Quintero 1996) asienten la dinámica presente de la falla de Acambay.

De acuerdo con el catálogo sismoestadístico del Servicio Sismológico Nacional (Instituto de Geofísica 2010) de las últimas cuatro décadas, la actividad sísmica es de magnitud moderada a alta y con cierta recurrencia (Tabla 1, Figura 3).

Tabla 1. Registro general de actividad sísmica periférica al municipio de Acambay, estado de México, que agrupa los últimos 40 años de información reportada. Fuente: Instituto de Geofísica (2010)

Long	Lat	UTM_X	UTM_Y	Fecha	Magnitud	Profundidad
99°41'00"	20°27'99"	457187,92	2242519,69	01/04/1976	3,5	9
100°30'00"	20°16'00"	364142,18	2229718,32	28/02/1979	4,5	19
100°37'00"	19°85'99"	356553,98	2196571,72	01/03/1979	4,7	28
100°11'99"	19°81'99"	382703,76	2191951,46	26/02/1979	4,4	0
99°39'99"	19°99'99"	458157,65	2211531,26	30/04/1981	3,2	1
99°29'99"	20°10'00"	468638,19	2222575,59	25/05/1981	3,8	15
99°21'00"	20°31'00"	478076,00	2245800,46	21/01/1987	4,1	---
100°56'17"	20°16'99"	336796,00	2231059,00	14/09/1988	3,4	70
100°48'00"	20°02'00"	345190,55	2214379,12	09/06/1998	3,9	12
100°50'00"	19°99'99"	343078,33	2212183,96	09/06/1998	4,1	12
100°51'00"	19°59'00"	341626,87	2166811,58	07/10/1999	3,8	14
99°54'00"	20°20'99"	443587,82	2234812,02	08/02/1999	3,3	17
100°17'99"	19°87'99"	376465,81	2198634,81	14/02/2000	3,4	2
100°14'00"	19°88'99"	380661,33	2199712,73	04/06/2000	3,7	5
100°26'00"	19°64'00"	367892,07	2172132,80	25/01/2001	3,4	3
100°23'99"	19°45'99"	369844,99	2152195,97	09/01/2001	3,7	4
100°45'00"	20°00'00"	348309,93	2212137,89	01/09/2005	3,8	73
99°17'99"	20°24'99"	481200,94	2239156,92	06/02/2005	3,7	4
100°83'99"	19°98'99"	307488,70	2211431,69	30/04/2006	4,2	15
100°92'00"	19°60'99"	298638,57	2169457,46	01/03/2006	3,6	10
100°16'00"	19°69'99"	378423,25	2178698,77	06/02/2008	3,7	16
100°95'00"	19°92'00"	295886,49	2203812,28	26/07/1009	3,8	10
100°20'00"	19°66'00"	374199,25	2174300,89	04/02/2009	3,6	4

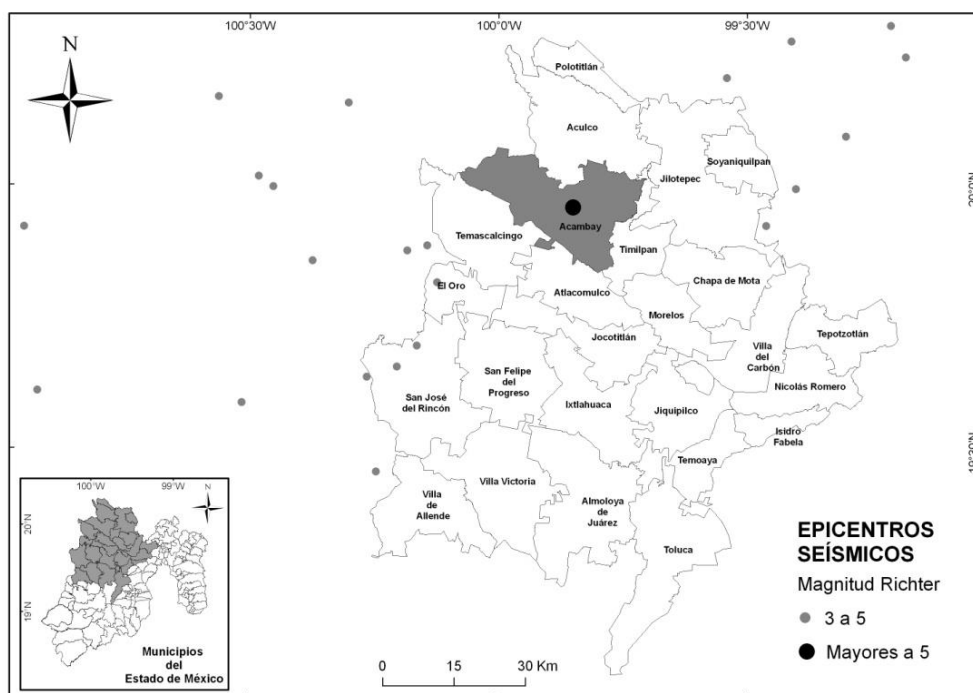


Figura 3. Localización de focos sísmicos correlacionados en el ámbito regional con el municipio de Acambay, estado de México. Fuente: Instituto de Geofísica (2010).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La determinación de la posición geográfica del área, así como sus condiciones topográficas fueron tomadas de las hojas Atlacomulco (E14-A-17) y El Oro de Hidalgo (E14-A-16), a escala 1:50000, elaboradas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI 2009) (Figura 2). Para el conocimiento geológico del área de estudio, se utilizó la carta geológica del Instituto de Fomento Minero del estado de México, a escala 1:250000 (2010), así como trabajos relacionados con la constitución geólogo-tectónica de la región (Nixon 1982; Pasquaré *et al.* 1991; Ponce *et al.* 1992; Suter, Quintero & Johnson 1992; Pardo & Suárez 1993; Aguirre 1995; Suter *et al.* 1995a, 1995b, 2001; Suter, Carrillo & Quintero 1996; SECOFI, 1996; Ramírez 1998; Ferrari 2000; García, Macias & Garduño 2000; Ego & Ansan, 2002; Norini *et al.* 2010; Roldán, Aguirre & Rodríguez 2011; Aguayo & Trápaga 2013). Entretanto, la sismicidad histórica asociada a la falla Acambay-Tixmadejé fue consultada en los trabajos de varios autores (Urbina & Camacho 1913; Astiz 1980; Suter, Carrillo & Quintero 1996; Langride *et al.* 2000; Persaud *et al.* 2006; Garduño *et al.* 2009), así como en los registros del Instituto de Geofísica de la UNAM (2010) (Tabla 1, Figura 3).

Por otra parte, los métodos geodésicos empleados, tanto por métodos de nivelaciones geodésicas de primer orden como por levantamientos con GPS de

precisión, constituyeron la base cuantitativa instrumental para la comparación multitemporal de los datos geodésicos, localizados en cinco signos geodésicos de la Red Geodésica Nacional de primer orden, dentro del territorio municipal de Acambay, a ambos lados de la falla Acambay-Tixmadejé, ocupando sectores del graben de Acambay (dos signos: 01 y 02) y del horst septentrional Santa María Tixmadejé (tres signos: 03, 04 y 05), este último localizado al norte de la falla (Figura 4).

Los signos fueron clasificados según el nivel de estabilidad, mediante la inspección ingeniero-geomorfológica de los mismos, de acuerdo con lo reportado por algunos investigadores (Lilienberg *et al.* 1988, 1993a, 1993b; Marques 2003; Magaz *et al.* 2006). Criterios estos aplicados en investigaciones geodinámicas en Europa oriental y en Cuba debido a que, en ocasiones, los desplazamientos de los signos presentan la influencia de múltiples factores externos como: efectos de procesos naturales, condiciones de yacencia y resistividad de sus bases constructivas, entre otros.

Los resultados de la inspección de campo arrojaron trece signos geodésicos, en condiciones inestables por diferentes situaciones constructivas y de conservación actual, los cuales fueron discriminados del análisis geodinámico. Para el caso de Acambay, solo fueron empleados cinco signos, clasificados como estables, para un 27,7 % de los existentes en el área estudiada. Los signos están identificados con su número en la Figura 3 y con el número del registro de su placa: 03, con número de placa 15001011; 04, con 15001044; y 05, con 15001043 (estos tres están ubicados en el horst septentrional Santa María Tixmadejé, al norte de la falla de Acambay-Tixmadejé); y 01, con número de placa 15001088; y 02, con 15001089 (ubicados en el graben central de Acambay) (Tablas 2 y 3, Figura 4).

Las nivelaciones reiteradas y el levantamiento GPS de precisión contemplaron varias series instrumentales temporales:

- (a) la primera serie de información correspondió a las nivelaciones realizadas por el INEGI, en los años 1998 (tres signos geodésicos: 03, 04 y 05) y 2003 (dos signos geodésicos: 01 y 02), bajo los criterios normativos establecidos en el manual de normas técnicas de la institución para estos fines; mediante el empleo del equipo de nivel digital Dini 12, que permite la generación de datos de primer orden y clase 2, con estándares de exactitud y posicionamiento de sección de 4 mm por la raíz de K y de línea de 5 mm por la raíz de K.
- (b) y la segunda serie correspondió al año 2011, obtenida del levantamiento geodésico con un equipo GPS Trimble, de primer orden, con estándares de exactitud y posicionamiento menores a los referidos, los cuales fueron

corregidos a través del cálculo y análisis de vectores (marca a marca), errores estándar, ajustes y configuración de redes.

En las mediciones geodésicas realizadas en el año 2011 fueron tomadas, para cada signo geodésico, las variables siguientes: fecha y hora de procesamiento, tipo de solución, frecuencia de uso, precisión horizontal (en m), precisión vertical (en m), RMS, razón, efeméride utilizada, modelo de antena, hora de inicio, hora de término y duración del proceso.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de los resultados de las mediciones geodésicas, comparando los valores altitudinales (Z) de cada uno de los signos geodésicos ubicados en el horst septentrional Santa María Tixmadejé (Tabla 2), mostró la actividad tectónica reciente de esta morfoestructura, situada en una zona sísmica intraplaca, donde experimenta velocidades de los movimientos verticales recientes, de moderada a alta, del orden de +7,3 mm/año a +12,8 mm/año, según los valores extremos de los signos geodésicos estudiados (signos 03, 04 y 05), tal como se muestra en las Tablas 2 y 3 y en la Figura 5. En el graben, también imperan los ascensos tectónicos, pero con magnitudes mucho menores de las velocidades, con respecto al horst septentrional Santa María Tixmadejé. En esta estructura deprimida, las velocidades de ascenso se mantienen muy bajas, entre +0,4 mm/año y +0,5 mm/año (signos geodésicos 01 y 02, Tabla 2 y 3, Figura 5).

Los rangos de desplazamientos en cada una de las morfoestructuras de Acambay demuestran el carácter de fracturación en bloques, señalado por otros autores (Suter, Quintero & Johnson 1992; Suter *et al.* 1995b; García, Macías & Garduño 2000). Se reflejan en el campo de las velocidades de los movimientos tectónicos verticales recientes mediante las nivelaciones reiteradas y el levantamiento GPS de precisión, así como atestiguan un mayor gradiente geodinámico en el bloque elevado septentrional, correspondiéndose con su estructura geológica, su historia de desarrollo neotectónico y la expresión morfoestructural de su relieve (Figuras 4 y 5).

Por otra parte, este sistema morfoestructural refleja contrastes asimétricos de la morfología y morfometría del relieve entre el bloque elevado, situado al norte de la falla Acambay-Tixmadejé y el graben, situado al sur y limitado en su extremo meridional por la falla Pastores. En el bloque elevado Santa María Tixmadejé, los valores de disección vertical del relieve oscilan entre 200-300 m y 400-500 m, mientras en el graben varían entre 20-50 m y 50-100 m (Pérez *et al.* 2010), lo que refleja una actividad neotectónica más notable en el flanco norte del sistema de bloques

Tabla 2. Signos geodésicos utilizados en la evaluación geodinámica de la región de Acambay, con número de identificación en las figuras, número de placa, coordenadas UTM (x, y, z) para distintos años de nivelación y diferenciales altimétricas 2003-2011, 1998-2011 y 1994-2011

Número de signo geodésico / Registro de placa	Mediciones (1998)			Mediciones (2003)			Mediciones (2011)			Diferencial altimétrico (ΔZ)
	Coordenadas UTM		Altitud (Z)	Coordenadas UTM		Altitud (Z)	Coordenadas UTM		Altitud (Z)	
	Norte (Y)	Este (X)		Norte (Y)	Este (X)		Norte (Y)	Este (X)		
01 / 15001088	-----	-----	-----	2,206,801.085	402,259.135	2,574.089	2,206,801.079	402,259.072	2,574.093	+ 0.004
02 / 15001089	-----	-----	-----	2,208,601.815	402,574.935	2,658.497	2,208,601.809	402,574.883	2,658.500	+ 0.003
03 / 15001011	2,213,089.423	413,300.198	2,712.115	-----	-----	-----	2,213,091.146	413,299.906	2,713.069	+ 0.0954
04 / 15001044	2,212,996.418	405,893.201	2,760.083	-----	-----	-----	2,212,996.952	405,892.845	2,760.249	+ 0.166
05 / 15001043	2,214,043.190	405,284.795	2,807.390	-----	-----	-----	2,214,043.723	405,284.400	2,807.549	+ 0.159

Tabla 3. Magnitud de los movimientos tectónicos verticales recientes en el horst septentrional Santa María Tixmadejé en el graben central de Acambay

Número del signo (Figura 3)	Número de placa	Altitud (z) en el año 1998 (m)	Altitud (z) en el año 2003 (m)	Altitud (z') en el año 2011 (m)	Diferencia altimétrica (m)	Número de años entre mediciones (1998/2003-2011)	Velocidad de los movimientos tectónicos verticales recientes (m/año)
Signos geodésicos ubicados en el graben central de Acambay							
01	15001088	-----	2 574,089	2 574,093	+ 0,004	8	+ 0,0005
02	15001089	-----	2 658,497	2 658,500	+ 0,003	8	+ 0,0004
Signos geodésicos ubicados en el horst septentrional a la falla de Acambay-Tixmadejé							
03	15001011	2 712,115	-----	2 713,069	+ 0,0954	13	+ 0,0073
04	15001044	2 760,083	-----	2 760,249	+ 0,166	13	+ 0,0128
05	15001043	2 807,390	-----	2 807,549	+ 0,159	13	+ 0,0122

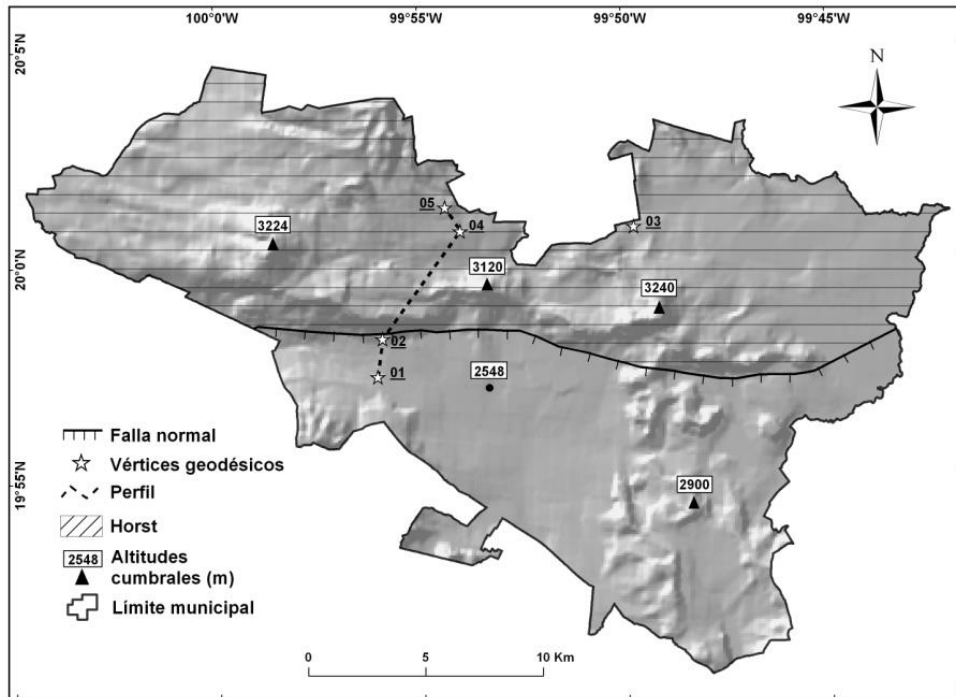


Figura 4. Esquema de localización de los signos geodésicos y perfil morfoestructural y de las velocidades de los movimientos tectónicos verticales recientes en el contexto del sistema del horst de Santa María Tixmadejé y del graben de Acambay.

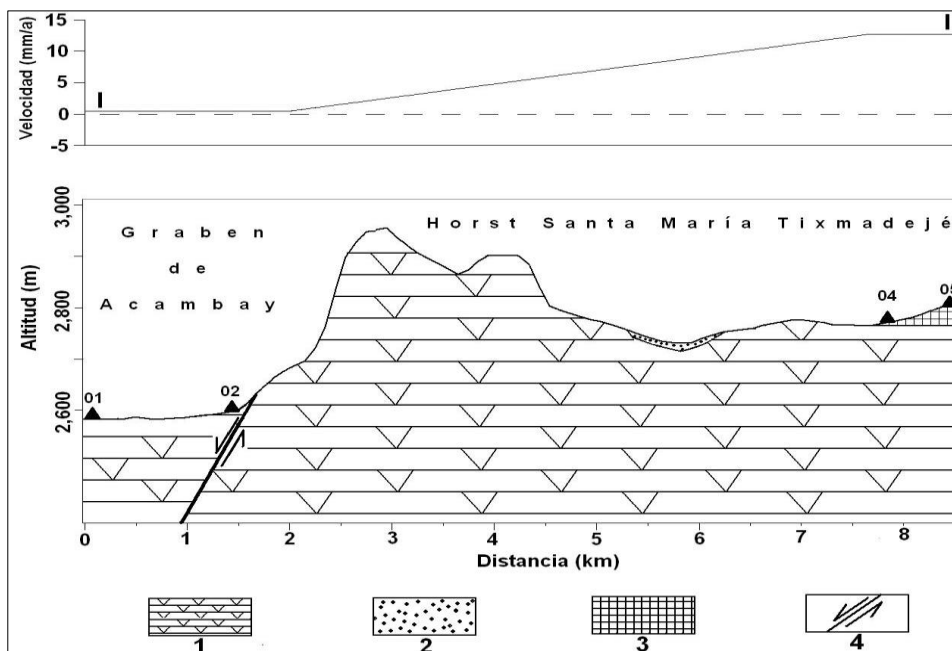


Figura 5. Perfiles morfoestructural del relieve (abajo) y geodinámico (arriba): 1. Tobs volcánicas del Mioceno medio-superior; 2. Depósitos aluviales del Holoceno; 3. Basaltos del Pleistoceno-Holoceno; y 4. Falla normal de desplazamiento dextral Acambay-Tixmadejé.

4. CONCLUSIONES

- El empleo de métodos geodésicos instrumentales de precisión permitió revelar y evaluar cuantitativamente las correlaciones entre los movimientos tectónicos verticales recientes y la diferenciación morfoestructural del relieve del sector oriental del sistema de horst y graben. Singular interés representa la aplicación de la metodología geodésica para morfoestructuras regionales y locales en México y, en especial, en la región de Acambay, donde existen regímenes neotectónico y sismotectónico activos, notables deformaciones endógenas y exógenas de los morfoelementos del relieve y evidentes desplazamientos verticales de sus estructuras.
- Las velocidades de los movimientos tectónicos verticales recientes reflejaron la tendencia neotectónica de las estructuras de horst y graben de Acambay, el estilo morfoestructural tridimensional de su relieve y el gradiente geodinámico de la falla Acambay-Tixmadejé, señalada por muchos autores referidos en el trabajo. Los valores de ascenso revelados en este estudio oscilan entre +7,3 mm/año a +12,8 mm/año, en el horst septentrional Santa María Tixmadejé; mientras que en el graben central de Acambay los ascensos son muy débiles, del orden de +0,4 mm/año a +0,5 mm/año.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Facultad de Geografía de la UAEMex y al Instituto de Geografía de la UNAM, su apoyo en las investigaciones de campo y gabinete. Al Instituto Nacional de Estadística y Geografía por los datos de las nivelaciones de los años 1998 y 2003 y a Jesús Emmanuel Bustamante Fernández por el apoyo tecnológico. A los árbitros anónimos y editores, por sus valiosos señalamientos y comentarios.

6. REFERENCIAS

- AGUAYO, J. E. & TRÁPAGA, R. 2013: *Geodinámica de México y minerales del mar*. Fondo de Cultura Económica, México, D. F.
- AGUIRRE, G. J. 1995: La Toba Amealco y su correlación con la formación Las Américas a través del graben de Acambay, parte central de la Faja Volcánica Mexicana. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 12(1): 17-21.
- ARGUS, D. F. & GORDON, R. G. 2001: Present tectonic motion across the Coast Ranges and San Andreas Fault system in central California. *Geological Society of America Bulletin* 113(12): 1580-1592.

- ASTIZ, L. M. 1980: *Sismicidad en Acambay, Estado de México -el temblor del 22 de febrero de 1979*. Tesis de grado. UNAM, México, D.F. 130 p.
- EGO, F. & ANSAN, V. 2002: Why is the Central Trans-Mexican Volcanic Belt (102-99° W) in transtensive deformation? *Tectonophysics* 359(1): 189-208.
- ENMAN, S. V. & NIKONOV, A. A. 1993: A comparative analysis of maps of vertical crustal movements for European Russia. *Journal of geodynamics* 18(1-4): 33-41.
- FERRARI, L. 2000: Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 53(1): 84-92.
- FINKO, E. A. 1992: The relationship of recent vertical movements to the morphostructural pattern of the Kazakn shield. *Journal of geodynamics* 15(3-4): 209-214.
- GARCÍA, A.; MACIAS, J. L. & GARDUÑO, V. H. 2000: Miocene to recent structural evolution of the Nevado de Toluca Volcano region, Central Mexico. *Tectonophysics* 318(1): 281-302.
- GARDUÑO, V. H.; PÉREZ, R.; ISRADE, I.; RODRÍGUEZ, M. A.; SZYNKARUK, E.; HERNÁNDEZ, V. M.; GARCÍA, M. L.; CORONA, P.; OSTROUMOV, M.; MEDINA, V. H.; GARCÍA, G.; CARRANZA, O.; LOPEZ, E. & MORA, J. C. 2009: Paleoseismology of the southwestern Morelia-Acambay fault system, central Mexico. *Geofísica Internacional* 48(3): 319-335.
- GARDUÑO, V. H.; ARREYQUE, E.; ISRADE, I. & RODRÍGUEZ, G. M. 2001: Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 18(1): 37-54.
- GERI, G.; PERUSINI, P. & ROSSI, A. 1984: Topografic changes in the Travale-Radicondoli geothermal field during the first ten years of exploitation. 3rd. Int. Symp. On Land Subsidence. Venice.
- INSTITUTO DE GEOFÍSICA. 2010: Cien años de sismicidad en México. Consultada: 20 de marzo de 2012. Disponible en: <http://usuarios.geofisica.unam.mx/vladimir/sismos/100a%F1os.html>
- LANGRIDE, M.; WELDON, R.; MOYA, J. & SUÁREZ, G. 2000: Paleoseismology of the 1912 Acambay earthquake and the Acambay-Tixmadejé fault, Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 105(B2): 3019-3037.
- KASSER, M.; RUEGG, J. C. & LOPINE, J. C. 1987: Geodetic measurements on the Asal Rift (Djibouti): twelve years of observations. *Journal of geodynamics* 7(3-4): 221-226.
- LILIENBERG, D. A.; HERNÁNDEZ, J. R.; MARQUÉS, M. E. & RUEDA, J. 1988: General Trends and Regional Differentiation of the Recent Geodynamics of

- Morphostructures of an Island Interplate Zone: Studies in a Complex Polygon at Santiago de Cuba and in an Eastern Cuba Model Area. *Journal of geodynamics* 9(2-4): 305-318.
- LILIENBERG, D. A.; HERNÁNDEZ, J. R.; MARQUES, M. E. & ÁLVAREZ, L. 1993a: *Movimientos tectónicos recientes de Cuba. El polígono geodinámico complejo de Santiago de Cuba*. T. 1. Ed. Academia, La Habana, 453 p.
- LILIENBERG, D. A.; HERNÁNDEZ, J. R.; MARQUES, M. E.; ÁLVAREZ, L. 1993b: *Movimientos tectónicos recientes de Cuba. El polígono geodinámico complejo de Santiago de Cuba*. T.2. Ed. Academia, La Habana, 118 p.
- MAGAZ, A. R.; HERNÁNDEZ, J. R.; DÍAZ, J. L. & HERNÁNDEZ, I. 2006: Formación y consolidación de las morfoestructuras septentrionales de la región centro del archipiélago cubano y su dinámica reciente. *Investigaciones geográficas* 61: 7-23.
- MAPA GEOLÓGICO. 2010: Instituto de Fomento Minero del Estado de México. Escala 1:250000. Toluca, 1 hoja.
- MAPAS TOPOGRÁFICOS. 2009: INEGI. Escala 1:50000. Aguascalientes, 2 hojas.
- MARQUES, A. P. 2003: *Manual de Goniometría*. 2^{da} ed. Editora Manole, São Paulo.
- MÁRQUEZ, B. & DE METS, C. 2009: Deformation of Mexico from continuous GPS from 1993 to 2008. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 10(2).
- MOLINA, L. F. 2006: *Campo de velocidades de la falla Boconó a partir de observaciones GPS*. Tesis de grado. Sartenejas. 39 p.
- NIXON, G. T. 1982: The relationship between Quaternary volcanism in central Mexico and the seismicity and the structure of subducted ocean lithosphere. *Geological Society of America Bulletin* 93(6): 514-523.
- NORINI, G.; CAPRA, L.; BORSELLI, F. R.; ZUNIGA, F.; SOLARI, L. & SAROCCHI, D. 2010: Large scale landslides triggered by Quaternary tectonics in the Acambay graben, Mexico. *Earth Surf. Process. Landforms* 35(12): 1445-1455.
- OZENER, H.; ARPAT, E.; ERGINTAV, S.; DOGRU, A.; CAKMAK, R.; TURGUT, B. & DOGAN, U. 2010: Kinematics of the eastern part of the North Anatolian Fault Zone. *Journal of geodynamics* 49(3): 141-150.
- PAPAZACHOS, C. B.; KIRATZI, A. A. & PAPAZACHOS, B. C. 1992: Rates of active crustal deformations in the Aegean and the surrounding area. *Journal of geodynamics* 16(3): 147-179.
- PARDO, M. & SUÁREZ, G. 1993: Steep subduction geometry of the Rivera plate beneath the Jalisco block in western Mexico. *Geophysical research letters* 20(21): 2391-2394.
- PASQUARÉ, G.; FERRARI, L.; GARDUÑO, V. H.; TIBALDI, A. & VEZZOLI, L. 1991: Geologic map of the central sector of the Mexican Volcanic Belt, states of Guanajuato and Michoacan, Mexico. *Geological Society of America*.

- PÉREZ, J. L.; HERNÁNDEZ, J. R.; ROSETE, F.; VILLALOBOS, M.; MÉNDEZ, A. P. & NAVARRO, E. 2010: Unidades morfométricas del relieve mexicano, a escala 1:250000. INECC, México, D. F., Hoja E14-2. Consultada: 31 marzo 2014. Disponible en: <http://www2.inecc.gob.mx/emapas/cartas.html>
- PERSAUD, M.; ZÚÑIGA, R.; AGUIRRE, G.; VILLAMOR, P. & LANGRIDGE, R. 2006: Paleoseismology of The Pastores and Venta de Bravo faults, Acambay graben, Trans-Mexican Volcanic belt, Central Mexico. *Geos* 26(1): 61-62.
- PONCE, L.; GAULON, R.; SUÁREZ, G. & LOMAS, E. 1992: Geometry and state of stress of the downgoing Cocos plate in the Isthmus of Tehuantepec, Mexico. *Geophysical Research Letters* 19(8): 773-776.
- QUINTERO, O. 2002: Análisis estructural de fallas potencialmente activas. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 55(1): 1-11.
- RAMÍREZ, M. T. 1998: Geomorphic assessment of active tectonics in the Acambay graben, Mexican volcanic belt. *Earth Surface Processes and Landforms* 23(4): 317-332.
- ROLDÁN, J.; AGUIRRE, G. J. & RODRÍGUEZ, J. L. 2011: Depósito de avalancha de escombros del volcán Temascalcingo en el graben de Acambay, Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 28(1): 118-131.
- RONTOGIANNI, S. 2010: Comparison of geodetic and seismic strain rates in Greece by using a uniform processing approach to campaign GPS measurements over the interval 1994-2000. *Journal of geodynamics* 50(5): 381-399.
- ROSTOM, R. S. 1991: Monitoring recent crustal movements in the Kenya rift valley by global positioning System (GPS): a (GPS) -a proposal. *Journal of geodynamics* 14(1-4): 65-72.
- SECOFI. 1996: Monografía geológico-minera del Estado de México. Consejo de Recursos Minerales, México, D. F., 148 p.
- SUTER, M.; QUINTERO, O. & JOHNSON, C. A. 1992: Active faults and state of stress in the central part of the Trans-Mexican volcanic belt, Mexico, 1, The Venta de Bravo fault. *J. Geophys. Res.* 97: 11983-11994.
- SUTER, M.; CARRILLO, M.; LÓPEZ, M. & FARRAR, E. 1995a: The Aljibes half-graben - Active extension at the boundary between the trans-Mexican volcanic belt and the Basin and Range Province, Mexico. *GSA Bulletin* 107(6): 627-641.
- SUTER, M.; QUINTERO, O.; LÓPEZ, M.; AGUIRRE, G. & FARRAR, E. 1995b: The Acambay graben: active intraarc extension in the TMVB, Mexico. *Tectonics* 14: 1245-1262.
- SUTER, M.; CARRILLO, M. & QUINTERO, O. 1996: Macroseismic study of shallow earthquakes in the central and eastern parts of the Transmexican volcanic belt, Mexico. *Bulletin of the Seismological Society of America* 86(6): 1952-1963.

- SUTER, M.; LÓPEZ, M.; QUINTERO, O. & CARRILLO, M. 2001: Quaternary intra-arc extension in the central Trans-Mexican volcanic belt. *Geological Society of America Bulletin* 113(6): 693-703.
- URBINA, F. & CAMACHO, H. 1913: La zona megasísmica Acamabay-Timaxdejé, Estado de México, conmovida el 19 de noviembre de 1912. *Boletín del Instituto Geológico de México* 32: 175 p.
- VÖLKSEN, C.; ÁRNADÓTTIR, T.; GEIRSSON, H. & VALSSON, G. 2009: Present day geodynamics in Iceland monitored by a permanent network of continuous GPS stations. *Journal of geodynamics* 48(3): 279-283.
- ZEMAN, A. 1988: General trends of normal height changes in Czechoslovakia for a period of approximately 33 years. *Journal of geodynamics* 10(2): 167-174.

Luis Miguel Espinosa-Rodríguez, geo_luismiguel@hotmail.com
Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México

José Ramón Hernández-Santana, santana@igg.unam.mx
Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México

Ana Patricia Méndez-Linares, patym1@igg.unam.mx
Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.

Modificación de las propiedades de la fundición blanca ИЧХ2Н4 con tres variantes de temple

Tomás Hernández-Columbié
Gleydis Dueñas-Rodríguez
Armín Mariño-Pérez
Alberto Velázquez-del Rosario
Dayanis Alcántara-Borges

Resumen

A escala de laboratorio se evaluó el efecto de tres variantes de temple en las propiedades de la fundición blanca ИЧХ2Н4, a fin de modificar su estructura original para evaluar la posibilidad de utilizarla en la fabricación de equipos mineros que operan en condiciones de abrasión e impacto. Las muestras, una vez fundidas, fueron recocidas para evaluar tres variantes de calentamiento con temple al aire. Después del temple, fueron revenidas y caracterizadas con metalografía óptica y ensayos de dureza. Se concluye que en las tres variantes de calentamiento se obtienen las propiedades requeridas para utilizar la aleación en la fabricación de elementos de equipos que deban resistir condiciones de intensa abrasión, en presencia de cargas de impacto, como son los equipos de trituración y molienda de minerales en la industria del níquel.

Palabras clave: temple al aire; fundición blanca; abrasión; dureza; cargas de impacto.

Changes in the properties of white cast iron ИЧХ2Н4 under conditions of variations of heating

Abstract

The influence of three heating variants, during hardening on the properties of national manufactured ИЧХ2Н4 white cast iron were evaluated at laboratory scale in order to predict the feasibility of using it on the manufacturing of mining equipments for abrasion and impact conditions. Cast samples, with controlled chemical composition and further annealed, were used for evaluating three heating variants with air quenching. The chemical composition of cast samples was in correspondence with the composition established by the standard GOST 5632-72. After air quenched, samples were annealed and characterized using optical microscope and hardness testing. It is concluded that in the three evaluated of heating variants, the required properties for manufacturing parts from equipments that undergo severe abrasion and impact loads were obtained; such as crashing and grinding mining equipments.

Keywords: air quenching; white cast iron; abrasion; hardness; impact loads.

1. INTRODUCCIÓN

Por su elevada resistencia a la abrasión, las fundiciones blancas son particularmente adecuadas para aplicaciones que involucren desgaste o simultáneamente desgaste abrasivo e impactos, causados por minerales en equipos de trituración y molienda, clasificación y sistemas de bombeo (Fernández y Belzunce 2006; CLAASGUSS GmbH 2012). En otros ámbitos, estas fundiciones requieren un buen comportamiento mecánico, dureza, resistencia al desgaste y tenacidad a temperaturas elevadas (200 °C-600 °C), como es el caso de los cilindros de los trenes de laminación que se utilizan en el conformado de las aleaciones metálicas (Blazevic 2002; Collini, Nicoletto & Conenák 2008).

Aleadas al cromo, las fundiciones blancas son demandadas por la industria minera para la fabricación de elementos de excavación y molienda, así como para partes componentes de equipos de transporte de mezclas líquido-sólido. En virtud de su alta dureza, resistencia a la abrasión y a la oxidación/corrosión son usadas en regímenes de trabajo especiales (Guliaev 1983).

El factor común de todas las fundiciones blancas es que su microestructura contiene una proporción característica de fases de carburos duros. La naturaleza reflectante de estos carburos en las superficies de fractura de las fundiciones blancas brinda una apariencia característica de fractura "blanca", de donde proviene su designación, pero lo más significativo, según criterio de Hinckley y demás colaboradores (2008), resulta que estos carburos duros pueden proporcionar excelente resistencia a la abrasión; sin embargo, este autor no precisa cómo transformar la fundición blanca a una estructura martensita con presencia de carburos duros, para brindarle a la aleación tenacidad, además de dureza, convirtiéndola en menos frágil y aumentando su campo de aplicación.

La fundición blanca se utiliza en elementos de molienda por su resistencia al desgaste. El enfriamiento rápido en el proceso de fundición evita la grafitización de la cementita; en contraposición, si se calienta de nuevo la pieza a una temperatura de 870 °C, el grafito se forma lentamente, adopta una forma característica conocida como carbono de revenido, resultando maleable la fundición. Vale decir que un gran tonelaje de hierro fundido blanco se emplea como materia prima para la manufactura de hierro fundido maleable (Walton & Opar 1981).

Las especificaciones de la norma ASTM A 532 (ASTM International 2004) e ISO 21988 (ISO 21988: 2006) cubren los requisitos de composición y dureza de las fundiciones blancas utilizadas para aplicaciones de alta

resistencia a la abrasión. El cromo, conjuntamente con el carbono, es el elemento de aleación fundamental utilizado en las fundiciones blancas. El cromo es un elemento fuertemente formador de carburos y puede originar variedades de carburos, en dependencia de los contenidos de carbono en la aleación (Huggett y Ben 2007).

Algunos autores (Zhang, Kelly & Gates 2001; Fernández y Belzunce 2006) han demostrado los beneficios del tratamiento térmico en el mejoramiento de las propiedades de las fundiciones blancas; pero a su vez, la minimización de los tiempos operacionales en los tratamientos térmicos constituye cada día una prioridad para los metalúrgicos por los incuestionables efectos económicos y ambientales asociados. Estos autores investigan cómo obtener una mayor dureza y resistencia al desgaste en los hierros blancos de medio y alto contenido de cromo, sin tener en cuenta que una mejora en la maleabilidad de metal también puede ser uno de los factores que incrementen la resistencia al desgaste del hierro fundido blanco, en dependencia del desgaste abrasivo imperante en el régimen de trabajo.

Figueredo y otros investigadores (2013) refieren la presencia de la estructura cementita en la fundición blanca, otra de las características que la diferencia de las fundiciones grises, lo que justifica su uso cuando se buscan elevadas resistencias al desgaste, por lo cual se emplean en la fabricación de bolas de molino, martillos percutores, forros de machacadoras de mandíbulas, revestimiento de tolvas, volutas e impelentes de bombas. Los referidos autores proponen, para mejorar la maquinabilidad, un tratamiento térmico de esferoidización, el cual hace disminuir considerablemente la dureza de los hierros blancos, incrementando su maquinabilidad y maleabilidad. De igual forma, Wang y demás colaboradores (2006) no tienen en cuenta la relación dureza/maleabilidad para incrementar la vida útil de la pieza fundida, proponiendo otros tratamientos térmicos posteriores.

Este trabajo tuvo el objetivo de obtener, a partir de una fundición blanca, una estructura resistente al desgaste abrasivo, una vez sometida a diferentes variantes de temple.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Obtención de las probetas

Las muestras (probetas) se obtuvieron mediante el vertido del metal líquido en un molde de arena previamente confeccionado, a partir de una plantilla en la caja de molde. Se utilizaron plantillas sueltas con un sistema de alimentación en series. Se le colocó una mazarota para evitar las

contracciones y un escoriador. El proceso de moldeo se realizó según la instrucción 08-I-027 (2008), de forma manual, con la utilización de mezcla autofraguante que responde a las exigencias del proceso tecnológico: permeabilidad, resistencia, penetrabilidad al gas, poder gasógeno e higroscopicidad.

2.2. Análisis de la composición química

El análisis químico de la aleación bajo estudio se realizó en el laboratorio del taller de fundición de la Empresa Mecánica del Níquel de Moa. Se empleó un espectrómetro cuántico de masa, Espectrolab 230, con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón. En la Tabla 1 se reporta el promedio de tres mediciones de composición en cada muestra.

Tabla 1. Composición química de la aleación

Elementos	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
Porcentaje en masa	3,3	0,73	0,411	0,05	0,034	1,7	0,20	3,6	0,06

Los elementos más representativos en la aleación son el Cr, C, Ni y Si. Las cantidades de los elementos que participan en la composición de la aleación se encuentran dentro del rango permisible por los estándares (Norma ASTM A 532). Para el caso que se analiza, la fundición blanca presenta un contenido de carbono de 3,3 %, lo cual la ubica en una fundición del tipo hipoeutectoide.

2.3. Tratamiento térmico

Se aplicaron variantes de mejorado térmico a muestras del hierro fundido blanco ИЧХ2Н4, según la norma GOST 7769-87 (equivalente al Ni-Hard clase I tipo II, según ASTM A 532). Se tomaron 15 muestras para análisis metalográfico y ensayo de desgaste. Las tres variantes de temple ensayadas para el termomejoramiento aparecen en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros empleados para el mejoramiento térmico de las muestras

	Velocidad de calentamiento (°C/h)	Temperatura inicial horno (°C)	Temperatura del escalón térmico/Tiempo de permanencia (h)	Temperatura de tratamiento (°C/h)
I	65	200	600/1,0	880/1,0
II	110	600	600/1,0	
III	125	600	---	

Las probetas se enfrían al aire para simular la velocidad crítica de transformación de la austenita, que acompañado de pequeñas cantidades

de ferrita, dé lugar a la formación de la martensita, objetivo del tratamiento térmico.

En la variante (I), con una velocidad de calentamiento de 65 °C/h, la muestra entra al horno encendido a temperatura inicial de 200 °C, la cual asciende hasta la temperatura de tratamiento 880 °C; tiene un escalón de una hora a una temperatura de 600 °C.

En la variante (II), con una velocidad de calentamiento de 110 °C/h, la muestra entra al horno encendido a temperatura de 600 °C, en la cual permanece durante una hora, seguido de un ascenso hasta alcanzar 880 °C.

Para la variante (III), con una velocidad de calentamiento de 125 °C/h, la muestra entra al horno encendido a temperatura de 600 °C y esta asciende directamente hasta 880 °C.

La Tabla 3 representa el plan experimental para evaluar el comportamiento del hierro blanco ИЧХ2Н4, cuyos resultados serán evaluados a partir de la relación entre tiempo de tratamiento térmico, microestructura, dureza y resistencia al desgaste.

Tabla 3. Plan experimental

No	Operación	Velocidad de calentamiento	Etapas	Microestructura	HRC
1	Bruto de colada		---	Carburos	63
2	Recocido	70 °C/h	3		
2	Variante 1 Temple al aire	65 °C/h	5		
3	Variante 2 Temple al aire	110 °C/h	4		
4	Variante 3 Temple al aire	125 °C/h	3		
5	Revenido	70 °C/h	3		

2.4. Preparación para la observación metalográfica

En la preparación de las muestras, para la observación metalográfica con diámetro 25 en el área de ensayo (según Norma ASTM E-92), se tuvo en cuenta las operaciones siguientes en ese orden: corte, desbaste, pulido, desengrasado, lavado y ataque químico. Las muestras se maquinaron en un torno 16 K 20, montadas y centradas en el plato con la cara de menor área en dirección a la contrapunta, con saliente de 12 mm con respecto a las muelas de sujeción del plato. Se refrentó con una profundidad de corte de 2

mm para limpiar la cara de imperfecciones provocadas por el proceso de fundición.

Para el desbaste se emplearon lijas (desde la No 320 hasta la No 400) y para el pulido lija No 800; para el desengrasado y lavado se utilizó acetona. El ataque químico se realizó con técnicas de ataque manual por inmersión usando nital al 2 %. Después de atacadas, las muestras se lavaron con agua destilada, se sumergieron en alcohol etílico durante unos segundos y, finalmente, se secaron en un secador neumático para eliminar impurezas y humedad.

2.5. Microestructura de la muestra patrón

Se observó la microestructura de una muestra patrón de la fundición blanca W4X2H4, obtenida por fundición empleando el método de colada, antes de ser tratada con las variantes de temple. El punto de partida para la aplicación de las variantes de temple es un recocido bajo a una temperatura de 250 °C. Las micrografías de la Figura 1 muestran las microestructuras de la aleación en estado bruto de colada (a) y después de recocida (b).

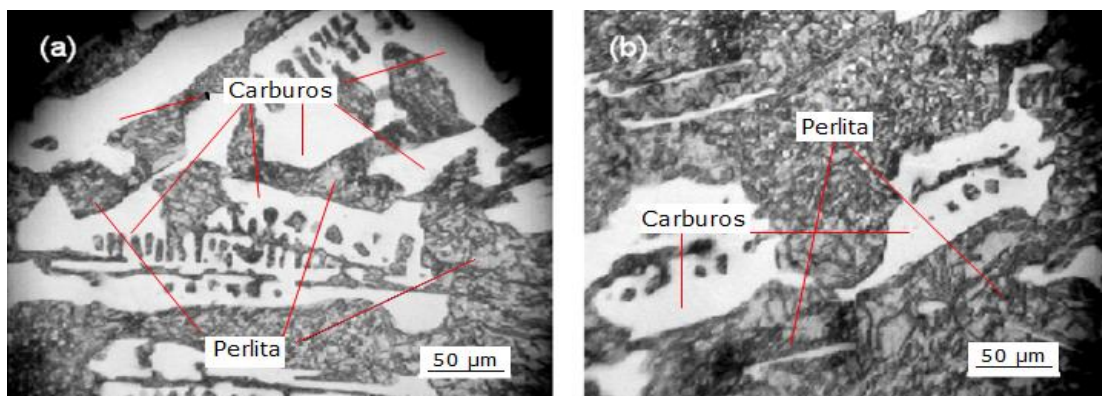


Figura 1. Microestructura de la aleación W4X2H4. a) En estado bruto de colada, b) En estado recocido.

En el estado de colada el material presenta una matriz compuesta por carburos complejos (cementita aleada), así como una pequeña parte de perlita, lo que le confiere a esta fundición gran dureza. Después de recocida a 250 °C se observa un incremento de la fase ferrítica con menor formación de carburo por la disolución parcial de los mismos. Estas fases confieren a la fundición blanca una menor dureza para poder ser maquinada.

Es importante destacar que en estos procesos de tratamiento el níquel influye de manera positiva inhibiendo la formación de fases duras, como elemento ganmágeno, al suprimir la transformación de austenita en perlita, que asegura la presencia de la martensita al realizar el enfriamiento al aire. La efectividad del cromo, como elemento alfégeno, contrarresta el efecto

grafitizante del níquel y asegura la formación de carburos (Zhao y Liu 2001).

2.6. Ensayo de desgaste

El ensayo de desgaste se realizó en un tribómetro pin-disco con tiempo de prueba de 110 minutos, según las Normas NC 04-79:87 y ASTM G65-94. Se aplicó desgaste a las muestras antes y después del tratamiento térmico. La máquina posee una rueda vulcanizada acoplada al árbol de la polea, sobre la que se suministra el abrasivo con un flujo entre 300 g/min y 400 g/min, con un valor promedio de 350 g/min. Como material abrasivo se utilizó polvo de mineral laterítico, con una granulometría de 75 μm .

Las muestras se pesaron previamente en una balanza digital Sartorius, con precisión de 0,01 mg. Antes de comenzar la prueba se aseguró el suministro de una cortina uniforme de arena. La estabilidad de suministro se garantizó por la sección de salida de la boquilla. Para evitar discontinuidad en el suministro se procuró que la boquilla no se encontrara obstruida y modificara el área de salida del mineral.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Primera variante de temple al aire

La micrografía de la Figura 2 muestra la microestructura de la aleación después de templadas y revenidas con la primera variante de temple.

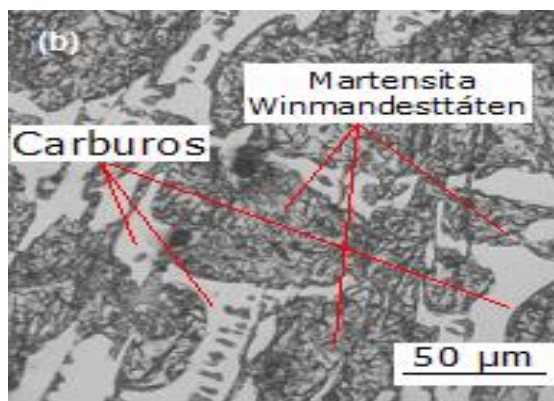


Figura 2. Microestructura de la aleación, para la variante I de temple más revenido.

Una vez tratada térmicamente, la fundición blanca templada y revenida (Figura 2) manifiesta una matriz compuesta por carburos (presumiblemente del tipo Cr_7C_3) y agujas de martensita del tipo Winmandesttäten, derivadas de la transformación de la austenita durante el enfriamiento al aire. La transformación de la austenita en martensita no es completa y, como resultado, se observa aún gran cantidad de austenita residual. Luego de este tratamiento, en la fundición comienza a aparecer la estructura

martensítica; sin embargo, este tipo de martensita Winmandesttäten (agujas) presenta una dureza elevada que hace, a la fundición blanca, susceptible al agrietamiento y a la rotura.

3.2. Segunda variante de temple

En la segunda variante de temple (Figura 3) igualmente se observa una matriz compuesta por carburos (presumiblemente del tipo Cr_7C_3) y agujas de martensita del tipo Winmandesttäten, derivadas de la transformación de la austenita durante el enfriamiento al aire. En relación con la muestra patrón, aunque se ha obtenido una estructura de martensita Winmandesttäten, la formación de agujas es de menor intensidad después del tratamiento a 110 °C/h.

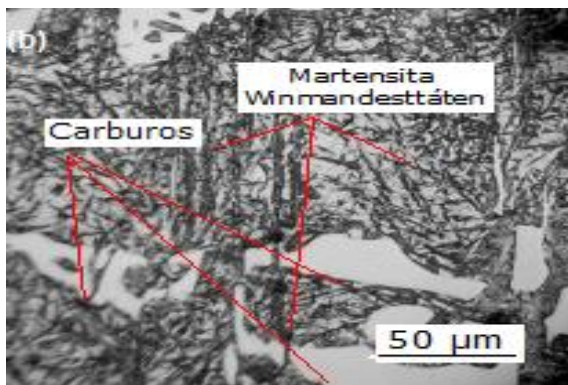


Figura 3. Microestructura con el empleo de la variante II de temple más revenido.

En el curso de estos tratamientos tiene lugar, además, un significativo endurecimiento estructural (endurecimiento secundario), propiciado por la precipitación de carburos y la transformación de la austenita retenida en martensita. Se logran así productos con dureza final entre 600 HV y 800 HV, lo que ya ha sido reportado por Fernández-Columbié y otros investigadores (2014).

3.3. Tercera variante de temple

El aumento de la velocidad de calentamiento puede conllevar a un desplazamiento de la temperatura teórica de tratamiento y aparición de grietas en la superficie del metal.

Un enfriamiento al aire del hierro blanco W4X2H4 podría provocar la transformación de toda la austenita en perlita; la presencia del níquel en la composición química de la fundición blanca suprime la transformación de toda la austenita en perlita, lo que asegura la presencia de la martensita en el medio templante empleado.

La micrografía de la Figura 4 muestra la microestructura de la aleación después de templada y revenida con la tercera variante de temple.

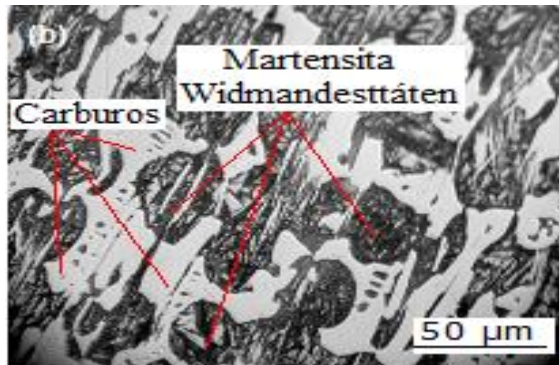


Figura 4. Microestructura de la aleación con el empleo de la variante III de temple.

La micrografía de la fundición en esta variante de temple muestra una matriz compuesta por carburos (presumiblemente del tipo Cr_7C_3) y agujas de martensita derivadas de la transformación de la austenita durante el enfriamiento al aire. La transformación de la austenita en martensita no es completa y, como resultado, se observa aún una gran cantidad de austenita residual.

Se debe destacar, en todos los casos, la ausencia de grietas o microgrietas atribuibles a los efectos del calentamiento rápido desde los 600 °C, lo que prueba, para las condiciones experimentadas, la posibilidad de considerar este método de calentamiento para el material en estudio, a pesar de que se trata de una experimentación a escala de laboratorio, en la que los elementos tratados son de poco volumen y no presentan configuración compleja. La efectividad del enfriamiento al aire se demuestra por la presencia de martensita en la microestructura, la que, sin dudas, ejerce una considerable influencia en la dureza y resistencia al desgaste de la aleación.

Elementos como el silicio, el aluminio, el níquel y el cobre, que se disuelven en la ferrita, endurecen la aleación y aumentan su resistencia; estos elementos favorecen la grafitización. Otros como el cromo, el manganeso y el molibdeno son formadores de carburos, tienden a formar fundición blanca en vez de gris y dificultan la grafitización.

3.4. Evaluación de la resistencia al desgaste

La dureza del material está correlacionada con el grado de abrasión, lo cual está asociado a la dependencia de la resistencia al mismo, la composición química, la dureza y la microestructura de un hierro fundido.

En la Tabla 4 se muestran los promedios de los valores de dureza en las muestras ensayadas después de templadas y revenidas. Se obtuvieron

valores de dureza muy similares en los tres casos, lo que revela la efectividad del calentamiento y el medio de enfriamiento empleado para la obtención de la microestructura deseada. Este resultado es congruente con la microestructura obtenida en las tres variantes después del temple y el revenido.

Tabla 4. Comportamiento de la dureza después del temple y el revenido

Variantes de temple	Dureza (HRC) promedio
I	54,03
II	54,05
III	53,42

Los valores de dureza promedio obtenidos, conjuntamente con la presencia de martensita y carburos duros, proveen una matriz metálica con suficiente resistencia a la abrasión en presencia de cargas de impacto, caso típico de elementos de laboreo minero como trituradoras y bombas de pulpas.

En la Figura 5 se muestra el comportamiento de la pérdida de material en un tiempo total de 110 min. La muestra ensayada es una probeta termomejorada con el empleo de la segunda variante de temple al aire.

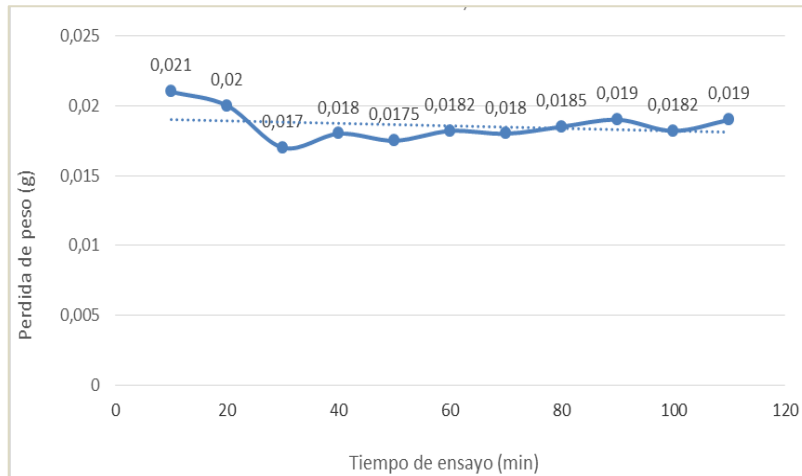


Figura 5. Comportamiento de la pérdida de material del hierro blanco ИЧХ2Н4 ensayada con la segunda variante de temple.

El material manifiesta picos de pérdida que van desde 0,021 g como máximo y mínima de 0,017 g. El comportamiento, en forma sinusoidal, de la pérdida de material en el tiempo ensayado es debido al incremento de la dureza en la superficie del metal. Durante el proceso de desgaste está presente la deformación plástica que induce la arena sílice que, como material abrasivo empleado, presenta más dureza que el material de la aleación.

La Figura 6 muestra el comportamiento de la pérdida de material, en comparación con la dureza que se manifiesta en la superficie del metal en el momento de la parada fijada en el ensayo para el pesaje de la probeta.

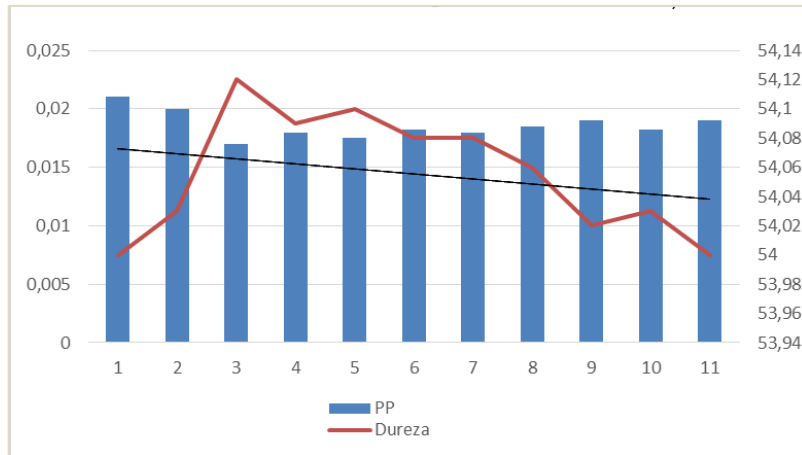


Figura 6. Pérdida de material vs dureza en la segunda variante de temple.

En el momento en el que se registra un aumento de la dureza el cálculo de la pérdida de peso de material evidencia una disminución. Los promedios de dureza del material, empleando la primera variante de temple al aire a la fundición blanca, son variables de 54 HRC a 54,1 HRC.

El desgaste de las muestras se asocia a que durante el deslizamiento sin lubricación ocurren transiciones en los mecanismos de fricción y suceden cambios en las condiciones de acoplamiento de las superficies. Durante un primer período, llamado tiempo de ajuste inicial, el coeficiente de fricción suele variar ampliamente, ya sea aumentando o disminuyendo. En este período puede ocurrir: que las asperezas sean deformadas o bien desgastadas por lo que las superficies se pueden acoplar mejor; que las películas superficiales iniciales se desgasten (óxidos, contaminantes) o que se formen nuevas películas estables, lo cual ha sido reportado por Zhao y Liu (2001).

4. CONCLUSIONES

- Para las tres variantes de temple ensayadas se obtiene en la fundición blanca ИЧХ2Н4 (GOST 5632-72) una dureza superior a 53 HRC y presencia de martensita de Windmanesttáten, que provee dureza y tenacidad; propiedades que vuelven resistente a la aleación en condiciones de desgaste abrasivo.
- Los ciclos térmicos que comprenden las variables de temple al aire posibilitan predecir el incremento de la dureza que, por consiguiente, se traduce en incremento de la resistencia a la abrasión de la fundición blanca ИЧХ2Н4 (GOST 7769-87) del tipo Ni-Hard, por la

presencia en su estructura final de un volumen considerable de martensita y una austenita retenida que no pudo transformarse durante el tratamiento térmico.

5. REFERENCIAS

- ASTM A532: 2004: Standard specification for abrasion-resistant cast irons, ASTM International. West Conshohocken, PA, United States.
- ASTM E-92: 2003: Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials. ASTM International.
- ASTM G65-94: 2000: Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus, ASTM International.
- BLAZEVIC, D. 2002: Hot strip mill operation. Vol. III. Sun Lakes, Arizona, EE. UU.
- COLLINI, L.; NICOLETTO, G. & CONENÁK, R. 2008: Microstructure and mechanical properties of pearlitic gray cast iron. *Materials Science and Engineering A* 488(112): 529-539.
- CLAASGUSS GmbH. 2012: Abrasion resistant, white cast iron materials. Technical Information No. 11.
- GULIAEV, A. P. 1983: *Metalografía*. T. I y II. Editorial Mir, Moscú.
- FERNÁNDEZ-COLUMBIÉ, T.; RODRÍGUEZ, I.; CORREA, R. & ALCÁNTARA, D. 2014: Junta de soldadura disímil de la aleación HK-40 y del hierro fundido 24. *Ingeniería Mecánica* 17(2): 98-107.
- FERNÁNDEZ, I. & BELZUNCE, F. 2006: Influencia de diversos tratamientos térmicos en la microestructura de una fundición blanca con alto contenido en cromo. *Revista de Metalurgia* 42(4): 279-286.
- FIGUEREDO, Y.; PALACIOS, A.; VELÁZQUEZ, A. & GARCÍA, E. 2013: El recocido de esferoidización como vía para mejorar la maquinabilidad de la aleación M4X28H2. *Minería y Geología* 29(1): 60-76.
- HINCKLEY, B.; DOLMAN, K. F.; WUHRER, R.; YEUNG, W. & RAY, A. 2008: SEM investigation of heat treated high-chromium cast irons. *Materials Forum* 32: 55-71.
- HUGGETT, P. & BEN, B. 2007: Development of a low melting point white cast iron for use in composite alloy manufacture. *Materials Forum* 31: 16-23.
- ISO 21988: 2006: International Organization for Standardization, Abrasion-resistant cast irons-classification, Geneva, Switzerland: ISO Copyright Office.
- Walton, C. F. & Opar, T. J. 1981: Iron castings handbook. *Iron casting society* 235: 297-321.
- WANG, J.; LI, C.; LIU, H.; YANG, H.; SHEN, B.; GAO, S. & HUANG, S. 2006: The precipitation and transformation of secondary carbides in a high chromium cast iron. *Materials Characterization* 56(13): 73-78.

ZHANG, M.; KELLY, P. & GATES, J. 2001: The Effect of Heat Treatment on the Toughness, Hardness and Microstructure of Low Carbon White Cast Irons. *Journal of Materials Science* 36(15): 3865–3875.

ZHAO, H. & LIU, B. 2001: Modeling of stable and metastable eutectic transformation of spheroidal graphite iron casting. *ISIJ international* 41(9): 986-991.

Tomás Fernández-Columbié, tfernandez@ismm.edu.cu

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

Gleydis Dueñas- Rodríguez, grodriguez@emni.moa.minem.cu

Máster en Ciencias Técnicas. Tecnólogo de la Empresa Mecánica del Níquel de Moa, Holguín, Cuba

Armín Mariño-Pérez, amarino@ismm.edu.cu.

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

Alberto Velázquez-del Rosario, avelazquez@gmail.com

Doctor en Ciencias Técnicas. Jimma Institute of Technology, Jimma University, Ethiopia.

Dayanis Alcántara-Borges, dalcantara@ismm.edu.cu

Ingeniera mecánica. Profesora Asistente. Departamento de Mecánica.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba.

Caracterización microestructural de aleaciones de aluminio para la fabricación de casquillos de eslingas

Amable Chirino-Rodríguez
Tomás Fernández-Columbié
Dayanis Alcántara-Borges
Isnel Rodríguez-González

Resumen

El objetivo del trabajo es caracterizar microestructuralmente las aleaciones de aluminio que se emplean en la fabricación de casquillos para eslingas obtenidas por procesos de fundición. Luego de torneadas, para lograr la resistencia entre los dos elementos (casquillo-eslinga), fueron prensadas con el empleo de estampas. El ruido magnético Barkhausen permitió determinar el efecto de la compresión sobre el cable según el tipo de aleación. Las microestructuras obtenidas se caracterizaron por el tamaño del grano y su morfología de una orientación de la fase alfa en la aleación Al-Mg, estructura dendrítica con silicio eutéctico muy fino en la aleación Al-Si-Cu y estructuras poliédricas o aciculares para la aleación Al-Si-Mg; este comportamiento y una dureza de 224,8 HV permite establecer que la aleación de Al-Mg tiene mejores propiedades para ser sometida a proceso de compresión.

Palabras clave: eslingas; aleaciones de aluminio; ruido Barkhausen; casquillos; análisis microestructural.

Characterization of alloys of aluminum for the production of cases for slings

Abstract

This paper has as objective to characterize microstructures the aluminium alloys that are used in the production of cases for slings and obtained by foundry processes. After having lathed and the resistance among the two elements (case-sling) they were pressed with the employment of prints. The magnetic noise Barkhausen allowed to determining the effect of the compression on the cable according to the alloy type. The obtained microstructure is characterized by the size of the grain and their morphology by an orientation of the phase alpha in the alloy Al-Si-Mg, structures dendrites with silicon very fine eutectic in the alloy Al-Si-Cu and its structures polyhydric or acicular for the alloy Al-Si-Mg, this behaviour and a hardness of 224.8 HV, allow to settle down that the alloy of Al-Mg presents better properties to be subjected to compression process.

Keywords: slings; alloy; Barkhausen; cases; microstructures.

1. INTRODUCCIÓN

La fabricación de eslingas como elementos de izaje no es una práctica común en los trabajos de diferentes talleres de mecanizado. Para fabricar una eslinga se requiere de normas certificadas que garanticen la fiabilidad de las mismas, no obstante, las empresas que se dedican a estos menesteres utilizan, como material de unión, casquillos de aluminio sometidos a proceso de compresión, con lo que se logra una sujeción segura.

El aluminio, por sus características y ventajas en comparación con otros materiales, incluido el acero, que también se utiliza en estos menesteres, tiene una aplicación más efectiva. En correspondencia con las características distintivas que presentan las diferentes series, no todas ellas reúnen funcionalidad para ser utilizadas, sobre todo cuando las mismas se obtienen por métodos de reciclado o fundido.

En relación con la obtención de aluminios fundidos, plantean Zander y Sandström (2008) que uno de los mayores problemas asociados con estas aleaciones es la formación de cavidades a escala micrométrica, llamadas microporosidad, que causa la reducción de las propiedades mecánicas, particularmente la resistencia a la fatiga, así como una pérdida de presión por tensión y una degradación de la superficie aparente en las partes vaciadas. Según Roubicek y otros investigadores (2008) la porosidad causa costosas pérdidas por chatarra (producto de mala calidad) y puede limitar el uso de los vaciados en ciertas aplicaciones. La porosidad por contracción y gas puede ocurrir separadamente o junta, produciendo indeseables defectos en los vaciados.

1.1. Aleaciones de Al-Si vaciado o fundido

Las aleaciones de aluminio vaciado constituyen, en términos de tonelaje, el segundo grupo más grande de consumo de metales después de las aleaciones de hierro vaciado (Modern Casting 2003) y, en particular, las de tipo Al-Si son ampliamente utilizadas en la industria automotriz, estructuras aeroespaciales y aplicaciones militares, debido a sus buenas propiedades mecánicas, bajo peso, buena soldabilidad, buena conductibilidad térmica, relativamente alta resistencia a alta temperatura, excelente resistencia a la corrosión, así como excelente fluidez al vaciado (Tayibi 2004).

En estudios realizados por Dahle y demás colaboradores (2005) se reportó que en las aleaciones de Al-Si la orientación cristalográfica del aluminio en el punto eutéctico y en las cercanías son dendritas primarias. Por otra parte, Datta y otros investigadores (2004) indicaron que existen cuatro morfologías del silicio, observadas en dos estados convencionales de

solidificación. Entre estas morfologías se encuentran cristales largos ideomórficos, placas finas superficiales, cristales convencionales ramificados y formas de crecimiento cooperativo (fibrosa).

Meran, Ozturk y Yuksel (2008) mencionan que la solidificación direccional de las aleaciones aluminio-silicio puede darse lugar mediante un enfriamiento rápido. Se ha establecido que la estructura fibrosa del silicio es el resultado de un crecimiento no facetado de la partícula de silicio primario a una alta velocidad de solidificación. La transición estructural desde láminas gruesas en forma de hojuelas hasta la estructura fibrosa es acompañada por un gran subenfriamiento.

1.2. Aleaciones del sistema Al-Mg-Si

En la industria, las aleaciones del sistema Al-Mg-Si son muy prometedoras, como parte estructural de reducir el peso y mantener una alta resistencia. Algunos estudios (Corrochano *et al.* 2008) muestran que cuando el Mg y el Si son adicionados en este sistema en una proporción de Al-Mg-Si₂, o con un ligero exceso de Si respecto a esta composición, existe un marcado endurecimiento ante el envejecimiento artificial a 175 °C. Sin embargo, si se realiza un envejecimiento natural antes del envejecimiento artificial, el endurecimiento mencionado se suprime significativamente.

Según Schatzberg (2003), dada las características propias de esta aleación, no existe compuesto ternario alguno, sino una mezcla de Mg₂Si y Al₃Mg₂. El compuesto Mg₂Si, inicialmente considerado como un compuesto iónico, se comporta como un semiconductor. La solubilidad del compuesto Mg₂Si en aluminio varía de una manera muy importante, en función de la temperatura, por un lado y del exceso de magnesio, por otro. Según Youseffi y Showaiter (2006), el silicio y el magnesio se combinan entre sí para formar el compuesto denominado siliciuro magnésico Mg₂Si, el cual, a su vez, forma un sistema eutéctico simple con el aluminio.

1.3. Aleaciones del sistema Al-Cu-Mg

En este tipo de aleaciones la microestructura, el tipo de fases que aparecen y la respuesta a los microaleantes está fuertemente asociada a la composición, en particular a la proporción entre la cantidad de cobre y de magnesio presentes en la aleación. La serie Al-Cu-Mg tiene al cobre como metal de principal aleación, cuyo contenido está entre 2 % y 10 % de este elemento en el aluminio, lo que permite una adecuada solubilidad a partir de 5,65 % de cobre. Al exceder la concentración de Cu en un 15 % se forman compuestos intermetálicos que fragilizan la aleación. Este grupo presenta una resistencia extremadamente alta al aplicarle un tratamiento

térmico adecuado, además, el cobre facilita el endurecimiento por precipitación (Mann *et al.* 2011).

Según Genel (2007), el cobre con el aluminio forma una solución sólida que produce un endurecimiento en las estructuras de las piezas fundidas. Este efecto se incrementa cuando la pieza es sometida a un calentamiento posterior, con lo cual se promueve la formación de precipitados dispersos ramificados. Con estos precipitados se incrementan las propiedades mecánicas, ya sea en piezas fundidas o en las tratadas térmicamente.

1.4. Efecto del ruido magnético Barkhausen

Las emisiones de ruido magnético Barkhausen (RMB) son afectadas por cambios en la microestructura del material, el esfuerzo aplicado y las deformaciones, lo que permite utilizar el RMB como una técnica de evaluación no destructiva de materiales. En estudios realizados diferentes autores coinciden en plantear que el RMB depende de los parámetros empleados para la magnetización, entre ellos se encuentra la frecuencia (Reyes, Capó & Franco 2012) y la intensidad de magnetización (Pérez *et al.* 2005), pero existen otras dependencias como las características del material, donde se considera el tamaño de grano (Ruiz *et al.* 2008), el contenido de carbono (Capó *et al.* 2004) y el estado de tensiones (Anglada, Padovese & Capó 2001).

El trabajo tiene como objetivo determinar, a través del comportamiento microestructural y del efecto Barkhausen de las aleaciones de aluminio empleadas, cuál es la que presenta mejores condiciones para ser empleada en la fabricación de casquillos para eslingas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Análisis de la composición química

La determinación de los elementos aleantes presentes en el material fue realizada bajo el método de electrofotometría de absorción atómica y vía húmeda en un equipo marca GBC, modelo Avanta, serie A 4721. En las Tablas 1, 2 y 3 se muestra la composición química de las aleaciones AA 5050, AA 2218 y AA 6082.

Tabla 1. Composición química de la aleación AA 5050 (Al-Mg) (%)

Nomenclatura	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Al
AA 5050	0,29	0,33	0,02	0,02	1,62	97,5

Tabla 2. Composición química de la aleación AA 2218 (Al-Mg-Cu)(%)

Nomenclatura	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Al
AA 2218	6,72	0,92	2,76	0,03	0,41	88,9

Tabla 3. Composición química de la aleación AA 6082 (Al-Mg-Si)(%)

Nomenclatura	Si	Fe	Mg	Al
AA 6082	1,21	0,41	1,48	96,6

Luego de obtenida la composición química de cada una de las aleaciones y compararlas con los estándares establecidos por los fabricantes se determinó que existe diferencia en sus componentes, lo que presumiblemente estuvo asociado con el vertido de estos aleantes durante el proceso de fundición.

2.2. Fuerza de conformado

Son las fuerzas de compresión generadas por la reacción entre la pieza y la matriz. Como el proceso se va a desarrollar en frío y conformado de un paso, se requerirá de mayores esfuerzos; esto permitirá la posibilidad de grandes cambios de forma, romper la estructura cristalina y constituir otra más refinada de granos pequeños.

El proceso se realizará con estampas cerradas; estas herramientas conformadoras permitirán el desplazamiento de una contra la otra, con el involucramiento totalmente de la pieza o en una extensión considerable. Se empleará una fuerza de 6,5 MPa.

2.3. Comportamiento microestructural

Se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL, modelo NIM-100, que está dotado de una cámara instalada con el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe. Para observar las probetas se nivelaron en un dispositivo con plastilina. Las microestructuras de las Figuras 1, 2 y 3 se corresponden con las estructuras metalográficas de las muestras patrones de las aleaciones de aluminio.

La Figura 1 se corresponde con la aleación aluminio-magnesio; se observa que los cristales de magnesio eutéctico tienen forma acicular y ramificada, con contornos puntiagudos que favorecen la aparición de microgrietas y reducen la ductilidad de la aleación.

En la Figura 2 se detectó, en numerosos puntos, la presencia de una estructura de tipo eutéctico, situada en los límites de las dendritas desarrollados durante la solidificación. Esta microestructura consiste en brazos dendríticos primarios y secundarios de fase α -Al, segregación interdendrítica que contiene una placa de silicio, rodeada por un halo de fase α -aluminio que están encapsuladas por eutéctico irregular del tipo Al- Si.

La muestra 3 presentó una morfología del silicio con combinación de láminas y hojuelas, algunas gruesas y distribuidas uniformemente. También se observó que existen ciertas partículas dispersas dentro de las dendritas de silicio; se perciben muchas partículas finas dentro de la estructura eutéctica al igual que pequeñas láminas.

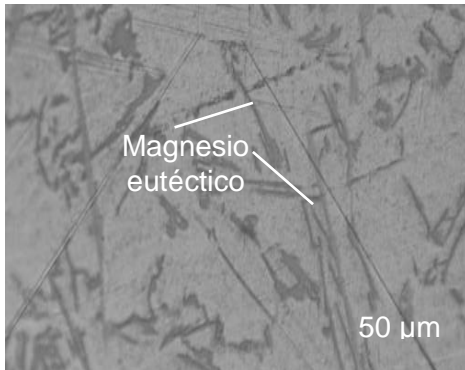


Figura 1. Aleación Al-Mg.

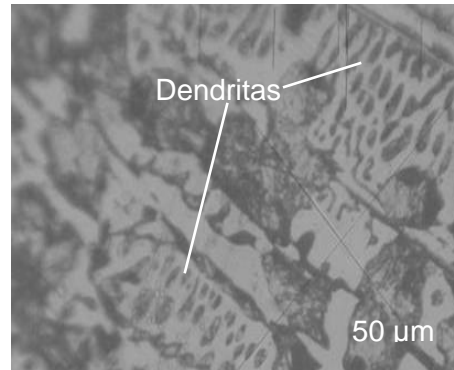


Figura 2. Aleación Al-Si-Cu.

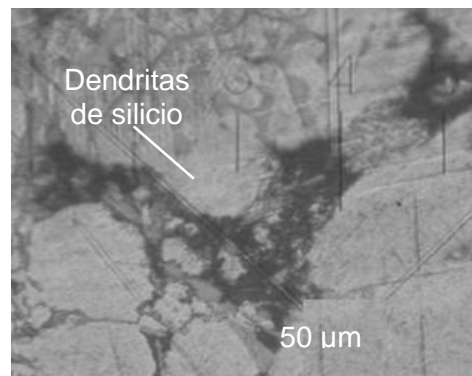


Figura 3. Aleación Al-Si-Mg.

2.4. Medición del RMB en los casquillos comprimidos

En las Figuras 4, 5 y 6 se muestran los puntos en los que se realizaron las mediciones a los casquillos con las eslingas luego del proceso de compresión.



Figura 4. Al-Mg.

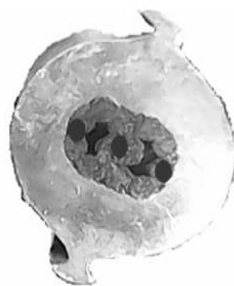


Figura 5. Al-Mg-Si.

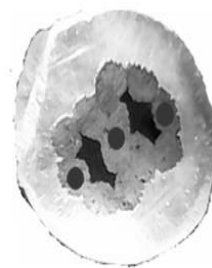


Figura 6. Al-Si-Cu.

Teniendo en cuenta que el movimiento de las paredes de los dominios magnéticos está fuertemente influenciado por la microestructura del material y el mecanismo de deformación que lo rige, con el surgimiento de los mismos se produce un freno al movimiento de las paredes. El ruido magnético Barkhausen es aplicable a materiales magnéticos, en este estudio no pudo ser posible analizar los casquillos por estar fabricados de aluminio, por lo que hubo que realizar mediciones en los cables luego del proceso de compresión.

El objetivo de este ensayo fue para determinar el nivel de compresión, en correspondencia con el tipo de aleación utilizada. Se realizaron al menos tres mediciones de la variación del voltaje en cada muestra; fueron repetidos tres veces en cada punto para establecer la media en la variación.

2.5. Ensayo de dureza

En la medición de la microdureza se utilizó un microdurómetro modelo PMT-3 No 168, que tiene acoplado un objetivo acromático con compensación libre trinocular de tubo inclinado a 30°. La Figura 7 muestra una huella de indentación realizada para el análisis.

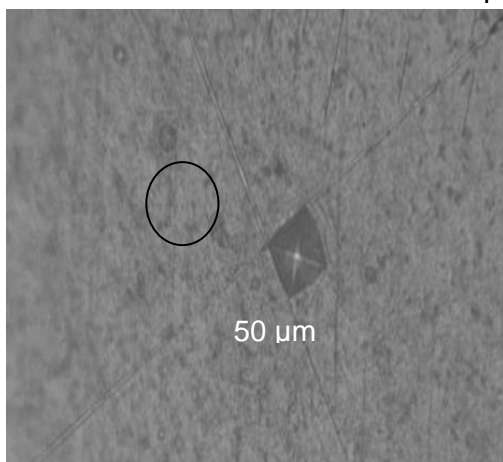


Figura 7. Huella de indentación realizada para el análisis de microdureza.

Se efectuaron tres mediciones en diferentes lugares que se promediaron; la carga aplicada fue de 0,49 N, en un tiempo de 15 s. El indentador empleado fue una pirámide de diamante, con un ángulo de 136°

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis microestructural de la aleación aluminio-magnesio

Con objeto de apoyar la identificación de las diversas transformaciones detectadas se procedió a realizar el análisis del examen microscopio para observar las posibles transformaciones. Las Figuras 8 y 9 se corresponden con las estructuras de la aleación aluminio-magnesio, luego del proceso de compresión.

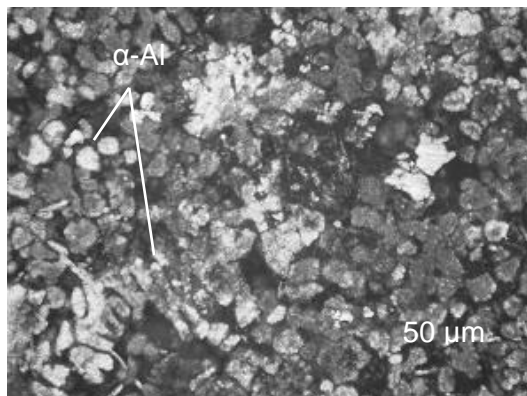


Figura 8. Muestra de la periferia.

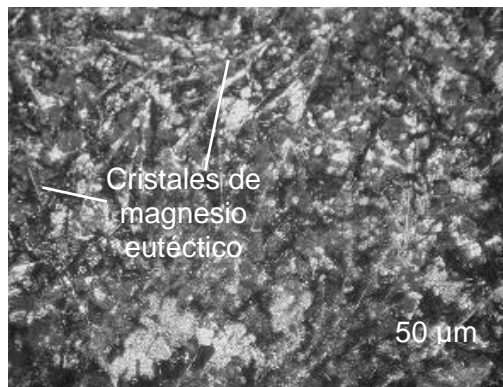


Figura 9. Muestra del centro.

Un incremento de la velocidad en la compresión, con una fuerza de 6,5 MPa, produce una mayor segregación del eutéctico (Figura 8), a bajas temperaturas (34 °C); se observa una mayor orientación de las fase alfa en la dirección perpendicular a la presión (Figura 9). En las micrografías se observa que el silicio tiende a desaparecer de la zona central, esto se justifica por el efecto de la compresión.

El silicio se desplaza hacia la periferia con el microconstituyente eutéctico líquido que ha fundido a menor temperatura (175 °C) y que no sea tan evidente este efecto puede ser debido al mayor tamaño del silicio. Por otro lado, el magnesio precipita, preferentemente, en los límites de grano como una fase altamente anódica, lo cual produce susceptibilidad al agrietamiento intergranular y a la corrosión por esfuerzo. La adición de magnesio incrementa fuertemente la resistencia del aluminio sin reducir su ductilidad.

3.2. Análisis microestructural de la aleación Al-Si-Cu

En las Figuras 10 y 11 se muestra el análisis microestructural de las muestras conformadas de la aleación Al-Si-Cu, obtenidas luego del proceso de compresión por estampado.

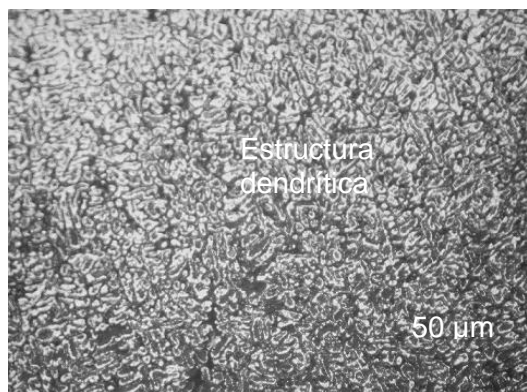


Figura 10. Muestra de la periferia.

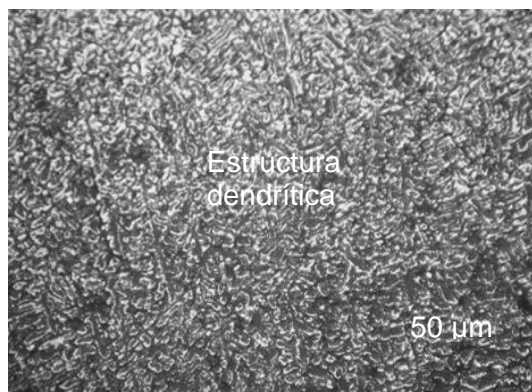


Figura 11. Muestra del centro.

En las estructuras se observa, en determinadas zonas, un aspecto parcialmente dendrítico con silicio eutéctico muy fino y cierta porosidad. No se observa una estructura de fase alfa globular rodeada de microconstituyente eutéctico típica de los procesos de conformación; se distingue un pequeño redondeo de las dendritas y un consecuente crecimiento del tamaño de la fase alfa, pero no muy acentuado, casi inapreciable a pocos aumentos así como un pequeño incremento en el tamaño de las partículas de silicio, justificado por el calentamiento de la muestra.

Si en las aleaciones el cobre está en proporciones muy bajas (como en este caso de estudio), un tratamiento de solución permite disolver los elementos solubles o esferoidizar los compuestos metaestables; de esta manera, se rompe su continuidad en la matriz para conducir a aumentar la ductilidad de la aleación. De igual manera, la deformación plástica rompe la red de compuestos frágiles y los distribuye en la matriz. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que los desbalances entre ciertos elementos aleantes y la presencia de elementos traza (Fe y Cr) pueden conducir a que en algunas aleaciones vaciadas se disminuya esta condición, para conducir a piezas de baja calidad superficial.

3.3. Análisis microestructural de la aleación Al-Si-Mg

Se realizó el análisis de la microestructura de la aleación aluminio-silicio magnesio; las Figuras 12 y 13 muestran este comportamiento, asociado a las fuerzas de compresión aplicadas a las mismas.

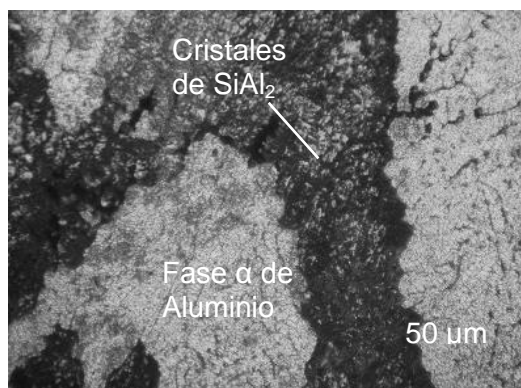


Figura 12. Muestra de la periferia.

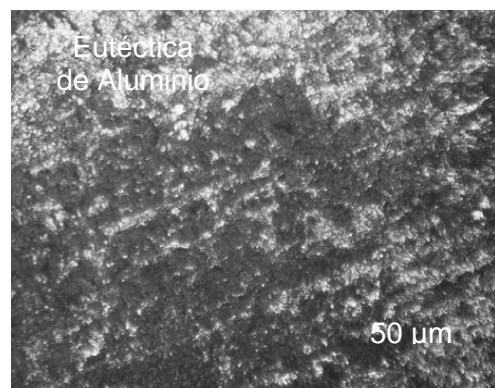


Figura 13. Muestra del centro.

Como se puede observar en las micrografías en las zonas centrales quedan zonas con muy poco silicio eutéctico. Existen zonas que en su totalidad son fase alfa y que, junto al aluminio, hay una matriz de cristales de SiAl_2 ; hay en ella otros dos constituyentes, uno de color gris y con tendencia a tener, en general, formas poliédricas o aciculares, mientras que la cuarta fase

presenta una coloración gris oscura con cierta tonalidad y forma irregular, con cristales de menor tamaño que el resto de los constituyentes que forman la eutéctica.

La proporción relativa de esta última fase parece ser muy variable de unos campos a otros, observándose masas en las que su presencia es muy escasa, mientras que en otras ocasiones su proporción es mucho mayor. Esta eutéctica cuaternaria aparece esporádicamente en forma globular y con constituyentes de tamaño pequeño.

3.4. Análisis del efecto Barkhausen aplicado a los cables

Se analizan los resultados de magnetización registrados para el ruido Barkhausen para las diferentes muestras. La Figura 14 se corresponde con la aleación AA 5050 (aluminio-magnesio).

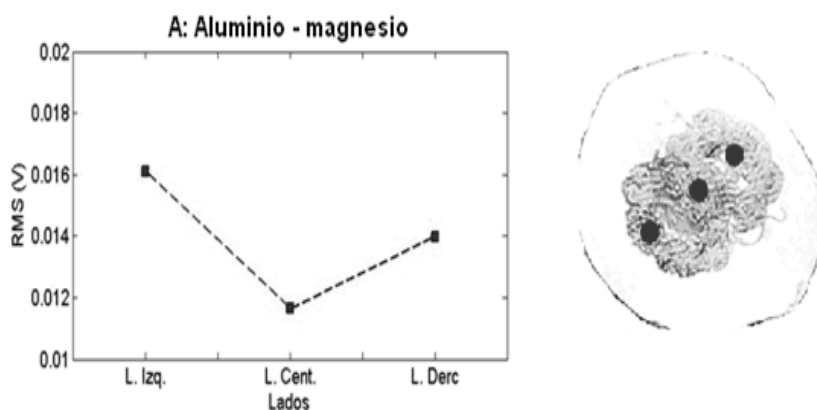


Figura 14. Caracterización magnética de la aleación AA 5050.

Se puede observar en la Figura 14 que, después de aplicada la magnetización en el cable, luego de ser comprimido, se ha obtenido, tanto en el lado izquierdo como en el lado derecho, un comportamiento muy similar. Esto demuestra que la aleación AA 5050 (aluminio-magnesio) ha fluido satisfactoriamente entre los alambres que componen la eslinga, lo cual está originado por la plasticidad que presenta esta aleación. La diferencia que se muestra en ambos lados, presumiblemente está ocasionado por una imperfección o mala colocación de la estampa durante el proceso.

En la Figura 15 se muestran los resultados de la magnetización en los cables de la aleación AA 6082 (aluminio-silicio-magnesio) luego del proceso de magnetización.

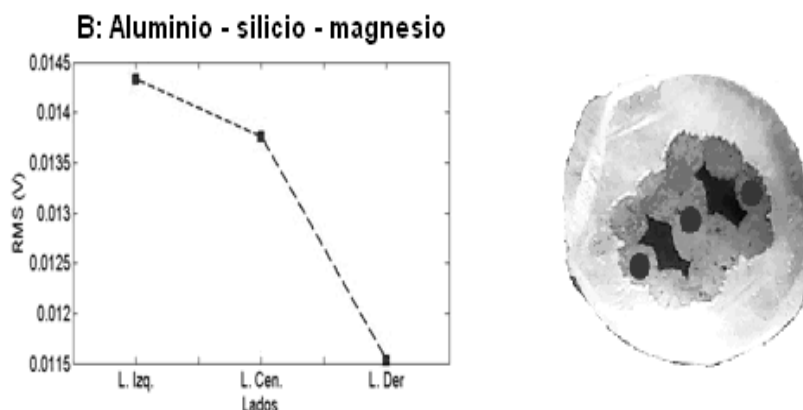


Figura 15. Caracterización magnética de la aleación AA 6082.

Una distribución irregular presentan los puntos obtenidos en la magnetización de la aleación, tal y como se muestra en la Figura 15, donde el lado derecho revela una menor afectación de la señal, que demuestra que en este extremo, el punto de cedencia del material es mayor e indica que el material tiene una mayor pérdida de energía y, por lo tanto, sufrió un endurecimiento debido a la carga aplicada, no así para el lado izquierdo donde se puede observar una ligera afectación. Los resultados pueden estar asociados a la formación de cristales de SiAl_2 , que introducen una mayor dureza en la aleación y, por ende, una menor resistencia a la tracción de la eslinga.

En la Figura 16 se puede observar el comportamiento obtenido de la magnetización en la aleación AA 2014 (aleación de aluminio-silicio- cobre).

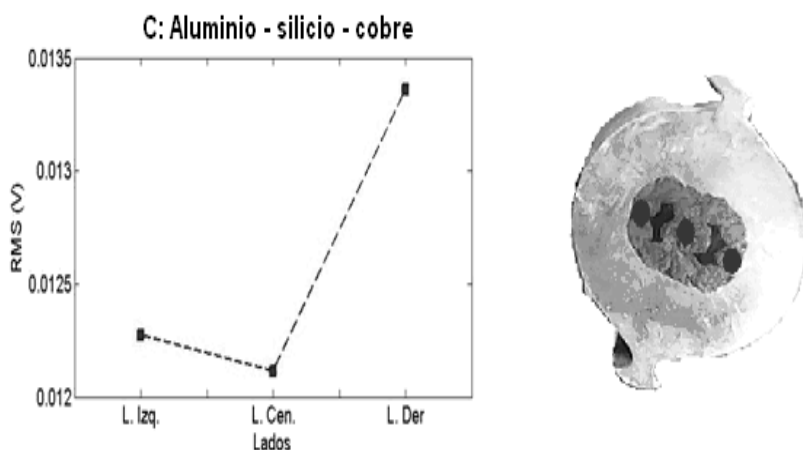


Figura 16. Caracterización magnética de la aleación AA 2218.

En la aleación AA 2218 se observa una distribución de los puntos similares a la aleación AA 6082, pero para el lado derecho, afectado por la dureza que se ha alcanzado en el cable, que puede estar ocasionado por la presencia de la estructura dendrítica con el silicio eutéctico y el elemento cobre, lo cual le

confiere a la aleación una menor ductibilidad; esto ofrece mayor resistencia a ser conformado y afecta la superficie de la eslinga.

Con los resultados de la magnetización analizadas para cada aleación, Al-Mg ha sido la menos afectada por daños debido a esfuerzos mecánicos (compresión). Se encontró que en las diferentes zonas o puntos analizados existen discrepancias significativas en las aleaciones AA 6082 y la aleación AA 2218, con respecto a la aleación AA 5050. En estos puntos, el RMB mostró un aumento en la amplitud de la señal, a medida que los puntos se alejaban de la región comprimida, mientras que el ancho de cada una de ellas se reduce.

La Figura 17 muestra el comportamiento de las envolventes obtenidas en cada una de las aleaciones luego de ser procesada con el empleo del ruido magnético Barkhause.

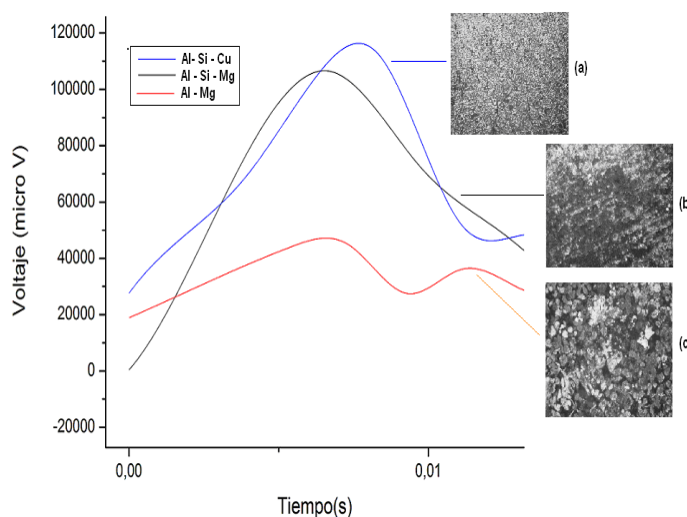


Figura 17. Comportamiento de las envolventes en cada aleación (cable).

Como se observa en la Figura 17, en el cable de la aleación de aluminio-magnesio se ha mantenido en la superficie un aumento del tamaño de grano (microestructura c), lo que condujo a un material magnéticamente más dúctil. Por consiguiente, se percibe la aparición más temprana del ruido Barkhausen (RB) (línea roja) y también una disminución en las señales de RB. Tanto el valor del pico máximo como el gráfico de la raíz media cuadrática (RMS) de toda la señal disminuyeron, mostrándose la aparición de dos picos, a diferencia de las demás aleaciones, que presentan un solo pico.

En la curva azul (aleación Al-Si-Cu) se observa un pico de mayor amplitud. Este resultado muestra un mecanismo diferente del movimiento de las paredes de dominios, distinto del encontrado en las otras dos muestras y originado por la aparición de granos de menor tamaño (microestructura a),

lo que induce mayor dureza. Resultado casi análogo que el que muestra la curva negra (aleación Al-Si-Mg), que promueve también la aparición de dominio magnético muy semejante en cuanto a tamaño de grano y de dureza (microestructura b). En ambos casos se observa la aparición de un solo pico.

La presencia de una alta densidad de dislocaciones ocasiona que los saltos Barkhausen sean cortos y consecuentemente de baja amplitud. Este comportamiento se ve reflejado en las señales de la Figura 16, observándose que cada una de las emisiones de ruido magnético Barkhausen (RMB) contiene un gran número de saltos (señal ancha) pero de baja amplitud.

3.5. Análisis de las durezas en las aleaciones

Las mediciones se realizaron por el método de Vickers; se hicieron, al menos, tres mediciones para cada muestra en diferentes lugares. Los valores de dureza son mayores cuando se aumenta la fuerza de compresión, lo que incrementa la tensión residual mínima y es similar para los distintos casquillos. En la Tabla 4 se muestra la microdureza de las diferentes aleaciones.

Tabla 4. Dureza en las diferentes aleaciones antes y después de la deformación

Aleación	Posición	HV _{inic}	HV _{final}
Al-Mg-Si (AA 6082)	Centro	100	221,7
	Centro-borde		
	Borde		
Al-Mg (AA 5050)	Centro	90	199,3
	Centro-borde		
	Borde		
Al-Si-Cu (AA 2218)	Centro	140	224,8
	Centro-borde		
	Borde		

Como se observa en la tabla anterior existe variación en la microdureza de las diferentes aleaciones luego de realizado el proceso de ensamble y compresión por estampado. Ha existido un incremento de esta propiedad mecánica, desde 140 HV hasta 224,8 HV para la aleación Al-Si-Cu, precedido por la aleación de Al-Mg-Si, desde 100 HV hasta 221,7 HV y, por último, con una menor resistencia a la conformación la aleación Al-Mg que, desde una microdureza de 90 HV, esta se incrementa hasta 199,3 HV. Lo

cual demuestra que por estos resultados es más conveniente el empleo en la fabricación de eslinga esta última aleación.

4. CONCLUSIONES

- Las microestructuras obtenidas en cada una de las aleaciones y caracterizadas por el tamaño de los granos y su morfología, con una orientación de la fase alfa en la aleación Al-Mg, estructura dendrítica con silicio eutéctico muy fino en la aleación Al-Si-Cu y estructura poliédricas o aciculares para la aleación Al-Si-Mg, permiten establecer que la aleación de Al-Mg presenta mejores propiedades para ser sometida a proceso de compresión sin provocar efecto de agrietamiento en ella.
- Las envolventes determinadas con el efecto magnético Barkhausen para las diferentes muestras demostró que el mayor pico se corresponde con la aleación de Al-Si-Cu, precedida por la aleación Al-Si-Mg y con un menor pico para la aleación Al-Mg, lo que garantiza que esta última aleación presenta mejores propiedades mecánicas.
- En las diferentes durezas de las aleaciones de aluminio de las series AA 2218, AA 5050 y AA 6082 existe un incremento de esta propiedad desde 199,3 HV para la aleación Al-Mg hasta 224,8 HV para la aleación Al-Si-Cu, lo cual permite plantear que la menor dureza obtenida en la aleación Al-Mg es la más adecuada para la fabricación de los casquillos de las eslingas.

5. REFERENCIAS

- ANGLADA, J.; PADOVESE, L. & CAPÓ, J. 2001: Magnetic Barkhausen Noise and hysteresis loop in commercial carbon steel: influence of applied tensile stress and grain size. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 231(11): 299-306.
- CAPÓ, J.; PÉREZ, J.; PADOVESE, L. & SERNA, C. 2004: Dependence of the Barkhausen Magnetic Emission with carbon content in commercial steel. *Journal of Materials Science* 39(6): 1367-1370.
- CORROCHANO, J.; CERECEDO, C.; VALCÁRCEL, V.; LIEBLICH, M. & GUITIÁN, F. 2008: Whiskers of Al₂O₃ as reinforcement of a powder metallurgical 6061 aluminium matrix composite. *Materials Letters* 62(1): 103-105.
- DAHLE, A.; NOGITA, K.; MCDONALD, S.; DINNIS, C. & LU, L. 2005: Eutectic Modification and Microstructure Development in Al-Si Alloys. *Materials Science and Engineering A* 413-414: 243-248.
- DATTA, J.; DATTA, S.; BANERJEE, M. & BANDYOPADHYAY, H. 2004: Beneficial effect of scandium addition on the corrosion behavior of Al-Si-Mg-SiCp

- metal matrix composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 35(9): 1003-1008.
- GENEL, K. 2007: The effect of pitting on the bending fatigue performance of high-strength aluminum alloy. *Scripta Materialia* 57(4): 297-300.
- MANN, R.; HEXEMER, R.; DONALDSON, I. & BISHOP, D. 2011: Hot deformation of an Al-Cu-Mg powder metallurgy alloy. *Materials Science and Engineering A* 528(16): 5476-5483.
- MERAN, C.; OZTURK, O. & YUKSEL, M. 2008: Examination of the possibility of recycling and utilizing recycled polyethylene and polypropylene. *Materials & Design* 29(3): 701-705.
- MODERN CASTING. 2003: Know your Competition 7th Census of World Casting Production - 2002. Modern Casting Staff Report. Modern Casting. Diciembre. p. 23-25.
- PÉREZ, J.; CAPÓ, J.; ANGLADA, J. & PADOVESE, L. 2005: A model for the influence of microstructure defects on magnetic Barkhausen noise in plain steels. *J. Magn. Magn. Mater* 288(122): 433-442.
- REYES, F.; CAPÓ, J. & FRANCO, E. 2012: Modelo matemático para la caracterización del envejecimiento del acero 12Cr1MoV superenvejecido a partir del efecto Barkhausen. *Ingeniería Mecánica* 15(1): 66-72.
- ROUBICEK, V.; RACLAVSKA, H.; JUCHELKOVA, D. & FILIP, P. 2008: Wear and environmental aspects of composite materials for automotive braking industry. *Wear* 265(1-2): 167-175.
- RUIZ, D.; PIOTRKOWSKI, R.; LOPEZ, M. & RUZZANTE, J. 2008: Ruido Barkhausen y emisión magneto acústica para la caracterización de materiales ferromagnéticos. *Revista Matéria* 13(1): 12-22.
- SCHATZBERG, E. 2003: Symbolic culture and technological change: The cultural history of aluminium as an industrial metal. *Enterprise and Society* 4(2): 226-271.
- TAYIBI, H. 2004: *Tratamiento de los polvos procedentes de la Metalurgia Secundaria del Aluminio*. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid. España. 150 p.
- YOUSEFFI, M. & SHOWAITER, N. 2006: PM processing of elemental and pre alloyed 6061 aluminium alloy with and without common lubricants and sintering aids. *Powder Metallurgy* 49(3): 240-252.
- ZANDER, J. & SANDSTRÖM, R. 2008: One parameter model for strength properties of hardenable aluminium alloys. *Materials and Design* 29(7): 1540-1548.

Amable Chirino-Rodríguez, achirino@ismm.edu.cu

Master en Ciencias. Profesor Asistente. Departamento de Mecánica
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba.

Tomás Fernández-Columbié, tfernandez@ismm.edu.cu

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

Dayanis Alcántara-Borge,s dalcantara@ismm.edu.cu

Ingeniera mecánica. Profesora Asistente. Departamento de Mecánica.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba.

Isnel Rodríguez-González, irgonzalez@ismm.edu.cu

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

Impacto visual generado por la explotación minera en el yacimiento Punta Gorda, Moa

Idania Aguilera-Fernández
Yordanis Batista-Legrá
Subash Bastola
Luis Rojas-Purón

Resumen

Durante la explotación a cielo abierto de las minas, el paisaje sufre impactos adversos. En este artículo se evalúa el impacto visual provocado por la explotación minera de superficie en el yacimiento laterítico Punta Gorda, en Moa. El método indirecto del *Bureau of Land Management*, implementado a través de herramientas informáticas (Surfer 8.0, Didger 3.02, Gemcom 4.11, Autocad Civil 3d), permitió determinar las unidades de paisaje visual y las principales cuencas visuales, según el criterio de selección utilizado. Se realizó también un análisis de la topografía, el color, la textura y la luminosidad de la cuenca visual. Los puntos de observación fueron seleccionados por sus características topográficas o por ubicarse en las cotas más elevadas. Este estudio abre un nuevo campo en la evaluación del impacto visual de una explotación minera a cielo abierto en Cuba y constituye un aporte práctico que brinda información paisajística de interés para la toma de decisiones sobre la gestión y planificación del yacimiento, destacándose, además, por su utilidad para el buen ordenamiento minero ambiental de una región.

Palabras clave: paisaje; calidad visual; evaluación de impacto; cuenca visual; minería a cielo abierto; yacimiento Punta Gorda.

Visual impact produced by mining activity in the Punta Gorda ore body, Moa

Abstract

Open-pit mining has adverse impacts on the landscape of the mining area. This article describes the visual impact resulting from surface mining activities being conducted in the Punta Gorda laterite ore body located in Moa. The implementation of the indirect method Bureau of Land Management by means of computer tools, such as Surfer 8.0, Digger 3.02, Gemcom 4.11, Autocad Civil 3d allowed the determination of visual landscape units and the main visual basins according to the method of selection used. This investigation also includes an analysis on the visual basin soil, color, texture and luminosity. Observation locations were selected based on their topographical characteristics or because of their being located in the highest altitudes. It was concluded that the visual impact of mining activities on the landscape investigated covers more than 50% of the visual basin. This research paves the way to a new field in the visual impact assessment of open-pit mining in Cuba. It constitutes a practical contribution providing information of interest on landscapes for the decision making associated with ore body management and planning and it stands out for being useful to ensure a successful mining and environmental planning of a region.

Keywords: landscape; visual quality; impact assessment; visual basin; open-pit mining; Punta Gorda ore body.

1. INTRODUCCIÓN

El paisaje geográfico o geosistema, como categoría científica general de carácter transdisciplinario, se concibe como un sistema espacio-temporal, complejo y abierto, que se origina y evoluciona justamente en la interfase naturaleza-sociedad, en un constante estado de intercambio de energía, materia e información, donde su estructura, funcionamiento, dinámica y evolución, reflejan la interacción entre los componentes naturales (abióticos y bióticos), técnico-económicos y socio-culturales (Mateo 2008; Salinas-Chávez 1991; NC 93-06-101-1987; Miravet-Sánchez *et al.* 2014).

La minería del níquel es uno de los sectores económicos más importantes de Cuba. Por ser una industria de las más dinámicas, genera cambios drásticos y destrucción no solo sobre el paisaje visual, sino también sobre el paisaje, en general, traduciéndose en disminución de la calidad de vida de los pobladores.

Con respecto a lo antes expuesto, el Consejo de Europa, organismo internacional compuesto por 44 países que reúne a casi 800 millones de habitantes, en su Convenio Europeo del Paisaje, plantea el derecho a este importante recurso natural, reconociendo que: "el paisaje es un elemento importante de la calidad de vida de las poblaciones en todas partes: en los medios urbanos y rurales, en las zonas degradadas y de gran calidad, en los espacios de reconocida belleza excepcional y en los más cotidianos" (Consejo de Europa 2000).

Se defiende el criterio de que el paisaje forma parte del medio o entorno en el que se vive, por tanto, de él también depende la calidad de vida; esto reafirma que el paisaje es un elemento importante en aspectos de la vida social, cultural, y un recurso económico que puede contribuir al desarrollo y a la creación de empleo. Este precepto es corroborado en la Constitución de la República de Cuba, teniendo en cuenta que en su artículo 27 dicta: "El Estado protege el medio ambiente y los recursos naturales del país. Reconoce su estrecha vinculación con el desarrollo económico y social sostenible para hacer más racional la vida humana y asegurar la supervivencia, el bienestar y la seguridad de las generaciones actuales y futuras" (Gaceta Oficial 2003).

Según la Norma Cubana (NC 93-06-101-1987), los paisajes son sistemas territoriales constituidos por componentes naturales y complejos de diferente rango taxonómico, formados bajo la influencia de los procesos naturales y de la actividad modificadora de la sociedad humana, que se encuentran en permanente interacción y se desarrollan históricamente. Cada geocomplejo se analiza como un sistema de recursos, un medio de

vida y de actividad del hombre, un sistema que conserva fondo genético, un laboratorio natural y como fuente de sentimientos estéticos.

La fragilidad visual es la capacidad de respuesta de un paisaje ante una actuación humana; mide el grado de deterioro que un paisaje experimentaría ante la incidencia de determinadas actuaciones (Cifuentes 1979, citado por Montoya-Ayala 1997; Montoya-Ayala, Padilla-Ramírez & Stanford-Camargo 2003). Es una forma de establecer su vulnerabilidad, lo contrario es la capacidad de absorción visual, entendida como la capacidad de recibir alteraciones sin deterioro de la calidad visual (Escribano 1991). Entonces, a mayor fragilidad menor capacidad de absorción visual y viceversa.

La consecuente degradación de vastas áreas por la explotación de yacimientos minerales, el gran número de intrusiones visuales, sean caminos mineros, escombreras, equipos de transporte, líneas de transmisión eléctrica, talleres y otros, reducen la calidad del paisaje, entendiendo esta como la característica principal para su conservación y definida sobre la base de sus valores ecológico, perceptivo y cultural. Esta reducción es proporcional a la intensidad del impacto y está relacionada con el grado de modificación, entre otros factores, debido al contraste en tamaño, forma o color (Cáncer 1999).

Lo anterior demuestra que es imprescindible incorporar los estudios de impacto visual a los proyectos de explotación minera del territorio afectado, de ahí que el propósito de este trabajo haya sido evaluar el impacto visual que causa la explotación minera en el yacimiento Punta Gorda, en el municipio holguinero de Moa.

Las consultas a expertos y a los pobladores de las comunidades locales sobre los posibles usos del suelo o las preferencias en cuanto a calidad del paisaje ha sido un aspecto a considerar en la identificación y prevención de los impactos visuales negativos durante la explotación minera y el cierre de la mina (Karanakova y Panov 2011).

La evaluación del impacto visual de una explotación minera debe ser un aporte práctico que brinde información paisajística de interés para la toma de decisiones sobre la gestión y planificación territorial y para llevar a cabo los planes de ordenamiento minero ambiental de una región.

La propuesta de medidas de mitigación puede incluir en la fase de rehabilitación el uso de pantallas naturales, en especial de vegetación, seleccionando especies propias del lugar; de igual modo, el diseño de los caminos mineros, el emplazamiento de las escombreras, el equipamiento y

la infraestructura de apoyo a la producción ha de hacerse en aquellos lugares de menor fragilidad visual (Karanakova y Panov 2011).

El yacimiento Punta Gorda está situado al noreste del municipio de Moa en la provincia de Holguín, ubicándose dentro de los límites del macizo montañoso Moa-Baracoa (Figura 1). El área está limitada por las coordenadas del sistema Lambert siguientes:

$X = 699\ 800 - 704\ 100$

$Y = 218\ 600 - 221\ 900$

Y las coordenadas geográficas latitud (φ) y longitud (λ):

$\varphi = 20^{\circ} 38',2$

$\lambda = 74^{\circ} 52',8$

Sus límites naturales son: al norte, las aguas del océano Atlántico; al sur, la línea convencional que lo separa del yacimiento Yagrumaje Oeste; al oeste, el yacimiento Moa Oriental y al este las elevaciones que constituyen la línea divisoria de las aguas del río Yagrumaje.

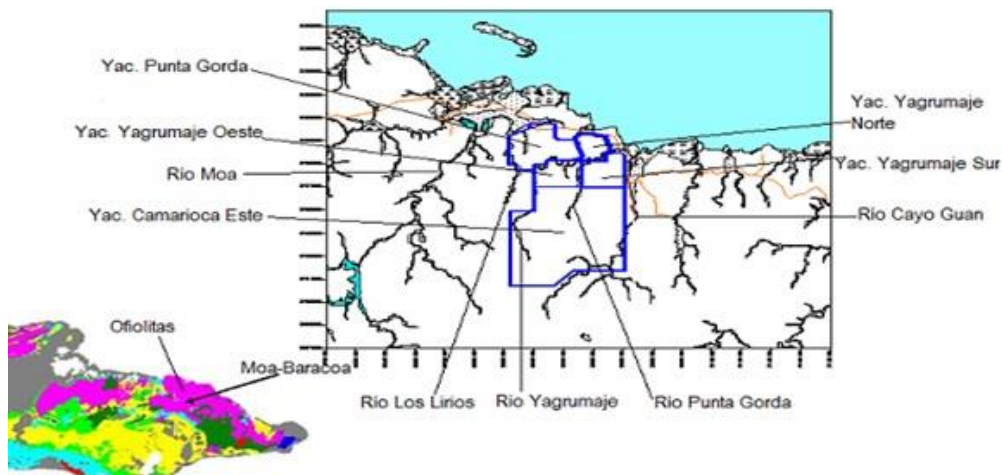


Figura 1. Ubicación geográfica del yacimiento Punta Gorda. Fuente: María I. García de la Cruz 2013.

Los impactos visuales generados por las explotaciones mineras de superficie tienen su razón de ser en la presencia de observadores potenciales, factor de gran peso en este estudio por los aspectos que a continuación se comentan en relación con la existencia de moradores.

La ciudad de Moa tuvo su origen en la explotación forestal, por la abundancia de pinares que crecían sobre la corteza de intemperismo. Después de conocerse que debajo de esos pinares existían enormes reservas de níquel y cobalto se fomentó la industria minero-metalúrgica,

con dos fábricas y una infraestructura de apoyo a la producción (Ceproníquel 2010).

Dada la importancia de esta industria se ha construido una infraestructura socioeconómica que comprende hospitales, viviendas, centros de recreación, carreteras, puerto, aeropuerto, radiodifusoras y centros educacionales desde la enseñanza primaria hasta universitaria, con gran peso en la formación de postgrado, donde se preparan profesionales del ramo de Cuba y de otros países.

Cada día es mayor la demanda de zonas que produzcan en el observador sensaciones de paz y tranquilidad (Escribano 1991). El interés proteccionista hacia el paisaje, recurso natural cada vez más escaso, es creciente a nivel internacional. Podría decirse que a través del paisaje se abren nuevos caminos de gestión para la protección, también hacia aspectos relacionados con la educación o didáctica patrimonial, el desarrollo territorial, la participación pública o como clave del bienestar social (Mata-Olmo 2008).

Este trabajo realiza una evaluación desde la perspectiva de la calidad y la fragilidad, considerando otros estudios de este tipo (Martínez-Vega, Martín & Romero 2003). En la bibliografía consultada sobre los métodos de valoración paisajística se distingue la experiencia realizada por Montoya-Ayala, Padilla-Ramírez y Stanford-Camargo (2003), basado en los modelos de Aguiló, Blanco, Cifuentes y Aranburu (citados en Estévez-González 2012). En todos los casos se dan respuesta, estudiando la calidad y la fragilidad visual por separado.

Siguiendo las alternativas propuestas por CONAMA (2007), la diversidad de enfoques para el estudio del paisaje se puede resumir en dos tendencias:

- a) La primera considera la subjetividad como factor inherente a toda valoración personal del paisaje.
- b) La segunda se apoya en el empleo de técnicas, automáticas o no, para los procesos de tipificación y valoración.

Siguiendo la experiencia internacional, en este estudio se tienen en cuenta ambas alternativas de análisis. Buscando un acercamiento a la realidad del paisaje analizado se hizo una mezcla de ambas tendencias.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el impacto visual provocado por la explotación minera de superficie en el yacimiento Punta Gorda de la empresa Ernesto Che Guevara de Moa, buscando cuantificar la modificación introducida durante el desarrollo de esta actividad.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología empleada consta de los siguientes pasos:

1. Identificación de las unidades de paisaje visual (en lo adelante UPV) del yacimiento.
2. Valoración de la calidad visual de las unidades de paisaje determinadas.
3. Valoración de la fragilidad visual de la zona de estudio.
4. Selección de los puntos de observación y mayor visibilidad.
5. Determinación de la cuenca visual.

2.1. Identificación de las unidades de paisaje visual del yacimiento Punta Gorda

La delimitación espacial de las UPV se realiza atendiendo a factores como las dimensiones del territorio y al propio comportamiento de los componentes naturales. La importancia relativa de cada componente puede variar de un caso de estudio a otro, razón por la cual puede plantearse que no existe una regla absoluta (Salinas-Chávez & Ramón-Puebla 2013). Tampoco existe una regla que defina lo que se pueda hacer al respecto mediante el uso de los SIG (Salinas-Chávez & Ramón-Puebla 2013).

Las unidades de paisaje son divisiones espaciales que cubren el territorio a estudiar, una agregación ordenada y coherente de las partes elementales, muy importante para la gestión posterior de estos recursos (Escribano 1991; MOPTMA 2004). Basados en Taranco-Segovia (2001), se siguieron los siguientes pasos:

- a) Recopilación de los elementos cartográficos existentes de la zona de estudio: mapas topográficos, de usos del suelo, vegetación, litológicos, entre otros.
- b) Análisis de imágenes satelitales y fotografías aéreas.
- c) Trabajo de campo en el que se confirman o modifican los límites de las UPV.
- d) Se analizan todos los factores que inciden en la calidad y fragilidad visual del territorio: geomorfología, hidrología, vegetación, edafología e incidencia humana, entre otros, y se establece la cartografía definitiva de las UPV.

En la obtención de las UPV se toma como componente central la vegetación, criterio de mayor peso, entre otros factores, por los ecosistemas que allí se desarrollan y, secundariamente, la morfología del terreno. La cubierta

vegetal considera los diferentes tipos de cubierta del suelo, desde las hierbas ralas a los bosques nativos densos. La morfología del terreno está determinada por la forma, textura y estructuras de la superficie del área a estudiar (Muñoz-Pedrerros 2004).

Se utilizaron mapas a escala 1:25 000. Se realizó *in situ* un inventario del área, luego se corroboraron los resultados mediante imágenes de satélite de la zona (Figura 2).



Figura 2. Vista satelital del yacimiento Punta Gorda. Fuente: Google Earth 2016. Image © 2016 CNES/ Astrium.

2.2. Valoración de la calidad visual en la zona de estudio

El proceso de la percepción está dado en la interpretación de mensajes recibidos por los órganos sensoriales del individuo. Aunque la percepción individual es función de su bagaje cultural y su experiencia personal hay patrones comunes relativos a la preferencia de paisajes según relieve, presencia de vegetación y de agua en movimiento relacionados con la memoria universal (González-Bernáldez 1981, 1985). A la preferencia por los paisajes con presencia de vegetación se le conoce como biofilia y a la preferencia por la presencia de agua como hidrofilia (Ulrich 1993, citado en Barrasa-García 2010).

Para realizar una valoración de la calidad visual del paisaje, asumiendo el carácter subjetivo del análisis, debido a los condicionantes y mecanismos sensitivos y perceptivos inherentes al propio observador, se toman en cuenta tres elementos de percepción (CONAMA 2007):

- Características intrínsecas del punto
- Calidad visual del entorno inmediato
- Calidad visual del fondo escénico.

Para el estudio de la calidad visual del paisaje se utilizó el método indirecto del BLM (*Bureau of Land Management* 1980). Este método se basa en la evaluación de las características visuales básicas de los componentes del paisaje. Se asigna un valor a cada componente según los criterios de valoración (Tabla 1).

Tabla 1. Inventario/evaluación de la calidad escénica. Criterios de ordenación y puntuación (BLM 1980)

Morfología (según la pendiente del terreno)	Paisaje montañoso (pendiente superior al 30 %)	Accidentado (pendiente entre 15 %-30 % Calificación 3)	Ondulado (5 % a 15 %) / Llano (0 % a 5 %)
Puntuación	5	3	2 / 1
Vegetación	Masas boscosas y gran variedad de tipos	Alguna variedad en la vegetación, pero solo uno o dos tipos	Poca o ninguna variedad o contraste en la vegetación
Puntuación	5	3	1
Agua	Factor dominante en el paisaje; apariencia limpia y clara, aguas blancas (rápido y cascado) o láminas de agua en reposo	Agua en movimiento o reposo, no dominante en su paisaje	Ausente o inapreciable
Puntuación	5	3	0
Color	Combinaciones de colores intensas y variadas, o contrastes agradables entre suelo, vegetación, roca, agua y nieve	Alguna variedad e intensidad en los colores y contrastes en el suelo, roca y vegetación, sin ser elemento dominante	Muy poca variación de color o contraste, colores apagados
Puntuación	5	3	1
Fondo escénico	El paisaje circundante potencia mucho la calidad visual	El paisaje circundante incrementa moderadamente la calidad visual del conjunto	El paisaje adyacente no ejerce influencia en la calidad del conjunto
Puntuación	5	3	0
Rareza	Único o poco corriente o muy raro en la región; posibilidad real de contemplar fauna y vegetación excepcional)	Característico, aunque similar a otros en la región	Bastante común en la región
Puntuación	6	2	1

Actuaciones humanas (usos del suelo)	Con modificaciones que favorecen la calidad visual	Calidad escénica afectada por modificaciones que no añaden calidad visual	Modificaciones intensas y extensas, que reducen o anulan la calidad escénica
Puntuación	2	0	-

A partir de la consulta a expertos y con base en los criterios reflejados en Tabla 1, para el análisis de la calidad visual fueron utilizados los siguientes valores de ponderación:

- Excelente (más de 30 puntos)
- Muy alta (de 21 a 30 puntos)
- Alta (de 16 a 20)
- Moderada (de 10 a 15)
- Baja (de 0 a 9).

2.3. Evaluación de la fragilidad

Para evaluar la fragilidad se utilizó el método de Escribano (1991) adaptado a las condiciones del objeto de estudio que considera tres variables:

- Factores biofísicos que ponderan la fragilidad visual del punto observado, considerando el suelo, la cubierta vegetal, la inclinación y orientación de la pendiente.
- Carácter histórico-cultural, que considera la existencia al interior de un paisaje, de valores singulares según escasez, valor tradicional e interés histórico.
- Accesibilidad, dada por la distancia y acceso visual desde carreteras y poblados.

Los factores biofísicos determinan la fragilidad visual del punto que, sumados a los factores histórico-culturales, constituyen la fragilidad visual intrínseca. Por último, al integrarse la accesibilidad se tiene la fragilidad visual adquirida. De este modo la valoración se hizo según la fórmula:

$$VFVP = \frac{\sum Sf}{nf}$$

Donde:

VFVP - Valor de la fragilidad visual del punto;

S- Superficie analizada;

f - Factores biofísicos;

n - Número de factores considerados.

2.4. Definición de los puntos de observación

Un aspecto importante en la evaluación del impacto visual es la identificación de los observadores potenciales. Las características culturales de los observadores influyen en la interpretación de las vistas del paisaje observado, teniendo en cuenta que el paisaje, aunque idéntico, en el fondo es diferente en la forma de interpretarlo (González-Bernáldez 1981, 1985; Cruz-Pérez & Español-Echániz 2009; Barrasa-García 2010).

La actitud del hombre ante el paisaje y ante la naturaleza, en general, responde, por una parte, a componentes racionales y, por otra, al subconsciente y, en palabras de Tarrason "el espíritu humano, frente al ambiente se comporta de modo emocional" (Tarrason, citado en Barrasa-García 2010).

Los puntos de observación fueron seleccionados tomando como criterio el número de observadores potenciales que transitan por ellos, pudiendo considerarse centros de alto nivel cultural, según las características de las personas que habitan, frecuentan o transitan por estos, lo que da una medida de la magnitud del impacto visual. Esto puede ser definitorio en la modificación del diseño de la explotación minera, como una vía de reducir los impactos visuales negativos de un proyecto.

2.5. Determinación de la cuenca visual

Primeramente fue necesario obtener el modelo digital del terreno con el uso del Surfer 8.0 y Didger 3.02. Para la determinación de la cuenca visual se crearon superficies con curvas de nivel y superficie en 3D. Utilizando las herramientas de Autocad Civil 3d 2010 se determinaron las características de la cuenca visual, desde los puntos de observación (miradores) identificados (Figura 3).

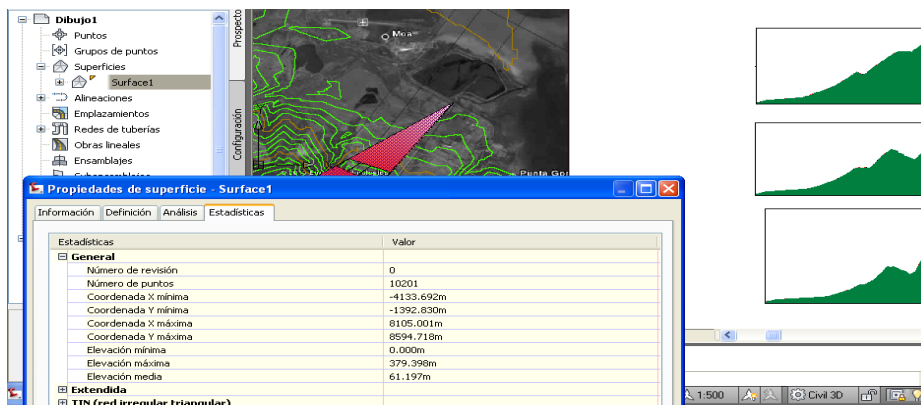


Figura 3. Cálculo automatizado de la cuenca visual.

Para la obtención de las áreas de sombra se realizaron perfiles longitudinales (Figura 4).

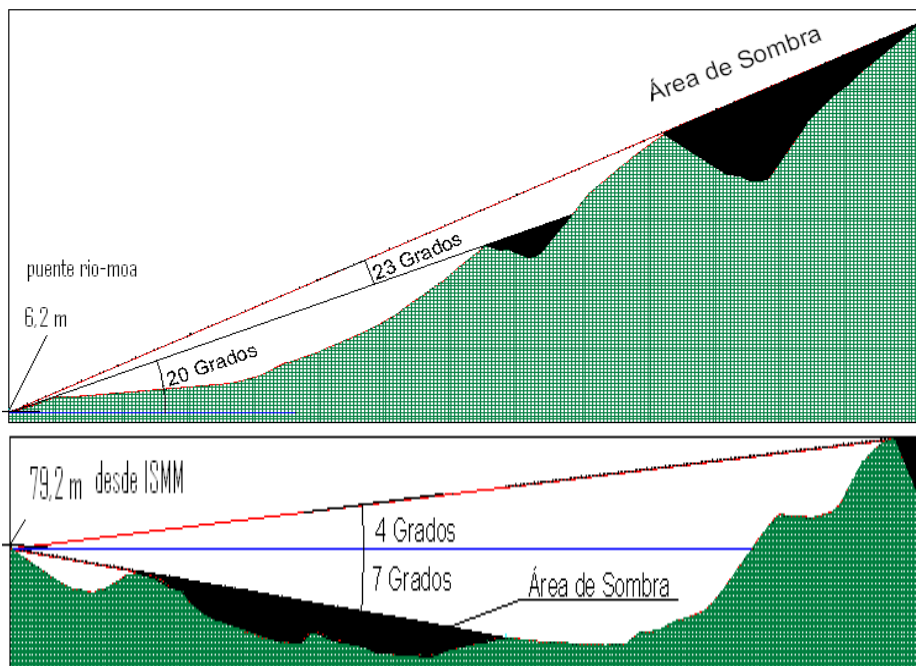


Figura 4. Determinación del área de sombra. Escala vertical 1:50 y horizontal 1:500.

A partir del plano topográfico e imágenes de satélite (Figura 2) se procede al cálculo de la compacidad y tamaño de cuenca visual. La determinación de la compacidad (I_c) se hace a partir de la línea de visión que ofrecen los perfiles. Para esto primeramente se determinó el porcentaje de sombra (H).

$$H = 100 * d/D$$

donde;

D = Distancia media de los perfiles desde el mirador hacia el yacimiento;

d = Longitud media no visible en el tramo analizado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como resultado se obtienen nueve UPV y cinco macrounidades. Se seleccionaron unidades visuales irregulares extensas, en las que uno o varios elementos del medio actuaban como definatorios, en este caso concreto, el relieve y los usos del suelo. Estas unidades presentan, además, cierto grado de autocontención visual, teniendo en cuenta que en muchos casos se ocultan tras las irregularidades del relieve.

Las UPV identificadas aparecen registradas en Tabla 2, mientras la calidad paisajística del yacimiento Punta Gorda para las UPV anteriormente definidas se registra en la Tabla 3.

Tabla 2. Representación porcentual de las unidades de paisaje visual en el yacimiento Punta Gorda

No.	Unidades de paisaje visual	Macrounidad	%
1	Bosque nativo adulto	Vegetación nativa	11,2
2	Embalses de agua	Cuerpo de agua léntico	3,4
3	Ríos	Cuerpo de agua lótico	2,6
4	Plantación de pino adulto	Área reforestada	30,7
5	Obstrucción por taludes sin vegetación	Obstrucciones visuales	18,2
6	Plantación de pino joven	Área reforestada	12,8
7	Obstrucción por taludes con vegetación	Obstrucciones visuales	5,5
8	Vegetación nativa	Vegetación nativa	13,9
9	Otras unidades de paisaje visual	Manigua	1,7

Tabla 3. Valoración paisajística de las unidades de paisaje visual en el yacimiento Punta Gorda

UPV	FISIOGRAFÍA	TOPOGRAFÍA	AGUA	COLOR	USOS DEL SUELO	FONDO ESCÉNICO	RAREZA	VALORACIÓN PAISAJÍSTICA	
Bosque nativo adulto	3	2	-	3	2	3	6	19	Alta
Embalses de agua	1	1	0	1	-	1	1	5	Baja
Ríos	2	1	3	2	-	2	2	12	Moderada
Plantación de pino adulto	3	3	-	2	2	3	3	16	Alta
Obstrucción por taludes sin vegetación	1	2	-	1	0	1	1	6	Baja
Plantación de pino joven	2	2	-	2	2	2	2	12	Moderada
Obstrucción por taludes con vegetación	2	3	-	3	2	3	3	16	Alta
Vegetación nativa	3	2	-	3	2	3	6	19	Alta
Manigua	1	1	-	2	1	2	1	1	Baja

3.1. Valoración de la fragilidad visual de la zona de estudio

Los valores de fragilidad visual obtenidos por cálculos para las unidades de paisaje definidas se muestran en la Tabla 4. Estos fluctúan entre 1 y 3; asignándose por los expertos como valor bajo de 0 a 1,2, moderado a partir de 1,3 y alto entre 1,4 hasta 3. En algunos paisajes, como cuerpos de agua, no fue posible aplicar cada factor; para estos casos se adaptó la fórmula conforme al número de factores que se utilizan.

Tabla 4. Valoración de la fragilidad visual de las UPV del yacimiento Punta Gorda

UPV	Valoración fragilidad visual	
Bosque nativo adulto	1,2	BAJO
Embalses de agua	2,5	ALTO
Ríos	3,0	ALTO
Plantación de pino adulto	1,5	MODERADO
Obstrucción por taludes sin vegetación	2,5	ALTO
Plantación de pino joven	2,5	ALTO
Obstrucción por taludes con vegetación	1,8	MODERADO
Vegetación nativa	1,9	MODERADO
Manigua	2,5	ALTA

3.2. Determinación de los puntos de observación o miradores

Una vez considerados los aspectos determinantes en la selección de los puntos de observación, como resultado se obtiene: el Instituto Superior Minero Metalúrgico ISMM (mirador 1) y el puente sobre el río Moa (mirador 2).

Entendiendo el paisaje como el entorno visual del punto de observación y considerando las características geomorfológicas de la zona de estudio los puntos seleccionados encuentran una cuenca visual con valores que oscilan alrededor del 50 %, de las explotaciones mineras del territorio observado, lo que da una idea del gran impacto visual y sobre el paisaje minero.

3.3. Determinación de la cuenca visual en el yacimiento Punta Gorda

A partir de la metodología se obtienen las características de la cuenca visual, desde los puntos de observación identificados (miradores) que son reflejadas en la Figura 3. En la determinación de la cuenca visual, uno de los primeros resultados que permitieron obtener factores como el tamaño de la cuenca, las áreas de sombra y áreas visibles, entre otros, fue la

construcción de perfiles desde los puntos de observación hasta el yacimiento (Figura 4).

Los valores de compacidad (I) y porcentaje de sombra (H) obtenidos se relacionan a continuación:

Para el mirador 1 (desde ISMM hacia el yacimiento):

$$D = 9\,790,79 \text{ m}$$

$$d = 4\,274,38 \text{ m}$$

$$H = 100 * d/D = 100 * 4\,274,38 \text{ m} / 9\,790,79 \text{ m} = 43,65 \%$$

Índice de compacidad I_c :

$$I_c = 100 - 43,65 \% = 56,35 \%$$

De igual modo para el mirador 2 (desde el puente sobre el río Moa hacia el yacimiento).

$$D = 5\,034,22 \text{ m}$$

$$d = 1\,895,52 \text{ m}$$

$$H = 100d/D = 100 * 1\,895,52 \text{ m} / 5\,034,22 \text{ m} = 37,65 \%$$

$$I_c = 100 - 37,65 \% = 62,35 \%$$

3.4. Determinación del tamaño de la cuenca visual de la zona de estudio

El cálculo de la cuenca visual permite determinar qué porción del territorio es visible desde los puntos fisiográficos elegidos y viceversa. Por los medios automatizados mencionados y sobre la base del modelo digital del terreno se calcula la cuenca visual.

De igual manera, se determina el área visible y el área total, luego la cuenca visual relativa.

$$\text{Área visible desde ISMM } (a) = 1,251 \text{ km}^2$$

$$\text{Superficie total del área de estudio si fuese llano } (A) = 15,210 \text{ km}^2$$

$$\text{Cuenca visual relativa} = 100 * \frac{a}{A} = 100 * 1,251 / 15,210 = 8,22 \%$$

Así mismo para el mirador 2 el puente (río Moa),

$$\text{Áreas visibles desde el puente-río Moa } (a) = 3,664 \text{ km}^2$$

$$\text{Área total del área de estudio si este fuese llano } (A) = 4,210 \text{ km}^2$$

$$\text{Cuenca visual relativa} = 100 * \frac{a}{A} = 100 * 3,664 / 4,210 = 87,02 \%$$

3.5. Determinación de la altura relativa de la zona de estudio

Se determinó la altura relativa de la zona de estudio mediante el uso de los perfiles generados.

Para el mirador 1 (ISMM):

Altura relativa = altura media del área visible - altura del punto de observación

Altura relativa = 61,79 m - 79,2 m = -7,41 m

Así mismo para el mirador 2:

Altura relativa = 61,97 - 6,2 m = 55,77 m.

Para el análisis del impacto visual, además de los resultados obtenidos mediante la determinación de la cuenca visual, el análisis de topografía, el color, la textura y la luminosidad, se realizaron encuestas a expertos. Con el auxilio de fotografías del yacimiento tomadas desde los miradores (ISMM 1, puente sobre el río Moa 2).

Mediante la comparación de los resultados de las características de la cuenca visual y el análisis de la distancia, visibilidad, topografía, color, textura y la luminosidad desde los puntos de observación, se concluyó que el impacto visual es alto desde el mirador 2 y es medio desde el mirador 1.

Desde el punto de vista ambiental, los espectadores que transitan por el lugar perciben un paisaje de mayor fragilidad visual o poca capacidad de absorción visual, por lo que las actuaciones humanas aportan un mayor impacto visual; esto implica la necesidad de adopción de medidas de enmascaramiento u ocultación que posibiliten la mitigación del impacto, dado el grado de deterioro existente.

4. CONCLUSIONES

- El impacto visual que aporta la actividad minera en el paisaje analizado, desde los puntos de observación, abarca una cuenca visual de más del 50 %. El resultado de los cálculos corrobora un mayor impacto visual desde el mirador 2 (puente-río Moa); si se tiene en cuenta que el área visible desde el ISMM es de 1,251 km² y desde el puente-río Moa de 3,664 km². De igual manera, la metodología mostrada expresa las variables más significativas en la valoración del impacto visual para el yacimiento Punta Gorda.
- Los valores de calidad y fragilidad visual que se obtienen como resultado muestran ser elementos de peso a tener en cuenta durante el diseño de un proyecto minero si se considera que dichos elementos pueden decidir en la conservación o modificación del proyecto de

cualquier actividad u objeto dentro de la mina en aras de minimizar el impacto visual.

- Durante el procedimiento desarrollado se aprecia que para identificar, predecir y evaluar el impacto visual, el uso de herramientas informáticas constituyen un factor fundamental para garantizar ahorro de energía y tiempo en la obtención de las características de la cuenca visual, el análisis del color, la textura, la topografía y la luminosidad del paisaje.

5. REFERENCIAS

- Barrasa-García, S. 2010: *Evaluación y cartografía de paisajes visuales en planificación ambiental. Teoría, métodos y técnicas del ordenamiento ecológico y territorial*. Centro de Estudios en Geografía Humana. Michoacán, México, 221-240.
- BLM (U.S.D.I., Bureau of Land Management) 1980: Visual resource management program. Div. of Recreation and Cultural Resource. Stock No.0224-011-000116-6. Government Printing Office, Washington, D.C: U.S.
- Cáncer, P. 1999: *La degradación y protección del paisaje*. Ediciones CÁTEDRA, Geografía Menor, Madrid, 247 p.
- Ceproníquel. 2010: Proyecto de rehabilitación del yacimiento Punta Gorda. 70 p.
- CONAMA. 2007: Antecedentes para analizar el paisaje en el contexto del SEIA. División de Evaluación y Seguimiento Ambiental. Área de Evaluación de Impacto Ambiental. 87 p.
- Consejo de Europa. 2000: Convenio Europeo del Paisaje. Florencia. 10 p.
- Constitución de la República de Cuba. 2003: Gaceta Oficial de la República de Cuba [en línea] edición Extraordinaria número 3 de 31 de enero de 2003. Disponible en: <http://www.cubadebate.cu/cuba/constitucion-republica-cuba/>
- Cruz-Pérez, L. & Español-Echániz, I. 2009: *El paisaje. De la percepción a la gestión*. Ediciones Liteam, Madrid. 202 p.
- Escribano, M. 1991: *El Paisaje*. Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Secretaría General Técnica, Centro de Publicaciones, Madrid, España, 198 p.
- Estévez-González, V. 2012: *Calidad y fragilidad visual del paisaje: MCE, fuzzy logic y GIS*. Tesis de maestría. Universidad Complutense de Madrid. 234 p.
- García-de la Cruz, M.I. 2013: Procedimiento para el reemplazo de los equipos mineros. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, 100 p.

- González-Bernáldez, F. 1981: *Ecología y Paisaje*. Editorial Blume, Madrid, 250 p.
- González-Bernáldez, F. 1985: *Invitación a la ecología humana. La adaptación afectiva al entorno*. Técnicos, Madrid, España, 256 p.
- Karanakova, R. & Panov, Z. 2011: Methodology of Visual Impact Assessment on Surface Mines and Measures of Managing with the Visual Resource for the design of Surface Mines. XIth National Conference with International Participation of the Open and Underwater Mining of Minerals, Varna, Bulgaria, 19-23 June. (Proceedings), 173-180.
- Martínez-Vega, J.; Martín, M. P. & Romero, R. 2003: Valoración del paisaje en la zona de especial protección de aves Carrizales y sotos de Aranjuez, Comunidad de Madrid. *GeoFocus* 3: 1-21.
- Mata-Olmo, R. 2008: El paisaje. Patrimonio y recurso para el desarrollo territorial sostenible. Conocimiento y acción pública. *Arbor* 184(729): 155-172.
- Mateo, J. 2008: *Geografía de los Paisajes*. Primera Parte. Paisajes naturales, Editorial Universitaria, La Habana, 191 p.
- Miravet-Sánchez, B.; García-Rivero, A.; Salinas-Chávez, E.; Cruañas-López, E. & Remond-Noa, R. 2014. Diagnóstico Geoecológico de los paisajes de la cuenca hidrográfica Ariguanabo, Artemisa, Cuba. *Ciencias de la Tierra y el Espacio* 15(1): 53-66.
- MOPTMA. 2004: *Guía para la Elaboración de Estudios del Medio Físico. Contenido y Metodología*. 254 p.
- Montoya-Ayala, R. 1997: La fragilidad del paisaje de los Tuxtlas, Veracruz, México. En: Primera Reunión de Usuarios de IDRISI, Alcalá de Henares. 17 p.
- Montoya-Ayala, R.; Padilla-Ramírez J. & Stanford-Camargo, S. 2003: Valoración de la calidad y fragilidad visual del paisaje en el valle de Zapotitlán de las Salinas, Puebla, (México). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* 35: 123-136.
- Muñoz-Pedrerros, A. 2004: La evaluación del paisaje: una herramienta de gestión ambiental. *Revista chilena de historia natural* 77(1): 139-156.
- NC 93-06-101. 1987: Paisaje. Términos y Definiciones. Sistema de Normas para la Protección del Medio Ambiente. Comité Estatal de Normalización, La Habana, 15 p.
- Salinas-Chávez, E. 1991: *Análisis y Evaluación de los Paisajes en la Planificación Regional en Cuba*. Tesis doctoral. Universidad de la Habana. 187 p.
- Salinas-Chávez, E. & Ramón-Puebla, A. 2013: Propuesta metodológica para la delimitación semiautomatizada de unidades de paisaje de nivel local.

Revista do Departamento de Geografia –Universidad de Sao Pablo 25: 1-19.

Taranco-Segovia, N. 2001: *Ordenación y sostenibilidad ambiental: estudio de caso: El paisaje en la Sierra de Espadán*. Concelleria de Medio Ambiente de la Generalitat Valenciana. 38 p.

Idania Aguilera-Fernández, iaguilera395@gmail.com

Master en Ciencias, Profesora Auxiliar. Departamento de Minería.
Instituto Superior Minero metalúrgico de Moa, Cuba

Yordanis Batista-Legrá, yebatista@ismm.edu.cu

Doctor en Ciencias Técnicas Departamento de Minería.
Instituto Superior Minero metalúrgico de Moa, Cuba

Subash Bastola, sbastola@mirarco.org

Graduate Research Assistant
MIRARCO Mining Innovation. Ontario, Canada

Luis Rojas-Purón, lrpuron@ismm.edu.cu

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Auxiliar del Departamento de Eléctrica.
Instituto Superior Minero metalúrgico de Moa, Cuba

Tratamiento de aguas sulfatadas de origen superficial producidas por una mina de carbón a cielo abierto

Alan Campos-Sánchez
Mayda Ulloa-Carcassés

Resumen

El propósito de este estudio fue seleccionar el método más idóneo de tratamiento de aguas sulfatadas producidas por una mina de carbón a cielo abierto en Venezuela. Muestras de agua tomadas en superficie, medio y fondo de los cuerpos de agua, en tres áreas, fueron sometidas a análisis básico, gravimétrico, volumétrico y colorimétrico. Los resultados indicaron que el pH está en límites permitidos por las normativas ambientales vigentes, mientras los sólidos suspendidos totales, disueltos totales, totales y sulfatos superan los valores normados. Se seleccionó el método humedal aeróbico como el más eficiente para la remoción de sulfatos, en función de las características fisicoquímicas de las aguas sulfatadas provenientes de la mina y por ser sistemas que utilizan la energía natural para purificar el agua, su costo de construcción y mantenimiento es sensiblemente inferior a los tratamientos convencionales y porque, al ser réplicas de ecosistemas naturales, se integran al medio ambiente.

Palabras clave: tratamiento de aguas; aguas sulfatadas; sulfatos; mina de carbón; minería a cielo abierto.

Treatment of sulphated water of surface origin produced by an open pit coal mine

Abstract

The purpose of this study was to select the most suitable method of treatment of sulfated water produced by an open pit coal mine in Venezuela. Samples of water taken on surface, middle and bottom of water bodies in three areas were subjected to basic, gravimetric, volumetric and colorimetric analysis. The results indicated that the pH is within limits permitted by current environmental regulations, while total suspended solids, total dissolved solids, and sulfates exceed the normed values. The aerobic wetland method was selected as the most efficient for the removal of sulfates, depending on the physicochemical characteristics of the sulphated waters from the mine and because they are systems that use natural energy to purify water, its construction and maintenance costs are significantly inferior to the conventional treatments and because, being replicas of natural ecosystems, they are integrated to the environment.

Keywords: water treatment; sulfated waters; sulfates; coal mine; opencast mining.

1. INTRODUCCIÓN

El carbón mineral es una roca sedimentaria de color negro, de fácil combustión, que contiene más del 50 % en peso y más del 70 % en volumen de material carbonoso (incluida la humedad inherente). Se forma a partir de la compactación y el endurecimiento por calor y presión de restos de plantas químicamente alteradas y carbonizadas, durante el tiempo geológico (Guevara 2012).

Es un recurso de gran valor como fuente de exportación para producir energía. Sin embargo, su explotación descontrolada en minas a cielo abierto trae como consecuencia el deterioro de la reserva forestal y del recurso agua, indispensable para la supervivencia de los seres vivos. Al mismo tiempo, es una actividad industrial que por su alto impacto ambiental, social y cultural se considera insostenible, por definición, en la medida en que la explotación del recurso supone su agotamiento.

Este tipo de minería puede tener efectos contaminantes muy serios sobre las aguas superficiales y subterráneas, debido a que en la extracción del carbón mineral se utiliza agua y el drenaje de las mismas puede afectar el ecosistema y la vida acuática en los caños y ríos cercanos, por la generación de importantes cantidades de aguas sulfatadas.

Las aguas sulfatadas son originadas de manera natural. Cuando las rocas que contienen minerales sulfatados se extraen a cielo abierto o en vetas en minas subterráneas, estos materiales reaccionan con el aire o con el agua para formar ácido sulfúrico. El ácido lixivia la roca fuente mientras esté expuesta al aire y al agua. Este proceso se mantiene en el tiempo y puede durar cientos de años, hasta que los sulfatos sean extraídos completamente. El ácido es transportado desde la mina por el agua, las lluvias o por corrientes superficiales y, posteriormente, depositado en los estanques, arroyos, ríos, lagos y mantos acuíferos cercanos, degradando severamente la calidad del agua; además, puede aniquilar la vida acuática (Gamonal 2012).

Es así que los volúmenes de aguas empleados en el proceso productivo de las empresas carboníferas se transforman, por su carga de sulfatos y sólidos, en efluentes altamente contaminantes que producen efectos nocivos como sedimentación, daño a la biota en general (disminución de la población de peces y otros recursos vivos), eutrofización, daños a la salud humana y, principalmente, el deterioro de la calidad fisicoquímica y bacteriológica de los cuerpos de agua.

Por tales razones, esta industria debe garantizar el tratamiento adecuado de sus efluentes para mantener los parámetros de calidad del agua según el

uso que hacen de ella las comunidades en sus entornos, para lograr mantener los estándares y cumplir las normativas establecidos por las leyes ambientales.

La mina objeto de estudio se dedica a la exploración, producción, transporte y comercialización de este mineral. El yacimiento está constituido por más de veinte mantos de carbón explotables, con un espesor total mayor de treinta metros. Se explota a cielo abierto, bajo un sistema de fosa abierta. Es común la acumulación de agua en el fondo de mina, producto de la escorrentía de las lluvias, por lo que debe ser bombeada para continuar con el avance de la minería para poder alcanzar las metas de producción.

No obstante, antes de descargar estos efluentes en los ríos y caños cercanos, se deben someter a tratamiento para la eliminación de los elementos que lo contaminan, no solo para cumplir con ciertas especificaciones que regula el Ministerio del Poder Popular para el Ambiente (MPPA), sino además, para mitigar el impacto ambiental producido con la finalidad de lograr la recuperación de los sistemas afectados y elevar los estándares de políticas ambientales de la empresa carbonífera.

Por esta razón, esta investigación tuvo como objetivo general seleccionar el método idóneo de tratamiento de aguas sulfatadas de origen superficial producidas por una mina de carbón a cielo abierto en la República Bolivariana de Venezuela.

La investigación se justifica en la necesidad de preservar las cuencas hidrográficas de los ríos, riachuelos y caños localizados en el área de influencia de la mina, los que constituyen fuentes de abastecimiento de los embalses de agua que abastecen a la ciudad y a varias comunidades campesinas de la zona de influencia de la mina

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó una investigación de tipo descriptiva, exploratoria de campo, con un diseño no experimental. Se desarrolló a través de las siguientes etapas metodológicas:

2.1. Identificación de impactos ambientales

A través de la bibliografía consultada (Conesa 1997; Canter 1998; Espinoza 2002), la observación directa y consultas a expertos, se determinaron las alteraciones más significativas ocasionadas por la minería a cielo abierto del carbón en función de los factores susceptibles de recibir impactos.

2.2. Determinación de los análisis básicos, gravimétrico, volumétrico y colorimétrico a los cuerpos de agua sulfatadas

Los puntos de muestreo se ubicaron en las tres zonas en que se divide el área de estudio (zona 1, zona 2 y zona 3). Se tomaron muestras de agua en superficie, medio y fondo de los cuerpos de agua y se midieron parámetros, tanto en sitio como en laboratorio, atendiendo a las especificaciones de los exámenes fisicoquímicos realizados por el laboratorio seleccionado.

Para los análisis básicos, volumétricos, gravimétricos y colorimétricos de las muestras se emplearon los procedimientos descritos en el manual *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (2005), que establece que el cálculo del ion sulfato se realiza por el método nefelométrico, mediante turbidímetro nefelométrico.

Los resultados obtenidos se compararon con los límites permisibles establecidos en la norma (Gaceta Oficial No 38.595 2007; Gaceta Oficial No 5.021 1995) y se clasificaron las aguas atendiendo a los niveles de calidad exigibles de acuerdo a los usos a que se destinen: aguas destinadas al uso doméstico y al uso industrial que requiera agua potable (Tipo 1); aguas destinadas al uso agropecuario (Tipo 2); aguas marinas o de medios costeros destinadas a la cría y explotación de moluscos consumidos en crudo (Tipo 3); aguas destinadas a balnearios, deportes acuáticos, pesca deportiva, comercial y de subsistencia (Tipo 4); aguas destinadas para usos industriales que no requieren agua potable (Tipo 5); aguas destinadas a la navegación y generación de energía (Tipo 6); y aguas destinadas al transporte, dispersión y desdoblamiento de poluentes sin que se produzca interferencia con el medio ambiente adyacente (Tipo 7).

2.3. Análisis y selección del método más eficiente para la remoción del sulfato en aguas sulfatadas

Para el análisis y selección del método más eficiente para la remoción del sulfato en aguas sulfatadas se emplearon los criterios de remoción según Guevara (2012), que considera los parámetros: sólidos suspendidos, DBO, DQO, nitrógeno, fósforo, patógenos y metales pesados. De igual manera, se tuvo en cuenta las limitantes establecidas por el Ministerio de Energía y Petróleo de la República Bolivariana de Venezuela, respecto a considerar en la selección, aspectos económicos, ambientales y socioculturales.

3. RESULTADOS

3.1. Identificación de los impactos ambientales

El drenaje proveniente de las aguas del proceso de extracción del carbón mineral produce degradación física, química y biológica sobre el hábitat y la vida acuática en los caños y ríos del área de influencia de la mina (Tabla 1).

Tabla 1. Principales impactos ambientales del sulfato en el agua

Aspecto	Relación
Físico/Químico	Procesos químicos que hacen que el azufre contenido en el carbón mineral contamine el aire, agua y la tierra
Biológicos	Alteración de la cuenca de los ríos del área de influencia
Humanos	Pauperización de indígenas y aborígenes

3.2. Determinación de los análisis básicos, gravimétrico, volumétrico y colorimétrico a los cuerpos de agua sulfatadas

Las Tablas 2 y 3 muestran los parámetros que fueron medidos, tanto en sitio como en laboratorio, atendiendo a las especificaciones de los exámenes fisicoquímicos realizados por el laboratorio. Los resultados comparados con los límites máximos permisibles para aguas destinadas al uso doméstico y al uso industrial que requiera agua potable (Tipo 1) aparecen en la Tabla 4.

Tabla 2. Parámetros determinados en sitio a las aguas sulfatadas de origen superficial producidas por la mina de carbón a cielo abierto

Parámetros	Método selectivo	Norma asociada
pH	Electrodo selectivo	SMWW 4500-OG
Temperatura (°C)	Electrodo selectivo	SMWW 2550-B
Oxígeno Disuelto (mg/L)	Electrodo selectivo	SMWW 4500-NO2-B
Salinidad (%)	Electrodo selectivo	SMWW 2550-B
Conductividad (µmhos/cm)	Electrodo selectivo	SMWW 2550-B
Color Real (Uc-Pt-Co) (BN)	Comparación Visual	SMWW 2120-B
Sólidos Suspendidos Totales (SST, mg/L)	Gravimétrico	SMWW 2540-D
Sólidos Disueltos Totales (SDT, mg/L)	Gravimétrico	SMWW 2540-C
Sólidos Totales (ST, mg/L)	Cálculos	No aplica
Turbidez (NTU)	Turbidimétrico	SMWW 2130-B
Dureza (mg/L)	Volumétrico	SMWW 2340-C
DBO (mg/L)	Electrodo selectivo	SMWW 5210-B

DQO (mg/L)	Volumétrico	SMWW 5220-B
Aceites y Grasas (mg/L)	Gravimétrico	SMWW 5220-B
Hidrocarburos (mg/L)	Gravimétrico	SMWW 5220-B
Sulfuros (mg/L)	Volumétrico	SMWW 4500-S ² -F
Fósforo total (mg/L)	Colorimétrico	SMWW 4500-P,B,E
Sulfatos (mg/L)	Turbidimétrico	SMWW 4500-SO ₄ ²⁻ -E
Nitrógeno Total (mg/L)	Cálculos	No aplica
Nitratos (mg/L)	Colorimétrico	SMWW 4500-NO ₃ -E
Nitrito (mg/L)	Colorimétrico	SMWW 4500-NO ₂ -B

Tabla 3. Elementos determinados por el método de plasma inductivamente acoplado a las aguas sulfatadas producidas por la mina de carbón. Norma asociada: SMWW 3120-B

Elementos	
Aluminio (mg/L)	Sílice (mg/L)
Vanadio (mg/L)	Boro (mg/L)
Cinc (mg/L)	Cromo (mg/L)
Níquel (mg/L)	Calcio (mg/L)
Cobre (mg/L)	Potasio (mg/L)
Plomo (mg/L)	Manganeso (mg/L)
Arsénico (mg/L)	Magnesio (mg/L)
Cadmio (mg/L)	Hierro (mg/L)

Tabla 4. Comparación de los valores obtenidos en las tres zonas con los valores límites normados

Tipo de análisis	Parámetros	Superficie (0 m)	Medio (20 m)	Fondo (40 m)	Límite ambiental permisible
Zona 1					
Básico	pH	8,37	8,30	8,31	6-9
Gravimétrico	SST (mg/L)	4,00	<1,00	<1,00	80
Gravimétrico	SDT (mg/L)	7 712	7 676	7 736	---
Gravimétrico	ST (mg/L)	7 716	7 676	7 736	---
Colorimétrico	Sulfatos (mg/L)	6439,08	5812,83	5712,1	1 000
Zona 2					
Básico	pH	8,45	8,47	8,46	6-9
Gravimétrico	SST (mg/L)	4,00	<1,00	<1,00	80
Gravimétrico	SDT (mg/L)	7 724	7 676	7 640	---

Gravimétrico	ST (mg/L)	7 724	7 676	7 740	---
Colorimétrico	Sulfatos (mg/L)	5 824,08	5 387,87	5 600,35	1 000
Zona 3					
Básico	pH	8,45	8,47	8,46	6-9
Gravimétrico	SST (mg/L)	4,00	<1,00	<1,00	80
Gravimétrico	SDT (mg/L)	7 932	7 374	7 374	---
Gravimétrico	ST (mg/L)	7 932	7 374	7 374	---
Colorimétrico	Sulfatos (mg/L)	5 790	5 792	5 309	1 000

Tabla 5. Comparación de los datos obtenidos del análisis volumétrico de las aguas sulfatadas con lo establecido en el Decreto 883

Parámetros	Superficie (0 m)	Medio (20 m)	Fondo (40 m)	Límite permisible Decreto 883 Capítulo III. Sección III. Artículo 10
Zona 1				
Dureza (mg/L)	5 696	3 702	3 822	*
DBO (mg/L)	<2,0	<2,60	<2,60	60
DQO (mg/L)	5,88	5,88	6,86	350
Zona 2				
Dureza (mg/L)	3 361,84	3 742,32	3 742,32	*
DBO (mg/L)	<2,0	<2,60	<2,60	60
DQO (mg/L)	4,90	5,88	5,88	350
Zona 3				
Dureza (mg/L)	3 983,76	4 064,24	3 863,04	*
DBO (mg/L)	<2	<2	<2	60
DQO (mg/L)	5,39	5,88	6,84	350

En el análisis de los resultados se destacan los valores de las concentraciones de sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos totales, sólidos totales y sulfatos, ya que estos son los de mayor interés por parte de la empresa carbonífera.

3.3. Análisis y selección del método más eficiente para la remoción del sulfato en aguas de minas de carbón

Las técnicas más usuales para la remoción de los sulfatos en minas de carbón a cielo abierto se localizan en los métodos terciarios o de remediación, que tienen como objetivo recolectar y tratar el drenaje contaminado. Estos métodos terciarios se dividen en tratamientos activos y pasivos.

La selección de las técnicas, sobre la base de lo planteado por Aduvire (2006) y Guevara (2012), se fundamentó en factores económicos y medioambientales y tomando en cuenta las ventajas y desventajas de los mismos. De igual manera, el Ministerio de Energía y Petróleo, organismo rector de la empresa carbonífera, estableció como condicionantes para la selección del método los aspectos económicos, ambientales y socioculturales.

Los resultados obtenidos permitieron determinar que el método terciario más indicado para el tratamiento de las aguas sulfatadas en la mina caso de estudio es el pasivo biótico, de tipo humedal aeróbico, debido a que son característicos para flujos superficiales y, a su vez, cumple con condiciones de mantenimiento y costo de construcción mínimas y garantiza la remoción de los contaminantes.

4. DISCUSIÓN

De la evaluación fisicoquímica de las muestras de agua y sedimento provenientes de los tres puntos de muestreo y su comparación con los límites máximos permisibles en las normas ambientales se obtuvo lo siguiente:

- Los valores de las concentraciones de SST (en superficie, medio y fondo) cumplen con los límites permisibles de la norma.
- El contenido de sulfatos no cumple con la normativa legal establecida.
- Todas las concentraciones de SST, SDT, ST y sulfatos, en las muestras evaluadas, se mantienen en rangos de valores elevados para un cuerpo de aguas que descarga en forma directa a ríos, embalses o lagos.
- El pH de las aguas sulfatadas tiene un valor de 8, cumpliendo con los límites establecidos en la ley.
- Las concentraciones de los elementos metaloides y no metaloides cumplen con los límites establecidos en la norma.

El método de humedal aeróbico es el método más eficaz a aplicar en las aguas sulfatadas de origen superficial, producidas en una mina de carbón a cielo abierto, para la remoción de sulfato, no solo por su utilidad en la captación o inmovilización de contaminantes, ya que involucra fenómenos como: floculación, precipitación, co-precipitación, sedimentación, filtración, absorción, adsorción, volatilización, complexación (formación de complejos), intercambio aniónico, intercambio catiónico, captación de nutrientes por

parte de las plantas y las reacciones de oxidación-reducción (Tabla 6), sino también por ser sistemas que utilizan la energía natural ambiental para purificar el agua, presenta costo de construcción y mantenimiento sensiblemente inferior a los tratamientos convencionales y por ser réplicas de ecosistemas naturales, se integran muy bien al medio ambiente y ofrecen una alternativa de alto valor ecológico y estético para el tratamiento de residuos.

Tabla. 6 Relación entre los principales parámetros fisicoquímicos y los mecanismos fisicoquímicos mediante los cuales se logra su remoción en un humedal

Parámetros	Principales mecanismos de remoción
Sólidos suspendidos	Sedimentación, precipitación y filtración
DBO y DQO	Sedimentación de materia orgánica, filtración, absorción, degradación microbiana (aerobia y anaerobia) ejercida principalmente por bacterias que crecen sobre la superficie de las plantas o que forman parte de las biopelículas (biofilms) del humedal
Nitrógeno	Amonificación, nitrificación, desnitrificación, volatilización, asimilación por parte de plantas y microorganismos
Fósforo	Absorción, precipitación (con aluminio, hierro, calcio...), adsorción, captación por parte de las plantas y microorganismos
Patógenos	Sedimentación y filtración, depredación, muerte natural, muerte por acción de la radiación ultravioleta, secreción de antibióticos desde las raíces de las plantas
Metales pesados	Absorción en las raíces de las plantas y detritos, sedimentación, precipitación, filtración

5. CONCLUSIONES

- Los principales impactos ambientales de la minería del carbón se manifiestan en la contaminación del aire, del agua y de la tierra debido a procesos químicos del azufre contenido en el carbón mineral, alteración de la cuenca del área de influencia de la mina y pauperización de indígenas.
- Los resultados obtenidos de la evaluación fisicoquímica de las aguas sulfatadas de origen superficial producidas por la mina de carbón a cielo abierto mostraron en los puntos de las zonas 1, 2 y 3 valores de Ph (en superficie, medio y fondo) de 8, cumpliendo así con los límites establecidos por la ley, de igual forma que los elementos metaloides y no metaloides; no obstante, las concentraciones SST, SDT, ST y

sulfatos (en superficie, medio y fondo) mantienen rango de valores elevados para un cuerpo de aguas que descargue de forma directa o indirecta a ríos, embalses o lagos.

- El análisis de los métodos de remoción de sulfatos permitió seleccionar como el más eficiente, en función de las características fisicoquímicas de las aguas sulfatadas provenientes de la mina, el de tipo de humedal aeróbico, no solo por su utilidad en la captación y/o inmovilización de contaminantes, sino también por ser sistemas que utilizan la energía natural para purificar el agua, presenta costo de construcción y mantenimiento sensiblemente inferior a los tratamientos convencionales y al ser réplicas de ecosistemas naturales se integran al medio ambiente.

6. REFERENCIAS

- ADEVIRE, O. 2006: Drenaje ácido de mina. Generación y tratamiento. Instituto Geológico y Minero de España. Disponible en: http://info.igme.es/SIDIMAGENES/113000/258/113258_0000001.pdf
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA), (2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21th.
- CANTER, L. 1998: *Manual de evaluación de impacto ambiental. Técnicas para la elaboración de los estudios de impacto*. McGraw Hill, España.
- CONESA, V. 1997: *Guía metodológica para la evaluación de impacto ambiental*. 3 ed. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- DECRETO 883. Normas para la Clasificación y el Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua y Vertidos o Efluentes Líquidos. *Gaceta Oficial de la República de Venezuela* No 5.021, Caracas, 11 de octubre de 1995.
- ESPINOZA, G. 2002: Fundamentos de evaluación de impacto ambiental. Banco Interamericano de Desarrollo, BID y Centro de Estudios para el Desarrollo, CED, Santiago, Chile.
- GAMONAL, P. 2012: Tratamiento de drenaje de ácidos de minas en humedales construidos. Disponible en: www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid...84d0
- GUEVARA, A. 2012: Utilización de los humedales construidos en el tratamiento del drenaje ácido de minas. Disponible en: <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/7010/2/145088.pdf>
- LEY DE AGUAS. *Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela* No 38.595, Caracas, 2 de enero de 2007.

Alan Campos-Sánchez, alantesiempre@gmail.com

Máster en Geología. Instituto Universitario de Tecnología de Maracaibo. Zulia
Venezuela

Mayda Ulloa-Carcassés, mulloac@ismm.edu.cu

Doctora en Ciencias Económicas. Profesora Titular

Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba

La minería en la cultura cubana

Virginia Costa-Llanos
Daniellis Rodríguez-Mejías

Resumen

Este trabajo constituye un abordaje preliminar al tema con vistas a fomentar la investigación de la dimensión social de la minería cubana y destacar su contribución al desarrollo de la identidad nacional. La minería se ha caracterizado por representar un proceso productivo industrial signado por el deterioro ambiental y humano. Esta actividad, igual que todas, muestra el desempeño de una diversidad de tareas que dejan huellas en la formación de una cultura productiva y social.

Palabras clave: minería; sociedad; cultura cubana e identidad.

The mining in the Cuban culture

Abstract

This work constitutes a preliminary approach to the theme to promoting research on the social dimension of Cuban mining and highlighting its contribution to the development of national identity. Mining has been characterized as representing an industrial production process marked by environmental and human deterioration. This activity, like all, shows the performance of a diversity of tasks that leave traces in the formation of a productive and social culture.

Keywords: mining; society; Cuban culture and identity.

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo constituye un abordaje preliminar con vistas a fomentar la investigación de la dimensión social de la minería y destacar su contribución al desarrollo de la cultura e identidad cubanas. La minería se ha caracterizado por representar un proceso productivo industrial signado por el deterioro ambiental y humano. Esta actividad, igual que otras, muestra el desempeño de una diversidad de tareas que dejan huellas en la formación de una cultura productiva y social.

El lugar que ocupan las migraciones en el surgimiento y desarrollo de la minería otorga a los productos que genera características que se articulan en diversos y múltiples aspectos, las cuales abarcan desde las rebeliones de esclavos hasta el imaginario colectivo y marcan con sus huellas la historia y el saber.

Los antropólogos clasifican las culturas prehistóricas asignando, en la generalidad de los casos, un espacio fundamental a la utilización de la piedra y los metales. Otros teóricos denominaron así a los distintos estadios culturales, indicando cuál era el material utilizado por los hombres en cada periodo: edad de piedra, edad de bronce.

El empleo por el hombre de materiales pétreos, junto a la domesticación de animales y el cultivo de cereales, ha sido señalado por los estudiosos como un hito en el progreso social. El antropólogo Lewis Morgan (1986) fijó que la producción de metales es el elemento sobre el que descansa la base de la civilización.

El desarrollo de la actividad minera se encuentra unido al avance de una nación, porque la necesidad del consumo de minerales aumenta año tras año, por eso la minería se incrementa de una manera ininterrumpida. La minería, la sed de oro, la obtención de metales preciosos, en general, fue el motor del descubrimiento del Nuevo Mundo; y también el mayor impulso a la expansión española en América.

2. DESARROLLO

Hasta fines del siglo XVIII la economía del Imperio ultramarino descansó en la explotación de minas. La primera actividad económica de la Conquista fue la minería, que se mantuvo durante la Colonia y la República. En el Caribe hispano se encuentran las dos primeras explotaciones mineras de América y en América Latina la tradición minera ha estado vinculada al crecimiento de las comunidades más antiguas de la región.

La minería en Cuba presenta algunas características que permiten definirla: su extensión en el tiempo y el papel de confluencia de la multirracialidad,

puesto que constituyó un espacio ocupado por migraciones que permitieron la inserción, en lo más íntimo del ser cubano, de nuevas manifestaciones culturales expresadas en diferentes aspectos, como la religiosidad popular o en el propio devenir histórico a través de rebeliones de esclavos y movimientos obreros.

Aunque el azúcar, el café y el tabaco juegan en la formación de la identidad nacional un papel significativo, también lo tiene la minería, aunque no esté reconocido. Esta se ha caracterizado por representar un proceso productivo industrial signado por el deterioro del medio ambiente y de la raza humana; si bien dicha industria muestra el desempeño de una diversidad de tareas complejas que dejan sus huellas en la formación de nuestra cultura productiva y social.

Como todas las actividades económicas, la minería en su desarrollo da origen a una serie de hechos culturales que, generalmente, son analizados como independientes. El proceso tecnológico, que comienza desde la extracción del mineral hasta culminar en el producto que va al mercado, incluye un proceso cultural. Se hallará presente la explotación aborígen, esclavitud negra, luchas sociales, mestizaje biológico y cultural, embarcadero, ferrocarril, inversiones extranjeras, migraciones, asentamientos, enclaves económicos. Todo ello da por resultado un impacto cultural derivado en la arquitectura, religión, la educación, el idioma, el deporte... todos los factores de la vida social están, de algún modo, ligados a los procesos de la actividad minera y sin la cual no podrían ser explicados. Hay una cultura que carece de calidad material, que está presente en las costumbres, creencias, lengua, la idiosincrasia de la sociedad y que revela una identidad regional (Costa-Llanos 2001).

La porción oriental de la isla de Cuba fue y es un territorio con diferencias regionales muy marcadas. La minería del sur se distingue de la del norte, no solo en el espacio y en el tiempo, sino también en la diversidad de la producción y en el nivel de desarrollo. Surgen en condiciones históricas muy distintas y atraviesan procesos históricos y culturales, desiguales. En 1533 ocurrió, en la encomienda de las minas de Jobabo, el primer alzamiento de esclavos del cual se tiene noticia documentada.

En Santiago del Prado (El Cobre) se llevó a cabo el beneficio de ese mineral más antiguo de América. Desde finales del siglo XVI se explotaban los yacimientos del cerro de Cardenillo, al oeste de la bahía de Santiago de Cuba; en un momento determinado se utilizaron camellos para el traslado del mineral hasta el puerto. En estas minas trabajaban no solo los cobreros (esclavos que extraían el mineral), sino también aborígenes y canarios que

ejecutaban labores más complejas. La explotación de estas minas motivó una particular concentración de fuerza de trabajo esclava que, a la postre, traería notables consecuencias para la historia de las luchas sociales en la región (Portuondo-Zúñiga 1996).

Los obreros, luego de un siglo de enfrentamiento con las autoridades coloniales, obtuvieron la libertad en 1801; casi un siglo antes de decretarse la abolición de esa institución en Cuba. Es un hecho de la historia del país de obligada referencia al hablar de la dimensión social de la minería, recogido felizmente por José Luciano Franco en su libro *Las minas de Santiago del Prado y la rebelión de los obreros*.

La coincidencia en la mina de blancos, negros y aborígenes propició la formación del culto a la Virgen de la Caridad, patrona de Cuba. A diecisiete kilómetros de la ciudad de Santiago de Cuba el poblado de El Cobre, en una etapa de cierre de minas, acondicionó tres galerías como museo y cuenta con el santuario, corazón de la religiosidad popular cubana. Si bien El Cobre es centro de catolicismo y religiosidad popular (en la que se utilizan piedras y algunos minerales, piedra de rayo, imán, entre otras, para actividades prácticas y litúrgicas) en la minería del norte de Oriente, específicamente en los enclaves norteamericanos (Moa, Nicaro, Felton), la religión mayoritaria es la protestante, con sus diferentes denominaciones.

También la arquitectura vinculada al desarrollo minero nororiental presenta diversos sistemas constructivos en las distintas comunidades.

Una investigación sociolingüística en comunidades mineras (Carralero & Vicente 2010) nos ha permitido tener una visión, que debe ampliarse, del acto comunicativo entre los mineros en el marco de sus actividades productivas. Varios préstamos lexicales del inglés están condicionados por hechos extralingüísticos que dependen del desarrollo histórico de la sociedad cubana (Figuerola & Soto 1988).

De manera que entre los factores que precisan ser estudiados para conocer mejor la cultura e identidad de la Isla está el entorno creado por la minería. Los productos formativos de la actividad van más allá de los cambios tecnológicos generados para hacerla más beneficiosa o de las vertientes comerciales de su producto y su influencia en la estabilidad europea o norteamericana.

Hay un universo estético vinculado a la minería, tanto a escala nacional como internacional. La vida del minero se ha plasmado en la literatura en obras como *Germinal*, de Zola y la fiebre del oro fue llevada al cine por Chaplin en *La quimera del oro*. El cante jondo ha sobrevivido a las

explotaciones mineras españolas donde nació, inspirado en la actividad constructiva y destructora de la vida de esos hombres (Ayala-Carcedo 2000).

Esa dimensión humana puede tratarse multidisciplinariamente. En la historia del arte y de la cultura cubana hay valiosos testimonios que tienen su punto de partida en la minería.

La cantera de San Lázaro en la que el joven José Martí fue condenado a realizar trabajos forzados en 1870 puede ser considerado patrimonio cultural cubano, como también su ensayo *El presidio político en Cuba*, que constituye la narración del horror vivido. En la Isla de Pinos, donde estuvo deportado, fue acogido por Sardá, el dueño de la hacienda El Abra, en la que existía una mina de mármol.

Tanto Piron, en el siglo XIX (Piron 1995, reedición de Editorial Oriente); como Hazard (1928) a inicios del XX, describen el poblado de El Cobre; el primero se refiere a las ferias que allí se celebraban y el segundo cuenta las terribles condiciones de trabajo de los mineros.

En la primera mitad del siglo XIX comienza la penetración extranjera en la minería, pero no es hasta la segunda mitad del mismo siglo en que las inversiones norteamericanas adquieren una proporción considerable. Puede ser este el momento en que aparece el daiquiri, el famoso coctel cubano, gestado (según la leyenda) en esas minas de manganeso santiagueras, la de Daiquiri, cuando un ingeniero en minas norteamericano intentó mezclar ron con limón para aliviar el calor o el tedio.

La entrada del ejército interventor en 1898 y la disposición de Leonardo Wood de que se organizara todo lo relativo a la minería cubana entregan esta riqueza, en forma absoluta, a manos extranjeras.

3. CONCLUSIONES

- Para abordar, como proceso histórico, la historia y la cultura de la minería, sus aportes históricos y culturales, se precisa una inmensidad de tareas que abarca desde una periodización de la actividad, a partir sus orígenes, el establecimiento de momentos históricos, hasta el estudio de la jerga (si puede llamarse así), su extensión y profundidad.
- Con relación a su rol como elemento histórico e identitario reconocido en Cuba pudieran contestarse las siguientes preguntas: ¿Ha sido portadora o no la minería de alguna tradición enraizada en el alma del pueblo cubano? ¿Lega alguna huella indeleble a la historia o la cultura cubana? ¿Existe un universo estético inherente a la minería?

¿Es la minería, más allá de sus inicios, de desmonte de tierras, una actividad eminentemente masculina? Estas pueden dimensionarse al Caribe o, al menos, a Cuba y a La Española.

- Si, como dijera Barnet (2005), de "aprender a ver lo cubano con óptica antropológica" se trata, es insoslayable incluir la minería.

4. REFERENCIAS

- AYALA-CARCEDO, J. F. 2000: Patrimonio natural y cultural y desarrollo sostenible. En: *Patrimonio geológico y minero en el marco del desarrollo sostenible*. Ed. Isabel Rábano, Madrid.
- BARNET, M. 2005: Editorial. *Catauro Revista cubana de antropología* 7(12):4.
- CARRALERO, S. & VICENTE, Y. 2010: Lenguaje, comunicación e identidad en la región minera de Moa. *Espéculo: Revista de estudios literarios*. Consulta: 4 enero 2014. Disponible en: <http://www.ucm.es/info/especulo/numero44/leminero.html>
- COSTA-LLANOS, V. 2001: Comunidades mineras y patrimonio cultural. *Minería y Geología* 18(2).
- FIGUEROA, V. J. & SOTO, L. D. 1988: Características lingüísticas del vocabulario de la minería a cielo abierto en Moa. *Revista Santiago* 70 sep.
- FRANCO, J. L. 1975: *Las minas de Santiago del Prado y la rebelión de los cobreros, 1530-1800*. Editorial de Ciencias Sociales, La Habana.
- HAZARD, S. 1928: *Cuba a pluma y lápiz: la siempre fiel isla*. 3 tomos. Cultural S. A., La Habana.
- MORGAN, L. 1986: *La sociedad primitiva*. 2^{da} Ed. Ediciones Quinto Sol, 559 p.
- PORTUONDO-ZÚÑIGA, O. 1996: *Santiago de Cuba desde su fundación hasta la guerra de los 10 años*. Editorial Oriente, Santiago de Cuba.
- PIRON, H. 1995: *La isla de Cuba*. Editorial Oriente, Santiago de Cuba.
- EXGEO. 2001: Report of the integrated Study LL-05 Field. Informe PDVSA. Maracaibo, Edo Zulia.
- EXGEO C.A. PDVSA. 2005: Actualización y revisión del modelo estático y dinámico y plan para el desarrollo del yacimiento LL-05. Maracaibo, Edo Zulia.
- GALLARDO, H. 2012: *Modelo de flujo por imbibición en yacimientos fracturados*. Trabajo de Tesis. Universidad Nacional Autónoma de México.
- LUGO, J. 1992: Historia tectónica a lo largo de los sistemas de fallas de Icotea y Pueblo Viejo, cuenca de Maracaibo. VI Congreso Venezolano de Geofísica. Memorias. Caracas, p. 118-124.

Virginia Costa-Llanos, ycllanos@ismm.edu.cu

Máster en Estudios Cubanos y del Caribe.
Departamento de Extensión Universitaria.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba

Daniellis Rodríguez-Mejías, drmejias@ismm.edu.cu

Lic. En Estudios Socioculturales.
Departamento de Extensión Universitaria.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba