

Modelos de resistividad eléctrica en formaciones geológicas del sur de Cuba occidental

José Antonio García-Gutiérrez
Carlos Sacasas-León

Resumen

El propósito de este estudio fue desarrollar modelos de resistividad eléctrica en las formaciones geológicas de mayor interés para los estudios ingeniero-geológicos en la parte sur de Cuba occidental. Para ello se elaboró un procedimiento de generalización de información geoelectrica de archivo, cuyo resultado final fueron los referidos modelos geoelectricos. Se registraron 48 obras, con 895 sondeos eléctricos verticales, de ellos 317 (35,4 %) situados junto a perforaciones (paramétricos). Se definieron tres modelos para la formación Paso Real y uno para Capdevila, las más distribuidas en la región de estudio. Los mayores valores promedio de resistividad eléctrica lo poseen las arenas cuarzosas superficiales del municipio Sandino ($1\ 241\ \Omega\cdot m$), mientras que en el horizonte inferior no exceden de $86\ \Omega\cdot m$, debido al aumento del grado de humedad y del contenido de arcilla de las rocas. Con base en los modelos se analizó la efectividad del método de resistividad eléctrica para resolver tareas básicas de los estudios ingeniero-geológicos. La evaluación del espesor de los suelos arcillo-arenosos de cubierta fue favorable en ambas formaciones geológicas, mientras que la determinación de la profundidad del nivel freático fue desfavorable. Las restantes tareas varían entre relativamente favorable y desfavorable según la formación geológica.

Palabras clave: modelación geofísica; resistividad eléctrica; sondeo eléctrico vertical (SEV); cuenca Los Palacios.

Electrical resistivity models in geological formations in southern of the east of Cuba

Abstract

The purpose of this study is to develop electrical resistivity models in geological formations of greater interest for geological engineering in the southern area of the East of Cuba. A procedure for the generalization of the geo-electrical database was prepared to generate the referred geo-electrical models. A total of 38 works with 895 vertical electrical surveys, of which 317 (35.4%) located near (parametrical) drills. Three models for the Paso Real formation and one for the Capdevila, the most distributed in the region under investigation were defined. The surface quartz sands from the municipality of Sandino were identified to have higher electrical resistivity averages ($1241 \Omega \cdot m$), while they do not exceed $86 \Omega \cdot m$ in the lower horizons to resolve basic tasks of the geological engineering investigations. The assessment of the cover clayey sandy soils was satisfactory in both geological formations while the determination of the water table depth was unfavorable. The remaining tasks varied between relatively favorable to unfavorable according to the geological formations.

Keywords: geophysical modeling; electrical resistivity; vertical electrical survey (VEF); Los Palacios basin.

1. INTRODUCCIÓN

La realización en Cuba de mediciones geoeléctricas aplicadas a la hidrogeología y la ingeniería geológica se inicia a mediados de la década de los sesenta del siglo XX, con la llegada de asesores de la entonces Unión Soviética y otros países para apoyar los planes de desarrollo económico del país. La acumulación en archivos técnicos de varias entidades de una cantidad apreciable de información relacionada con este método geofísico, constituye un verdadero *archivo geoeléctrico* del territorio nacional. Solo en la dependencia provincial de Pinar del Río de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) se dispone en la actualidad de más de 1 500 puntos de sondeo eléctrico vertical (SEV) y varias decenas de imágenes eléctricas 2D, ubicados en diferentes formaciones geológicas.

La conservación y aprovechamiento de la información geofísica de archivo, basado en el amplio uso de las tecnologías de información, es una práctica común en los países más desarrollados en las geociencias (Tulstrup 2004; USGS 2016), lo que también se conoce como Informática Geofísica (*Geophysical Informatics*) (Peng *et al.* 2015).

En Cuba, el análisis sistemático de la información geológico-geofísica de archivo es una práctica común en la prospección petrolera y minera, donde se realiza una evaluación integral de los materiales anteriores antes de emprender nuevas campañas geofísicas y de perforación de pozos, por demás muy costosas. Sin embargo, como evidencia la experiencia del autor y la búsqueda realizada en distintas fuentes de información, esto no se cumple de la misma forma en la llamada geofísica ingenieril o superficial.

El primer antecedente de sistematización de cortes geoeléctricos en Cuba corresponde al geofísico soviético Kuba (1973), quien estableció una relación de cortes característicos en diferentes regiones de Cuba donde están presentes las rocas calizas, y su significación para la búsqueda de reservas de agua explotable.

En años posteriores, durante los levantamientos geológicos y de búsqueda de minerales sólidos a escalas 1:50 000 y 1:100 000, llevados a cabo en diferentes polígonos del país, incluyendo las partes central y meridional de la antigua provincia de Pinar del Río (Martínez, Fernández De Lara & Peláez 1988; Barrios *et al.* 1988), se obtuvieron valores estadísticos de la resistividad eléctrica de las rocas de las principales formaciones geológicas, a partir de mediciones de SEV y, sobre todo, de mediciones de pozo.

Un aporte a la generalización de resultados de la aplicación del método de SEV en la ingeniería geológica la presenta García (1996) que tomando como base los resultados del empleo del SEV en las investigaciones de 10

complejos hidráulicos en la zona premontañosa de la provincia de Pinar del Río, destaca los cortes geoelectricos característicos, con una tabla resumen comparativa sobre las posibilidades de este método en la solución de diferentes tareas ingeniero-geológicas. Más tarde, este autor llevó a cabo otro trabajo similar para las rocas serpentizadas de dicha provincia (García 2011).

Una modalidad desarrollada en los últimos años por autores cubanos y angolanos consiste en la reutilización de materiales geoelectricos de archivo para desarrollar nuevas aplicaciones. En un primer ejemplo, a partir de sondeos eléctricos verticales ejecutados en la provincia de Luanda, República de Angola, se implementó en plataforma SIG (Sistema de Información Geográfica) una base de datos integral y un catálogo de curvas de SEV, que permitió establecer las áreas más favorables para la prospección eléctrica de aguas subterráneas en dicha provincia (Fundora, Catanha & Alaminos 2011). También en Luanda, Pereira de Barros *et al.* 2015 utilizaron curvas de SEV medidas para estudios hidrogeológicos para determinar parámetros geotécnicos del suelo.

En el campo de las aplicaciones a la hidrogeología, se destaca la contribución de Vidal-Méndez 2008, quien propone una expresión para calcular la conductividad hidráulica media de un acuífero en función de la resistividad eléctrica media de las rocas saturadas, obtenida mediante sondeos eléctricos verticales.

Las curvas de SEV realizadas con diferentes objetivos se han empleado también para la elaboración de mapas regionales de resistividad (o conductividad) eléctrica (Bashkuev *et al.* 2008; García & Sacasas 2016).

En la investigación que sirve de base al presente artículo, la vía seleccionada de generalización de materiales de archivo consistió en la elaboración de modelos de resistividad eléctrica en las principales formaciones geológicas de la región de estudio. Al mismo tiempo, se propuso mostrar su aplicación para analizar la efectividad del método de resistividad eléctrica en la solución de tareas de ingeniería geológica, como determinar el espesor y composición de los suelos de cubierta, espesor de las rocas meteorizadas, profundidad del nivel freático y otras en las formaciones estudiadas.

Debe señalarse que los referidos modelos de resistividad eléctrica superan en alcance las caracterizaciones por la resistividad eléctrica de formaciones geológicas individuales, al incorporar la dimensión de profundidad. Por otra parte, guardan relación con los modelos clásicos empleados en la solución

de las tareas directa e inversa de la prospección eléctrica con corriente continua (Keller & Frischknecht 1966; Orellana 1982).

La región de estudio se enmarca en la denominada Cuenca Los Palacios, la cual se extiende al sur de la Cordillera de Guaniguanico, separadas ambas por la falla Pinar (Figura 1).

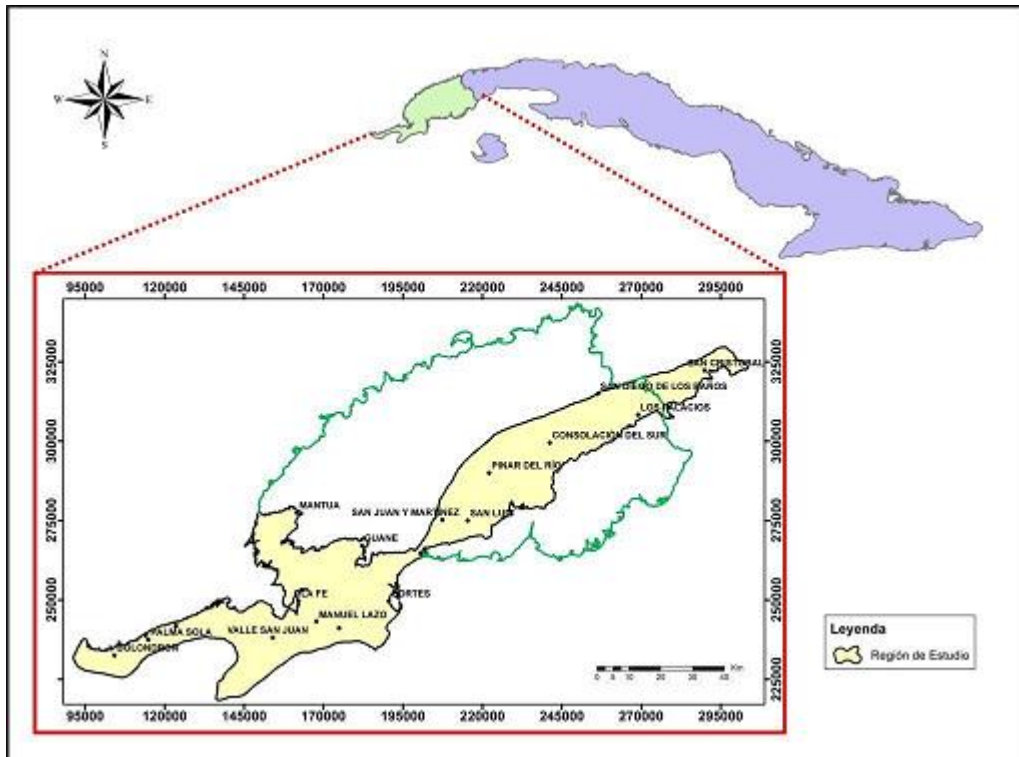


Figura 1. Situación de la región de estudio.

En dicha cuenca, sobre un basamento ofiolítico, yacen secuencias sedimentarias que abarcan desde el Cretácico Inferior hasta el Cuaternario Reciente, incluyendo en la parte superior los sedimentos de las formaciones geológicas Capdevila, Paso Real y Guane, que constituyen los de mayor interés para el presente trabajo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología elaborada para la generalización de la información geoelectrónica de archivo constó de tres etapas, cuyas tareas y resultados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Procedimiento de generalización de información geoelectrica

ETAPA	TAREAS	RESULTADOS
Búsqueda de información	Inventario y georreferenciación de obras con geofísica Recopilación de datos geológicos del área de estudio	Base de datos de obras Formaciones geológicas presentes
Análisis y elaboración	Evaluación de calidad de la información primaria Selección, georreferenciación y reinterpretación de SEV paramétricos Elaboración de cortes geoelectricos generalizados (CGG) por obra Obtención de resistividad eléctrica de suelos y rocas en SEV paramétricos	Base de datos de SEV paramétricos Base de datos de CGC Tablas de resistividad eléctrica de suelos y rocas
Generalización	Selección de escenarios geológicos por formación Selección de SEV paramétricos implicados Cálculo de valores promedio de resistividad y profundidad de cada capa y rangos de variación Representación final	Modelos de resistividad eléctrica de la región de estudio

En la etapa de búsqueda se registraron 48 obras donde se aplicó geofísica, con 895 puntos de sondeo eléctrico vertical, de los cuales 317 (35,4 %) están situados junto a perforaciones (paramétricos), lo que permite calibrar el corte geoelectrico con el litológico (Figura 2).

Por último, se pasó a la elaboración de los modelos de resistividad eléctrica, los que constituyen el resultado final del proceso de generalización de la información geoelectrica de una región. Representan un esquema sintetizado e integrador del comportamiento de la resistividad eléctrica, hasta la profundidad máxima alcanzada, en zonas determinadas. Para su definición se tomaron en cuenta los siguientes criterios:

- a) Formación geológica principal implicada.
- b) Condiciones de yacencia de las rocas primarias: descubiertas o cubiertas por sedimentos más jóvenes de diferente génesis.

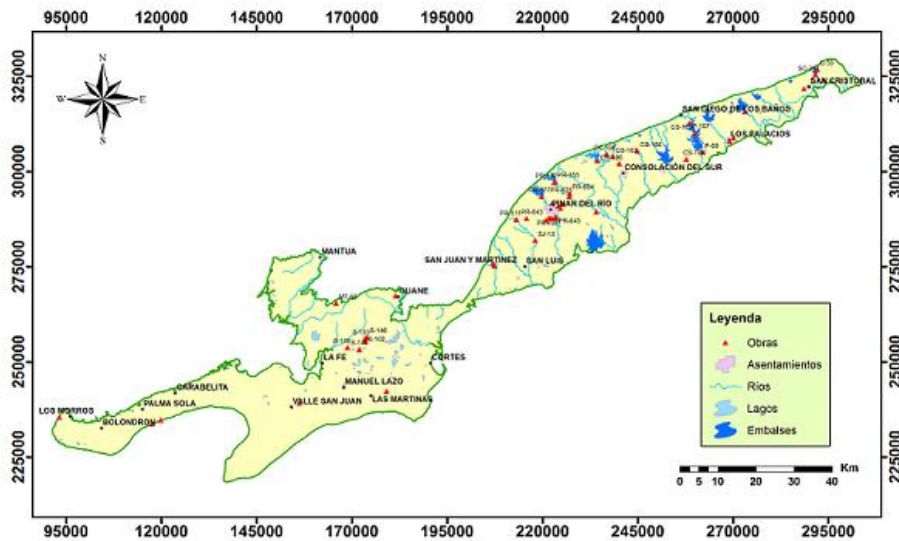


Figura 2. Ubicación de las obras con geofísica en la región de estudio.

El procedimiento utilizado para la elaboración de los modelos de resistividad eléctrica se inició con la identificación del escenario geológico-geofísico a modelar, pasando posteriormente a la selección de los CGG que lo caracterizan (Tabla 2).

Tabla 2. Cortes geoelectrónicos generalizados utilizados en la elaboración de los modelos de resistividad eléctrica

Modelo	Formación geológica principal y condiciones de cubierta	Cortes geoelectrónicos generalizados utilizados
I	Paso Real cubierta por suelos indiferenciados de Fm. Guane y Guevara	S146-CGG2-15m; S102-CGG-25m; S103-CGG-15m; S146-CGG1-15m
II	Paso Real cubierta por suelos de Fm. Guane	MT56-CGG-40m; PR464-CGG-25m ; PR786-CGG-25m; PR645-CGG-10m; PR711-CGG-20m; PR625-CGG-25m; PR684-CGG-25m; CS108-CGG-25m; P114-CGG-25m; P103-CGG-25m; SC152-CGG-50m; SC278-CGG-25m
III	Paso Real cubierta por suelos aluviales	SJ13-CGG-40m; PR588-CGG-25m; P88-CGG-25m; CS109-CGG-50m; CS162-CGG1-25m; SC281-CGG-50m;
IV	Capdevila cubierta por suelos de Fm. Guane o aluviales	SJ126-CGG-25m; PR677-CGG-50m; PR587-CGG-35m; PR555-CGG-35m; CS196-CGG-50m; CS198-CGG-50m

Seguidamente, se determinaron los valores promedio de las resistividades eléctricas y profundidades de cada capa geoelectrónica del modelo, así como

el rango de variación para un nivel de confianza de 95 %. Cada capa se acompaña de una breve descripción litológica, grado de saturación de los suelos y estado de conservación de las rocas.

El total de modelos desarrollados para la región de estudio fue de cuatro, de los cuales tres correspondieron a la formación Paso Real y uno a Capdevila, las más ampliamente distribuidas. La base geológica empleada fue el mapa geológico a escala 1:100 000 del Instituto de Geología y Paleontología-Servicio Geológico Nacional (IGP-SGN 2005).

En la Figura 3 se muestran ejemplos de curvas de SEV de cada uno de los modelos definidos.

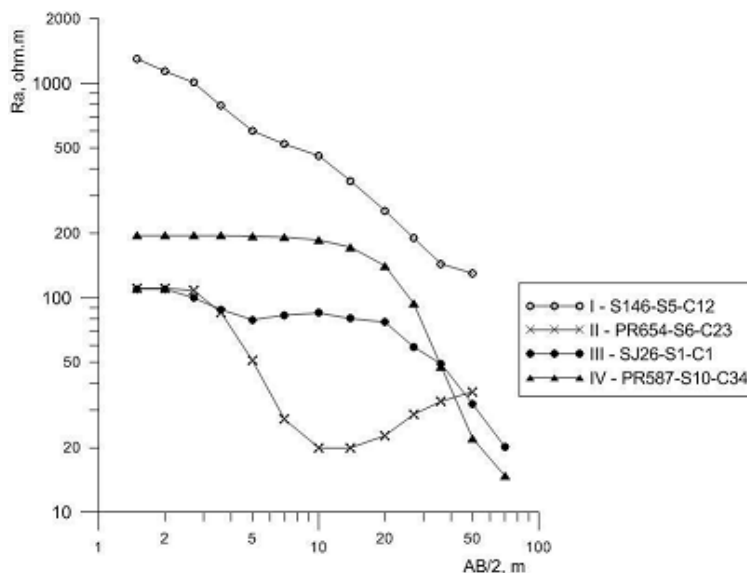


Figura 3. Curvas de SEV de cada uno de los modelos

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan los modelos o patrones de resistividad eléctrica definidos para caracterizar las principales formaciones geológicas de la región.

3.1. Complejo terrígeno-calcareo del Neógeno (formación Paso Real)

Estas rocas presentan una amplia distribución en la región de estudio, con afloramientos en la zona premontañosa y borde septentrional de la llanura sur, y cubiertas por suelos de diferente génesis en distintas zonas del territorio.

I. Formación Paso Real cubierta por suelos indiferenciados de las formaciones Guane y Guevara

En este modelo resulta un elemento característico la presencia de una fina capa de arenas cuarzosas muy resistivas en la parte superior, subyacidas por arenas arcillosas de humedad variable con la profundidad, hasta cortar

el horizonte miocénico representado por la formación Paso Real (Figura 4). Este corte geoelectrónico se encuentra en áreas del municipio Sandino, extremo occidental de la región.

Se expresa por las siguientes particularidades:

- La capa arenosa superficial está definida por una elevada resistividad eléctrica (1241 $\Omega \cdot m$ como promedio).
- Las resistividades eléctricas promedio de 232 y 76 $\Omega \cdot m$, respectivamente, de las capas intermedias, están condicionadas, principalmente, por el aumento del grado de saturación de los suelos arcillo-arenosos con la profundidad.
- La capa inferior del corte, asociada a la presencia de sedimentos de la formación Paso Real, se mapea con seguridad en el corte geoelectrónico por su baja resistividad eléctrica promedio (19 $\Omega \cdot m$), constituyendo un horizonte de apoyo confiable en la zona.
- Los contrastes de resistividad entre capas son significativos (2,5-6), lo que favorece su diferenciación geoelectrónica.

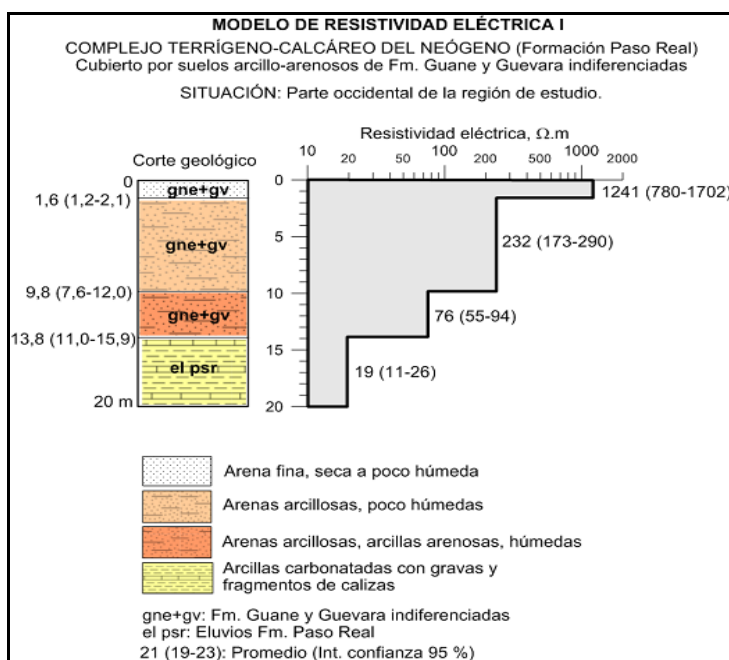


Figura 4. Modelo de resistividad eléctrica para la Formación Paso Real cubierta por suelos indiferenciados de las formaciones Guane y Guevara.

II. Formación Paso Real cubierta por suelos de la formación Guane

Este modelo geoelectrónico es el de mayor distribución y significación en aplicaciones ingenieras en la región de estudio, ocupando áreas extensas de relieve llano a poco ondulado. Los suelos gravoso-areno-arcillosos de la

formación Guane, constituyen con frecuencia los depósitos de cubierta (Figura 5).

Sus principales características son las siguientes:

- La capa superior del corte geoelectrico, asociada a los suelos de cubierta, se define por una resistividad eléctrica promedio de 162 $\Omega \cdot m$.
- La resistividad eléctrica promedio de la capa intermedia es de 21 $\Omega \cdot m$, asociada, como en casos anteriores, a los eluvios-rocas intemperizadas de la formación Paso Real.
- El horizonte inferior posee una resistividad eléctrica promedio de 86 $\Omega \cdot m$ y caracteriza el horizonte rocoso más conservado, con variaciones en su resistividad en dependencia del predominio de la fracción arcillosa o calcárea en su composición.
- Las relaciones de resistividad promedio entre las capas (4,1 a 7,7) son favorables para su diferenciación por este parámetro físico.

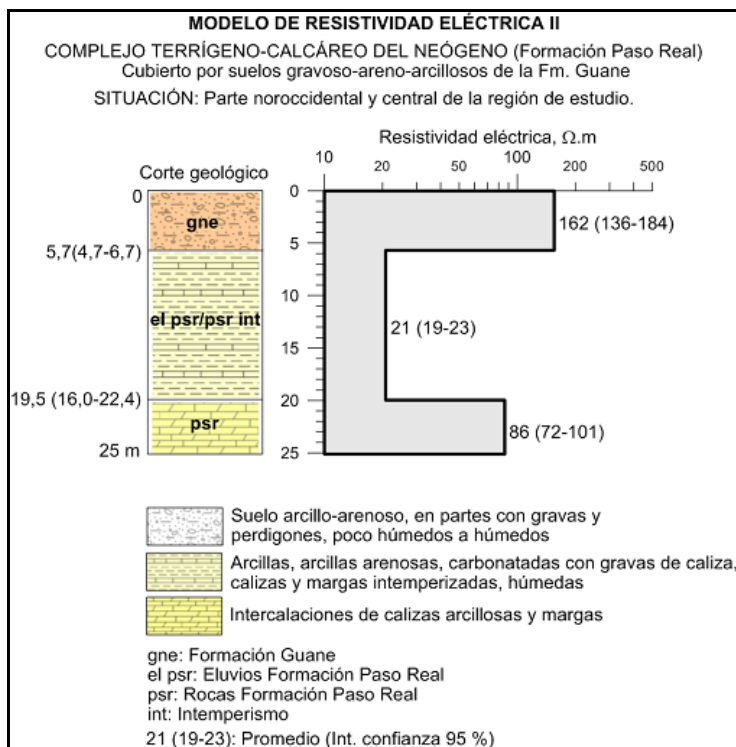


Figura 5. Modelo de resistividad eléctrica para sedimentos de la formación Paso Real cubiertos por suelos de la formación Guane.

III. Formación Paso Real cubierta por suelos aluviales

Este modelo de resistividad eléctrica se define por la presencia de un espesor de suelos aluviales recubriendo los depósitos miocénicos, siendo característico para las zonas del cauce y primer nivel de terraza de las

corrientes fluviales que atraviesan la región de estudio (Figura 6). Un rasgo característico de estas zonas es la variabilidad de las condiciones geológico-geoelectricas, como resultado de la complejidad del ambiente de deposición de los sedimentos.

Sus principales características son las siguientes:

- La capa superior representa la cubierta de suelos arcillo-arenosos aluviales, con una resistividad eléctrica promedio de $60 \Omega \cdot m$.
- La segunda capa geoelectrica corresponde a los eluvios-rocas intemperizadas de la formación Paso Real, caracterizados por una resistividad eléctrica promedio de $23 \Omega \cdot m$.
- El horizonte inferior, con una resistividad eléctrica promedio de $62 \Omega \cdot m$, se asocia con las rocas primarias más conservadas.
- Los contrastes de resistividad entre las capas del modelo son relativamente bajos (2,6-2,7), aunque suficientes para garantizar su separación por este parámetro físico.

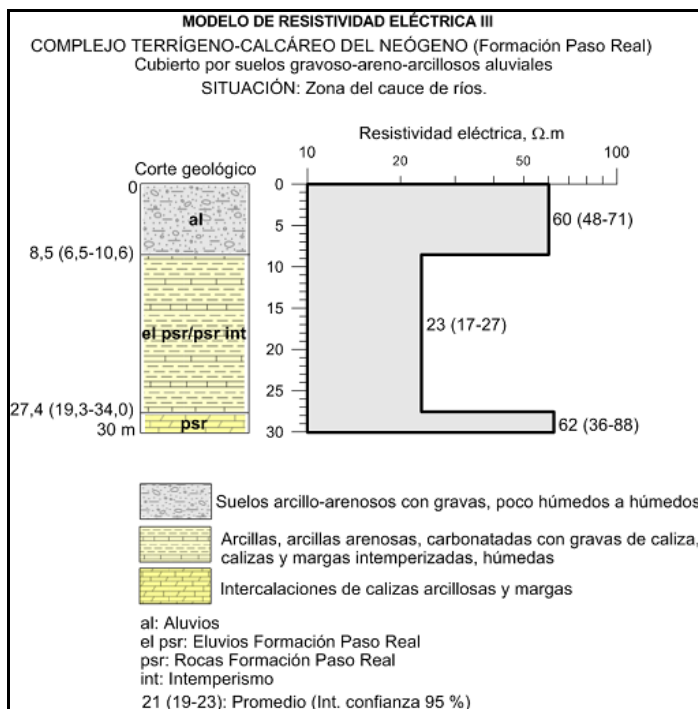


Figura 6. Modelo de resistividad eléctrica para sedimentos de la Formación Paso Real cubiertos por suelos aluviales.

3.2. Complejo terrígeno-calcáreo del Paleógeno (formación Capdevila)

Los depósitos paleogénicos, representados mayoritariamente por la formación Capdevila, ocupan una extensa faja en la zona premontañosa situada al sur de la falla Pinar, donde han recibido la preferencia de

proyectistas hidráulicos para la construcción de embalses por las características onduladas del relieve y relativamente baja permeabilidad de suelos y rocas.

IV. Formación Capdevila cubierta por suelos de la formación Guane o aluvios

Esta situación corresponde al caso cuando los depósitos paleogénicos están cubiertos por suelos gravoso-areno-arcillosos, frecuentemente plioceno-pleistocénicos (formación Guane) o aluviales recientes (Figura 7).

El modelo presenta los siguientes rasgos distintivos:

- Los mayores valores de resistividad eléctrica (hasta varios cientos de $\Omega \cdot m$) corresponden a los suelos de cubierta, mientras que los sedimentos paleogénicos presentan, al igual que en el caso anterior, muy baja resistividad (menos de $25 \Omega \cdot m$).
- El horizonte geoelectrico inferior que define las rocas paleogénicas, difícilmente diferenciables en cuanto a su grado de meteorización, posee una resistividad eléctrica promedio de $20 \Omega \cdot m$, con sectores aislados más arenosos donde aumenta hasta $48-76 \Omega \cdot m$.
- El contraste de resistividad entre capas es amplio, alcanzando hasta 13,7 entre los valores promedio.

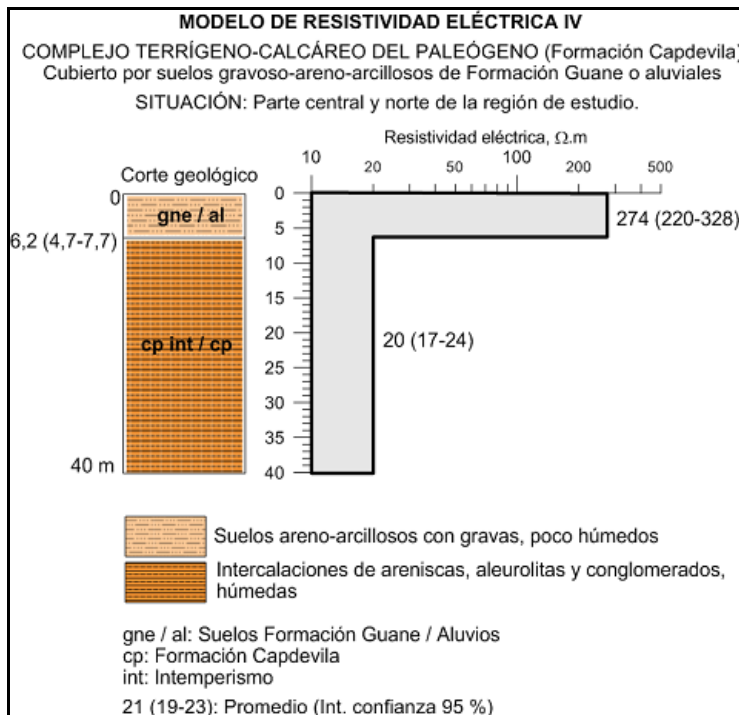


Figura 7. Modelo de resistividad eléctrica para sedimentos paleogénicos cubiertos por suelos gravoso-areno-arcillosos.

4. DISCUSIÓN

Con base en los cuatro modelos de resistividad eléctrica descritos, se pueden resumir las particularidades generales que caracterizan el corte geoelectrico en la parte superior de la región de estudio, hasta una profundidad de 20-40 m:

- Los mayores valores promedio de resistividad eléctrica están presentes en la capa superior de los modelos. En el caso de las arenas cuarzosas superficiales del municipio Sandino, la resistividad eléctrica promedio alcanza valores extremos de $1241 \Omega \cdot m$, mientras que para los suelos areno-arcillosos que recubren ambas formaciones, los valores son de 60 a $274 \Omega \cdot m$.
- Los valores de resistividad eléctrica del horizonte inferior no exceden de $86 \Omega \cdot m$, lo que se explica por el aumento del grado de humedad con la profundidad y, sobre todo, por la presencia de material arcilloso en la composición litológica de las diferentes formaciones geológicas del territorio.

4.1. Efectividad de la resistividad eléctrica en la ingeniería geológica

A partir de los modelos de resistividad eléctrica, se han evaluado las potencialidades de este método en la solución de diferentes tareas básicas en los estudios ingeniero-geológicos (Tabla 3). Se han definido tres categorías de aplicabilidad:

- **Favorable:** La tarea se resuelve en la gran mayoría de los casos (>90 %): Relación de resistividades eléctricas promedio favorable (>3); espesor de capa relativo a su profundidad >1.
- **Relativamente favorable:** La solución de la tarea depende fuertemente de las condiciones locales.
- **Desfavorable:** La tarea no se resuelve en la mayoría de los casos (<50 %): Relación de resistividades eléctricas promedio baja (<3); espesor de capa relativo a su profundidad cercano a 1.

Tabla 3. Potencialidades de la resistividad eléctrica en la ingeniería geológica

Tarea ingeniero-geológica	Modelos empleados	Relación de resistividades	Espesor relativo de capa	Grado de aplicación
FORMACIÓN PASO REAL				
Espesor de suelos arcillo-arenosos de cubierta	I, II, III	2,6-7,7	>1	Favorable
Espesor de suelos arenosos superficiales	I	5,3	>1	Favorable
Diferenciación de suelos arcillo-arenosos	I, II, III	1-3,1	0,4	Relativamente favorable
Espesor de suelos eluviales	I, II, III	$\cong 1$	-	Desfavorable
Espesor de rocas intemperizadas	II, III	2,7-4,1	>1	Relativamente favorable
Profundidad del nivel freático	II, III	$\cong 1$	-	Desfavorable
FORMACIÓN CAPDEVILA				
Espesor de suelos arcillo-arenosos de cubierta	IV	13,7	>1	Favorable
Espesor de rocas intemperizadas	IV	$\cong 1$	-	Desfavorable
Profundidad del nivel freático	IV	$\cong 1$	-	Desfavorable

Según la tabla, la evaluación del espesor de los suelos arcillo-arenosos de cubierta fue favorable en ambas formaciones, mientras que la determinación de la profundidad del nivel freático fue desfavorable. Las restantes tareas variaron entre relativamente favorable y desfavorable según la formación geológica.

5. CONCLUSIONES

- El procedimiento metodológico desarrollado para la gestión de información geoelectrica consta de tres etapas, cuyas salidas principales sintetizan las condiciones geoelectricas de la parte superior del corte. El mismo puede ser extendido a otras regiones que cuenten con información geoelectrica disponible.
- Las particularidades del corte geoelectrico superficial (hasta 20-40 m) de la región de estudio han sido generalizadas en cuatro modelos de

resistividad eléctrica, de los cuales tres corresponden a la formación Paso Real y uno a Capdevila. Según los mismos, es destacable la disminución de la resistividad eléctrica con la profundidad en gran parte de la región.

6. REFERENCIAS

- BARRIOS, E.; MARRERO, J.; PORTUONDO, A.; NUÑEZ, R. & PLACERES, R. 1988: Levantamiento geológico a escala 1:100 000 y búsqueda acompañante Pinar Sur. Informe ONRM, La Habana, Cuba, 297 p.
- BASHKUEV, Y. B.; ADVOKATOV, V. R.; ANGARKHAEVA, L. K.; DORZHIEV, V. S. & HAYAKAWA, M. 2008: Maps of geoelectric sections of Turkey, Iran, Afghanistan, Pakistan, Korea and Japan. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 8(4): 861-868.
- FUNDORA, M. J.; CATANHA, M. & ALAMINOS, C. 2011: Plataforma SIG: Geoelectricidad en la prospección de aguas subterráneas. Caso de estudio: Luanda. En: VI Congreso Cubano de Geofísica. Memorias ENT#091;CD-ROMENT#093;, La Habana.
- GARCÍA, J. A. 1996: Análisis de la efectividad del método de sondeo eléctrico vertical en investigaciones ingeniero-geológicas de obras hidráulicas en la zona premontañosa de la provincia de Pinar del Río. En: III Simposio Cubano de Geofísica. La Habana.
- GARCÍA, J. A. 2011: Efectividad del método de sondeo eléctrico vertical en estudios ingeniero-geológicos en rocas serpentizadas de la provincia de Pinar del Río, Cuba. En: VI Congreso Cubano de Geofísica. Memorias ENT#091;CD-ROMENT#093;, La Habana.
- GARCÍA, J. A. & SACASAS, C. 2016: Mapas regionales de resistividad eléctrica en un sector al sur de Cuba occidental. *Ciencias de la Tierra y el Espacio* 17(1): 71-80.
- IGP-SGN 2005: Mapa geológico de Cuba a escala 1:100 000 (versión digital). Instituto de Geología y Paleontología-Servicio Geológico Nacional, La Habana, Cuba.
- KELLER, G. V. & FRISCHKNECHT, F. C. 1966: *Electrical methods in geophysical prospecting*. Pergamon Press, New York.
- KUBA, A. 1973: Utilización de la exploración eléctrica para la búsqueda e investigación de las aguas subterráneas. *Serie Geofísica* No. 10. Academia de Ciencias de Cuba. 18 p.
- MARTÍNEZ, D.; FERNÁNDEZ DE LARA, R. & PELÁEZ, R. 1988: Informe sobre los trabajos del levantamiento geológico y búsqueda a escala 1:50 000 en la parte central de la provincia de Pinar del Río. Emp. de Geología de Pinar del Río, Minbas, 959 p.

- ORELLANA, E. 1982: *Prospección geoelectrica en corriente continua*. Paraninfo, Madrid, 578 p.
- PENG, F.; PENG, L.; ZHANG, J.; XUE, G.; MA, M. & ZHANG, Y. 2015: From Geophysical Data to Geophysical Informatics. *Data Science Journal* 14: 13. Consulta: 9 nov 2016. Disponible en: <http://doi.org/10.5334/dsj-2015-013>.
- PEREIRA DE BARROS-DA SILVA, M. A.; FERNÁNDEZ-NÚÑEZ, H. M.; PEREIRA TEIXEIRA-PIRES & PÉREZ-LAZO, J. 2015: Obtención de parámetros geotécnicos de la ciudad de Luanda a partir de sondeos eléctricos verticales. *Minería y Geología* 31(2): 48-65.
- TULSTRUP, J. 2004: Environmental data and the Internet: openness and digital data management. *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin* 4: 45-48.
- U.S.G.S. 2016: USGS Data management. Sitio web del Servicio Geológico de Estados Unidos de América. Consulta: 11 nov 2016. Disponible en: <http://www2.usgs.gov/datamanagement/index.php>.
- VIDAL-MÉNDEZ, E. 2008: Cálculo de la conductividad hidráulica de los acuíferos a partir de la resistividad eléctrica. *Minería y Geología* 24(2).
- Informes del archivo ENIA Pinar del Río utilizados (código y año): S-185 (1995); S-120 (1984); MT-56 (1988); S-156 (1988); S-146 (1987); S-102 (1981); S-103 (1981); S-146 (1987); S-143 (1987); G-73 (1989); SJ-26 (1983); SJ-50 (1988); PR-511 (1984); PR-843 (1990); SJ-13 (1978); PR-677 (1987); PR-464 (1982); PR-654 (1987); PR-732 (1988); PR-344 (1980); PR-587 (1985); PR-555 (1984); PR-786 (1989); PR-645 (1987); PR-711 (1988); PR-653 (1987); PR-419 (1981); PR-625 (1986); PR-684 (1987); PR-588 (1986); CS-196 (1988); CS-198 (1988); CS-162 (1986); CS-146 (1985); CS-186 (1988); CS-108 (1982); P-107 (1986); CS-109 (1982); P-88 (1982); P-114 (1987); P-103 (1986); SC-152 (1982); SC-278 (1993); SC-281 (1990); C-55 (1987); SC-167 (1983).

José Antonio García-Gutiérrez, jagarcia@eniapr.co.cu

Máster en Gestión Ambiental. Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas
Profesor Asistente, Dpto. de Geología, Univ. de Pinar del Río, Cuba

Carlos Sacasas-León, cs1@civil.cujae.edu.cu

Doctor en Ciencias Geológicas. Profesor Titular. Departamento de Geociencias
Universidad Tecnológica de La Habana J. A. Echevarría, Cuba

Cartografía de la peligrosidad por erosión hídrica en la ciudad de Brazzaville

Kempena Adolphe
Rafael Guardado-Lacaba
Yexenia Viltres-Milán
Teresa Hernández-Columbié

Resumen

La erosión hídrica es el fenómeno geodinámico que más afecta la ciudad de Brazzaville (Congo). Se realizó un estudio de cartografía ingeniero-geológica de la ciudad con el objetivo de generar un mapa de peligrosidad por erosión hídrica que facilite el ordenamiento territorial. La metodología se centró en el procesamiento e interpretación de imágenes tipo Landsat y Radar SRTM. A partir del levantamiento ingeniero-geológico de la ciudad se confeccionó el mapa de inventario de tipos de erosión hídrica para el diagnóstico del área. Mediante un SIG se generaron los mapas temáticos y el mapa de peligrosidad total. Se concluye que los distritos situados al norte, nordeste y noroeste de la ciudad presentan la mayor peligrosidad por erosión hídrica, asociada fundamentalmente a una escasa cobertura vegetal, un suelo arenoso pobre en arcilla y muy erosionable y un relieve predominantemente montañoso.

Palabras clave: SIG; cartografía; peligrosidad; erosión hídrica; Brazzaville.

Cartography of water erosion hazard in Brazzaville city

Abstract

Water erosion is the geodynamic phenomenon that most affects the city of Brazzaville (Congo). A geological engineering mapping of the city was carried out with the objective of generating a map of water erosion hazard that facilitates the territorial ordering. The methodology focused on the processing and interpretation of Landsat and Radar SRTM images. From the geological engineering survey of the city it was made the types of water erosion Map for the diagnosis of the area. Thematic maps and the total hazard map were generated through a GIS. It is concluded that the districts located to the north, northeast and northwest of the city present the highest hazard level to water erosion, associated mainly with a low vegetation cover, sandy soil poor in clay and very erodible and the mountainous relief.

Keywords: GIS; mapping; hazard; water erosion; Brazzaville.

1. INTRODUCCIÓN

Se entiende por erosión hídrica el proceso de sustracción de masa sólida al suelo o de la roca de la superficie por el flujo de agua del escurrimiento superficial. En la ciudad de Brazzaville, la erosión hídrica es el fenómeno geodinámico que causa mayores daños a las comunidades ubicadas en zonas de pendientes abruptas y desprovistas de cobertura vegetal.

La ciudad de Brazzaville se encuentra en la margen derecha del río Congo, su extensión es de unos 30 km y posee siete distritos, como se muestra en la Figura 1. En 2008, el informe del Centro Nacional de Estudios Estadísticos y Económicos dio a conocer (CNSEE por sus siglas en francés 2008); que más de un millón de personas viven en Brazzaville, representando el treinta por ciento de la población total de la República del Congo.

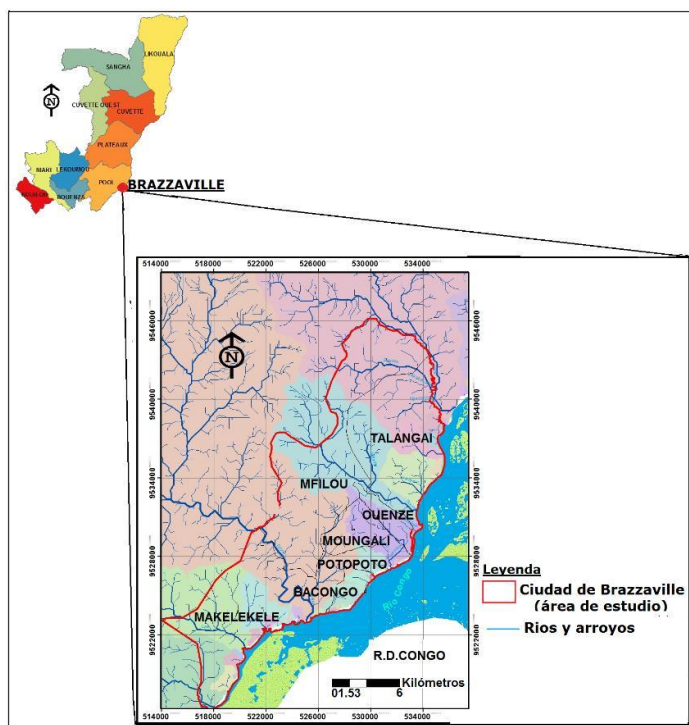


Figura 1. Mapa de ubicación de la ciudad de Brazzaville.

La ciudad posee un relieve formado de colinas, mesetas y llanuras (Codou 1976). El clima de la ciudad es del tipo "Bas Congo" con una estación lluviosa de octubre a mayo y una estación seca de junio a septiembre. Se observa una disminución de las lluvias entre enero y febrero (Vennetier 1977; Samba-Kimbata 1978). La geología de la ciudad está constituida por la formación de Inkisi (Precámbrico- Paleozoico), aflora al suroeste de Brazzaville a lo largo del río Congo (Boudzoumou 1986). Esta formación está representada en su parte inferior por un lente de conglomerado con una matriz arcosa gruesa de cuarzo y arenisca

cuarcífera. El nivel intermedio está compuesto de arcosa cruzado por estratificaciones arenosas con mica blanca, cuarzo, arenisca y argilita y en la parte superior aparecen areniscas silíceas con feldespatos y micas; este nivel contiene algunas argilitas intercaladas.

La formación Batéké (cobertura sedimentaria) se depositó durante el período de Mesozoico a Pleistoceno (Desthieux 1992), cuyo contacto con la Serie de Stanley Pool es difícil de determinar. La formación Batéké tiene dos niveles: el inferior, compuesto de arenisca polimórfica, arenisca fina y blanda, arenisca cuarcífera, calcedonia y arenisca lenticular y hacia arriba se nota la presencia de una solidificación en el pasado y el nivel superior, compuesto de arena ocre o limón arenoso situado sobre la arena eólica. Cubren las porciones superiores de las mesetas (Codou 1976; Desthieux 1992). La formación de Stanley Pool forma una cobertura sedimentaria de edad Mesozoica y se superpone discordantemente a las areniscas de Inkisi. Se compone de areniscas arcillosas y margas que se dividen en tres niveles: el nivel inferior compuesto de argilita roja (Le Marechal 1966); el nivel medio compuesto de arenisca blanca compacta, a veces sin estratificación cruzada, siendo este, transgresivo en relación con la base y aflora en el suroeste de Brazzaville principalmente en el Barranco de Makélékélé; el nivel superior está compuesto de areniscas blandas y caolinita, de color amarillo con estratificación cruzada y aflora en la isla Mbamou y en el Valle Djiri (Le Marechal 1966), tal como se muestra en la Figura 2.

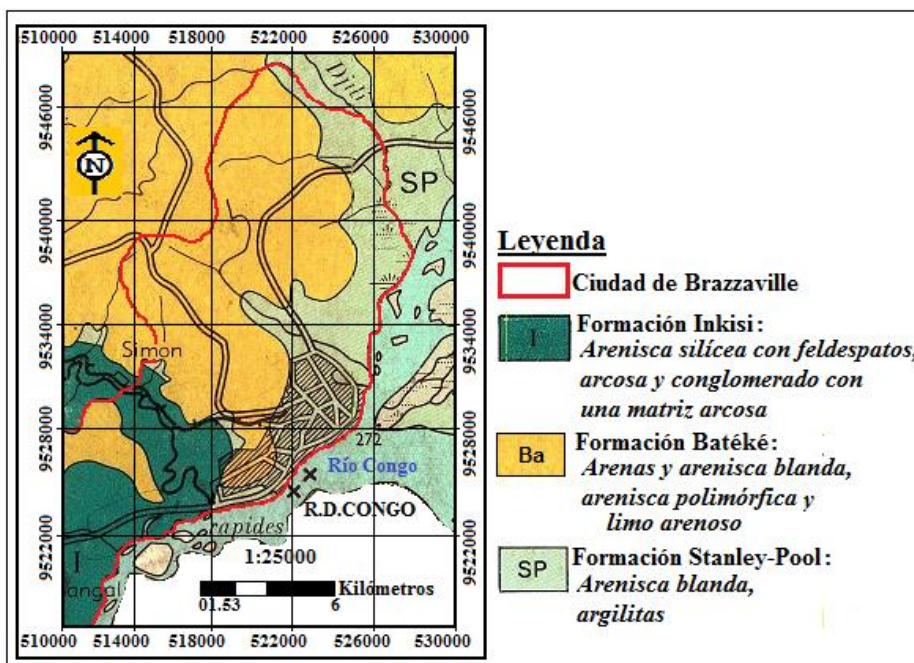


Figura 2. Geología de Brazzaville.

El suelo es muy pobre en arcilla y materia orgánica y clasificado en general de ferralítico (Denis 1977; Schwartz 1987). El estudio geotécnico indica en Brazzaville cuatro grupos de suelos: ferralíticos, heterogéneos, hidromórficos y poco desarrollados (Nzila 2001).

La ciudad de Brazzaville no posee un riguroso ordenamiento territorial, el drenaje de las aguas carecen de un sistema de canalización que permitan el control de las aguas pluviales, lo que produce impactos al ambiente, donde los problemas de erosión del suelo constituyen el fenómeno geodinámico de mayor trascendencia para la ciudad (Samba & Moundza 2012).

La evaluación de la peligrosidad por erosión hídrica debe ser estudiada al emprender diferentes proyectos constructivos y de planificación de la ciudad, con el objetivo de un mejor uso y manejo de estos distritos de la ciudad. La determinación de la peligrosidad por erosión hídrica permite realizar una mejor clasificación del territorio basada en las prioridades del uso de suelo, su conservación y estabilidad ante los diferentes procesos geodinámicos actuantes.

El artículo presenta un estudio ingeniero-geológico-cartográfico de la ciudad de Brazzaville con el objetivo de proporcionar el mapa de peligrosidad por erosión hídrica de la ciudad que contribuya al mejor ordenamiento territorial y constructivo y propicie una mejor explotación y un uso racional del suelo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se presenta una síntesis formalizada de los métodos empleados para evaluar la erosión hídrica para la ciudad de Brazzaville. Lo primero consistió en establecer un mecanismo que permita el análisis y evaluación de los procesos de erosión hídrica de suelos y elaborar una correcta planificación de usos del suelo que permita disminuir el riesgo e incrementar la capacidad de retención de los suelos. Se desea, además, hacerlo con una base cartográfica a escala 1:25000, disponible en el Instituto de Geografía Nacional (IGN) de la República del Congo (mapa de clima, suelo, pendiente, vegetación y uso de suelo), según el Sistema de Información Geográfica empleado (Mapinfo profesional 10.14).

La metodología se centró en el procesamiento e interpretación de imágenes tipo Landsat y Radar SRTM. A partir del levantamiento ingeniero-geológico de la ciudad se confeccionó el mapa de inventario de tipos de erosión hídrica (Figuras 3 y 4).

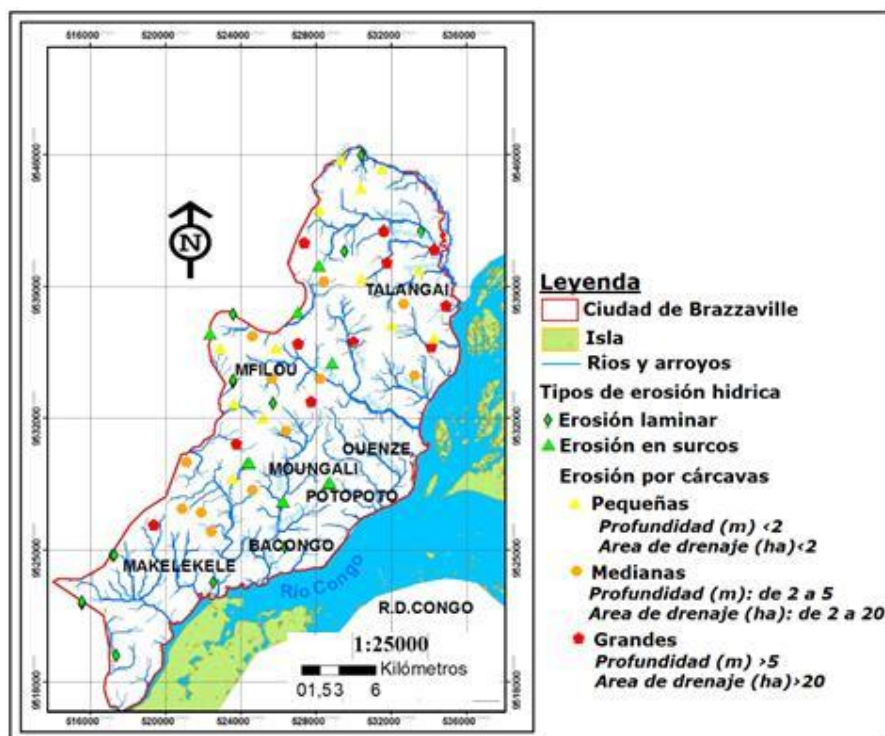


Figura 3. Mapa de inventario de erosión hídrica.

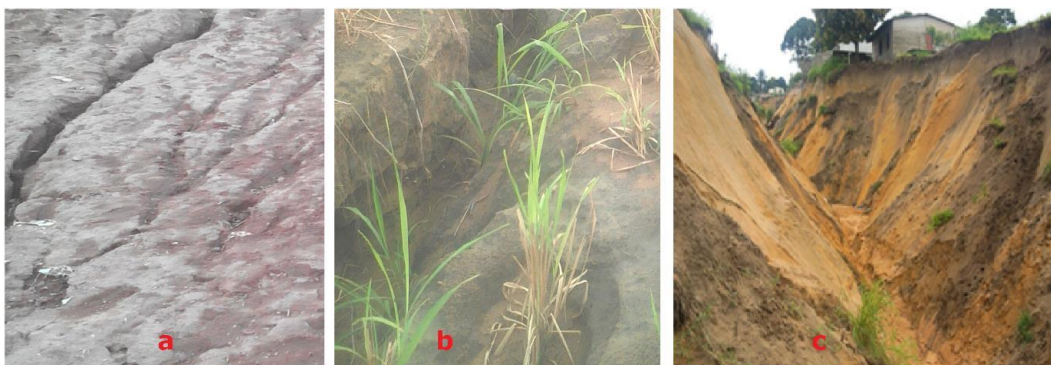


Figura 4. Tipos de erosión hídrica en la ciudad de Brazzaville (a. Erosión laminar, b. Erosión en surcos y c. Erosión por cárcavas).

Posteriormente mediante un sistema de información geográfica se evaluaron los diferentes tipos de mapas temáticos que representan los diversos factores que inciden en la peligrosidad por erosión hídrica en la ciudad; tomándose en consideración la tipología, la intensidad, el desarrollo, la dinámica, los mecanismos del fenómeno de la erosión hídrica, en particular la erosión por cárcavas (Figura 5).

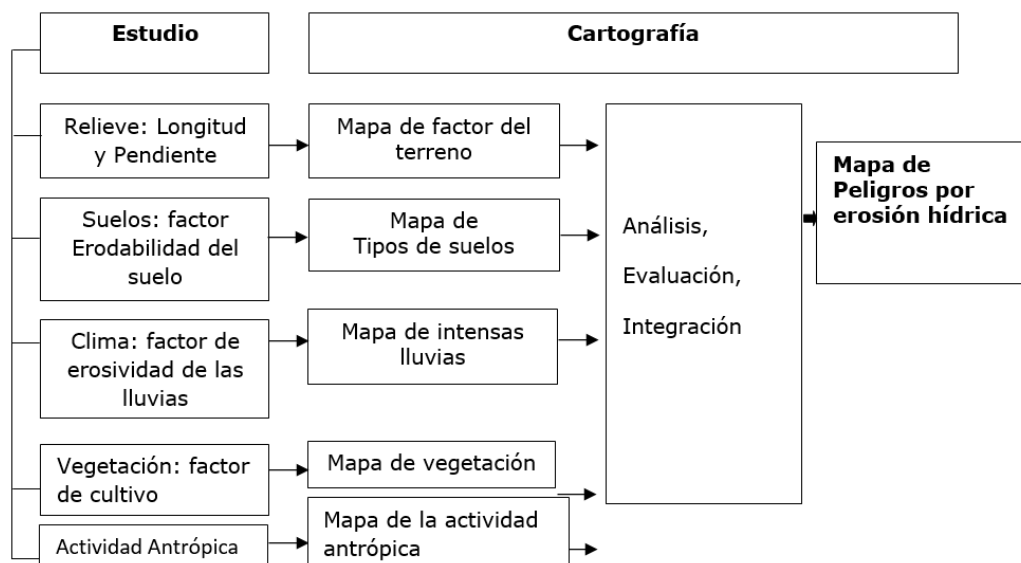


Figura 5. Esquema metodológico de la cartografía de peligrosidad total por la erosión hídrica de la ciudad de Brazzaville.

2.1. Elaboración de los mapas temáticos para la clasificación de la peligrosidad:

a. Peligrosidad según la pendiente

Al estudiar el relieve se tomó en consideración el factor del terreno: longitud de la pendiente (L) y su inclinación (S) (Tabla 1). El factor del terreno permite conocer la peligrosidad por erosión hídrica a través del relieve; este fue dividido en cinco clases.

Tabla 1. Peligrosidad por erosión hídrica según la pendiente

Clase	Pendiente (%)	Peligrosidad de erosión
1	0 - 3	Muy baja
2	3,1 - 12	Baja
3	12,1 - 20	Media
4	20,1 - 35	Alta
5	>35	Muy alta

b. Peligrosidad por el tipo del suelo

El factor suelo se sintetizó a través del componente de erodabilidad que indica la susceptibilidad de los suelos a ser erosionados; su determinación está en función del porcentaje de arena más limo, de arena, de materia orgánica, de la estructura del suelo y su permeabilidad. A continuación, aparecen las tablas que correlacionan los tipos de suelo y la pendiente (Tabla 2).

En la susceptibilidad del suelo a la erosión hídrica es importante establecer el tipo de textura del suelo en el caso de la ciudad de Brazzaville tenemos: suelos heterogéneos saturados (C), lateríticos de mesetas (B) y lateríticos de montaña (A₃), suelos arenosos de laderas y pobres en contenido de arcillas (A₂) (Tabla 3).

Tabla 2. Susceptibilidad de los suelos a erosión

Tipos de suelos	Clase de pendiente				
	1	2	3	4	5
Arena, suelo areno-limoso	0% - 3%	3,1%- 12%	12,1% - 20%	20,1% - 35%	>35,1%
	C	C	B	A ₃	A ₂

Tabla 3. Susceptibilidad por erosión hídrica según la textura de los suelos de Brazzaville

Código	Clase	Susceptibilidad	Tipos de suelos
C	2	Baja	Suelos heterogéneos saturados
B	3	Mediana	Suelos lateríticos de mesetas
A ₃	4	Alta	Suelos lateríticos de montañas
A ₂	5	Muy alta	Suelos arenosos localizados en laderas empinadas y pobres en contenido de arcillas

c. Peligrosidad según el clima (agresividad climática)

El factor clima está representado por la erosividad de las intensas lluvias, es decir, el número de unidades de índice de erosión que ocurren en un año normal de lluvias. Wischmeier y Smith (1978) fueron quienes encontraron que la pérdida de suelo en campos desnudos era directamente proporcional al producto de la energía cinética total de la lluvia multiplicada por su intensidad máxima desarrollada durante treinta minutos continuos. La suma de estos productos, llamado valor o índice de erosión (EI), para un período dado, proporciona un índice de erosión numérico de las lluvias que evalúa la erosión potencial de las mismas durante ese período.

La cartografía de la agresividad climática para producir la erosión hídrica de los suelos responde a la intensidad de esta ante los suelos de la ciudad. Para el cálculo de la agresividad climática se utilizó el Índice de Fournier modificado, para ello se consideraron 20 estaciones climatológicas ubicadas en la ciudad de Brazzaville. Los valores de erosividad de la lluvia son catalogados como: ligeros (0-50), moderados (50-500), altos (500-1,000) y muy altos (> 1,000).

La metodología utilizada para generar la cobertura del factor climático se basó en un análisis geoestadístico que permitió determinar la estructura y distribución espacial de la agresividad climática (intensas lluvias) sobre el área de estudio.

d. Peligrosidad según la vegetación

La vegetación es analizada según el grado de cobertura vegetal (Tabla 4) en el área de estudio. Se aplicó la ecuación presentada a continuación.

$$\%CV = \frac{A_{ocv}}{A_{total}} \quad (1)$$

%CV: porcentaje de cobertura vegetal en la microcuenca hidrográfica

A_{total} : Área total de la microcuenca hidrográfica.

Tabla 4. Clases del grado de cubierta vegetal

Clases	Grado de cubierta vegetal (%)
1	Inferior a 25
2	25 – 50
3	50 – 75
4	Superior a 75

e. Peligrosidad según el uso del suelo

Las zonas llanas poseen pendientes de 0 % a 3 % se refieren a las áreas que presentan pérdidas insignificantes del suelo, independientemente del uso o presencia de fuertes lluvias, por lo que la peligrosidad de erosión es muy baja. Las pendientes de 3 % a 12 % son áreas donde la peligrosidad de erosión es baja y se puede controlar con las prácticas de adecuada gestión. Las pendientes de 12 % a 20 % se vinculan a la peligrosidad de erosión media o moderada y los tipos de usos de la tierra son limitados. Las pendientes de 20 % a 35 % son consideradas como los sitios con peligrosidad a la erosión elevada y, por lo tanto, no son terrenos aptos para la construcción de viviendas sin estudios geotécnicos previos. Las pendientes de más de 35 % son áreas con una alta peligrosidad de erosión debido a la alta velocidad adquirida por el agua de lluvia con carencia de la vegetación.

Tabla 5. Peligrosidad por el uso de suelo

Clases	Ocupación y uso del suelo	Riesgo
1	Cuerpos de agua	Muy bajo
2	Vegetación boscosa	Bajo
3	Vegetación herbácea	Mediano
4	Áreas construidas	Alto
5	Áreas sin vegetación	Muy alto

2.2. Integración de mapas temáticos

El estudio ingeniero-geológico de la ciudad de Brazzaville está fundamentado por medio de la cartografía de aquellos factores que intervienen sobre la erosión hídrica a escala 1:25 000, lo que permitió la correcta evaluación de las condiciones ingeniero-geodinámicas del terreno de la capacidad de acogida y estabilidad.

El procedimiento del SIG es el siguiente:

1. Clasificación de cada mapa de factores de acuerdo a las clases relevantes.
2. Asignación de valores de peso a cada factor (Tablas 6a y 6b).
3. Asignación de pesos a cada mapa de factor.
4. Cálculo de los pesos para cada píxel y clasificación en clases de peligrosidad.

Tabla 6a. Peso del factor litología en la peligrosidad (Varnes 1984)

Factor	Descripción	Categoría	Peso
Litología	Tipo de material	Areniscas	1,0
		Suelos arenosos	1,0

Tabla 6b. Pesos de los factores topográficos y ambientales en la peligrosidad (Varnes 1984)

Factores topográficos y ambientales			
Factor		Categoría	Peso
Morfometría		Más de 45°	2,0
Pendiente de los taludes		36° a 45°	1,7
		26° a 35°	1,2
		16° a 25°	0,8
		Menos de 15°	0,5
		Relieve relativo	Menos de 100 m
Diferencia de altura entre la divisoria de aguas y el valle		101 m a 300 m	0,6
		Más de 300 m	1,0
		Uso de la Tierra	Cuerpos de agua y zonas pantanosas
		Vegetación boscosa	1,20
		Vegetación herbácea	1,50
		Vegetación escasa o sin vegetación	2,00
		Areas contruidas	2,00
Clase	Peligrosidad total	Descripción	Suma de los pesos
1	I	Peligrosidad muy baja	3,5
2	II	Peligrosidad baja	3,5 a 5
3	III	Peligrosidad media	5,1 a 6,0
4	IV	Peligrosidad alta	6,1 a 7,5
5	V	Peligrosidad muy alta	7,5

3. RESULTADOS

Se obtuvo un mapa de peligrosidad para cada factor analizado, los cuales fueron integrados para obtener el mapa de peligrosidad total para la ciudad de Brazzaville.

La Figura 6 muestra el mapa de peligrosidad de erosión por intensas lluvias. La intensidad relativa de las precipitaciones y la pérdida del suelo está relacionada con las intensas lluvias en la ciudad. Por esta razón, es obvia la relación existente entre suelo, lluvia y la cobertura vegetal en el fenómeno de erosión hídrica. En la Tabla 7 aparecen las superficies ocupadas en la ciudad de Brazzaville y el nivel de la peligrosidad por intensas lluvias.

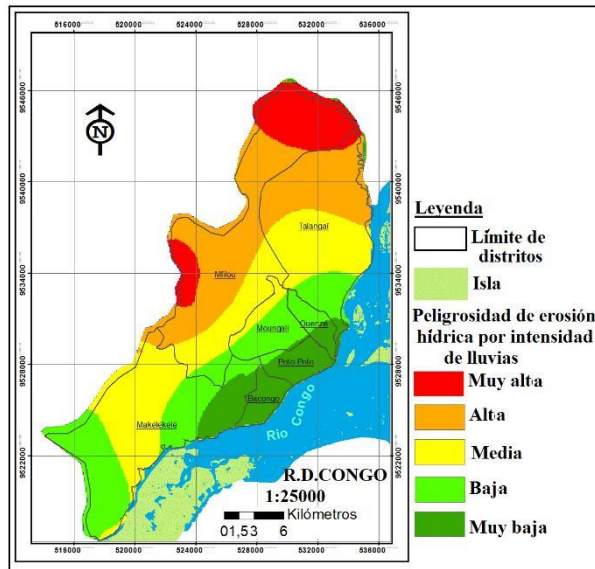


Figura 6. Mapa de peligrosidad por intensas lluvias de la ciudad de Brazzaville.

Según el mapa, la peligrosidad por intensidad de lluvia en 24 horas para un período de retorno de 100 años se divide en 5 clases (muy alta, alta, moderada, baja y muy baja). La clase de peligrosidad muy baja corresponde a los valores de menos de 1 450 mm y representa el 10,60 % del área total; la peligrosidad baja es de 1 450-1 550 mm, constituyendo el 14,73 % del área total; la clase de peligrosidad media tiene valores de 1 550-1 850 mm de lluvia y ocupa el 29,22 % del área total; la peligrosidad alta tiene valores mayores de 1 850-2 150 mm y representa el 35,02 % del área total y la peligrosidad muy alta tiene valores superiores a 2 150 mm y representa el 10,38 % del área total. Como puede observarse, la zona norte de la ciudad es la más lluviosa y posee la mayor peligrosidad de erosión por lluvia (Tabla 7).

Tabla 7. Superficie ocupada en hectáreas (ha) y porcentaje (%) según el nivel de peligrosidad por intensas lluvias en la ciudad de Brazzaville

Peligrosidad por intensas lluvias	Superficie ocupada	
	Hectáreas (ha)	Porcentaje (%)
Muy baja	2 887,72	10,60
Baja	4 006,33	14,73
Mediana	7 944,09	29,22
Alta	9 519,47	35,02
Muy alta	2 823,99	10,38

3.1. Caracterización de la peligrosidad por el relieve (pendiente)

El factor del relieve es un elemento clave junto al tipo de suelo y la lluvia para determinar la intensidad de erosión de los suelos (Figuras 7 y 8). La

pendiente del terreno afecta los escurrimientos superficiales imprimiéndoles velocidad. El tamaño de las partículas, así como la cantidad de material que el escurrimiento puede desprender o llevar en suspensión, son una función de la velocidad con la que el agua fluye sobre la superficie. A su vez, la velocidad depende del grado y longitud de la pendiente. Cuando se carece de cobertura vegetal, la pendiente indica un determinado nivel de la peligrosidad de erosión hídrica (Tabla 8). La Tabla 9 recoge en una matriz de 5x5 clases la peligrosidad de erosión para las pendientes y el uso del suelo.

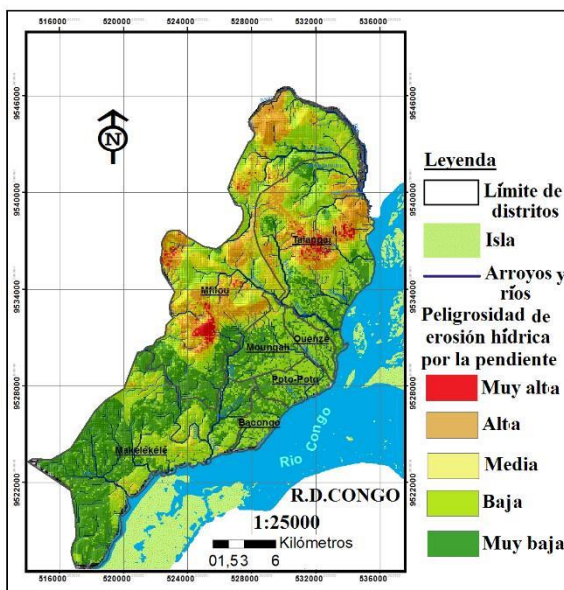


Figura 7. Peligrosidad de erosión hídrica por la pendiente.

Tabla 8. Superficie ocupada por la peligrosidad a la erosión hídrica tomando en consideración la pendiente

Pendiente (%)	Peligrosidad	Superficie	
		Hectáreas (ha)	Porcentaje (%)
0 - 3	Muy baja	7 985,89	32,03
3,1 - 12	Baja	9 232,43	37,03
12,1 - 20	Media	3 974,40	15,94
20,1 - 35	Alta	3 363,93	13,49
>35	Muy alta	3 0,32	1,48

Tabla 9. Matriz de interpretación de la peligrosidad de erosión hídrica en la ciudad de Brazzaville

USO DE SUELOS	PELIGROSIDAD DE EROSION	PENDIENTES				
		clase	1	2	3	4
Muy bajo	1	1	2	2	3	3
Bajo	2	2	2	3	3	4
Medio	3	2	3	3	4	4
Alto	4	3	3	4	4	5
Muy alto	5	3	4	4	5	5

La combinación de valores en la matriz se realizó tomando en consideración:

- Cuando coincida el valor de las dos variables (pendientes y uso del suelo), el valor final de la peligrosidad de erosión será el mismo que el de las variables. Por ejemplo, pendiente=1 y uso del suelo=1, la peligrosidad de erosión tomará el valor 1.
- Cuando sea posible, se tomará el valor intermedio entre las dos variables. Por ejemplo, si la pendiente=3 y el uso del suelo=1, entonces la peligrosidad de erosión será igual a 2.
- Si hay varios valores intermedios, se optará por el número intermedio de mayor valor. Por ejemplo, si la pendiente=1 y el uso del suelo=4, (los valores intermedios posibles son el 2 y el 3), tomando el valor intermedio más alto el valor de la peligrosidad de erosión es 3.
- Finalmente, si no hay valores intermedios entre las dos variables, el valor final de la peligrosidad de erosión coincidirá con el valor más alto de cualquiera de las dos variables. Por ejemplo, si la pendiente=4 y el uso del suelo=5, el valor de la peligrosidad de erosión es 5.

3.2. Caracterización de la peligrosidad por la susceptibilidad de los suelos

En la Figura 8 se muestra la distribución de la peligrosidad de los suelos por la erosión hídrica. Los suelos ubicados en la zona norte y noroeste de la ciudad de Brazzaville presentan el mayor grado de peligrosidad ante la erosión. Según la Tabla 10 una pendiente de 0 a 3 % representa un área de 994,783 ha, que implica un 3,93 % del peligro de erosión catalogado de bajo para la ciudad de Brazzaville. Los terrenos con pendiente de 20 % a 35 % y de mayor de 35 % figuran con los peligros de alto a muy alto y ocupan una superficie de 1 297,211 ha. Los terrenos de baja a muy baja

pendiente son suelos destinados a la explotación agrícola, ocupan una superficie de 6109,92 ha.

Los suelos consignados para la construcción de viales y zonas residenciales de la ciudad ocupan una superficie de 18 180,183 ha, lo que representa el 71,94 % de la superficie total del área de estudio. Estos suelos presentan las características de sufrir una deformación al contacto con el agua. Esta deformación se debe a la estructura que toman las partículas arenosas en su conformación.

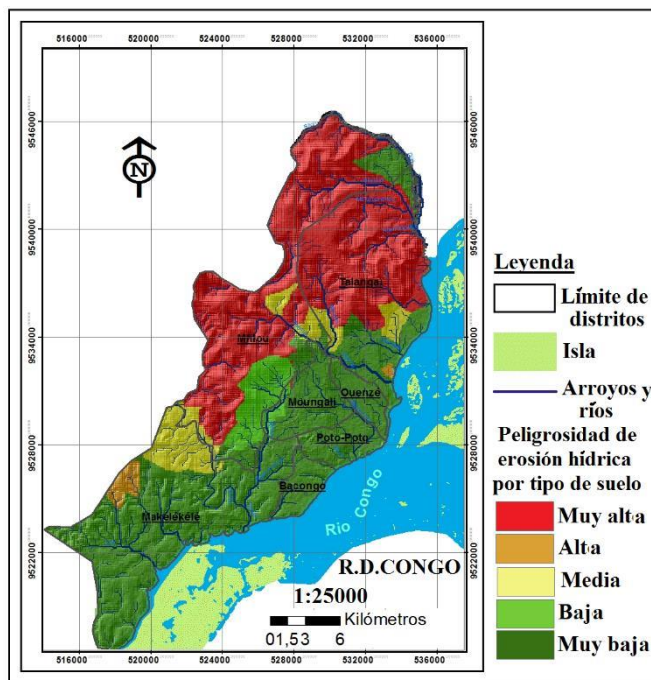


Figura 8. Peligrosidad de erosión hídrica por el tipo de suelo.

Tabla 10. Peligrosidad según la susceptibilidad de los suelos a la erosión hídrica

Clase	Pendiente (%)	Nivel de peligrosidad	Superficie	
			Hectáreas (ha)	Porcentaje (%)
1	0 – 3	Muy bajo	994,783	3,93 %
2	3 – 12	Bajo	18 180,183	71,94 %
3	12 – 20	Mediano	4 412,671	17,46 %
4	20 – 35	Alto	815,884	3,23 %
5	>35	Muy alto	481,327	1,90 %

3.3. Peligrosidad por el grado de cobertura vegetal

La Figura 9 muestra el mapa de peligrosidad por el grado de la cubierta vegetal de la ciudad de Brazzaville. Uno de los problemas más agudos en la ciudad es la deforestación que se produce en los distritos del norte y

noroeste. Estos terrenos al sufrir la deforestación quedan expuestos a la erosión hídrica con mayor intensidad.

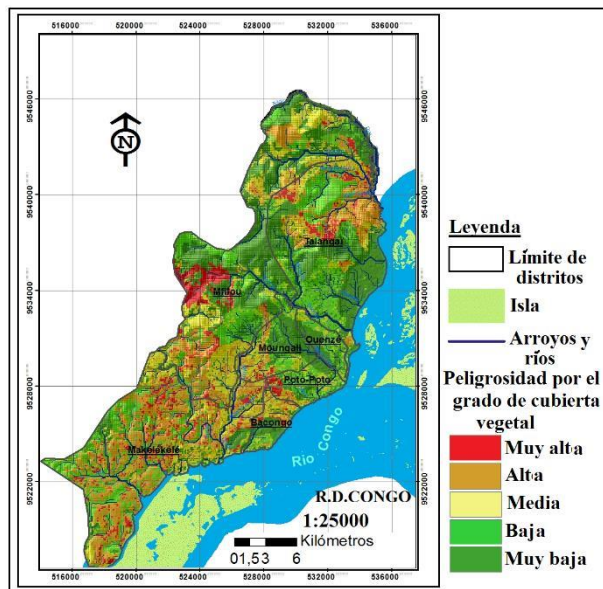


Figura 9. Mapa de peligrosidad por el grado de la cubierta vegetal de la ciudad de Brazzaville.

La ciudad de Brazzaville posee una superficie de 25 268,58 ha. Se catalogan como de peligrosidad muy baja a baja 9 514,53 ha. Con peligrosidad media tenemos un área de 6 931,17 ha. La peligrosidad de alta a muy alta existe en un área de 8 822,88 ha lo que representa el 35 % del total del área de la ciudad (Tabla 11).

El mapa de peligrosidad muestra el grado de amenaza de los distritos norte y noroeste ante los procesos erosivos.

Tabla 11. Peligrosidad por el grado de cobertura vegetal

Nivel	Superficie	
	Hectáreas (ha)	Porcentaje (%)
Bajo y muy bajo	9 514,53	37,07
Mediano	6 931,17	27,43
Elevado y muy elevado	8 822,88	35,51
Total	25 268,58	100

3.4. Evaluación de la peligrosidad total

La peligrosidad total es el resultado del análisis y evaluación de todos los factores causales y condicionantes que intervienen en el proceso de la erosión hídrica; los tipos de suelos y su susceptibilidad, la lluvia, factor del terreno con la longitud de la pendiente, su inclinación y orientación, la

vegetación y el uso de suelo. La Figura 8 representa el mapa de peligrosidad total de erosión hídrica de la ciudad donde se puede apreciar que la parte norte y noroeste reúnen las condiciones favorables para el surgimiento y desarrollo de fenómenos de erosión hídrica de gran magnitud. En la Tabla 8 se exponen los elementos de peligrosidad, según la pendiente, uno de los factores claves en estudio de la erosión hídrica.

Tabla 12. Variación de la peligrosidad total en cada intervalo de la pendiente

Pendiente (%)	Peligrosidad Total	Superficie	
		Hectáreas (ha)	Porcentaje (%)
0 – 3	Muy baja	1 206 990,47	49,21
3 – 12	Baja	578 302,67	23,58
12 – 20	Media	374 010,23	15,25
20 – 35	Alta	235 668,49	9,60
>35	Muy alta	57 481,68	2,34

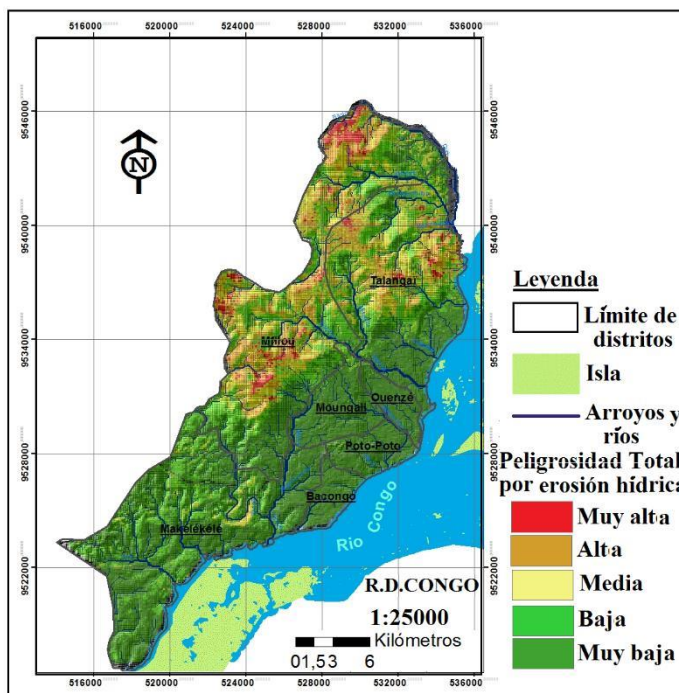


Figura 10. Mapa de peligrosidad total de erosión hídrica.

4. DISCUSIÓN

Las variables establecidas para el análisis de la peligrosidad del suelo por erosión hídrica en la ciudad de Brazzaville están relacionadas con el entorno urbano. Las variables consideradas representan diferentes características del posible comportamiento del fenómeno de la erosión hídrica en su tipología: laminar, surco, cárcavas y barrancos.

Para la ciudad de Brazzaville, la cubierta vegetal y el uso del suelo dan lugar a un alto grado de peligrosidad que, evidentemente, será mayor en la medida que el potencial en zonas de intensa actuación humana se incrementa (erosión acelerada) y menor en las zonas de adecuada cubierta vegetal. Conocer la cubierta vegetal y el uso del suelo actual se convierte así en una tarea primordial, la cual es facilitada mediante el tratamiento de imágenes de satélite Landsat.

Debe considerarse que el control llevado a cabo por medio de la aplicación del SIG y las relaciones existentes entre las variables, muestran que, en general, los resultados atribuyen el grado de peligrosidad de erosión hídrica al uso no adecuado del suelo.

5. CONCLUSIONES

- La aplicación de un método basado en un sistema de información geográfica (SIG) permitió categorizar el nivel de peligrosidad de la ciudad de Brazzaville, constituyendo el principal resultado de este trabajo, el cual brinda información básica para realizar la evaluación ingeniero-geológica, el diseño de planes y manejo de zonas inestables y el ordenamiento del territorio en el plan de gestión regional del espacio natural.
- Se establece que los principales factores que generan peligrosidad por erosión hídrica en la ciudad de Brazzaville se relacionan con la no aplicación de prácticas de conservación y ordenamiento territorial adecuados, haciendo los suelos más vulnerables a la erosión hídrica.
- Los distritos situados al norte, nordeste y noroeste de la ciudad presentan la mayor peligrosidad por erosión hídrica, asociada fundamentalmente a una escasa cobertura vegetal, un suelo arenoso pobre en arcilla y muy erosionable y un relieve predominantemente montañoso.

6. REFERENCIAS

- BOUDZOUYOU, F. 1986: *La chaîne Ouest-Congolienne et son avant-pays au Congo: relation avec le Mayombien; sédimentologie des séquences d'âge protérozoïque supérieur*. Thèse de Doctorat. Université de Droit, d'Economie et de Sciences d'Aix Marseille (France). 220 p.
- CNSEE, 2008: *Répartition de la population du Congo Brazzaville par département et par commune et projetée 2000 à 2015*. Brazzaville. 50 p.
- CODOU, A. 1976: *Géographie: la République Populaire du Congo*. Hatier, collection André-Journaux. 79 p.

- DENIS, B. 1977: *Rapport pédologique concernant des zones situées autour de Makoua et destiné*. ORSTOM, Brazzaville. 69 p.
- DESTHIEUX 1992: Carte géologique de la République du Congo (1/1000.000).
- LE MARECHAL, A. 1966: *Contribution à l'étude des plateaux Batékés (géologie, géomorphologie, hydrogéologie)*. ORSTOM, 78 p.
- NZILA, J. D. 2001: *Les sols du Congo et les problèmes d'aménagement des sols*. E.N.S. Université Marien Ngouabi. 68 p.
- SAMBA, G. & MOUNDZA, P. 2012: Brazzaville, croissance urbaine et ses problèmes environnementaux. Centre de recherches sur les Tropiques Humides, Université de Marien Ngouabi-Congo, p. 3-4.
- SAMBA-KIMBATA, M. J. 1978: *Le climat du Bas Congo*. Thèse de doctorat 3ème cycle. Université de Bourgogne, C.R.C. de Dijon. 260 p.
- SCHWARTZ, D. 1987: *Les sols des environs de Brazzaville et leur utilisation*. ORSTOM, Pointe Noire. 206 p.
- VARNES, D. J. 1984: *Landslide hazard Zonation. A Review of Principles and practice*. UNESCO Press, Paris, 63 p.
- VENNETIER, P. 1977: *Atlas de la République du Congo*. Editions Jeune Afrique, Paris, 67 p.
- WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D. D. 1978: *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. Agriculture*. Handbook 537, United State Department of Agriculture, Washington. 28 p.

Kempena Adolphe, akempena@gmail.com

Departamento de Geología, Facultad de Ciencias y Técnicas,
Universidad Marien Ngouabi, Brazzaville, Congo.

Rafael Guardado Lacaba, rguardado@ismm.edu.cu

Facultad de Minas y Geología,
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba.

Yexenia Viltres Milan, yviltres87@gmail.com

Facultad de Minas y Geología,
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba.

Teresa Hernández Columbié, thez@moanickel.com.cu

Empresa Comandante Pedro Soto Alba, Moa, Cuba.

Dimensión fractal de redes de drenaje controladas estructuralmente en cuencas hidrográficas de Pinar del Río, Cuba

Robert Ramírez-Hernández
Alina Rodríguez-Infante
Alexis Ordaz-Hernández

Resumen

Se investiga, bajo el enfoque de los sistemas fractales y con base en parámetros morfométricos, la red de drenaje conformada por las cuencas hidrográficas de los ríos Cangre, Los Pozos, Paso Viejo, San Diego, Los Palacios, Santa Cruz y San Cristóbal (Pinar del Río, Cuba). A partir de la configuración de las curvas de nivel y la longitud de los ríos se extrajeron las áreas de drenaje de cada una de las corrientes y se calcularon las longitudes real y euclidiana de estas como paso intermedio para estimar los parámetros del cálculo de la dimensión fractal. Se encontró que para cuencas con características geológicas como las aquí estudiadas, la dimensión fractal promedio de las corrientes según Takayasu parece ser la más apropiada. El desplazamiento de las corrientes de orden 2 con respecto a las de orden 1 se atribuye a zonas de drenaje asociadas a corrientes de corto recorrido, propias de zonas tectónicamente activas. El factor litológico parece influir en las características del drenaje de la cuenca Cangre, aunque la mayor influencia sobre el sistema la ejercen las abundantes fallas y fracturas existentes en el área, lo que se sustenta en los altos valores fractales de las cuencas Cangre, San Diego y Los Palacios. El coeficiente de Hurst de estas cuencas es próximo a uno, lo que revela el comportamiento autosimilar de la red. Para el resto de las cuencas no es posible asumir un tipo de comportamiento debido a que el valor de Hurst es muy superior a uno.

Palabras clave: dimensión fractal; tectónica; red de drenaje; parámetros morfométricos; cuencas hidrográficas; Pinar del Río.

Fractal dimension of structurally controlled river networks of Pinar del Río, Cuba

Abstract

River networks were studied applying the fractal systems approach and based on morphometric parameters. Procedures are applied to Cangre, Los Pozos, Paso Viejo, San Diego, Los Palacios, Santa Cruz and San Cristóbal river basins (Pinar del Río, Cuba). Drainage areas were extracted taking into account isolevel lines configurations and river lengths. For every stream the Euclidian length was also estimated, to calculate the river network fractal dimension. It seems that Takayasu approach is the most appropriate to describe basins with the geological characteristics like those included in this study. The shift of order 2 streams with respect to order 1 streams is explained by the presence of drainage zones where streams have short lengths, typically in tectonically active areas. The lithologic factor seems to have influenced the drainage characteristics of Cangre basin, although, in general, the numerous faults and fractures exert a major control on every basin, which is supported by the high fractal values of Cangre, San Diego and Los Palacios basins. The Hurst coefficients of these basins are close to one, revealing a self-similar behavior of the river network. For the remaining basins it is no possible to assume a typical behavior because of the Hurst values are greater than one.

Keywords: fractal dimension; tectonics; drainage networks; morphometric parameters; hydrographic basins; Pinar del Río.

1. INTRODUCCIÓN

En el origen del relieve las fuerzas internas de la tierra juegan el papel primordial, sin embargo, su evolución queda sujeta a la combinación de estas fuerzas con los factores climáticos. Diversos trabajos abordan el estudio del relieve desde el punto de vista tectónico y estructural; otros consideran el papel de estructuras primarias como la estratificación y su influencia sobre el desarrollo del drenaje.

Clark *et al.* (2004) asocian anomalías del drenaje a factores tectónicos y litológicos; Huggett (2007) realiza un estudio de las formas de relieve, así como la orientación de los ejes de estas formas en ambientes transpresionales y transtensionales. Las características de la red de drenaje han sido descritas en varios trabajos, prestando especial atención a los parámetros morfométricos introducidos por Horton (1932, 1945), Strahler (1946) y Hack (1957).

La geometría fractal permite describir patrones irregulares y fragmentados, los que se repiten a diferentes escalas, generalmente, de forma isotrópica. Cuando estos patrones sufren variaciones anisotrópicas al cambio de escala estamos en presencia de un sistema fractal autoafín (Nikora & Sapozhnikov 1993; Nikora *et al.* 1996). La invarianza de escala no es constante en procesos autoafines y los modelos basados en autoafinidad parecen ser más adecuados para describir los patrones de drenaje (Veltri *et al.* 1996). Partiendo de las condiciones de autosimilitud, entre la longitud de los ríos y el área de las cuencas de drenaje Mandelbrot (1977) llegó a la conclusión que la dimensión fractal para corrientes individuales (**d**), era igual a 1,2, mientras que la dimensión fractal de todo el sistema (**D**), era igual o próximo a 2. Los estudios de autosimilitud de la red de drenaje se iniciaron con las leyes de Horton (1932, 1945) cuya definición matemática es:

$$R_B = \frac{N_{u-1}}{N_u} \quad R_L = \frac{\bar{L}_u}{\bar{L}_{u-1}} \quad R_A = \frac{\bar{A}_u}{\bar{A}_{u-1}} \quad R_S = \frac{\bar{S}_u}{\bar{S}_{u-1}} \quad (1)$$

Donde: R_B , R_L , R_A y R_S son relación de bifurcación, relación de longitud, relación de área y relación de gradiente, respectivamente. N_u , \bar{L}_u , \bar{A}_u y \bar{S}_u cuantifican el número, longitud promedio, área promedio y gradiente promedio de las corrientes de orden u .

Este trabajo aborda el cálculo de la dimensión fractal de varias cuencas hidrográficas, aplicando modelos fractales de autosimilitud y autoafinidad, con el propósito determinar a qué modelos se ajustan estas cuencas, y analiza la influencia de las condiciones geológicas de cada una de ellas sobre el cumplimiento de los modelos fractales mencionados.

1.1. Características del área de estudio

El área de estudio se ubica en la zona occidental de Cuba y se extiende desde la cuenca del río Cangre, en el municipio Pinar del Río, hasta la cuenca del río San Cristóbal en el municipio del mismo nombre, provincia Artemisa. Los límites del área están entre los $22^{\circ} 25' 0.0''$ y $22^{\circ} 50' 0.0''$ de latitud norte y los $83^{\circ} 0' 0.0''$ y $83^{\circ} 50' 0.0''$ de longitud oeste. Las cuencas estudiadas ocupan una superficie de 343 km^2 , Figura 1.

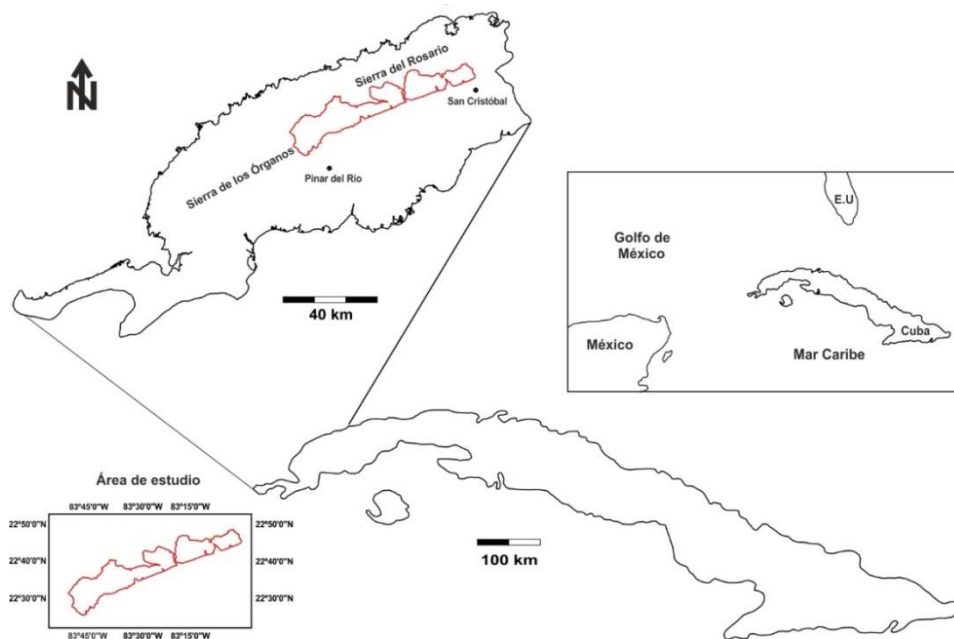


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio.

Geológicamente las cuencas se ubican en las unidades tectónicas de Sierra del Rosario/Alturas de Pizarras del Norte/Esperanza, Alturas de Pizarras del Sur y Cinturón Cangre, definidas por Cobiella-Reguera (2008). Estas unidades constituyen una de las áreas más extensas de afloramientos del margen continental pasivo norteamericano.

Existen notables diferencias entre los cortes terrígenos de las unidades Sierra del Rosario/Alturas de Pizarras del Norte/Esperanza y Alturas de Pizarras del Sur. Aunque en ambas unidades están presentes las rocas de la Fm. San Cayetano, en las Alturas de Pizarras del Sur predominan los sedimentos de aguas someras. Depósitos de turbiditas predominan en la unidad Sierra del Rosario/Alturas de Pizarras del Norte/Esperanza. Hay que destacar que junto a las rocas carbonatadas aparecen intercalaciones de material silíceo (Cobiella-Reguera 2008).

Las alturas de Pizarras del Sur están formadas casi exclusivamente por las rocas de la Fm. San Cayetano. En esta unidad se encuentra, ocupando una

pequeña área, el Cinturón Cangre, considerado el equivalente metamorizado de la Fm. San Cayetano. Piotrowska (1978) plantea que su metamorfismo de alta presión no está vinculado a la orogénesis cubana y es posiblemente un evento Cretácico, aunque su actual posición estructural es resultado de los sobrecorrimientos del Paleoceno tardío-Eoceno temprano.

En los últimos años se han realizado trabajos de detalle para precisar las características estructurales del corte de la parte oriental de la Sierra del Rosario y esclarecer aspectos relacionados con la orogenia cubana, así como con movimientos neotectónicos, en especial, relacionados con falla Pinar (Cofiño & Cáceres 2003; Ordaz 2013).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se estudiaron las cuencas de siete ríos: Cangre, Los Pozos, Paso Viejo, San Diego, Los Palacios, Santa Cruz y San Cristóbal, Figura 2. El área de trabajo es cubierta por 17 hojas topográficas escala 1:25 000.

En una primera etapa se extrajo la red de drenaje que aparece representada en las hojas cartográficas. Además, la red de ríos se completó con todos los posibles cauces que pueden ser cartografiados a partir de la configuración de las curvas de nivel. Las corrientes fueron clasificadas según el método de Strahler (1952), Figura 3.

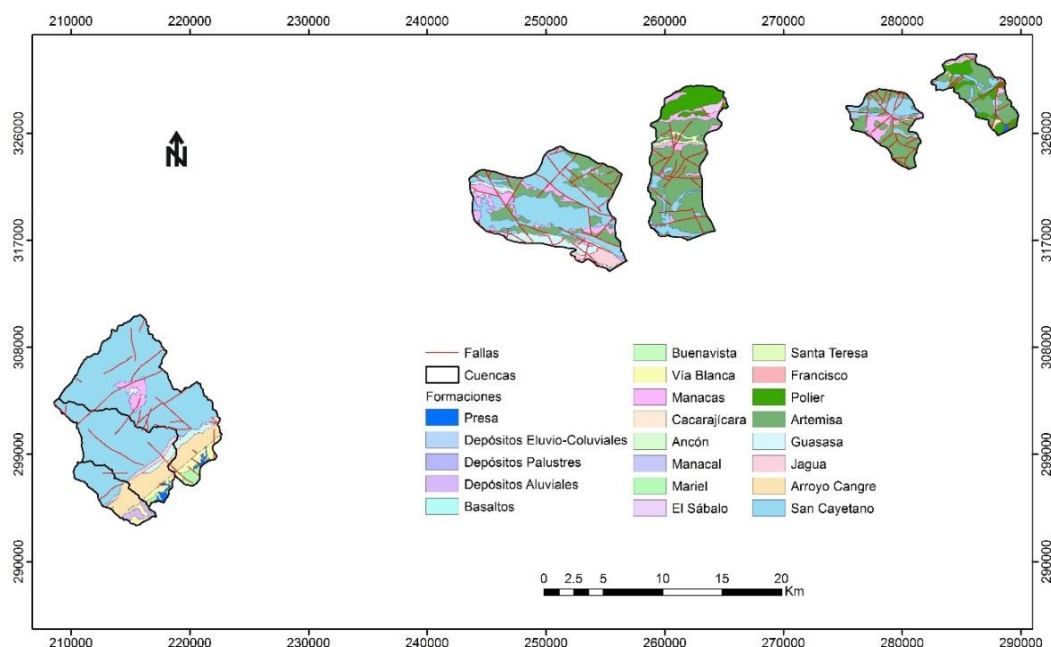


Figura 2. Ubicación de las cuencas hidrográficas y esquema geológico del área de trabajo. De izquierda a derecha y separadas por líneas gruesas: Arroyo Cangre, Los Pozos, Paso Viejo, San Diego, Los Palacios, Santa Cruz y San Cristóbal.

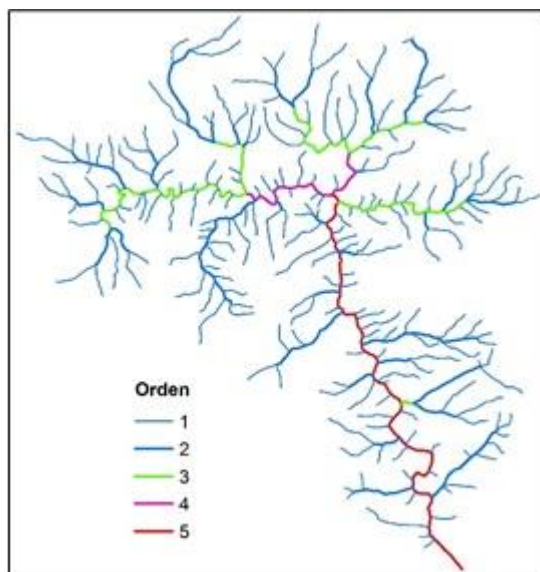


Figura 3 Clasificación de la red de drenaje, según Strahler (1952).

La configuración de las curvas de nivel permitió extraer las subcuencas superficiales y asociarlas a las corrientes que las drenan. Además de la longitud real de las corrientes se calculó la longitud euclidiana de las mismas, como paso intermedio para la estimación de parámetros que intervienen en el cálculo de la dimensión fractal.

Los parámetros morfométricos dependen directamente de propiedades litológicas, tectónicas y estructurales, los que a su vez determinan las características geométricas de la red de drenaje y la cuenca hidrográfica. Debido a la existencia de modelos de autosimilitud (Mandelbrot 1977, 1983; Liu 1992) y modelos de autoafinidad (Nikora & Sapozhnikov 1993; Nikora *et al.* 1996; Veltri *et al.* 1996) para las redes de drenaje se aplicaron métodos de cálculo que tienen en cuenta los fundamentos de ambos modelos (Tabla 1).

Tabla 1. Relaciones para la determinación de la dimensión fractal de una corriente (**d**) y la red de drenaje (**D**)

Estimado	Ecuación	Autor(es)	No
d	$L \propto A^{d/2}$	Mandelbrot (1983)	(2)
d	$L'/L^{1/d}$	Takayasu (1990)	(3)
d	$\max\left(1,2 \cdot \frac{\log R_B}{\log R_A}\right)$	Rosso <i>et al.</i> (1991)	(4)
d	$2 \cdot \frac{\log R_L}{\log R_A}$	Liu (1992)	(5)
D	$Z \propto A^{D/2}$	Mandelbrot (1983)	(6)
D	$d \cdot \frac{\log R_B}{\log R_L}$	Tarboton <i>et al.</i> (1990)	(7)

D	$\left(\frac{1}{2-d}\right) \frac{\log R_B}{\log R_L}$	La Barbera & Rosso (1990)	(8)
D	$2 \cdot \frac{\log R_B}{\log R_A}$	Liu (1992)	(9)
D_G^*	$Z \propto A^{D_G/2}$	Nikora & Sapozhnikov (1993)	(10)

* D_G es la dimensión de lagunaridad, estimador de la dimensión fractal

Adicionalmente el modelo de autoafinidad plantea que los exponentes de escala en las direcciones longitudinal y transversal de la red de drenaje son diferentes. Las relaciones entre los tamaños característicos longitudinal y transversal del drenaje con respecto a la longitud total de las corrientes (Z) y la relación entre el tamaño característico longitudinal de la cuenca y la longitud de una corriente principal son:

$$l \propto Z^{v_l} \quad w \propto Z^{v_w} \quad L \propto l^{1/v_{li}} \tag{11}$$

En estas ecuaciones v_l y v_w representan los exponentes de escala en las direcciones longitudinal y transversal, al tiempo que l y w son los tamaños característicos de la red en las direcciones mencionadas; de forma práctica los exponentes de escala se calculan como:

$$v_l = \frac{\beta v_{li}}{\varepsilon} \quad v_w = \frac{(1-\beta v_{li})}{\varepsilon} \quad D_G = \frac{2}{v_l+v_w} \tag{12}$$

Gráficos logarítmicos de longitud euclidiana vs longitud real de las corrientes permiten probar la hipótesis que plantea que las corrientes a escalas pequeñas son autosimilares: $v_{li} = 1$ (Sapozhnikov & Nikora 1993; Nikora 1994b en Nikora *et al.* 1996). El valor ε se determina a partir de la pendiente de la recta del mejor ajuste en el gráfico de longitud total de las corrientes vs área de las subcuencas, mientras que β es dos veces la pendiente de la recta del mejor ajuste en el gráfico de longitud de la corriente principal vs área de las subcuencas. Si los exponentes v_l y v_w son iguales la red es autosimilar, de lo contrario se plantea que la red es autoafín. En el caso en el cual ambos exponentes son diferentes la dimensión fractal es reemplazada por la dimensión de lagunaridad (D_G), ecuación 12.

Nikora & Sapozhnikov (1993) interpretaron la relación v_w/v_l como el exponente de Hurst, H , el cual caracteriza el grado de autoafinidad de la red; mientras más alejado de 1, más autoafín es la red.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El estudio del comportamiento fractal de la red de drenaje comenzó con el cálculo de los parámetros morfométricos para siete cuencas hidrográficas; los resultados se recogen en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros morfométricos de las cuencas

Ríos	R _B	R _L	R _A	R _s
Cangre	4,59	2,38	5,94	0,42
Los Pozos	4,82	3,13	7,36	0,35
Paso Viejo	3,87	2,49	5,00	0,54
San Diego	3,64	2,20	4,53	0,50
Los Palacios	4,29	3,42	5,36	0,50
Santa Cruz	4,17	2,70	7,45	0,58
San Cristóbal	3,79	2,39	6,14	0,38

Los valores en itálica y negritas son aquellos que exceden o están en los límites de los valores máximos probables observados para la mayoría de las cuencas. Puede apreciarse que casi todos los valores se encuentran en los intervalos más comunes. En la Tabla 3 se muestran los resultados del análisis fractal para las siete cuencas.

Tabla 3. Valores fractales para la red y promedios para las corrientes

Cuenca	d ²⁺	d ³⁻	d ⁴	d ⁵	D ⁶⁺	D ⁷	D ⁸	D ⁹	D ₆ ¹⁰⁺	H
Cangre	1,08	1,09	1,71	0,97	1,81	1,92	1,94	1,71	1,81	0,85
Los Pozos	0,75	1,08	1,58	0,94	1,62	1,81	1,83	1,58	1,62	1,66
Paso Viejo	0,81	1,08	1,68	1,14	1,66	1,58	1,59	1,68	1,66	1,46
San Diego	0,97	1,06	1,71	1,04	1,92	1,75	1,75	1,71	1,92	1,05
Los Palacios	1,09	1,04	1,73	1,46	1,96	1,24	1,24	1,73	1,96	0,83
Santa Cruz	0,31	1,05	1,42	0,99	1,70	1,51	1,52	1,42	1,70	2,17
San Cristóbal	0,70	1,04	1,47	0,96	1,80	1,59	1,59	1,47	1,80	1,83

2: Mandelbrot (1983), 3: Takayasu (1990), 4: Rosso et al. (1991), 5: Liu (1992), 6: Mandelbrot (1983), 7: Tarboton et al. (1990), 8: La Barbera & Rosso (1991), 9: Liu (1992), 10: Nikora & Sapozhnikov (1993);

+ : valores estimados según las pendientes de las rectas ajustadas en gráficos de longitud-área.

- valores estimados según las pendientes de las rectas ajustadas en gráficos de longitud-longitud

Se aprecian en la tabla anterior marcadas diferencias entre los valores estimados y calculados de la dimensión fractal promedio de las corrientes. La diferencia fundamental entre los métodos radica en empleo o no de los coeficientes de Horton para la determinación de los valores fractales. Otro aspecto a tener en cuenta es efecto del área de drenaje que es asignada a

cada una de las corrientes. Hack (1957) calculó la dimensión fractal de las corrientes en las cuencas de los ríos Virginia y Maryland, encontrando d igual a 1,2. Este autor también realizó cálculos para cuencas en el oeste de los Estados Unidos y encontró un valor promedio de 1,4, llegando a la conclusión que d variaba de región a región.

Eagleson (1970 en Tarboton *et al.* 1990) estableció el valor 1,14 como valor fractal promedio para la corriente principal. Este valor fue confirmado más tarde por Tarboton (1988, en Tarboton *et al.* 1990). Gray (1961), Muller (1973) y Hjelmfelt (1988), todos en Tarboton *et al.* (1990), calcularon valores de 1,14, 1,2 y 1,16 respectivamente. Todos los cálculos anteriores se basan en el supuesto del cumplimiento de las leyes de Horton sobre la composición del drenaje. La dimensión fractal de la red, D , se estimó empleando los valores de d^3 , obtenidos según Takayasu (1990). Como se aprecia sólo coinciden en los cálculos los valores de D estimados por Mandelbrot (1983) y Nikora & Sapozhnikov (1993). La Figura 3 muestra la comparación entre diferentes métodos de cálculo de la dimensión fractal d .

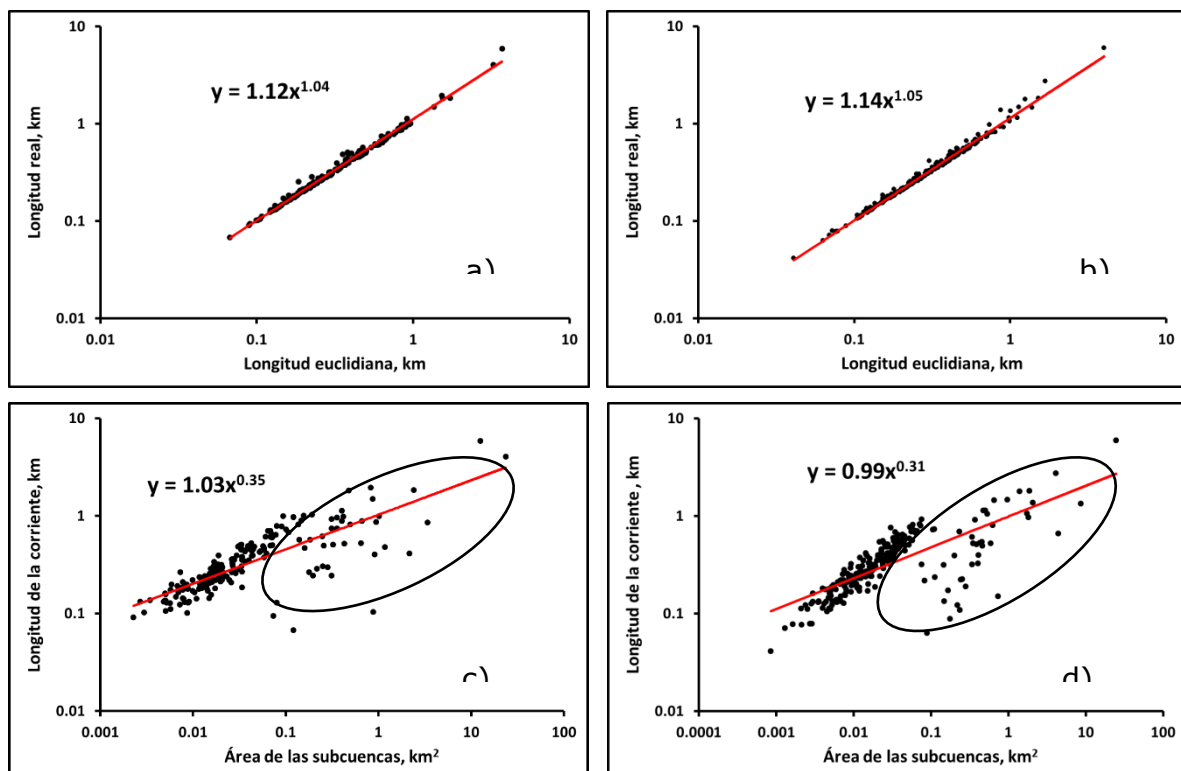


Figura 3. Determinación de la dimensión fractal promedio de la corriente para los ríos San Cristóbal y Santa Cruz a partir de las pendientes de las rectas ajustadas. a) y b) según Takayasu (1990); c) y d) según Mandelbrot (1983). Las elipses encierran los ríos que se alejan de la nube principal, mayormente de orden dos en adelante.

Los valores d según Mandelbrot (1983) son: 0,7 y 0,62, los cuales carecen de interpretación práctica. El parámetro ε se estima a partir de las pendientes de las rectas que se muestran en la Figura 4.

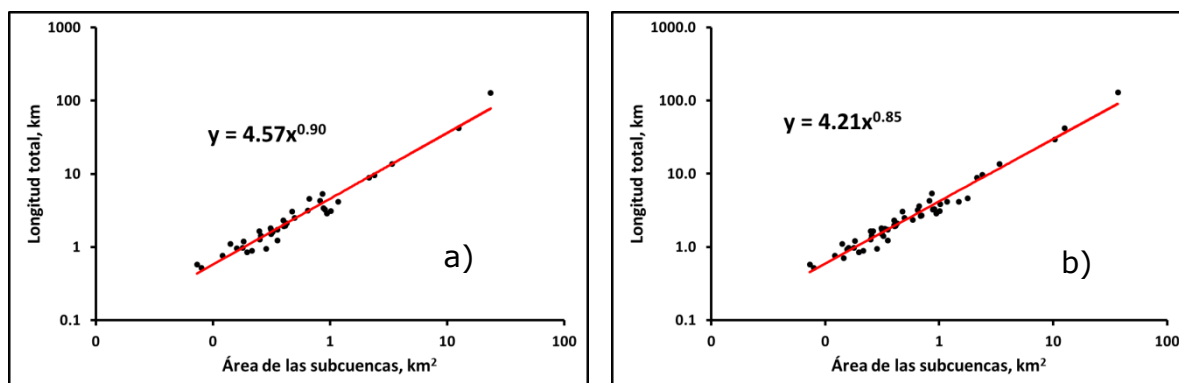


Figura 4. Gráficos para la estimación del parámetro ε , empleado en cálculo de la dimensión fractal de la red: a) río San Cristóbal, b) río Santa Cruz. El eje de las ordenadas representa la longitud total de todas las corrientes que caen dentro de una subcuenca.

4. DISCUSIÓN

Al analizar los parámetros morfométricos de las cuencas llama la atención los valores de la relación de área (R_A) para las cuencas de los ríos Los Pozos y Santa Cruz principalmente. Los valores de ambas cuencas exceden el valor máximo probable de 6. Las variaciones de estos valores promedio fuera de rangos más observados: R_L : 1,5-3; R_B : 3-5; R_A : 3-6; R_S : 0,3-0,6; es el resultado del control tectónico sobre las redes de drenaje. Ríos cortos con amplias áreas de drenaje, ríos extensos con pequeñas subcuencas, ríos de orden superior de pequeña longitud y áreas de drenaje grandes son el resultado de los efectos de los movimientos neotectónicos sobre la conformación del relieve actual y de la configuración del drenaje como el elemento más dinámico dentro del paisaje.

La cuenca Los Pozos posee varios ríos de orden 4, pero uno de ellos es especialmente largo, recorriendo casi toda la cuenca. A diferencia de esta cuenca el río Santa Cruz presenta dos pequeñas corrientes de orden 4 y su corriente de mayor orden, 5, posee una gran longitud. Las corrientes de orden 4 y 5 en las cuencas estudiadas poseen una dirección preferencial NW-SE, siguiendo la dirección de fallas de gran magnitud que según Cofiño & Cáceres (2003) son el resultado del avance diferencial de los mantos durante los cabalgamientos. Un terreno fragmentado en bloques, la presencia de numerosas fallas tectónicas y la existencia de los frentes de cabalgamientos justifican estos comportamientos anómalos, que su vez, alteran los valores promedios de los parámetros morfométricos.

Los puntos encerrados en elipses en las Figuras 3c) y 3d) representan los ríos de orden 2 en adelante, para los cuales sus áreas de drenaje crecen más rápidamente que sus longitudes. Este comportamiento es similar para todas las cuencas estudiadas y ejerce influencia en el cálculo de la dimensión de lagunaridad, así como en la determinación del coeficiente de Hurst (H_{lw}).

Los esfuerzos que originaron la estructura de mantos cabalgados que hoy se observa en toda la cordillera de Guaniguanico cambiaron de dirección al terminar los cabalgamientos. En el Eoceno Medio temprano comienza la rotación horaria del máximo estrés compresivo, al mismo tiempo que σ_3 se acerca también al plano horizontal. Esto favorece las condiciones de transcurrencia, dando lugar a la Zona de Falla Pinar, y con ella a todo un patrón de fracturas de Riedel de segundo orden asociadas a esta, por las cuales circulan las aguas superficiales.

Ríos alargados y rectos, corrientes principales encajadas en sus cauces, con vertientes de pendientes elevadas, pocos afluentes y un medio geológico con presencia de rocas carbonatadas hacen que se violen sistemáticamente las leyes de Horton sobre la composición del drenaje. En opinión de los autores de este trabajo, las condiciones de tectónica activa, transcurrente y vertical, así como el factor litológico, que permite el desarrollo del carso y por lo tanto no favorece el escurrimiento superficial, actúan de forma conjunta impidiendo el desarrollo de la red de drenaje.

4.1. Comportamiento fractal de la red de drenaje

Los valores de la dimensión fractal para las corrientes (Tabla 3) demuestra que los métodos de Mandelbrot (1983) y Rosso *et al.* (1991) no son apropiados para condiciones en las cuales la tectónica y la litología ejercen un fuerte control sobre el drenaje. Valores demasiado bajos (d^{2+}) o demasiado altos (d^4) no son correctos para la dimensión fractal de la corriente.

Tomando como ejemplo el valor $d=1,71$ para la cuenca del río San Diego y sustituyéndolo en ecuación (7) ofrece $D=2,8$; si d se sustituye en ecuación 8 el resultado $D = 5,69$. Ambos valores carecen de significado práctico, debido a que D no puede ser mayor que 2, que es la dimensión topológica de una red que cubre por completo el espacio. Según Robert & Roy (1990) la dimensión fractal de las corrientes no debe estimarse a partir de la relación longitud-área porque es probable que este valor sea dependiente de la escala. Todos los valores de D fueron calculados utilizando d^{3-} , que es la dimensión según Takayasu (1990).

Aunque los métodos de Mandelbrot (1983) y Nikora & Sapozhnikov (1993) producen los mismos resultados **D**, el segundo permite calcular el coeficiente de Hurst, indicador del grado de autosimilitud de la red. Los coeficientes de Hurst ofrecen resultados interesantes para las cuencas Cangre (0,85), San Diego (1,05) y Los Palacios (0,83). En la cuenca del río Cangre predominan los materiales terrígenos de la Fm. San Cayetano, mientras que en San Diego la proporción entre rocas terrígenas y carbonatadas es similar. En esta última cuenca tiene lugar un proceso interesante y es que esta es la zona en la cual las secuencias de Sierra de los Órganos son sobrecorridas por las secuencias de Sierra del Rosario, creando una gran zona de trituración de las rocas, en especial las carbonatadas.

En la cuenca Los Palacios los ríos corren casi exclusivamente sobre calizas. Tomando en cuenta que los valores **D**, obtenidos según los diferentes autores, varían entre ellos se calcula el valor promedio para cada cuenca: Cangre (1,84), Los Pozos (1,69), Paso Viejo (1,63), San Diego (1,81), Los Palacios (1,63), Santa Cruz (1,57) y San Cristóbal (1,65). Puede notarse cómo los valores más altos de **D** promedio coinciden también con los valores más altos del coeficiente de Hurst (Tabla 3) excepto para la cuenca del río Los Palacios como consecuencia de una relación de longitud anómala.

5. CONCLUSIONES

- Los valores de los índices morfométricos están dentro de los rangos calculados para la mayoría de las cuencas a nivel mundial. Excepciones son la R_A para las cuencas Los Pozos y Santa Cruz y la R_L para la cuenca Los Palacios. Ríos encajados profundamente en sus cauces y áreas de drenaje muy variables son las causas de estas desviaciones. La dimensión fractal promedio de las corrientes según Takayasu (1990) parece ser la más apropiada para cuencas con las características geológicas del área estudiada. El método de Mandelbrot (1983) produce valores demasiado pequeños mientras que el método de Rosso et al. (1991) los sobreestima.
- El desplazamiento de las corrientes de orden 2 en adelante con respecto a las de orden 1 puede ser el resultado de amplias zonas de drenaje asociadas a corrientes de corto recorrido, características de zonas tectónicamente activas. El factor litológico parece ejercer influencia sobre las características del drenaje, especialmente en la cuenca Cangre, aunque la mayor influencia sobre el sistema surge de las abundantes fallas y fracturas de las rocas en el área de estudio.

Los elevados valores fractales de las cuencas Cangre, San Diego y Los Palacios confirman esta aseveración. El coeficiente de Hurst de estas cuencas se aproxima a 1 indicando el comportamiento autosimilar de la red. Para el resto de las cuencas no es posible asumir un tipo de comportamiento, pues los valores de Hurst son bastante superiores a uno, lo cual contradice lo planteado en la literatura sobre el tema.

6. REFERENCIAS

- CLARK, M. K.; SCHOENBOHM, L. M.; ROYDEN, L. H.; WHIPPLE, K. X.; BURCHFIEL, B. C.; ZHANG, X.; TANG, W.; WANG, E. & CHEN, L. 2004: Surface uplift, tectonics and erosion of eastern Tibet from large-scale drainage patterns. *Tectonics* 23(1): 1-21.
- COBIELLA-REGUERA, J. L. 2008: Reconstrucción palinspástica del paleomargen mesozoico de América del Norte en Cuba occidental y el sudeste del Golfo de México. Implicaciones para la evolución del SE del Golfo de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 25(3): 382-401.
- COFIÑO, C. E. & CÁCERES, D. 2003: Efectividad de la utilización de métodos microtectónicos en el desciframiento de la evolución de estructuras tectónicas (Falla Pinar). *Minería y Geología* 19(3-4): 29-34.
- HACK, J. T. 1957: Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland. U.S. Geological Survey, Professional Paper 294: 45-97.
- HORTON, R. E. 1932: Drainage basin characteristics. *Transactions American Geophysical Union* 13(1): 350-361.
- HORTON, R. E. 1945: Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society America Bulletin* 56(3): 275-370.
- HUGGETT, R. J. 2007: *Fundamentals of Geomorphology*. Second edition. Routledge, London, 458 p.
- JAIN, V. E. 1973: *Geotectónica General*. Parte I. Mir, Moscú, 357 p.
- LA BARBERA, P. & ROSSO, R. 1990: Reply. *Water Resources Research* 26(9): 2245-2248.
- LIU, T. 1992: Fractal structure and properties of stream networks. *Water Resources Research* 28(11): 2981-2988.
- MANDELBROT, B. B. 1977: *Fractals, form, chance and dimension*. W. W. Freeman and Company, San Francisco.
- MANDELBROT, B. B. 1983: *The fractal geometry of nature*. W. H. Freeman and Company, New York.
- NIKORA, V. I. & SAPOZHNIKOV, V. B. 1993: River network fractal geometry and its computer simulation. *Water Resources Research* 29(10): 3569-3575.

- NIKORA, V.; IBBITT, R. & SHANKAR, U. 1996: On channel network fractal properties: A case of study of the Hutt River basin, New Zealand. *Water Resources Research* 32(11): 3375-3384.
- ORDAZ, A. 2013: *Evaluación de las condiciones ingeniero-geológicas para el pronóstico de la respuesta dinámica de los suelos. Caso de estudio: Ciudad de San Cristóbal, Cuba occidental*. Tesis de doctorado. Universidad de Pinar del Río.
- PIOTROWSKA, K. 1978: Nappe structure of Sierra de los Órganos, western Cuba. *Acta Geologica Polonica* 28(1): 97-170.
- ROBERT, A. & ROY, A. G. 1990: On the fractal interpretation of the mainstream length-drainage area relationship. *Water Resources Research* 26(5): 839-842.
- ROSSO, R.; BACCHI, B. & LA BARBERA, P. 1991: Fractal relation of mainstream length to catchment area in river networks. *Water Resources Research* 27(3): 381-387.
- STRAHLER, A. N. 1946: Elongate entrenched meanders of Conodoguinet Creek. *American Journal of Science* 244(1): 31-40.
- STRAHLER, A. N. 1952: Dynamic basis of geomorphology. *Geological Society of America Bulletin* 63(9): 923-938.
- TAKAYASU, H. 1990: *Fractals in the physical sciences*. Manchester University Press, Manchester.
- TARBOTON, D. G.; BRAS, R. L. & RODRÍGUEZ-ITURBE, I. 1990: Comment on "On the fractal dimension of stream networks" by Paolo La Barbera and Renzo Rosso. *Water Resources Research* 26(9): 2243-2244.
- TARBOTON, D. G. 1996: Fractal river networks, Horton's laws and Tokunaga cyclicity. *Journal of Hydrology* 187(1-2): 105-117.
- VELTRI, M.; VELTRI, P. & MAIOLO, M. 1996: On the fractal description of natural channel networks. *Journal of Hydrology* 187(1-2): 137-144.

Robert Ramírez-Hernández, robertrh@upr.edu.cu

Máster en Ciencias. Profesor Auxiliar
Universidad de Pinar del Río, Cuba

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

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

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

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

Diversificación del uso industrial del yacimiento Río del Callejón: obtención de sulfato de aluminio para tratamiento de agua

Leonardo Rodríguez-Suárez
Alberto Hernández-Flores
Carmen Rodríguez-Acosta

Resumen

Con el objetivo de obtener sulfato de aluminio para su uso industrial como coagulante en el tratamiento de las aguas, se realizaron pruebas experimentales a escala de laboratorio con una muestra del yacimiento Río del Callejón perteneciente al municipio especial Isla de La Juventud, la muestra caracterizada desde el punto de vista químico y granulométrico fue sometida a un proceso tecnológico que tuvo como operaciones fundamentales la calcinación y la lixiviación con ácido sulfúrico. Para la realización de las pruebas tecnológicas se empleó el método de tamizado de Plackett – Burman, para lo que se tuvieron como variables independientes; temperatura de calcinación, tiempo de calcinación, temperatura de lixiviación, tiempo de lixiviación, velocidad de agitación, concentración de ácido y relación líquido sólido. Como resultados fundamentales del trabajo se obtuvo, el sulfato de aluminio con características apropiadas para ser empleado como sustancia coagulante para el tratamiento de aguas de consumo humano y de aguas residuales. Se confirmó mediante una corrida adicional en la cual se obtuvo aproximadamente un 17 % más del producto de interés, que las variables independientes de mayor influencia en el proceso de obtención del sulfato de aluminio, son: en primer lugar la temperatura de calcinación y en menor grado y en orden descendiente, la relación sólido / líquido y el tiempo de lixiviación.

Palabras clave: caolín; calcinación; diseño de Plackett–Burman; lixiviación ácida; sulfato de aluminio.

Diversification of the industrial use of the land river layer: obtaining aluminum sulfate for water treatment

Abstract

With the objective of obtaining aluminum sulphate to be used as a coagulant in the water treatment, experimental test works were conducted with a sample of the kaolin ore body Río del Callejón located in the special municipality of the Isle of Youth. The sample was characterized from the chemical and granulometric point of view and was subjected to a technological process with calcination and sulphuric acid leaching being the main operations. The Plackett–Burman screening design was used in the technological tests taking calcination temperature, calcination time, leaching temperature, leaching time, agitation velocity, acid concentration and liquid-solid ratio as independent variables. An aluminum sulphate with suitable characteristics to be used as a coagulant substance in water treatment (human consumption and residual) was obtained. The experimental results revealed that the aluminum sulphate obtained shows better quality than that of the one currently obtained in the industry using aluminum hydroxide.

Keywords: acid leaching; aluminum sulfate; calcination; kaolin; Plackett-Burman design.

1. INTRODUCCIÓN

Cuba posee depósitos minerales del grupo del caolín distribuidos en gran parte del territorio nacional entre los que se pueden señalar: Río del Callejón, Pino, Toño y Dumañuecos en la Isla de la Juventud; Mir en Holguín; Hortensia, Camagüey; Brooklyn y Santa Isabel de Pinar del Río, así como Gaspar y Bañadero, en Ciego de Ávila. Estos recursos han sido utilizados hasta el presente en lo fundamental para la industria cerámica, cosméticos y la industria del cemento (Batista –González *et al.* 2009). Los recursos minerales del yacimiento Río del Callejón se han utilizado fundamentalmente en la industria cerámica Fina y en menor grado en la cerámica especial, sin embargo en este depósito mineral se calculan reservas que en sus diferentes categorías de medidas, indicadas e inferidas suman cantidades cercanas a los 40 000 000 de toneladas, con contenidos promedios de óxido de aluminio (Al_2O_3) de 32,2% y de óxido de hierro (Fe_2O_3), de 2,4% (ONRM 2008).

Es conocido además que la industria química cubana requiere de producir grandes cantidades de sulfato de aluminio para el tratamiento de las aguas, ya sea en los acueductos, o las aguas residuales. Según la Oficina Nacional de Estadística en el período comprendido en los años 2006 al 2015, se dio tratamiento al 95,7% del agua suministrada a los acueductos, al mismo tiempo que se trató el 34,1 % de las aguas residuales (ONEI 2016).

El sulfato de aluminio es el coagulante tradicional que se utiliza a escala mundial para el tratamiento de las aguas, en Cuba se obtiene este producto a partir del hidróxido de aluminio, que se importa y del ácido sulfúrico de producción nacional. A pesar de ello, el país no logra cubrir el 100 % de la demanda de este producto químico para el tratamiento tanto del agua potable como de aguas residuales, esto hace que en las comunidades rurales y aquellas que se abastecen de fuentes de fácil acceso, se realice el consumo de agua sin el tratamiento químico requerido (Rodríguez *et al.* 2005).

Por las razones expuestas se realiza este trabajo de investigación que tiene como objetivo obtener sales de aluminio a partir de recursos minerales del yacimiento Río de Callejón en la Isla de la Juventud, para el tratamiento de las aguas de consumo y residuales en el territorio nacional.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Como proceso fundamental para la obtención del sulfato de aluminio se utilizó la lixiviación con ácido sulfúrico. Esta operación unitaria, que resulta una de las más antiguas empleada en la industria química, y fundamental en la hidrometalurgia, tuvo como factores principales a controlar los

siguientes: (i) solvente a utilizar; (ii) temperatura del proceso, y (iii) tratamiento previo que se le realiza al sólido (Treybal 1990).

Para la realización de las pruebas se utilizó una muestra del yacimiento Río del Callejón, los resultados del análisis químico y granulométrico se exponen en la tabla 1. Las características del ácido sulfúrico empleado en la lixiviación, procedente de la Empresa Rayonitro se muestran en la tabla 2.

Tabla1. Composición química y granulométrica de la muestra

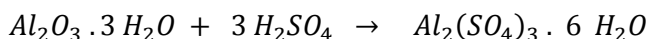
Ensayo	Contenido, %
SiO ₂	54,69
Al ₂ O ₃	23,32
Fe ₂ O ₃	0,56
MgO	0,021
CaO	No detectable
K ₂ O	1,43
Na ₂ O	7,63
PPI	10,42
pH	5,70
H ₂ O	1,65
Granulometría > 60 mesh	10,50
De 60 mesh a 200 mesh	32,50
< 200 mesh	57,00

Tabla 2. Caracterización del ácido sulfúrico técnico empleado en la lixiviación

Ensayos	Resultados
Acidez total como H ₂ SO ₄	97,96 %
Hierro	10,65 mg/L
Cobre	0,6 mg/L
Níquel	5,85 mg/L
Residuo fijo por ignición	0,014 %
Densidad	1,843 g/mL a 20 °C
Sustancias reductoras al permanganato	0,001 %

La calcinación se realizó en una mufla Furnace 6000, Barnstead Thermolyne con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min. Para el filtrado de los cristales se utilizó un embudo con el papel de filtro F - 2041, a una presión de vacío de -0,6 bar, y se terminó de secar a temperatura ambiente.

La reacción entre el ácido sulfúrico y el óxido de aluminio presente en el caolín, se desarrolla según la siguiente ecuación:



Se utilizó un agitador magnético marca Thermo Scientific Cimarec™ Stirring Hot Plates, donde se regula la temperatura y la velocidad de agitación. Se empleó un termómetro de mercurio para verificar la temperatura real de la mezcla: agua, ácido sulfúrico y caolín.

De acuerdo a la literatura consultada (Buenrostro 2003; Torres–Janneth, Castelló & Vizcayo 2011 y Velásquez & Vélez 2014) se seleccionaron las variables y sus respectivos niveles (Tabla 3).

Tabla 3. Variables independientes a considerar en el diseño de lixiviación del caolín y el ácido sulfúrico

Factores	Bajo	Alto	Unidades
Temperatura de calcinación	25,0	700,0	°C
Tiempo de calcinación	60,0	120,0	min
Temperatura de lixiviación	80,0	105,0	°C
Tiempo de lixiviación	60,0	120,0	min
Velocidad de agitación	350	612	rpm
Concentración de ácido	11,7	29,2	% en peso
Relación sólido/líquido	4,0	6,0	Relación 1:4/1:6

Para determinar la influencia de las variables independientes, se elaboró una matriz de experimentos según el método de tamizado Plackett–Burman empleando el software estadístico Statgraphics Centurión XVI como se observa en la Tabla 4.

Tabla 4. Matriz del diseño de experimento de Plackett – Burman codificado, con sus valores reales entre paréntesis, empleado en la lixiviación ácida del caolín

Corrida	Temperatura de calcinación, °C	Tiempo calcinación, minutos	Temperatura lixiviación, °C	Tiempo lixiviación, minutos	Velocidad agitación, rpm	Concentración de ácido, %	Relación sólido / líquido
1	1(700)	-1 (60)	-1 (80)	-1 (60)	1 (612)	1 (19,95)	1 (6)
2	-1(25)	-1 (60)	-1 (80)	-1 (60)	-1 (350)	-1 (17,50)	-1 (4)
3	-1 (25)	-1 (60)	1 (105)	1 (120)	1 (612)	-1 (11,45)	1 (6)
4	-1 (25)	1 (120)	1 (105)	-1 (60)	1 (612)	-1(17,38)	-1 (4)
5	1 (700)	1 (120)	1 (105)	-1 (60)	1 (612)	1 (28,97)	-1 (4)
6	1 (700)	-1 (60)	1 (105)	1 (120)	-1 (350)	1 (29,06)	-1 (4)
7	1 (700)	1 (120)	-1 (80)	1 (120)	1 (612)	-1 (11,88)	1 (6)
8	-1 (25)	1 (120)	-1 (80)	-1 (60)	-1 (350)	1 (19,24)	1 (6)
9	1 (700)	-1 (60)	1 (105)	-1 (60)	-1 (350)	-1 (12,17)	1 (6)
10	-1 (25)	-1 (60)	-1 (80)	1 (120)	1 (612)	1 (28,87)	-1 (4)
11	1 (700)	1 (120)	-1 (80)	1 (120)	-1 (350)	-1 (17,45)	-1 (4)
12	-1 (25)	1 (120)	1 (105)	1 (120)	-1 (350)	1 (19,14)	1 (6)

* La concentración reflejada es la valorada por titulación ácido – base con hidróxido de sodio antes de iniciar la lixiviación.

2.1. Características geológicas del yacimiento Rio del Callejón

Desde el punto de vista genético los depósitos de caolines en Cuba se corresponden con los siguientes tipos:

De meteorización residuales: Se asocian a los depósitos eluvio–deluviales desarrollados a expensa de la meteorización de secuencias de esquistos metaterrígenos (*PJ*) y de los granitoides (*K2*). En su composición predomina la caolinita, con contenidos variables de cuarzo y montmorillonita e impregnaciones de óxido férrico. Forman capas irregulares de un espesor útil promedio de 10 m – 20 m y lentes de tamaño variable con espesor de 10 m. En todos los casos se observan en el corte relictos de la roca madre o lentes de arena cuarzosa y arcillas rojas, además de bloques de cuarcita.

Hidrotermales: Se forman debido a la alteración de las rocas vulcanógenas de composición media–ácida (*K2cn – cp*) y de los granitoides (*K2*). En ellos predomina la caolinita, con contenidos variables de montmorillonita; forman

capas alargadas y lentes de espesores irregulares, distribuidas de modo diferente en el corte de la secuencia vulcanógena. También se presentan como manifestaciones de arcillas caoliníticas de color blanco, blanco-rojizo, abigarradas y hasta gris oscuro. A veces en la superficie se asocian a concreciones ferruginosas y cuarzo derivado de vetas. También aparecen arcillas caoliníticas refractarias y semi-refractarias, así como andesitas caolinizadas.

El yacimiento Río del Callejón es un depósito del tipo de meteorización, está constituido por tres componentes básicos: Río del Callejón (cemento blanco), Río del Callejón (mina vieja) y Río del Callejón (*BB – 1*) con sus calidades correspondientes (Batista-González *et al.* 2009).

Esta materia prima mineral caolinítica en su composición mineralógica general contiene caolinita, cuarzo, feldespato, limonita, montmorillonita, minerales de hierro, oro nativo, pirita, micas, clorita, goethita, dickita, zunyita, hematita y sericita.

En la tabla 5 se pueden apreciar las cantidades del recurso por categoría según el Balance Nacional.

Tabla 5. Recursos del yacimiento Río del Callejón (según BNRR de 2008)

Categoría	Recursos en 10 ³ t	Contenidos (%)	
		Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
Medido	9 680,019	31,34	1,95
Indicado	14 230,364	32,66	2,64
Inferido	13 625,497	32,79	2,68

Se calcinó a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min partiendo de la temperatura ambiente hasta llegar a la temperatura prefijada de 700 °C. Una vez llegado al tiempo prefijado, se apagaba la mufla y se dejaba enfriar hasta el día siguiente.

La reacción de lixiviación se llevó a cabo en un beaker de 1000 mL, los reaccionantes se agregaban en el siguiente orden: el agua, el ácido sulfúrico; se calentaba hasta llegar a la temperatura indicada en cada corrida y manteniendo la agitación constante, se agregaba la totalidad de los 50 gramos de caolín. El tiempo de reacción se comenzó a contar a partir de haber finalizado la adicción del sólido en cada corrida experimental. Para mantener el nivel del líquido y a su vez, la relación sólido/líquido constante durante todo el tiempo que duraba la reacción, se agregaba agua del grifo cada quince minutos aproximadamente, manteniendo el volumen inicial antes de comenzar la reacción.

El esquema tecnológico que se utilizó en los experimentos, sobre cuya base se realizaron las pruebas experimentales, se muestra en la Figura 1.

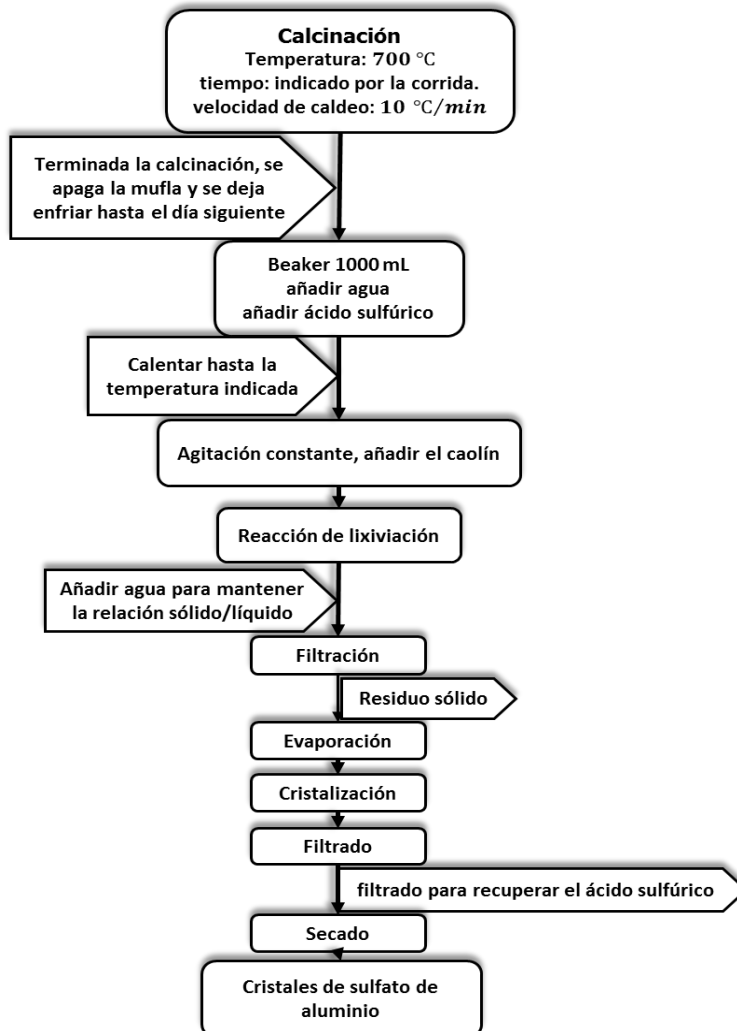


Figura 1. Esquema tecnológico empleado en los experimentos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 6 se observan los valores decodificados del diseño, así como los valores obtenidos de la variable respuesta. Resulta significativa la influencia de la temperatura de calcinación en la reacción de lixiviación a 700 °C, por el contrario, cuando ocurre la reacción a temperatura ambiente, la obtención de sal es prácticamente despreciable. Estos resultados se corresponden con los obtenidos por otros autores que plantean que la activación térmica es la forma más efectiva y empleada para modificar la estructura cristalina de las arcillas y alcanzar el máximo potencial de reactividad. Esta alta reactividad hace que sea más soluble el caolín y que las cantidades de aluminio disuelto sean mayores, tanto en medio ácido como en medio alcalino (Galán-Liberto 1986; García-Colina 1995).

Tabla 6. Diseño de experimento de Plackett – Burman con la variable respuesta, peso de los cristales

Corrida	Concentración de ácido, %			Peso de los cristales, de Sulfato de Aluminio (g)
	concentración real, % *	Cantidad ácido, (g)	Cantidad de agua, (g)	
1	19,95	58,3	241,7	41,42
2	17,5	34,98	165	1,51
3	11,45	34,98	265	7,07
4	17,38	34,98	165	6,04
5	28,97	58,3	141,7	33,27
6	29,06	58,3	141,7	42,28
7	11,88	34,98	265	49,58
8	19,24	58,3	241,7	3,94
9	12,17	34,98	265	51,11
10	28,87	58,3	141,7	8,45
11	17,45	34,98	165	37,9
12	19,14	58,3	241,7	9,77

* La concentración reflejada es la valorada por titulación ácido – base con hidróxido de sodio antes de iniciar la lixiviación.

En la Figura 2 que expone el Diagrama de Pareto Estandarizado para la variable respuesta peso de los cristales, en el diseño de Plackett – Burman se corrobora la marcada influencia de la temperatura de calcinación en la obtención del sulfato de aluminio, es decir, se favorece la obtención del producto con una mayor temperatura de tratamiento térmico del caolín. Está marcada influencia de la temperatura de calcinación está dada por el efecto que tiene ésta en la estructura cristalina del caolín, pues entre los 500 – 900 grados Celsius, ocurre la deshidroxilación, es decir, la eliminación de agua de cristalización acompañada de una desaparición progresiva de la cristalización. El producto que se obtiene es un material amorfo con un alto grado de reactividad (Galán 1986; García-Colina 1995).

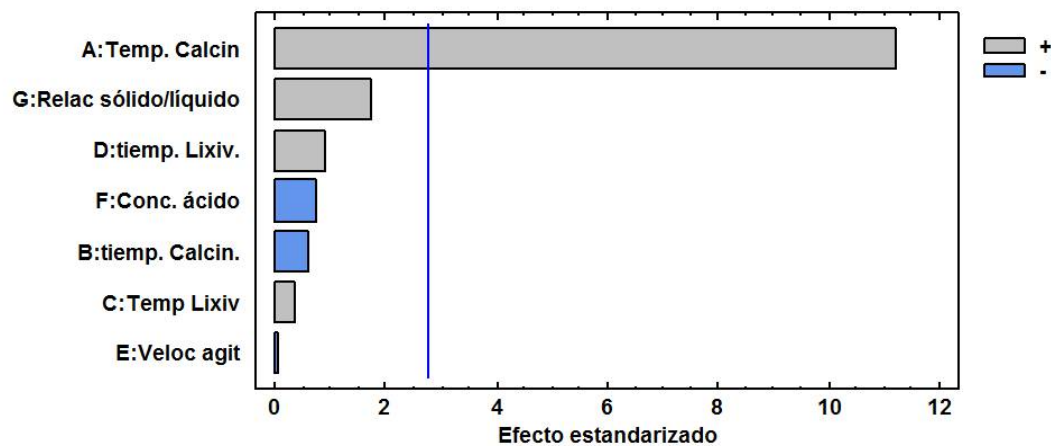


Figura 2. Diagrama de Pareto Estandarizado para la variable respuesta peso de los cristales, en el diseño de Plackett - Burman.

La relación sólido/líquido y el tiempo de lixiviación tienen menor influencia en la variable respuesta, no obstante, se beneficia la obtención del sulfato de aluminio cuando ambas se encuentran en su máximo valor. La concentración del ácido, tiene menor influencia en la respuesta, pero favorece a ésta cuando está en su valor mínimo.

El tiempo de calcinación tiene aún menor influencia en la variable respuesta, favoreciéndola con el valor mínimo, es decir, con un tiempo de tratamiento de 60 minutos, coincidiendo con lo reportado, donde la pérdida de cristalinidad, y por ende la facilidad de extraer el aluminio, mantiene una estrecha relación, al menos, hasta el momento en que se destruye el arreglo cristalino en el caolín. A partir de este instante se mantiene constante la pérdida de cristalinidad (Buenrostro 2003).

El comportamiento de las variables temperatura de lixiviación y velocidad de agitación, tienen menor efecto sobre la respuesta, pero esta se favorece cuando la temperatura de lixiviación está en su nivel más alto, La velocidad de agitación no influye en la respuesta.

La ecuación del modelo ajustado es la siguiente:

Peso de cristales

$$\begin{aligned}
 &= 24,3617 + 18,2317 * \text{Temp. Calcin} - 0,945 \\
 &* \text{tiemp. Calcin.} + 0,561667 * \text{Temp Lixiv} + 1,48 \\
 &* \text{tiemp. Lixiv.} - 0,0566667 * \text{Veloc agit} - 1,17333 * \text{Conc. ácido} \\
 &+ 2,78667 * \text{Relac sólido/líquido}
 \end{aligned}$$

El análisis de varianza para las variables independientes del diseño se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Análisis de varianza para las variables independientes del diseño Plackett – Burman desarrollado

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura Calcinación	3988,72	1	3988,72	125,72	0,0004
B:tiempo Calcinación	10,7163	1	10,7163	0,34	0,5923
C:Temperatura Lixiviación	3,78563	1	3,78563	0,12	0,7472
D:tiempo Lixiviación	26,2848	1	26,2848	0,83	0,4142
E:Velocidad agitación	0,0385333	1	0,0385333	0,00	0,9739
F:Concentración ácido	16,5205	1	16,5205	0,52	0,5105
G:Relación sólido/líquido	93,1861	1	93,1861	2,94	0,1617
Error total	126,906	4	31,7265		
Total (corr.)	4266,16	11			

R-cuadrada = 97,0253 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 91,8195 por ciento

Error estándar del est. = 5,63263

Error absoluto medio = 2,82944

Estadístico Durbin-Watson = 2,33898 (P=0,6865)

En la ecuación ajustada para el modelo, se aprecia una concordancia con lo analizado anteriormente de acuerdo al gráfico de pareto estandarizado. Según esta ecuación los coeficientes de mayor valor después del correspondiente a la temperatura de calcinación son: el coeficiente de la relación sólido/líquido y el coeficiente del tiempo de lixiviación.

Teniendo en consideración lo anterior, se hace una corrida adicional, donde se aumenta el tiempo de lixiviación a 180 minutos, con los valores de las otras variables independientes iguales. El valor de la variable respuesta, peso de los cristales, en estas condiciones fue de 60 gramos de sulfato de aluminio, este valor representa cerca del 17 % más del máximo valor alcanzado en la corrida 9 del diseño (51,11 gramos de sulfato de aluminio).

Como resultado de la prueba tecnológica con la muestra del yacimiento Río del Callejón se puede aseverar que los cristales de sulfato de aluminio obtenidos de la lixiviación del caolín de Río del Callejón con ácido sulfúrico, son blancos. De las 12 corridas experimentales en seis, la lixiviación produjo la sal de interés en cantidades significativas que resultan de interés práctico. La tabla 8, expone las corridas y los análisis llevados a cabo según

la norma cubana NC 387: 2005. *Productos químicos para uso industrial. Sulfato de aluminio.*

Tabla 8. Análisis del sulfato de aluminio obtenido en las diferentes corridas, según la NC 387: 2005. Productos químicos para uso industrial. Sulfato de aluminio

No. corrida	alúmina total soluble (Al_3O_2), %	hierro total soluble en agua (Fe_3O_2), %	Acidez libre como (H_2SO_4), %	Materia insoluble, %
2	23,41	0.036	25.68	-
3	22,52	0.007	31.33	-
5	21,18	0.055	24.90	-
9	23,71	0.065	24.73	-
9	24,35	0.012	23.31	-
11	24,45	0.005	26.54	-
NC 387:2005 Terrón o en grano grado técnico	Mínimo, 17 %	0.75, sobre la base de 17 % Al_3O_2	Acordado entre cliente y proveedor	Máximo 0.5
Referencia ¹	Mínimo, 17 %	0.2 – 0.4	0.5 – 2.0	Máximo 0.5

¹ Sulfato de aluminio obtenido actualmente en la planta industrial.

De la tabla 8, se puede observar que los valores de óxido de aluminio, están por encima del mínimo estipulado por la norma cubana. Los valores de hierro total soluble en agua, se encuentran muy por debajo del indicado en la misma, lo cual permitiría usar este producto en aplicaciones adicionales a las del tratamiento de agua, en la industria del papel, por ejemplo. La acidez libre, en forma de ácido sulfúrico, es un parámetro a consultar, pues como indica la norma, habría que conciliar con el cliente para determinar si acepta el producto con este valor.

Para comparar el producto obtenido, se toma como referencia los valores del sulfato de aluminio que produce actualmente la industria en el país a partir de la reacción entre el hidróxido de aluminio y el ácido sulfúrico. Exceptuando el valor de la acidez libre, los valores obtenidos son similares.

4. CONCLUSIONES

- El sulfato de aluminio obtenido cumple con los valores normados para ser utilizado como producto químico en el tratamiento de aguas de consumo humano y de aguas residuales. Los resultados experimentales indican que el sulfato de aluminio que se obtiene a partir el yacimiento Río del Callejón presenta indicadores de calidad

superiores al sulfato de aluminio que se obtiene hoy en la industria a partir del hidróxido de aluminio.

- La temperatura de calcinación resulta la variable de mayor influencia en el peso de los cristales de sulfato de aluminio. Las variables relación líquido/sólido y tiempo de lixiviación a pesar de no resultar significativas desde el punto de vista estadístico, con el aumento de ambas se favorece el peso de los cristales de sulfato de aluminio.
- Los mejores resultados se obtienen con las siguientes condiciones de operación:
 - Temperatura Calcinación: 700 °C
 - Relación sólido/líquido: 1:6
 - Tiempo de lixiviación: 180 minutos
 - Concentración ácido: 12,17 %
 - Tiempo Calcinación: 60 min
 - Temperatura Lixiviación: 105 °C
 - Velocidad agitación: 350 rpm

5. REFERENCIAS

- BATISTA-GONZÁLEZ ET AL. 2009: Información reducida INFOYAC, para la recopilación de datos de los yacimientos Río del Callejón y Dumañuecos. INFOYAC® – Sistema Informativo para los Recursos Minerales de Cuba. Marca Registrada.
- BUENROSTRO, J. F. 2003: *Estudio del proceso de obtención de amonoalunita a partir de caolín para su transformación a alúmina*. Tesis de maestría. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. Consultado: 14 jul 2016. Disponible en: <http://www21169.cnki6.com/tesiuami/UAMI10795.pdf>
- GALÁN, LIBERTO DE PABLO. 1986: Solubilidad de la metacaolinita y de caolinita en medio ácido *Revista mexicana de ciencias geológicas* 6(2): 163–170. Consultado: 14 oct 2016. Disponible en: <http://www.biblioteca.org.ar/libros/91285.pdf>
- GARCIA COLINA, FERNANDO. 1995: Procesos industriales de acondicionamiento del caolín para su utilización como materia prima en la síntesis de zeolita X. [en línea]. Memoria presentada para optar al grado de Doctor en Química. Departamento de ingeniería química y metalúrgica. Unversidad de Barcelona, [fecha de consulta: 29 de junio de 2016]. Disponible en: http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/35418/15/06.FGC_1de10.pdf

- OFICINA NACIONAL DE RECURSOS MINERALES (ONRM). 2008: Balance Nacional de Recursos Minerales.
- RODRÍGUEZ, S.; MUÑOZ, R.; GARCÍA, O. & FERNÁNDEZ, E. 2005: Empleo de un producto "Coagulante Natural para Clarificar Agua". *Revista CENIC Ciencias Químicas* 36 (Especial). Consultado: 31 mar 2016. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/1816/181620511037.pdf>
- SERVICIOS INFORMATIVOS DE LA OFICINA NACIONAL DE ESTADÍSTICAS E INFORMACIÓN (ONEI). 2016. Disponible en: <http://www.onei.cu/servicios%20informativos.htm>
- TORRES-JANNETH, R.; CASTELLÓ, R. & VIZCAYO, C. 2011: Análisis comparativo de caolines de diferentes fuentes para la producción de metacaolín. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales* 31(1): 35-43. Consultado: 26 jun 2016. Disponible en: <http://www.rlmm.org/ojs/index.php/rlmm/article/download/39/100>
- TREYBAL, E. R. 1990: Lixiviación. En: *Operaciones de transferencia de masas*. Segunda Edición. McGraw-Hill, México.
- VELÁSQUEZ, S. & VÉLEZ, D. 2014: *Diseño conceptual de una planta para la producción de sulfato de aluminio a partir de bauxita*. Tesis de grado. Universidad EAFIT. Consultado: 10 jun 2016. Disponible en: <https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/5392>

Leonardo Rodríguez-Suárez, leonardo@inor.ciiq.minem.cu

M. Sc. Especialista en Investigaciones de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente
Centro de Ingeniería e Investigaciones Químicas
La Habana, Cuba

Alberto Hernández- Flores, alberto@inor.ciiq.minem.cu

Dr. C. Profesor Titular. Especialista en Investigaciones de Ciencia Tecnología y medio Ambiente
Centro de Ingeniería e Investigaciones Químicas
La Habana, Cuba

Carmen Rodríguez-Acosta, carmen@inor.ciiq.minem.cu

M Sc. Investigadora Auxiliar. Centro de Ingeniería e Investigaciones Químicas
La Habana, Cuba

Lixiviación ácida inversa en la eliminación de hierro de la arcilla caolinítica de Cayo Guam, Moa, Cuba

Sergio R. Cabo de Villa-Figueiral
Amaury Palacios-Rodríguez
Miguel Garrido-Rodríguez

Resumen

El estudio tuvo el propósito de beneficiar las arcillas caoliníticas del yacimiento de Cayo Guam (Moa) mediante lixiviación ácida inversa, usando ácido clorhídrico como agente lixivante, a fin de limpiar las arcillas eliminando su contenido de hierro. Se aplicaron técnicas de espectrometría infrarroja y de fluorescencia y difracción de rayos X durante la caracterización de la materia prima inicial y luego del proceso de lixiviación ácida inversa. Se consiguió con este método extraer más del 98 % de las impurezas de hierro, obteniendo así una arcilla de mayor pureza con contenidos de sílice de 60,48 % y de óxido de aluminio de 49,50 %. Se constata que la lixiviación ácida inversa no afecta la estructura de la arcilla y que constituye un valioso método de beneficio para las caolinitas pigmentadas por hierro.

Palabras clave: arcilla caolinítica; ácido clorhídrico; lixiviación ácida inversa; yacimiento Cayo Guam.

Reverse acid leaching for removal of iron in kaolinitic clay in Cay Guam, Moa Cuba

Abstract

The objective of the study was to clean the kaolinitic clays in Cay Guam ore body through reverse acid leaching using chloride acid as a leach agent in order to clean the clay by eliminating the iron content. Techniques such as infrared and fluorescence spectrometry and X ray diffraction were applied during the characterization of the original raw material and after the reverse acid leaching process took place. The implementation of this method allowed extracting more than 98% of iron impurities, which resulted in obtaining a purer clay with silicon content of 60.48% and aluminum oxide of 49,50%. It was proved that the structure of the clay is not affected by reverse acid leaching and thus constitutes a method of beneficiation for kaolinites pigmented with iron.

Keywords: kaolinitic clay; chloride acid; reverse acid leaching; Cayo Guam ore body.

1. INTRODUCCIÓN

La caolinita es una arcilla blanca muy pura que se utiliza en la obtención de porcelana, cosméticos, medicamentos, pinturas, cerámica, entre otros. Desde el punto de vista mineralógico es un silicato de aluminio hidratado formado por la descomposición de feldespato y otros silicatos de aluminio.

La obtención de caolinita a partir de minerales arcillosos reviste una gran importancia en la industria cubana, de ahí que la aplicación de la lixiviación ácida inversa en la arcilla del yacimiento de Cayo Guam, tuvo como objetivo caracterizar las principales transformaciones físico-químicas al usarse el ácido clorhídrico como agente lixivante. Los óxidos e hidróxidos de hierro constituyen impurezas en las arcillas caoliníticas, como fases separadas del mineral o adsorbidos en la superficie del mineral arcilloso (Fonseca, Góngora & Martínez 2004), que limitan su uso para la obtención de productos cerámicos, cosméticos, pinturas y vidrio.

La presencia del hierro coloidal, usualmente como óxido hidratado, afecta notoriamente el color de la arcilla caolinítica cuando éste es calcinado y su remoción es muy difícil al ser fuertemente adsorbido sobre la superficie del mineral (Mayo 2002). Una de las vías para eliminar el hierro de la arcilla caolinítica es precisamente la lixiviación inversa, que consiste en pasar a la solución las impurezas de la fase mineral, dejando la parte útil en el producto sólido donde se incrementa el contenido de fases (óxido de aluminio y sílice) que determinan su calidad (Hernández *et al.* 2011).

Estudios geológicos en el municipio de Moa, provincia de Holguín, han demostrado la existencia de cortezas aluminosas que pueden emplearse como arcillas en la industria cerámica. Investigaciones geológicas (Orozco 1995; Pons & Leyva 1996) determinaron que son manifestaciones de arcillas caoliníticas, con cuerpos de gabros de diversas dimensiones, intemperizados, de color variable desde blanco hasta rosado y rojo intenso, indicativo de un incremento progresivo en el contenido de hierro.

Otras investigaciones (Pons & Leyva 1996) también plantean que las arcillas de los principales yacimientos de Moa poseen características químicas, físicas y mineralógicas que permiten su uso como material refractario en las industrias de la región y como materia prima para la obtención de objetos cerámicos.

La lixiviación del hierro de la arcilla roja de caolín es deseable por las siguientes razones:

- a) puede utilizarse en la producción de materiales refractarios;
- b) es posible recuperar elementos como níquel, cobalto, cromo y hierro;

- c) puede ser aprovechada para producir alúmina por procesos como el Bayer, o para producir anhídros cloro-aluminio (Veglio & Toro 1994).

Las impurezas influyen en la utilidad industrial de la arcilla ya que determinan en gran medida la calidad de los minerales caoliníticos, pues afectan negativamente sus propiedades térmicas y ópticas. Por ejemplo, cantidades tan bajas como 0,4 % de hierro (férrico) pueden ser suficientes para dar color a los depósitos de arcillas y reducir su refractariedad y blancura (Eun-You & Kyung-Suk 1999; Ambikadevi & Lalithambika 2000).

En muchos depósitos de arcillas caoliníferas la pigmentación, roja o amarilla, se debe principalmente a la asociación de óxidos, hidróxidos y óxidos hidratados de hierro férrico, tal como hematina (rojo) y magnetita (rojizo café). Estos óxidos e hidróxidos se encuentran como capas, en granos individuales, o como partículas finas muy discretas por todo el mineral (Ambikadevi & Lalithambika 2000).

La calidad del caolín esta medida, generalmente, en términos del contenido de hierro y regularmente el caolín está acompañado de algunos minerales de hierro como son hematita, magnetita, goethita, maghemita y pirita entre otros. (González & Ruiz 2006; González, Pino & Ruiz 2003). Estos óxidos e hidróxidos disminuyen el índice de blancura del caolín, dando como resultado arcillas de coloración café-amarillo (beige), en dependencia del contenido de hierro (Cameselle 2007).

González y Ruiz (2006) estudiaron las ventajas de la cloración en la extracción de hierro y titanio de los minerales de arcilla y caolín utilizados en las industrias de papel y cerámica en Argentina y demostraron que, a altas temperaturas, el cloro no solo elimina el hierro y el titanio cuantitativamente por la formación de las especies FeCl_3 y TiCl_4 , sino que también produce cambios de fase en los minerales clorados (González, Slafer & Miralles 2003).

El uso de la cloración en los procedimientos de la metalurgia extractiva ha aumentado notablemente en las últimas décadas y se puede prever un futuro aumento en el uso del cloro en los procesos pirometalúrgicos. Este aumento se debe a numerosos factores que incluyen la alta reactividad, el bajo coste, la variedad y disponibilidad de agentes clorantes, el desarrollo de materiales resistentes a la corrosión y la facilidad con la que se pueden tratar y recuperar los efluentes (Jena y Brocchi 1997).

El presente estudio estuvo encaminado a beneficiar las arcillas caoliníticas del yacimiento de Cayo Guam (Moa) usando para ello lixiviación acida

inversa, con ácido clorhídrico como agente lixiviante, a fin de eliminar las impurezas de hierro de las arcillas y obtener caolinitas más puras.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Reactivos y materiales

- Ácido clorhídrico concentrado (HCl) a 38 % de pureza
- Arcilla roja del yacimiento Cayo Guam ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)
- Agua (H_2O)
- Reactor (beaker de 1 L)
- Agitador mecánico de paletas
- Balanza
- Papel de filtro
- Termómetro de referencia
- Bomba al vacío
- Probeta
- Estufa.

2.2. Métodos

2.2.1. Planificación experimental

La investigación se llevó a cabo a escala de laboratorio en un reactor de 1 L y se trabajó con un coeficiente de utilización (α) del 50 %.

Para el diseño de la matriz de experimentación se utilizó el método factorial completo, seleccionándose las variables de entrada y los niveles de experimentación como se indican en las Tablas 1 y 2.

Se seleccionaron como variables independientes que influyen en la extracción del hierro las siguientes:

- Granulometría del sólido (0,074 mm), la cual se definió a partir del tamizado por vía húmeda.
- Velocidad de agitación constante a 250 rpm, definida a partir de las características del reactor.
- Temperatura del proceso (70 °C–90 °C).
- Concentración inicial de ácido Clorhídrico (112–160 g/L).
- Porcentaje de sólido (30 % y 40 %)

Tabla 1. Factores y niveles de experimentación

Factores Niveles	Temperatura (°C)	Concentración de HCL (g/L)	Granulometría (mm)
Mínimo	70	112	0,074
Máximo	90	160	0,074

Tabla 2. Matriz real de experimentación

Factores Pruebas	Temperatura (°C)	Concentración de HCL(g/L)	Granulometría (mm)
1	90	160	0,074
2	70	160	0,074
3	90	112	0,074
4	70	112	0,074
5	90	160	0,074
6	70	160	0,074
7	90	112	0,074
8	70	112	0,074

2.2.2. Técnicas analíticas utilizadas

Durante la caracterización de la materia prima inicial y luego del proceso de lixiviación ácida inversa se emplearon las siguientes técnicas analíticas.

Fluorescencia de Rayos X (FRX): se utilizó un espectrómetro Bruker AXS S4 operado a una potencia de 1 kW con un cátodo de Rh. Los cristales analizadores utilizados fueron OVO55FC para el Na, el F y el Cl con un colimador con un ángulo de divergencia de 0,46°; PET para Al, Si, P y Mn con un colimador con un ángulo de divergencia de 0,23° y LiF220 para el resto de los elementos analizados.

Difracción de Rayos X: Las mediciones se realizaron en un difractómetro de rayos X Phillips PW 1804 con software de identificación *Identify* mediante los cuales se obtuvieron los difractogramas. Para los análisis de difracción se emplean la cartoteca 4-865 ASTM y el manual de Mineralogía de Dana.

Espectroscopía Infrarroja: Los análisis por Espectrometría de Infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) se realizaron con un espectrómetro Perkin Elmer FTIR y se procesaron los resultados con el software ACDLABS. El equipo opera con un láser de He-Ne, en el rango de los 400 a los 4000 cm^{-1} . Las muestras fueron preparadas según el método de pastillas de KBr al 1 % de concentración. Para prevenir la interferencia del agua absorbida, tanto el KBr como los materiales caracterizados fueron secados a 200 °C durante una hora en la estufa. Las mezclas de arcilla con KBr en polvo se

comprimen en una prensa de troquel para formar una pastilla translúcida a través de la cual pasa el rayo de luz del espectrómetro.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis granulométrico

El análisis granulométrico de la muestra de arcilla dio como resultado lo siguiente (Tabla 3).

Tabla 3. Distribución granulométrica de la arcilla roja de Cayo Guam

Clases, (mm)	Salida			
	(g)	(%)	Suma por más, (%)	Suma por menos, (%)
-0,59+0,35	1 000	50	50	100
-0,35+0,25	250	13	63	50
-0,25+0,088	560	28	91	38
-0,088+0,074	100	5	96	10
-0,074+0	90	5	100	5

Según se observa el 50 % de la arcilla se retiene sobre el tamiz 0,35 mm y de manera general el 91 % de la arcilla se concentra en la clase -0,59+0,088 mm, lo cual se corrobora con la Figura 1 donde se manifiesta a partir de la curva de distribución de la salida sumaria el predominio de granos finos y se comprueba que el d_{80} corresponde a 0,35 mm.

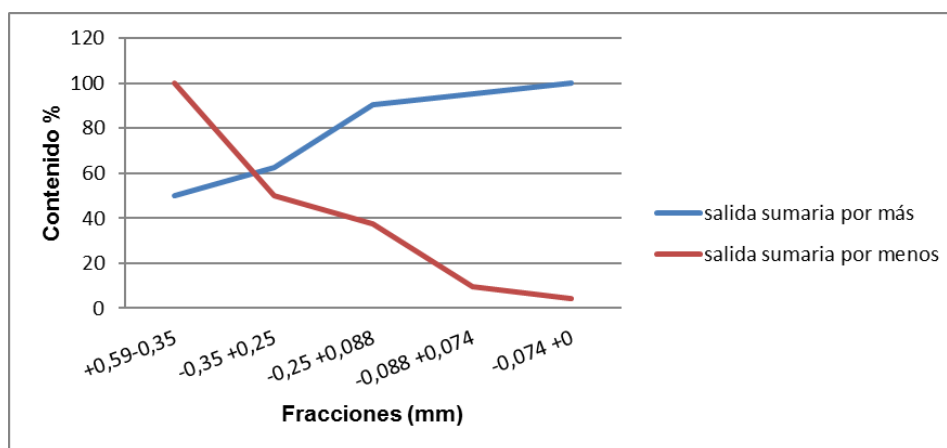


Figura 1. Curva de distribución de la salida sumaria.

En la Figura 2 se muestra el comportamiento de los elementos predominantes en las arcillas en función de la distribución granulométrica. En ella se observa que no existe una variación significativa en el contenido por fracciones de los óxidos de hierro(III), aluminio y silicio (Fe_2O_3 , SiO_2 y Al_2O_3) los que se encuentran distribuidos de forma homogénea en toda la masa del mineral.

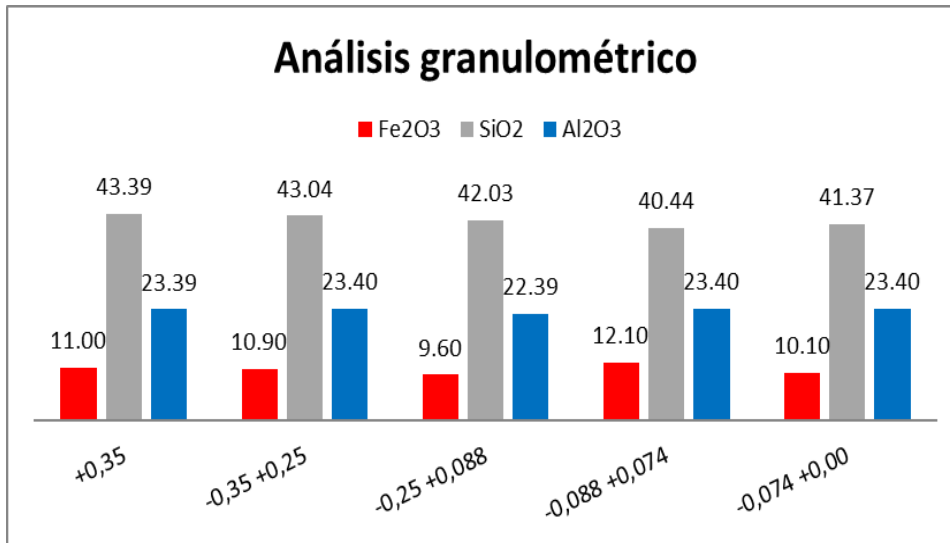


Figura 2. Característica granulométrica de la arcilla roja de Cayo Guam.

El contenido de óxido de hierro(III) representa un porcentaje elevado para la clasificación de la arcilla como una arcilla caolinítica, considerando que para ello no debe rebasar el 0,4 %.

3.2. Caracterización mineralógica de la arcilla sin tratar

En el análisis realizado por DRX a la muestra de arcilla roja del yacimiento Cayo Guam en su estado natural mostrado en la Figura 3, se identifican los picos de las principales fases; caolinita (K), hematita (H) y cuarzo (C).

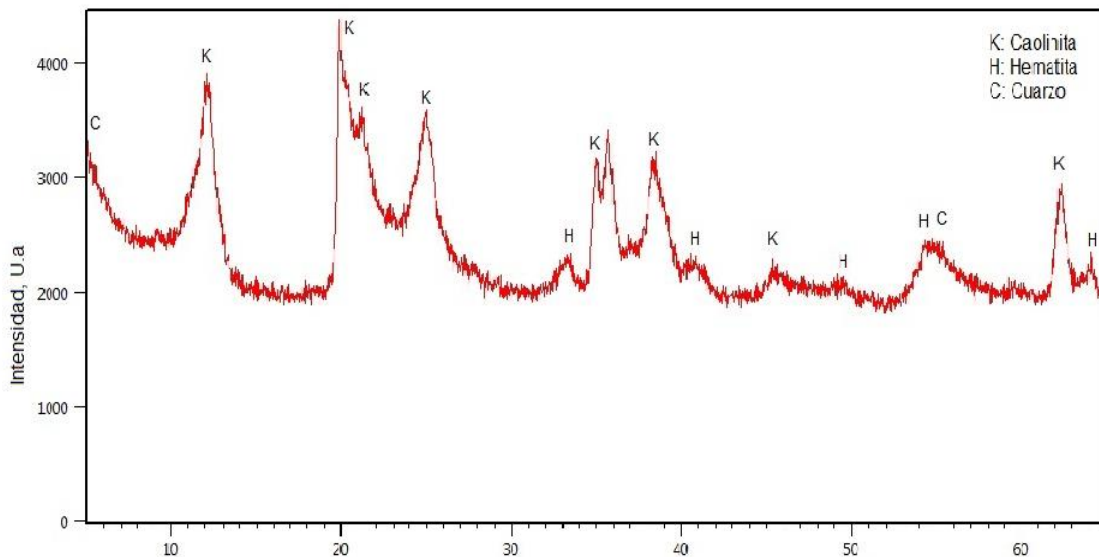


Figura 3. Difractograma de la muestra sin tratamiento.

La cuantificación de las fases realizadas mediante el software X'Pert HighScore Plus versión 3.0.4 del 2011, mostró que en mayor cuantía aparece la caolinita con un 74 %, luego la hematita con 10 % y con 16 % el cuarzo.

La Figura 4 muestra los difractogramas de arcilla natural (color negro) y la arcilla lixiviada (color verde) a la temperatura de 90 °C, a una concentración de ácido clorhídrico de 160 g/L y granulometría de 0,074 mm.

La arcilla tratada con ácido clorhídrico sufre cambios en comparación con la arcilla natural, es perceptible por la técnica analítica. Las principales fases como la caolinita y hematita, comienzan a sufrir transformaciones que se manifiestan en la intensidad de los picos difractométricos, las intensidades de las señales correspondientes a la hematita disminuyen y en algunos casos desaparecen. Las señales correspondientes a la caolinita ganan en intensidad y los picos son más pronunciados, observándose que la fase que más prevalece es esta, lo que se traduce en un mejor ordenamiento en su estructura.

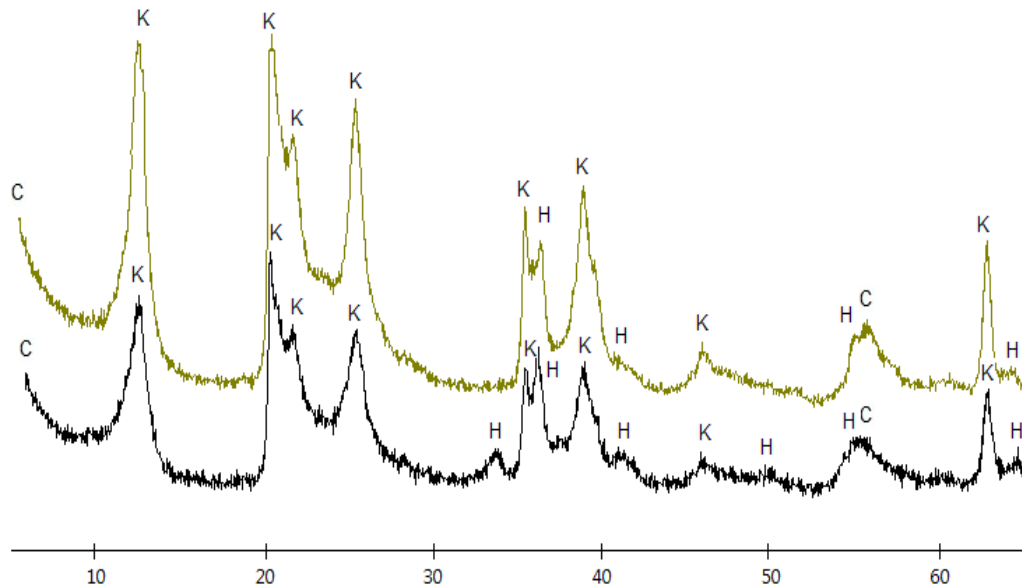


Figura 4. Transformaciones de la arcilla durante y la lixiviada analizadas por DRX.

Se puede apreciar que los picos que corresponden a las fases del cuarzo se mantienen. Esto puede traer consigo una mejora de las propiedades físico-químicas de la arcilla, dado por la disminución de las fases de hematita.

3.3. Análisis por espectroscopía IR

Los resultados del análisis por espectrofotometría infrarroja de la muestra de arcilla del yacimiento Cayo Guam muestran que la misma se caracteriza por una intensa absorción en la zona de 4 000 cm^{-1} a 2 500 cm^{-1} típico de la montmorillonita o illita. La señal a 3 700 cm^{-1} está asociada a la presencia de caolinita en la mezcla, y a 3 620 cm^{-1} corrobora la existencia de material illítico aunque es de señalar que el pico a 1 030 cm^{-1} indica una mayor

concentración de montmorillonita en la mezcla, con una absorción débil a $3\ 500\ \text{cm}^{-1}$ asociada a la presencia de hidróxidos de hierro y aluminio pero no se corrobora esto por la ausencia de picos fuertes a $1\ 527\ \text{cm}^{-1}$ y $1\ 408\ \text{cm}^{-1}$. El pico a $3\ 420\ \text{cm}^{-1}$ indica la presencia de illita o montmorillonita sin poder distinguir cual es, pues se solapan las señales en ese rango, aparece, como se muestran en la Figura 5, un pico a $915\ \text{cm}^{-1}$ por la presencia de caolinita en la muestra. La existencia de carbonato se corrobora por una absorción intensa en la zona de $1\ 420\ \text{cm}^{-1}$ a $876\ \text{cm}^{-1}$ y picos representativos a $700\ \text{cm}^{-1}$ y $749\ \text{cm}^{-1}$ típico de la magnesita.

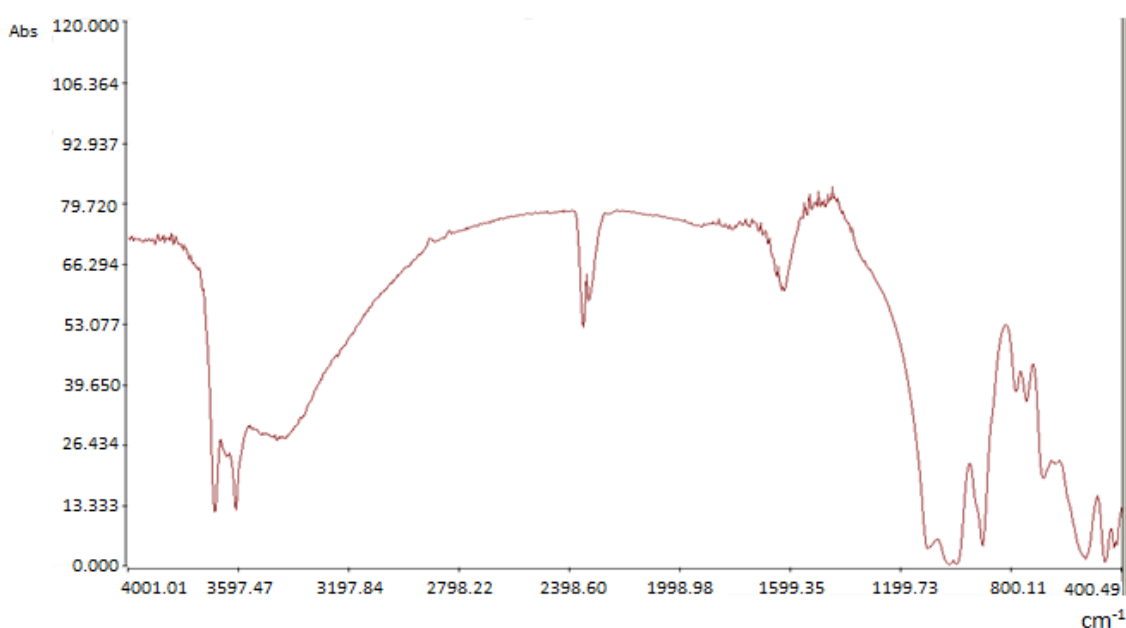


Figura 5. Espectro IR de la arcilla sin tratar del yacimiento de Cayo Guam.

El análisis comparativo de los resultados por el espectro FTIR de las fases sólidas antes y después de la lixiviación ácida inversa y como patrón inicial el caolín, representada en la Figura 6, permite corroborar que el método aplicado en la investigación es efectivo y permite establecer que:

- No modifica la estructura cristalina de la arcilla, resultado que corrobora el análisis químico de las fases sólidas en las que se mantiene constante la relación óxido de aluminio/sílice.
- Actúa como un método de beneficio de la arcilla al disminuir el contenido de las impurezas, lo que se demuestra al compararse los resultados de los espectros IR de la arcilla del yacimiento de Cayo Guam y la arcilla obtenida por la lixiviación ácida inversa, libre de impurezas de hierro, con el espectro de la arcilla caolinítica reportada en la literatura.

- Al disminuir la intensidad de los picos de hematita en la arcilla y al desaparecer algunas fases, hay un mayor acercamiento a las fases de caolinita más pura como se puede observar en los difractogramas (Figura 4).

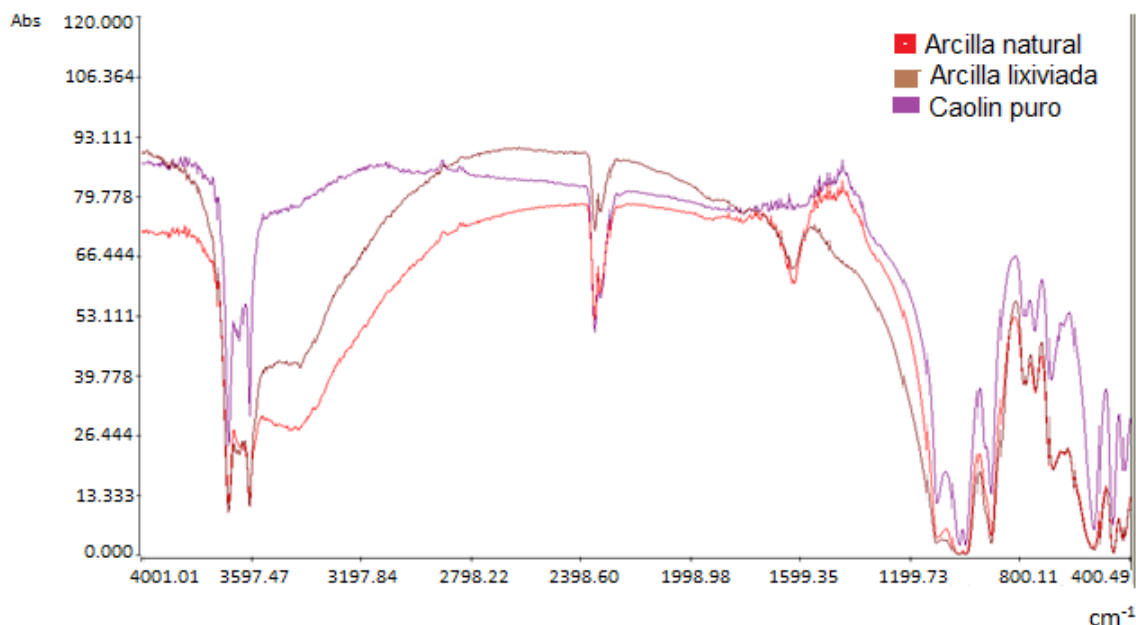


Figura 6. Espectros FTIR de las arcillas antes y después de tratamiento.

3.4. Caracterización química y mineralógica del sólido obtenido

En la Tabla 4 se muestra la composición química de la arcilla antes del proceso de lixiviación, en ella se observan los porcentajes iniciales de cada elemento, el hierro como impureza principal con un 10,20 % y es la causa del color rojizo de este yacimiento caolínico del yacimiento de Cayo Guam.

Tabla 4. Composición química inicial de la arcilla roja de Cayo Guam (%)

NiO	CoO	FeO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MnO	ZnO
0,08	0,058	10,20	0,18	23,39	41,91	0,04	0,05	0,003

Luego del proceso de lixiviación se logra concentrar a los óxidos de aluminio y silicio hasta valores de 49,5 % y 60,48 %; el resto de los componentes disminuyen de forma considerable su contenido. En el caso del hierro, que constituye la principal impureza se logra disminuir hasta valores menores al 2 %. Lo anterior corrobora la factibilidad de aplicar la lixiviación inversa a este mineral.

En la Figura 7 se muestra la arcilla antes y después de la lixiviación y como resultado la eliminación del hierro como impureza se observa el cambio de coloración de la arcilla desde rojo hasta blanco, lo que está en correspondencia con el análisis anterior.

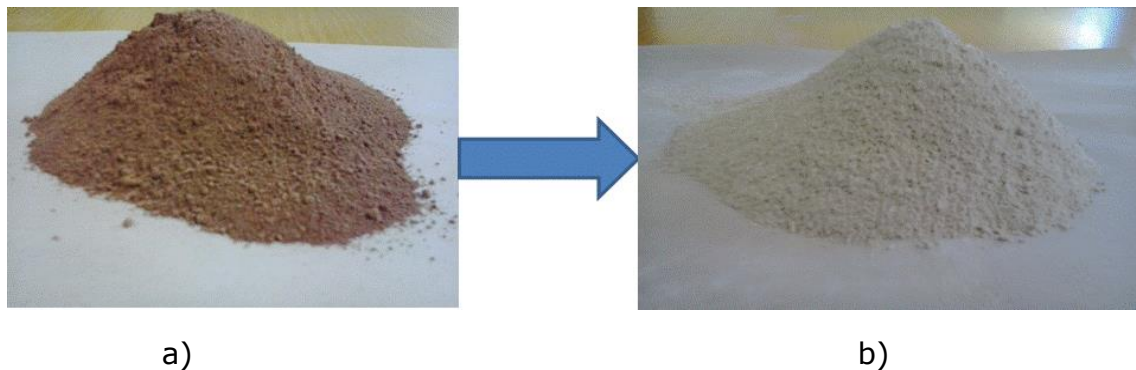


Figura 7. a) Arcilla natural y b) Arcilla lixiviada con ácido clorhídrico.

4. CONCLUSIONES

- Durante la investigación se demostró los parámetros de estudio tienen influencia positiva para la extracción de hierro, siendo el de mayor influencia la temperatura, seguido de la concentración de ácido clorhídrico, el porcentaje de sólido y por último la granulometría.
- El análisis termodinámico demostró que es posible aplicar la lixiviación ácida inversa para eliminar las impurezas de la arcilla del yacimiento Cayo Guam.
- La lixiviación ácida inversa de la arcilla caolinítica del yacimiento Cayo Guam constituye un método adecuado que permite eliminar el contenido del óxido de hierro en más de 98 %, principal impureza del mineral.
- En las condiciones prefijadas, es posible una alta extracción de hierro desde las arcillas rojas de Cayo Guam, por medio de la lixiviación ácida inversa. Para temperatura de 90 °C, concentración inicial de ácido clorhídrico de 160 g/L, contenido de sólido de 30 % y una granulometría menor de 0,074 mm, se obtiene una extracción de hierro mayor del 98 %.

5. REFERENCIAS

- AMBIKADEVI, V. R. & LALITHAMBIKA M. 2000: Effect of organic acids on ferric iron removal from iron-stained kaolinite. *Applied Clay Science* 16(3): 133-145.
- CAMESELLE, C. 2007: Electrokinetic Bleaching of Kaolin Clay. 6th Symposium on electrokinetic remediation. Vigo, España, 12-15 de junio, p. 133-134.
- EUN-YOU, L. & KYUNG-SUK, C. 1999: Microbial removal of Fe (III) impurities from clay using dissimilatory iron reducers. *Bioscience and bioengineering* 87(3): 397-399.
- FONSECA, D. E.; GÓNGORA, E. & MARTÍNEZ, O. 2004: Evaluación de mezclas de

- arcillas de la región de Centeno, Moa, Cuba. *Ingenierías* 12(22): 45-54.
- GONZÁLEZ, F. G.; SLAFER, G. A. & MIRALLES, D. J. 2003: Floret development and spike growth as affected by photoperiod during stem elongation in wheat. *Field Crops Research* 81(1): 29-38.
- GONZÁLEZ, J. & RUIZ, M. D. 2006: Bleaching of kaolins and clays by chlorination of iron and titanium. *Applied Clay Science* 33(3): 219-229.
- GONZÁLEZ, J. A.; PINO, E. & RUIZ, Y. M. 2003: Blanqueado de arcilla mediante la eliminación de hierro en la etapa de quemado. Jornada Sam/Conamet/Simposio Materia. Argentina Sam Luz.
- HERNÁNDEZ, R. A.; LEGORRETA, F.; HERNÁNDEZ, L. E.; MATA, P. F.; OLIVERA, P. N. & MARTÍNEZ, A. 2011: Decoloración de arcillas caoliníferas por lixiviación para la obtención de caolín con alto índice de blancura. En: XX Congreso Internacional en Metalurgia Extractiva (Memorias). Hemosillo, Sonora, México, 18-20 de mayo.
- JENA, P. K. & BROCCHI, E. A. 1997: Metal extraction through chlorine metallurgy. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* 16(4): 211-237.
- MAYO, O. & 2002: Geología de los yacimientos de arcillas para la cerámica. Quinta Conferencia Científico Técnica de la Construcción, Jornada Iberoamericana. La Habana. Editorial SOFTCAL, IR 824-831.
- OROZCO, G. 1995. Caracterización de las arcillas de Cayo Guam. Informe técnico. Centro de Información. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa.
- PONS, J. A. & LEYVA, C. 1996: Empleo de las arcillas ferrocaoliníticas-gibbsíticas de la región de Moa en los talleres de fundición. *Minería y Geología* XIII(3): 93.
- VEGLIO, F. & TORO, L. 1994: Process development of kaolin pressure bleaching using carbohydrates in acid media. *Mineral processing* 41(3-4): 239-255.

Sergio R. Cabo de Villa-Figueiral, scvilla@ismm.edu.cu
Ingeniero metalúrgico. Prof. Instructor; Dpto. Metalurgia Química.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba

Amaury Palacios-Rodríguez, apalacio@ismm.edu.cu
Doctor en Ciencias Técnicas Prof. Auxiliar, Dpto. Metalurgia Química.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba

Miguel Garrido-Rodríguez, mgarrido@quimica.cujae.edu.cu
Doctor en Ciencias Técnicas Prof. Auxiliar. Dpto. Química.
Instituto Superior José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba

Comportamiento microestructural de uniones de materiales disímiles obtenidas por explosión

Juan Ramón Castillo-Matos
Tomás Fernández-Columbié
Dayanis Alcántara-Borges
Isnel Rodríguez-González

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo establecer el comportamiento microestructural de uniones disímiles de titanio con acero AISI 1020 y de acero AISI 1066 con acero AISI 1008 por el proceso de soldadura por explosión. Se consideró una velocidad de detonación de 2 800 m/s, un radio de la carga de 0,345 kg y una velocidad de colisión de 1 196,16 m/s, con un volumen de explosivo de 600 cm³ y una densidad de 1,15 g/cm³. Las microestructuras obtenidas están compuestas por granos de ferrita equiaxiales, granos muy finos del tipo troostítico y grano grueso con red de ferrita. En la zona fundida de ambos materiales base se observaron granos finos y alineados del tipo ferrítico. La dureza experimentó un incremento en las muestras desde 120 HV, para el acero AISI 1008, hasta 250 HV para el AISI 1066. Se establece que la unión del acero AISI 1020 con el titanio presenta una interfase en forma de línea, a diferencia de la junta de acero AISI 1008 con el AISI 4063 que forma ondulaciones con amplitud regular, lo que garantiza un aumento en la resistencia mecánica, asociada a la ductilidad del acero AISI 1008

Palabras clave: soldadura por explosión; unión disímil; comportamiento microestructural; acero AISI 1020; acero AISI 1066.

Microstructural behavior of unions of dissimilar material obtained by explosion welding

Abstract

The objective of this investigation is to establish the behaviour of the microstructure of dissimilar joints made of titanium with AISI 1020, 1066 and 1008 steels through explosion welding. A detonation velocity of 2 800 m/s, a charge radius of 0,345 kg and a collision velocity of 1196, 16 m/s with an explosive volume of 600 cm³ and a density of 1,15 g/cm³ were considered. The microstructures obtained were composed of equiaxed ferrite grains, very fine grains of troostitic type and coarse grains with ferrite grid. Fine and aligned grains of ferrite type are observed in the casted area of both base materials. The metal hardness experienced an increase in samples from 120 HV AISI 1008 steel up to 250 HV for AISI 1066 steel. The AISI 1020 steel joint with titanium has an line shaped interface unlike the AISI 1008 steels with 4063 forms waves with uniform width, which provides a higher mechanical resistance associated with the ductility of the AISI 1008 steel.

Keywords: explosion welding; dissimilar unions; microstructural behavior; AISI 1020 steel; AISI 1066 steel.

1. INTRODUCCIÓN

Una explosión es la transformación (física o química) rápida de una sustancia, acompañada del paso de la energía potencial de la misma o los productos de su transformación a energía cinética. Una de las características de la explosión es el brusco aumento de la presión en el medio circundante, a consecuencia de lo cual surge una onda de choque y un campo de tensiones lo cual permite, entre otras ventajas, la unión de materiales con diferentes puntos de fusión.

Algunos autores (Acarer, Gulenc & Findik 2003, 2004; Durgutlu, Okuyucu & Gulenc 2008) exponen que la soldadura por explosión es un proceso en el cual una coalescencia rápida de dos superficies metálicas es causada por la energía de un explosivo detonado, no se usa metal de relleno, no se aplica calor externo, no ocurre difusión, el tiempo es demasiado corto, la unión es metalúrgica, combinada con un entrelazado mecánico que resulta de un rizado. Comúnmente es usada para unir dos metales disimiles, en particular para revestir un metal en la superficie de otro.

La selección de la sustancia explosiva para producir el endurecimiento permite garantizar la aceleración en uno de los componentes (placa voladora), hasta causar un impacto oblicuo a altas velocidades con la otra placa (base) y los criterios fundamentales para su elección son la velocidad de detonación y la energía específica del explosivo. En este sentido pudieran ser utilizados varios tipos de sustancia explosiva, en particular las combinaciones o mezclas sólidas; si las propiedades no están totalmente definidas por el fabricante, estas pueden ser determinadas de forma experimental (Mousavi y Sartangi 2009).

Al iniciarse la detonación, la carga explosiva se propaga de un extremo al otro de la placa que "vuela", es una reacción progresiva, aunque ciertamente muy rápida, que se produce a velocidades de hasta 8 500 m/s. La zona de alta presión resultante impulsa la placa que vuela para que choque con el metal de soporte en forma progresiva a alta velocidad, por lo que toma una forma angular conforme avanza la explosión (Walsh, Shreffler & Willig 1953; Durgutlu, Gulenc & Findik 2005).

En este proceso Ben-Artzy (2010) especifica que la placa superior permanece en su posición en la región donde el explosivo todavía no ha detonado. Debido a que la colisión ocurre a alta velocidad, en forma progresiva y angular, provoca que se vuelvan inestables las superficies en el punto de contacto y las películas de superficie son expelidas hacia delante desde el vértice del ángulo. Por tanto, las superficies que chocan están químicamente limpias y el comportamiento del fluido del metal, que implica

una cierta fusión interfásial, proporciona un contacto íntimo entre las superficies y conduce a la unión metalúrgica.

Según Petushkov, Titov y Bryzgalin (2002) en los explosivos detonantes la velocidad de las primeras moléculas gasificadas es tan grande que no ceden su calor por conductividad a la zona inalterada de la carga, sino que lo transmiten por choque, deformándola y produciendo su calentamiento y explosión adiabática con generación de nuevos gases. El proceso se repite con un movimiento ondulatorio que afecta a toda la masa explosiva y se denomina onda de choque.

Las variaciones de la velocidad de choque y del ángulo de impacto durante el proceso pueden provocar una interfase ondulada o rizada entre los dos metales. Este tipo de interfase fortalece la unión, debido a que aumenta el área de contacto y tiende a entrelazar mecánicamente las dos superficies (Al-Hassani, Salem & Lazari 1984).

Algunos autores (Celik & Alsaran 1999; Madhusudan & Srinivasa 2009) plantean que el empleo de las soldaduras disímiles están asociadas a diferentes industrias tales como las termoeléctricas, la química y petroquímica, donde se presentan secciones que están construidas de aceros al carbono y algunas de otra aleación, que por razones económicas se someten a temperaturas menores a 100 °C. Sin embargo, otras secciones operan a elevadas temperaturas donde los problemas de corrosión o pérdida de las propiedades mecánicas están presentes y causan fallas que deben ser reparadas o cambiadas frecuentemente.

En correspondencia con lo planteado anteriormente y por las condiciones de operabilidad que se puedan lograr en las uniones de soldadura, es donde la unión de materiales disímiles adquiere gran importancia lo cual da origen a diversos estudios dirigidos hacia la comprensión de las fallas que se presentan durante el servicio y que han sido vinculadas a las uniones disímiles mediante el fenómeno de desunión, que se presenta en la zona de transición de las uniones disímiles

El trabajo tiene como objetivo establecer el comportamiento microestructural de uniones disímiles realizadas por el proceso de soldadura por explosión donde se consideran parámetros como la velocidad de impacto, el ángulo de colisión y la velocidad del punto de colisión.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Parámetros en el proceso de soldadura por explosión

Para el proceso de soldadura con explosivos se tuvo en cuenta tres etapas básicas: la detonación de la carga explosiva, la deformación y aceleración

de la plancha volante y la colisión entre ambas planchas; los parámetros considerados fueron:

V_p - velocidad de impacto; m/s

β - ángulo de colisión; grado

V_c - velocidad del punto de colisión; m/s

E_k - energía cinética del explosivo; J

La velocidad de colisión y la velocidad de la plancha volante deben ser menores que la velocidad del sonido en cada uno de los componentes a soldar, la velocidad de impacto se calcula como:

$$V_p = \sqrt{(2E_k)} \left(\frac{\frac{5}{3R^2}}{R^2 + 5R + \frac{5}{4}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{O} \quad V_p = 1,2Vd \left[\frac{\left(1 + \frac{32}{27R}\right)^{\frac{1}{2}} - 1}{\left(1 + \frac{32}{27R}\right)^{\frac{1}{2}} + 1} \right] \quad (1)$$

Donde:

Vd - velocidad de detonación; m/s

R - radio de carga, kg

El volumen del explosivo se calcula de acuerdo a las dimensiones y el espesor del ancho y alto del material a unir.

$$V = a \cdot b \cdot c \quad (2)$$

En la que:

a - largo de la plancha, cm

b - ancho de la plancha, cm

c - espesor del explosivo, cm

La masa del explosivo se calcula de acuerdo a la ecuación 3.

$$m = V \cdot \rho \quad (3)$$

Siendo:

V - volumen de la carga explosiva, cm^3

ρ - densidad del explosivo, g/cm^3

El radio de la carga se determina como:

$$R = \frac{m}{2} \quad (4)$$

Para la que:

m - masa del explosivo, kg

Para calcular la desviación del explosivo se tiene en cuenta la ecuación siguiente:

$$\phi = \left(-1 - \frac{V_G}{2E_K} \right)^{\frac{1}{2}} = 0,7 \text{ a } 0,83 \quad (5)$$

Donde:

ϕ - desviación del material explosivo.

V_G - es la velocidad de detonación de la partícula detrás del frente de detonación de los gases.

En el presente trabajo fue elegido ϕ como 0,8

Como se requiere de un chorro en la región de choque, el valor mínimo del ángulo de colisión β debe ser excedido. Para un metal dado, el ángulo es una función de la velocidad de colisión, por lo que se calcula en función de esta velocidad y de la ecuación dinámica de estado. El ángulo β se calcula como:

$$\beta = \tan^{-1} \left[\frac{V_p \cos(\alpha/2)}{V_c - V_p \sin(\alpha/2)} \right] \quad (6)$$

Si se tiene en cuenta que la velocidad de la partícula es un cuarto de la velocidad de detonación, entonces se obtiene según Caraballo & Vinardell (2004) como:

$$U_p = \frac{V_d}{4} \quad (7)$$

Siendo:

U_p - velocidad de las partículas; m/s

En esta distribución las dos placas están en la configuración paralela y a una determinada distancia de separación, con la carga explosiva encima de la parte superior, denominada la placa volátil. Como capa amortiguadora se empleó el plástico entre el explosivo y la placa volátil.

2.2. Materiales empleados

Para el desarrollo del trabajo se seleccionaron cuatro materiales base: acero AISI 1020, el acero AISI 1008, el acero AISI 4063 y la aleación de titanio Ti - 6Al - 4V. Las uniones disímiles se realizaron de la forma siguiente: titanio - acero AISI 1020 y acero AISI 4063 - acero AISI 1008. Las diferentes probetas se prepararon con longitud de 200 x 200 mm.

2.2.1. Composición química de los materiales

La composición química de los aceros se determinó mediante análisis espectral, en un espectrómetro de masa cuántico, ESPECTROLAB 230, con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón y para la aleación de titanio se realizó en un espectrómetro de masa PMI MASTER PRO con electrodo de base tungsteno bajo arco sumergido en atmósfera de argón. En la Tabla 1 se muestra la composición química de las aleaciones.

Tabla 1. Composición química de las aleaciones, en %

Aleaciones	C	Si	Mn	P	S	Fe
AISI 1008	0,08	0,020	0,25	0,014	0,016	Resto
AISI 1020	0,18	0,50	0,40	0,040	0,050	Resto
AISI 4063	0,60	0,25	1,10	0,040	0,050	Resto
Aleación	C	Fe	Al	V	Ti	
Ti - 6Al - 4V	0,10	0,40	5,5	3,5	Balance	

La soldadura disímil entre las aleaciones se realizó con la unión siguiente:

- Aleación de titanio Ti - 6Al - 4V y el acero AISI 1020.
- Acero AISI 4063 y el acero AISI 1008.

2.1.1.1. Material explosivo empleado

Para la realización de las uniones se utilizó como sustancia explosiva industrial el TECTRON 100, el cual cumple con los requerimientos exigidos para la realización de la soldadura por explosivos de las aleaciones objeto de estudio. Los parámetros de detonación del explosivo según Caraballo & Vinardell (2004) son:

- Densidad (ρ); 1,15 g/cm³
- Energía específica (Ee); 3097,64 J

2.2.2. Plan experimental

Para el desarrollo del plan experimental se prepararon las muestras de las aleaciones objeto de estudio. La unión se realizó en configuración paralela,

como se muestra en la Figura 1. Se realizó primeramente la limpieza de la superficie de las probetas.

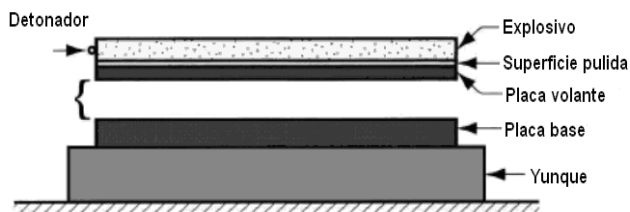


Figura 1. Preparación de la unión para la soldadura.

Las diferentes probetas se prepararon con longitud de 200 x 200 mm, se cortaron longitudinalmente en una fresadora vertical de acuerdo con los datos establecidos en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros para la soldadura de las probetas

No	Aleación	Velocidad de detonación (m/s)	Ángulo de Colisión (grados)	Desviación del explosivo	Espesor de la carga explosiva (mm)
1	Titanio-acero AISI 1020	2 800	7	0,8	5
2	Acero AISI 4063-Acero AISI 1008	2 800	7	0,8	5

2.3. Microestructura de las aleaciones

Para el análisis microestructural se empleó un microscopio óptico NOVEL modelo NIM-100, con cámara acoplada, instalada mediante el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe.

El análisis microestructural consistió en la observación de una muestra patrón de las diferentes aleaciones, se seleccionó la zona del metal base lo más alejado de donde pudiera tener influencia el ciclo térmico de soldadura. El objetivo de este análisis fue obtener una muestra sin afectación en su estructura metalográfica, que permitiera determinar posibles cambios ocurridos tanto en la ZF como en la influencia térmica. La Figura 2 (a), (b), (c) y (d) muestran las estructuras de las diferentes aleaciones. Para revelar las estructuras metalográficas, en los aceros, se empleó como reactivo químico el nital al 2 %, una parte de ácido nítrico y tres partes de ácido fluorhídrico en un tiempo de 15 segundos y en la aleación de titanio una mezcla de 5 ml de HF, 35 ml de HNO₃ y 60 ml de H₂O en un tiempo de 60 segundos.

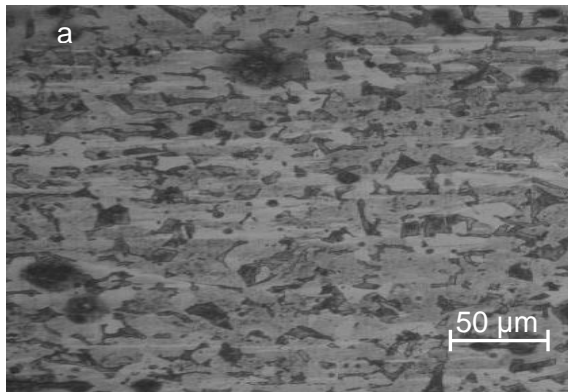


Figura 2. Microestructura del acero 1008.

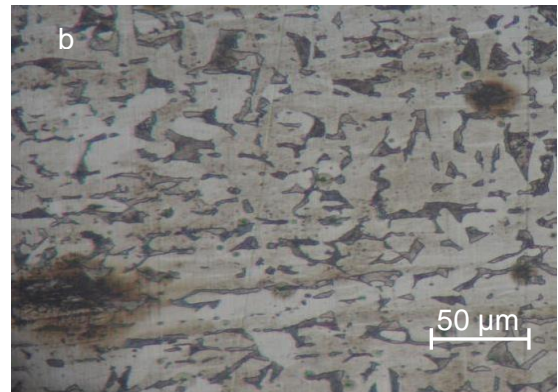


Figura 3. Microestructura del acero 4063.

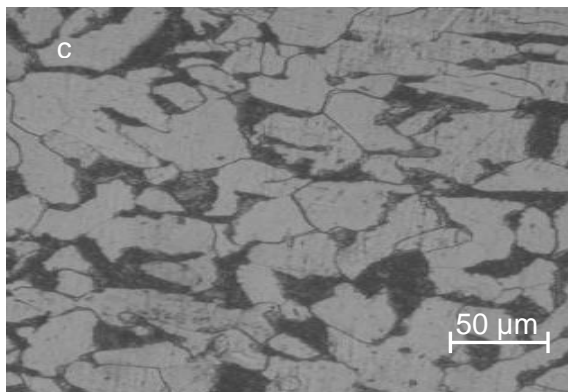


Figura 4. Microestructura del acero 1020.

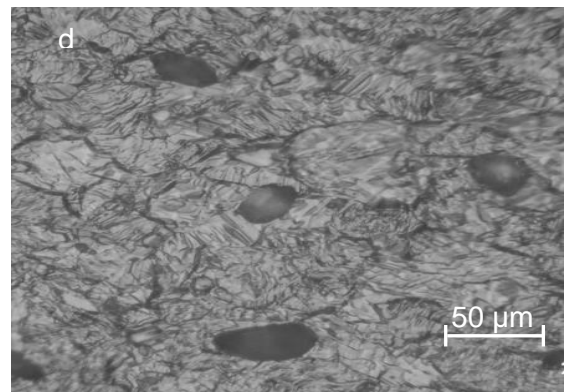


Figura 5. Microestructura del titanio.

La Figura 2 (a), que se corresponde con el acero AISI 1008, está compuesta por una estructura ferrítica, las microestructuras de las figuras b y c, que pertenecen al acero AISI 1066 y el AISI 1020, están compuestas por una estructura de ferrita + perlita y la microestructura de la aleación de titanio (Figura 2 d) posee granos equiaxiales de fase α .

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis de los parámetros del proceso de soldadura

Para determinar la velocidad de colisión y la velocidad de la plancha volante se emplea la ecuación 1, con una velocidad de detonación de 2 800 m/s, un radio de la carga, calculado por la ecuación 4 (0,345 kg), se obtiene una velocidad de colisión de 1 196, 16 m/s, con la que se logra el aspecto fluido viscoso de las aleaciones y una unión metalúrgica entre ellos, pues el mecanismo está basado en que bajo la acción de grandes cargas de choque que impactan la pieza a alta velocidad pueden precipitar fases secundarias, sobre todo del tipo carburo, en la matriz austenítica, lo que ha sido también planteado por Jinxiang *et al.* (2005) y Morizono, Yamaguchi & Tsurekawa (2015).

El volumen de la carga explosiva se calculó por la ecuación 2, con un ancho de 20 cm y largo de 20 cm de plancha, así como espesor del explosivo de 1,5 cm, el volumen obtenido fue de 600 cm^3 . Con tal volumen de explosivo y una densidad de $1,15 \text{ g/cm}^3$, fue calculada por la ecuación 3, la masa de la carga explosiva, cuyo valor obtenido fue de 0,69 kg.

Para la desviación de la carga explosiva, donde se tuvo en cuenta la ecuación 5, fue tomada para el trabajo el valor de 0,8, de igual manera se consideró el ángulo de colisión β con un valor de 7° considerando la ecuación 6. La velocidad de la partícula (U_p) fue calculada por la ecuación 7 donde se consideró una velocidad de detonación de 2 800 m/s, por lo que se obtuvo un valor de 700 m/s.

En la compactación dinámica, entre la placa base y la placa volante, la onda de choque induce altas presiones que permiten la unión entre partículas y la formación de compacto con altas densidades, sin inducir difusión de largo alcance o transformación de fase alguna. El efecto de frotación cortante, que se supone tiene lugar durante la compactación dinámica, produce una fuerte unión entre las partículas.

Para un contacto lineal, como es el caso de preparación de las muestras y realizar la unión soldada por explosión, la fluencia debajo de la capa superficial comienza cuando la presión media de contacto se aproxima a la resistencia máxima de la aleación, sin embargo la zona sub - superficial plástica está rodeada y constreñida por material que aún responde elásticamente. Se pueden alcanzar magnitudes de la tensión de contacto con el límite de fluencia del material antes de que la zona crezca lo suficiente como para lograr, en la superficie, el resultado de un flujo plástico masivo, según lo planteado por Petushkov (2003) y Greenberg y demás investigadores (2012).

3.2. Análisis microestructural de la aleación de titanio – acero AISI 1020

Las microestructuras de las Figuras 6a, 6b y 6c, que se corresponden con la unión metalúrgica de la aleación de titanio Ti - 6Al - 4V y el acero AISI 1020, muestran diferentes orientaciones del grano, las que contribuyen a la activación de sistemas de deslizamiento y se convierten en un régimen activo que determina los niveles de deformación y tensiones locales del grano y consecuentemente con la deformación a nivel macroscópico.

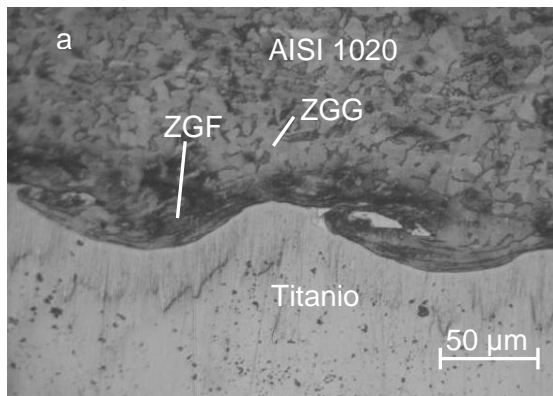


Figura 6a. Vista transversal.

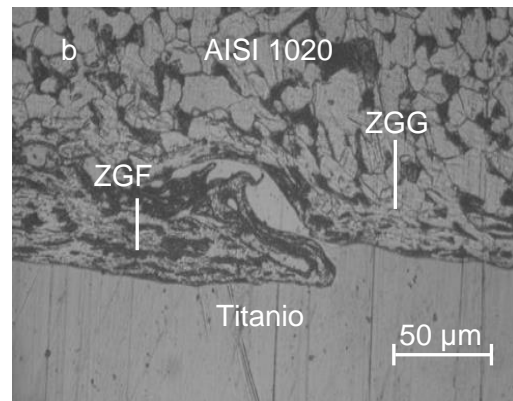


Figura 6b. Vista longitudinal.

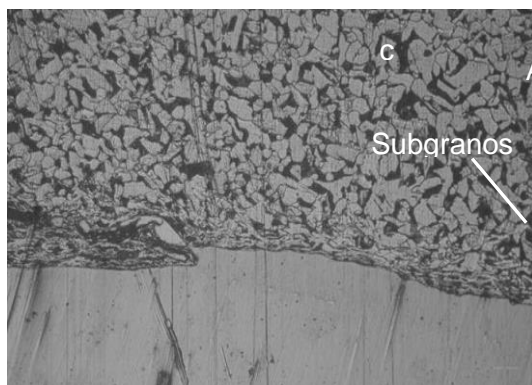


Figura 6c. Vista frontal.

Las Figuras (a), la (b) y la (c) se corresponden con la unión soldada disímil titanio-acero AISI 1020, la parte superior, que se corresponde con el AISI 1020, está compuesta por granos de ferrita equiaxiales, los cuales se reducen según se acercan a la zona de fusión de la aleación de titanio.

En la interfase de la unión, se presenta una modificación de la microestructura en la línea de fusión con refinamiento de grano, mientras que en la zona deformada existe un crecimiento de grano marcado por los límites de granos y en el interior de los granos existen pequeños subgranos. En la interfase de soldadura se presenta una estructura en forma de ola, sin presentar la microestructura de granos columnares cerca de la línea de fusión, mientras que en el centro de la interfase de soldadura, la microestructura es equiaxial debido a la solidificación de ambas aleaciones después de realizado el proceso de soldadura.

Las microestructuras observadas en las figuras anteriores, presentan una estructura de mayor tamaño en el crecimiento de grano al alejarse de la zona deformada. La fuerza impulsora del proceso del crecimiento del grano resulta de la disminución de la energía libre, como consecuencia de la reducción del área de la frontera en ellos. Este crecimiento se produce por

difusión, por la deformación plástica y la combinación de la adhesión y del entrelazado mecánico que asegura una unión fuerte, lo que fue reportado por Fukui e Inamura (2004).

3.3. Análisis microestructural de la aleaciones AISI 4063 – acero AISI 1008

Las Figuras 7(a), (b), (c) y (d) se corresponden con la unión disímil de las aleaciones AISI 4063 y del acero AISI 1008.

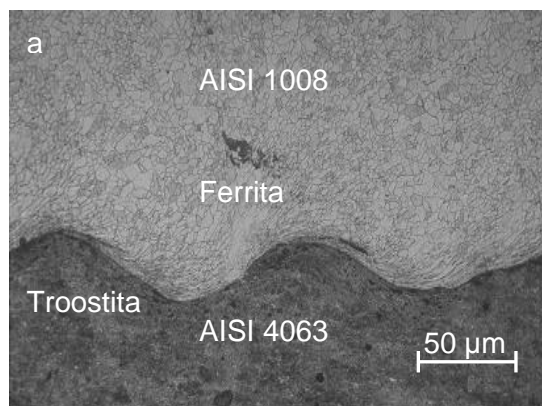


Figura 7a. Vista transversal.

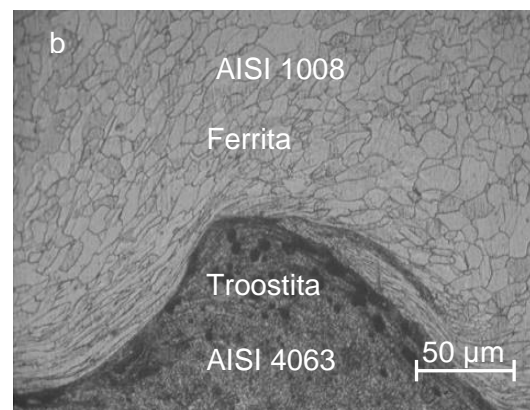


Figura 7b. Vista longitudinal.

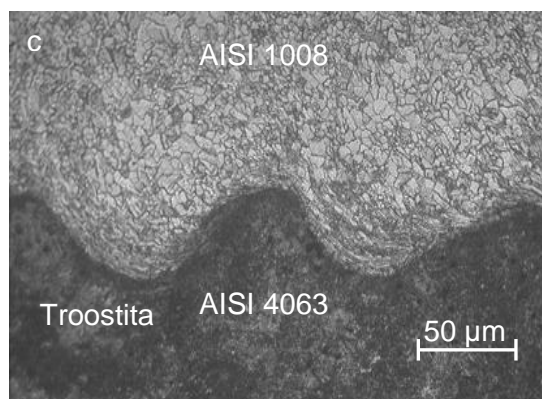


Figura c. Vista frontal.

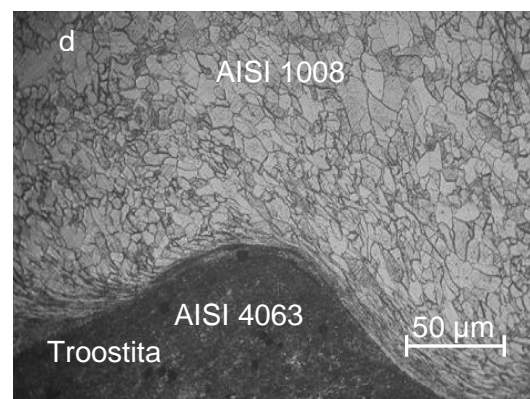


Figura d. Vista longitudinal.

En las microestructuras obtenidas, se puede observar el comportamiento descrito por la ola en la zona de fusión del material, donde el material de mayor dureza, el acero AISI 4063, se introduce por efecto de la difusión en el acero AISI 1008, ya que este es más dúctil que el primero, permitiendo que por los átomos del mismo se difunda las estructuras de los átomos del material de mayor dureza.

Se aprecia en la zona de soldadura una orientación preferencial de los granos en ambas aleaciones en un mismo sentido, lo cual está asociado a la presión de detonación y la onda expansiva del explosivo al ejercer su fuerza sobre la placa volante. La distribución de temperaturas a todo lo largo de

las piezas ha provocado la deformación plástica en la interfase con una disminución en la dureza de las aleaciones que involucra la migración de átomos y se produzca la unión entre ambas.

En la unión soldada la estructura del acero AISI 4063 (parte oscura) presenta un fondo de granos muy finos del tipo troostítico y grano grueso con red de ferrita y en la zona de la interfase fundida de ambos materiales (parte clara) presenta granos finos y alineados del tipo ferrítico.

Debido a que la deformación plástica representa en sí el movimiento de las dislocaciones por los planos de deslizamiento con su salida a la superficie de los cristales, es que el surgimiento de cualquier tipo de obstáculo capaz de dificultar el movimiento de las dislocaciones provoca el endurecimiento del policristal y el incremento de su resistencia (García-Jacomino *et al.* 2007).

Del análisis metalográfico se llega a la conclusión que como consecuencia del trabajo de deformación en frío realizado por la acción de las cargas explosivas, se origina una textura de deformación plástica donde el material se endurece por efecto de la soldadura por explosión.

3.4. Análisis de la dureza

Para la evaluación de la dureza se realizaron tres mediciones como mínimo en cada una de la zona de soldadura de las aleaciones, las que luego fueron promediadas, cuyos resultados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados del análisis de dureza

Materiales	AISI 4063	AISI 1008	Titanio	AISI 1020
	347	100	225	210
Dureza (HV)	347	99,5	227	211
	348	99,3	228	211

La causa del incremento de la dureza en las muestras soldadas por explosivos se debe fundamentalmente a la deformación plástica por el aumento de la densidad de dislocaciones y la consecuente reducción del tamaño del grano.

4. CONCLUSIONES

- Se pudo establecer en el análisis microestructural en la que la unión, del acero AISI 1020 con el titanio presenta una interfase en forma de línea, a diferencia de la junta de acero AISI 1008 con el AISI 4063 que forma ondulaciones con amplitud regular, lo que garantiza un aumento en la resistencia mecánica, asociada a la ductilidad del acero AISI 1008.

- Las velocidades de impacto, detonación y colisión, y la fracción de volumen influyen de manera diferente en la deformación permanente de las aleaciones disímiles sometidas a proceso de soldadura por explosión.
- Por el efecto de la deformación plástica, en la interfase de las uniones disímiles se pudo determinar que producto de la onda de choque, se produce incremento de dureza asociado a la disminución del tamaño del grano por efecto de la compactación dinámica.

5. REFERENCIAS

- ACARER, M.; GULENC, B. & FINDIK, F. 2003: Investigation of explosive welding parameters and their effects on microhardness and shear strength. *Materials & Design* 24(8): 659-664.
- ACARER, M., GULENC, B.; FINDIK, F. 2004: The influence of some factors on steel/steel bonding quality on these characteristics of explosive welding joints. *Journal of Materials Science* 39(21): 6457-6466.
- AL-HASSANI, S.; SALEM, S.; LAZARI, G. 1984: Explosive welding of flat plates in free flight. *International Journal of Impact Engineering* 1(2): 85-101.
- BEN-ARTZY, A. 2010: Wave formation mechanism in magnetic pulse welding. *International Journal of Impact Engineering* 37(4): 397-404.
- CARABALLO, M. A. & VINARDELL, C. 2004: Evaluación del comportamiento físico del acero Hadfield sometido a cargas explosivas. *Minería y Geología* 20(1-2): 95-101.
- CELIK, A. & ALSARAN, A. 1999: Mechanical and structural properties of similar and dissimilar steel joints. *Materials Characterization* 43(11): 311-318.
- DURGUTLU, A.; GULENC, B. & FINDIK, F. 2005: Examination of copper/stainless steel joints formed by explosive welding. *Materials & Design* 26(6): 497-507.
- DURGUTLU, A.; OKUYUCU, H. & GULENC, B. 2008: Investigation of effect of the stand-off distance on interfaz characteristics of explosively welded copper and stainless steel. *Materials & Design* 29(7): 1480-1484.
- FUKUI, Y. & INAMURA, T. 2004: Mechanical properties of a Ti-Nb-Al Shape Memory Alloys. *Material Transaction* 45(4): 1077-1085.
- GARCÍA-JACOMINO, J.; BURGOS, J.; ÁLVAREZ, M. & GARCÍA, J. 2007: Efecto del tratamiento con explosivos sobre las tensiones residuales en uniones soldadas de acero al carbono. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela* 22(2): 50-54.
- GREENBERG, B.; IVANOV, M.; PATSELOV, A. & YU, P. 2012: The processes of fragmentation, intermixing and fusion upon explosion welding. Elsevier. *AASRI Procedia* 3(1): 66-72.

- JINXIANG, Z.; KAISHIN, L.; KAI, Z.; XIAOJIE, L.; YING, L. & KAI, Z. 2005: A study on the relief of residual stresses in weldments with explosive treatment. *International Journal of Solids and Structures* 42(13): 3794-3806.
- MADHUSUDAN, G. & SRINIVASA, R. 2009: Microstructure and mechanical properties of similar and dissimilar stainless steel electron beam and friction welds. *International Journal of Advance Manufacturing Technology* 45(5): 875-888.
- MORIZONO, Y.; YAMAGUCHI, T. & TSUREKAWA, S. 2015: Aluminizing of High-carbon Steel by Explosive Welding and Subsequent Heat Treatment. *ISIJ International* 55(1): 272-277.
- MOUSAVI, S. & SARTANGI, P. 2009: Experimental investigation of explosive welding of cp titanium/AISI 304 stainless steel. *Materials & Design* 30(3): 459-468.
- PETUSHKOV, V. 2003: Peculiarities of explosion treatment of the circumferential weld on pipe filled with liquid. *Paton Welding Journal* 6(2): 14-16.
- PETUSHKOV, V. G.; TITOV, V. A. & BRYZGALIN, A. G. 2002: Limiting thickness of welded joints to be explosion treated. *Paton Welding Journal* 1(3): 20-27.
- WALSH, J.; SHREFFLER, R. & WILLIG, F. 1953: Limiting conditions for jet formation in high velocity collision. *Journal of Apply Physics* 24(3): 349-359.

Juan Ramón Castillo-Matos, rcastillom@ismm.edu.cu

Profesor Instructor. Departamento de Mecánica.
Especialista en Ciencias e Ingeniería de Materiales, Ensayos destructivos y no destructivos.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Holguín, Cuba

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

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

Dayanis Alcántara-Borges, 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

Modelación del área de la sección transversal y el ancho de la banda de transportadores para menas lateríticas y áridos de construcción

Roberto J. Sierra-Pérez
Aristides A. Legrá-Lobaina
Yoni Sierra-González
María E. Torres-Santander

Resumen

El propósito de este trabajo fue obtener el modelo que permite determinar el área de la sección transversal de la carga y la dimensión precisa de la banda, atendiendo a que en los manuales de diseño y explotación de transportadores de banda el área de la sección transversal de la carga se incluye dentro de un coeficiente (coeficiente constructivo o de forma), cuyos valores están tabulados y se escogen sobre la base de la experiencia, considerando la productividad deseada y valores estándares de ciertos materiales.

Palabras clave: acarreo de materiales; minería; modelación; transportador de banda.

Modeling the cross section area and belt width of belt conveyors operating in laterite ore bodies and construction aggregate deposits

Abstract

The objective of this investigation is to obtain a model allowing the determination of the cross section area and the exact belt dimension taking into account that the area of the load cross section is included in a coefficient (constructive coefficient or shape coefficient) in design and operating manuals for belt conveyors. These values are tabulated and are empirically selected considering the desired productivity and standard values established for certain materials.

Keywords: ore hauling; mining; modeling; belt conveyor.

1. INTRODUCCIÓN

Los parámetros tecnológicos del transportador de banda están interrelacionados por la expresión matemática (1) (Potapov 1980; Spivakoski & Potapov 1983; Vasiliev, Nikolaiev & Cazonov 2006):

$$B = 1,1 \cdot \left(\sqrt{Q \cdot (\gamma \cdot \psi \cdot v \cdot K)^{-1}} + 0,05 \right) \quad (1)$$

Donde:

B: ancho de la banda; m,

Q: productividad entregada por el transportador; t/h,

ψ : coeficiente que tiene en cuenta la disminución de la productividad debido al ángulo de inclinación longitudinal del transportador,

v: velocidad de movimiento de la banda; m/s,

K: coeficiente constructivo o de forma, que depende de las dimensiones transversales del transportador (según el valor de b_0 , Figura 1) y de las propiedades del material transportado (contenidas en el valor del ángulo de reposo φ y del coeficiente ψ), esto se puede expresar mediante:

$$K = \frac{3600 \cdot AT}{\Psi \cdot b_0^2} \quad (2)$$

Donde:

b_0 : ancho relativo de la sección transversal; m,

AT: área de la sección transversal del material en el transportador; m².

De la expresión (1) se puede observar que con el aumento o disminución del coeficiente constructivo K, el ancho de la banda disminuye o aumenta respectivamente. Quesada (1993) realizó este análisis sin considerar las relaciones funcionales entre las propiedades físico-mecánicas del mineral laterítico. También se desprende que el área AT es directamente proporcional al coeficiente K, que implica que sus valores dependen de los valores tabulados de K, sometidos al mismo error.

Según algunos autores (Matushev & Sumin 1985; Pereda & Polanco 1999), el coeficiente K está tabulado (Tabla 1). Solo se determina teniendo en cuenta valores específicos del ángulo del talud del material transportado y los aspectos de montaje desde el punto de vista constructivo. Sin embargo, hay materiales, como el mineral laterítico, para los que el ángulo del talud es mucho mayor de 20°.

Tabla 1. Valores del coeficiente de forma según el ángulo de los rodillos laterales

Parámetro	Plana		Acanalada sobre 3 rodillos					
Ángulo de inclinación de los rodillos laterales; grados	---		20		30		36	
Ángulo del talud grados	15	20	15	20	15	20	15	20
Coeficiente K	240	325	470	550	550	625	585	655

Oriol y Aguilar (1995) plantean que el coeficiente K se determina para longitud de rodillos igual al 40 % del ancho de la banda y ángulo de inclinación de los rodillos laterales de 20° y que la ecuación se expresa en función del 70 % del ángulo del talud estático. Sin embargo, varios materiales tienen valores de este último diferentes al 70 %, tal es el caso del mineral laterítico y los áridos de construcción cubanos.

De acuerdo con Zelienskii y Petrov (1986), el valor del coeficiente K se determina por una tabla, cuyos valores dependen de: ángulo de inclinación del transportador de 0 a 22°, ángulo del talud del material de 25° a 45° y ángulo de inclinación de los rodillos laterales de 20° y 30°.

Conforme a la norma GOST 22645-77, el ángulo de inclinación de los rodillos de apoyo de la banda es 10°, 20°, 30° para anchos de banda de 400-800 mm y 10°, 20°, 30°, 45°, para anchos de banda de 1 000 ÷ 2 000 mm. El valor más frecuente del ángulo de inclinación del rodillo lateral es 30°. En este caso los valores de K no sobrepasan el valor de 365.

Según Shubin y Pedre (1986), el coeficiente de forma para los transportadores inclinados disminuye en un 15 % según el ángulo de inclinación del tramo. Para ángulos del talud natural desde 30° a 45° el coeficiente de forma K = 105 a 160 y para bandas acanalada K = 265 a 320.

Los transportadores de banda plana se utilizan para distancias cortas y con poca velocidad de movimiento de la banda. El coeficiente de forma de acuerdo con Grigoriev et al. (1986) se determina por:

$$K = 900 \cdot c^2 \cdot \tan \varphi \quad (3)$$

$$\text{en el cual } c = \frac{b}{B} \quad (4)$$

Donde:

b: ancho que ocupa la carga transportada sobre la banda; m.

En este caso el área de la sección transversal de la carga en la banda se determina en función del ancho de la banda B , la longitud del rodillo l_r y la altura de la sección sobre la banda h . Los valores de K varían de 115 a 300 para φ de 10° a 25° .

Para Spivakoski (1982) y Spivakoski y Dimitriev (1982) los valores de K oscilan entre 270 y 290, sin embargo, en este caso el ancho de la banda se determina por la ecuación:

$$B = 1100 \cdot \left(\sqrt{Q \cdot (K \cdot v \cdot \gamma)^{-1}} + 0,05 \right) \quad (5)$$

Gerontiev y Karlin (1962) plantean que el coeficiente K tiene valores entre 1,6 y 3,5 y que el ancho de la banda se determina por:

$$B = \sqrt{Q \cdot (160 \cdot K \cdot v \cdot \psi \cdot \gamma)^{-1}} \quad (6)$$

De acuerdo con Potapov (1980) se utilizan los valores del coeficiente K siguientes:

$K=450$ a 590 para dos rodillos y ángulo de inclinación de los rodillos laterales de $\alpha = 15, 20$ y 30° ,

$K=470$ a 610 para tres rodillos y $\alpha = 20^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40° .

$K=620$ a 669 para 4 rodillos y $\alpha_1 = 15^\circ$ y 18° ; $\alpha_2 = 30^\circ$ y 36° y

$K=630$ a 705 para 5 rodillos y $\alpha_1 = 22,5^\circ$ a 36° y $\alpha = 22,5^\circ$ a 25° .

En ninguno de los casos explicados anteriormente no se tienen en cuenta las propiedades físico-mecánicas del material transportado, ni se expresa un procedimiento de selección del valor del coeficiente K .

Según Vasiliev, Nikolaiev & Cazonov (2006) solo analizan el coeficiente de forma para ángulos del talud de hasta 20° y ángulo de los rodillos laterales de 20° y 30° .

Vasiliev y Nikolaev (2003) escogen el coeficiente de forma por la Tabla 2. En este caso no se considera el ángulo del talud del material transportado.

Tabla 2. Valores de K establecido por Vasiliev y Nikolaev (2003)

Tipo de apoyo de los rodillos	Ángulo inclinación rodillos laterales; grados	Ángulo del talud del material; grados		
		15	20	25
Planos	---	250	330	420
De dos rodillos	20	500	580	660
	45	570	615	660
De tres rodillos	20	470	550	640
	30	550	625	700
	35	590	660	730

En los tres últimos casos no se corresponde con los valores de las propiedades del mineral laterítico cubano ni con los áridos de construcción; principalmente el ángulo del talud. Además, hay experiencia de usar ángulos de inclinación de los rodillos laterales de hasta 35°.

Según varios catálogos: Rotrans (Burgos) solo se utilizan ángulos de los rodillos laterales de 10°, 15° y 20° para artesas de dos rodillos y 20° y 30° para tres rodillos y FMC Corporation, Link-Belt (1990), recomienda utilizar ángulos de los rodillos laterales de 20°, 35° y 45°, también DUNLOP (2004) y RULMECA (2007) emplean ángulos de los rodillos laterales de 20°, 30°, 35° y 45°.

El desenlace de este análisis muestra que el coeficiente K se escoge de forma aproximada, los valores tabulados no tienen en cuenta el número de rodillos que mejor resuelva el problema energético, ni los valores adecuados de los ángulos de inclinación y dimensiones de los rodillos laterales, la forma de la pila de material formada y el ángulo exacto del talud y más aún del mineral laterítico mullido homogeneizado y áridos cubanos y su interrelación con la granulometría y la humedad. No existe un procedimiento, ni una expresión establecida para su determinación, en lo fundamental para las menas lateríticas.

Se deduce que escoger de esa manera un coeficiente de tal importancia, que puede determinar el área de la sección transversal del material y por ende el ancho de la banda, no es lo más racional; primero: porque no se tienen en cuenta las características físico-mecánicas reales de los minerales; segundo: porque no se aprovechan totalmente, o más racionalmente, las posibilidades de transportación y tercero: porque la transportación se hace menos eficiente.

Como explicación de este trabajo se demuestra que:

- Los transportadores de banda utilizados en el acarreo de menas laterítico en la industria cubana y áridos de construcción tienen bajo nivel de utilización de su capacidad de carga (hasta 60 %) y grandes pérdidas de energía (mayor de 10 000 MWh/año), ocasionado por factores inadecuados de diseño, selección y explotación (Sierra 2010).
- El valor del coeficiente K dado en la literatura se elige de forma aproximada y no se corresponde con el valor requerido para determinar el área de la sección transversal del material sobre la banda (AT), el ancho de banda racional (B) durante el acarreo de menas laterítico y en correspondencia con la geometría y dimensiones de la artesa. El ancho de banda está sobredimensionado hasta un 25 % en esta industria.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Fundamentación

La fundamentación del método de cálculo asume que:

- La determinación de la forma y área de la sección de la carga se realiza teniendo en cuenta las características del material a transportar, que pueden ser expresadas mediante sus respectivos ángulos de reposo maximal (al punto máximo) y tangencial y su interrelación con la humedad y granulometría.
- La determinación del ancho de la banda se realiza sumando la longitud de los rodillos, más cierto margen de seguridad. La longitud de los rodillos y su geometría debe ser tal que el área de la sección de la carga, para una velocidad deseada y valores dados de γ y ψ , posibilite la productividad (Q) solicitada.

2.2. Modelación del área de la sección transversal y el ancho de la banda

La productividad del transportador es una función del área total de la sección transversal del flujo de carga (AT; m²), de la velocidad de movimiento de la banda (v; m/s), de la masa volumétrica del material transportado (γ ; t/m³) y de la inclinación del transportador en el sentido ascendente de la carga (β); coeficiente (ψ) (Matushev y Sumin 1979; Novoyilov 1985 y Vasiliev, Nikolaiev & Cazonov 2006) expresión (7).

$$Q = 3600 \cdot AT \cdot v \cdot \gamma \cdot \psi ; \quad (7)$$

Al analizar diferentes disposiciones del órgano portador de la carga (banda) sobre los apoyos de rodillos (tipos de artesa) se observa que las áreas

transversales del flujo de carga son diferentes para un mismo ancho de banda. Para determinar las áreas transversales para artesa de uno hasta siete rodillos de apoyo (Figura 1) se obtienen por relaciones geométricas y trigonométricas a través de los modelos (9), (10), (11) establecidos en este trabajo. También se obtienen los modelos para determinar el ancho de banda ocupado por el mineral laterítico o áridos de construcción (b), para cualquier tipo de artesa y el ancho relativo de la sección transversal (b₀).

La forma del área de la sección transversal del flujo de carga obedece al tipo de artesa; plana o acanalada y al ángulo del talud dinámico (φ_d) en función de la humedad y la granulometría para las cargas analizadas. Depende de las dimensiones geométricas de la artesa; longitud de los rodillos l_i y de su ángulo de inclinación con respecto a la horizontal α_i , de la longitud del rodillo central l_r y del ángulo del talud dinámico del mineral φ_d . De la Figura 1 el área de la sección transversal está determinada por el valor de la magnitud b_0 . El área total de la sección transversal AT es la suma de las áreas de las secciones transversales A_0, A_1, A_2 y A_3 :

$$AT = A_1 + A_2 + A_3 + A_0 ; m^2 \tag{8}$$

Cuando se parte de la longitud del rodillo central l_r :

$$A_1 = l_r \cdot l_1 \cdot \text{sen} \alpha_1 + l_1^2 \cdot \text{sen} \alpha_1 \cdot \text{cos} \alpha_1 \tag{9}$$

$$A_2 = (l_r + 2 \cdot l_1 \cdot \text{cos} \alpha_1) \cdot l_2 \cdot \text{sen} \alpha_2 + l_2^2 \cdot \text{sen} \alpha_2 \cdot \text{cos} \alpha_2 \tag{10}$$

$$A_3 = (l_r + 2 \cdot l_1 \cdot \text{cos} \alpha_1 + 2 \cdot l_2 \cdot \text{cos} \alpha_2) \cdot l_3 \cdot \text{sen} \alpha_3 + l_3^2 \cdot \text{cos} \alpha_3 \cdot \text{sen} \alpha_3 \tag{11}$$

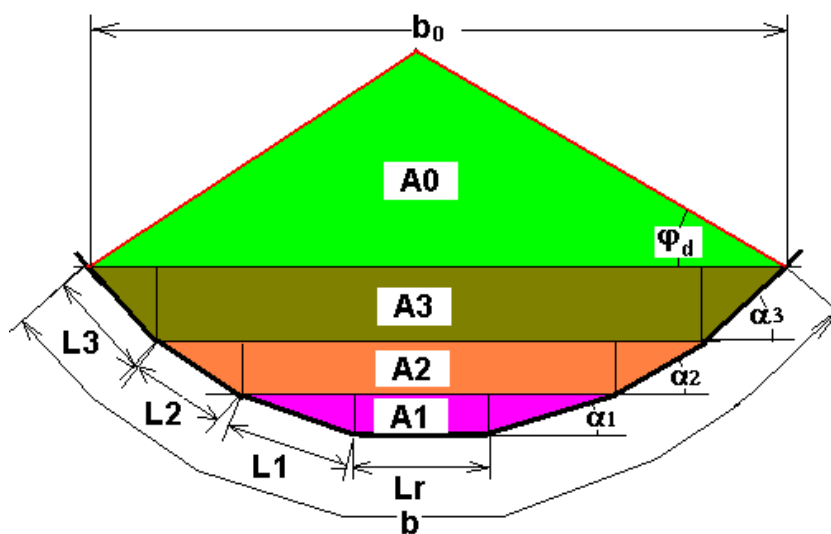


Figura 1. Esquema del área de la sección transversal del flujo de carga.

Cuando se parte del ancho relativo de la sección transversal de la carga b_0 :

$$A1 = b_0 \cdot l_1 \cdot \text{sen} \alpha_1 - 2 \cdot l_1 \cdot l_3 \cdot \text{sen} \alpha_1 \cdot \cos \alpha_3 - 2 \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \text{sen} \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2 - l_1^2 \cdot \text{sen} \alpha_1 \cdot \cos \alpha_1 \quad (12)$$

$$A2 = b_0 \cdot l_2 \cdot \text{sen} \alpha_2 - 2 \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot \text{sen} \alpha_2 \cdot \cos \alpha_3 - l_2^2 \cdot \text{sen} \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2 \quad (13)$$

$$A3 = b_0 \cdot l_3 \cdot \text{sen} \alpha_3 - l_3^2 \cdot \text{sen} \alpha_3 \cdot \cos \alpha_3 \quad (14)$$

El área A_0 depende del tipo de pila formada:

$$A_0 = K_f b_0^2; \quad (15)$$

Donde: K_f : depende del tipo de sección de la carga.

Sin embargo, CEMA (1999) solo considera la forma de la pila como circular y se ha demostrado para diferentes materiales que tiene distintas configuraciones. Las expresiones para determinar K_f para cada tipo de sección de carga, teniendo en cuenta los ángulos de reposo maximal φ_m y tangencial φ_t , están en Ricaurte (2009).

El área transversal del flujo de carga depende de factores condicionales, que son las características físico-mecánicas del material a transportar y de factores constructivos como son las dimensiones y la forma de la artesa, el régimen vibratorio y de movimiento de la carga por toda la traza del transportador y de la forma de alimentación del mineral a la banda. Los factores condicionales son impuestos a los proyectistas y, a su vez, estos últimos son los que asignan los factores constructivos mediante su elección.

Para artesa plana (un rodillo) $b = b_0$, entonces, de A_0 se obtiene:

$$b_0 = \sqrt{\frac{A_0}{K_f}}; \quad (16)$$

Para una artesa acanalada con un número de rodillos de apoyo, $nr > 1$ y hasta siete:

$$b_0 = l_r + 2 \cdot \sum_{i=1}^{nr} [l_i \cdot \cos(\alpha_i)]; \quad (17)$$

que es la ecuación general de b_0 en función de sus dimensiones geométricas. La ecuación (16) para determinar b_0 se puede escribir como:

$$b_0 = \sqrt{\frac{AT - \left(\sum_{i=1}^{ns} A(i) \right)}{K_f}}; \quad (18)$$

Para una artesa acanalada, el ancho de la banda ocupado por el mineral sobre la banda b se obtiene:

$$b = l_r + 2 \cdot (l_1 + l_2 + l_3); \quad (19)$$

Despejando l_r en la ecuación (19) y sustituyendo en (17) se obtiene:

$$b_0 = b - 2 \cdot \sum_{i=1}^n [l_{(i)} \cdot (1 - \cos \alpha_{(i)})]; \quad (20)$$

Sustituyendo (20) en (18) se obtiene:

$$b = \sqrt{\frac{AT - \left(\sum_{i=1}^{ns} A(i) \right)}{K_f}} + 2 \cdot \sum_{i=1}^n [l_{(i)} \cdot (1 - \cos \alpha_{(i)})]; \quad (21)$$

Por norma, el ancho b , como margen de seguridad para evitar el derramamiento del mineral debido a las irregularidades en la alimentación, debe relacionarse con el ancho B de la banda mediante la expresión:

$$b = 0,9 \cdot B - 0,05; \quad (22)$$

(Normas GOST 22645-77 y DIN 22101); donde B se da en m.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Obtención del modelo

De acuerdo a la Figura 1, $b = l_r + 2 \cdot \sum_{i=1}^{nr} l(i)$, sustituyendo (21) en (22) y despejando el ancho de la banda B se obtiene el modelo para la dimensión principal:

$$B = 1,1 \cdot \left\{ \sqrt{\left(\frac{1}{K_f} \right) \cdot \left[\frac{Q}{v \cdot \gamma \cdot \psi \cdot 3600} - \sum_{i=1}^n A(i) \right]} + 2 \cdot \sum_{i=1}^n [l_{(i)} \cdot (1 - \cos \alpha_{(i)})] + 0,05 \right\} \quad (23)$$

$$B = 1,1 \cdot \left\{ \left(\frac{1}{K_f} \right) \cdot \left[\frac{Q}{v \cdot \gamma \cdot \psi \cdot 3600} - \left(\begin{aligned} & [l_r \cdot l_1 \cdot \text{sen} \alpha_1 + l_1^2 \cdot \text{sen} \alpha_1 \cdot \cos \alpha_1] + \\ & + [(l_r + 2 \cdot l_1 \cdot \cos \alpha_1) \cdot l_2 \cdot \text{sen} \alpha_2 + \\ & + l_2^2 \cdot \text{sen} \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2] + \\ & + [(l_r + 2 \cdot l_1 \cdot \cos \alpha_1 + 2 \cdot l_2 \cdot \cos \alpha_2) \cdot l_3 + \\ & + l_3^2 \cdot \cos \alpha_3 \cdot \text{sen} \alpha_3] \end{aligned} \right) \right] + 2 \cdot \sum_{i=1}^n [l_{(i)} \cdot (1 - \cos \alpha_{(i)})] + 0,05 \right\} \quad (24)$$

Con el valor de B obtenido por (23) y utilizando la ecuación (1) se pueden determinar los valores del coeficiente de forma K para el mineral laterítico o árido para construcción en cualquier tipo de artesa.

Deberá rectificarse la longitud del rodillo $l_{(nr)}^*$. Esto se puede realizar

$$\text{mediante la fórmula } l_{(nr)}^* = l_{(nr)} + \frac{B - b}{2} + R_s ; \quad (25)$$

Donde: R_s : margen de seguridad del rodillo. Según Prok Internacional, Rotrans (1990), Rocman (2001a, 2001b) y Phoenix (2004) si B_s es el margen estándar del borde de la banda, que se calcula como:

$$B_s = 0,055 \cdot B + 20 ; \text{ mm} \quad (26)$$

en la cual B: ancho de banda; mm, entonces:

$$l_{nr}^* = l_{(nr)} + B_s ; \quad (27)$$

Nótese que los coeficientes de la fórmula (22) no dependen de las propiedades del material, de la velocidad de transportación, ni de las características de la alimentación. Un enfoque alternativo que puede solventar esta insuficiencia es el siguiente.

Para cada tipo de material que se transporte puede ser estudiado un margen de seguridad específico M_s . Ahora se tiene que:

$$B = \sqrt{\left(\frac{1}{K_f} \right) \cdot \left[\frac{Q}{v \cdot \gamma \cdot \psi \cdot 3600} - \sum_{i=1}^n A(i) \right] + M_s + 2 \cdot \sum_{i=1}^n [l_{(i)} \cdot (1 - \cos \alpha_{(i)})]}; \quad (28)$$

Y en este caso la longitud final del rodillo será según la ecuación (29), que puede observarse en la Figura 2. La suma $M_s + R_s$ puede designarse como margen general de seguridad.

$$l_{(nr)}^* = l_{(nr)} + Ms + Rs ; \quad (29)$$

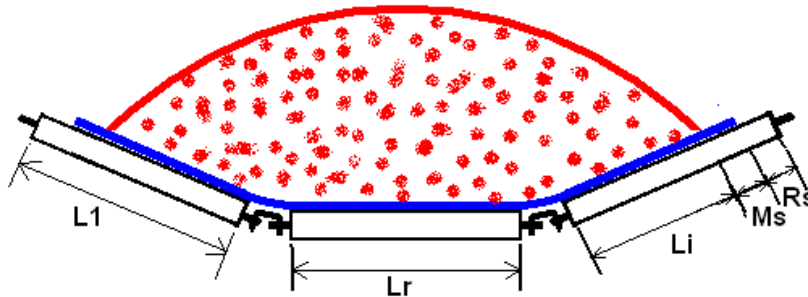


Figura 2. Márgenes de seguridad en la artesa.

Basado en el hecho de que optimizar una función objetivo sujeta a restricciones es encontrar, respecto a dichas restricciones, un conjunto de soluciones factibles y entre estas últimas se selecciona una o varias que maximicen o minimicen la función objetivo o que, al menos, estén por encima de cierta cota predefinida para la función objetivo, se ha seleccionado como método de optimización el que sigue los pasos: discretizar-evaluación exhaustiva en las restricciones-evaluar soluciones factibles en función objetivo.

Este enfoque ha permitido establecer un procedimiento para optimizar el diseño de las longitudes de los rodillos y la geometría de la artesa de un transportador.

4. DISCUSIÓN

4.1. Premisas para optimización del área de la sección transversal de la banda

Esta investigación hace un aporte a la tercera fase de optimización del algoritmo propuesto, cuyo paso 5, según Sierra (2010), plantea: determinar el número de rodillos, sus magnitudes y geometría que garanticen que el área de la sección de la carga (AT) sea tal que responda a la productividad pedida para una velocidad aceptable. De esta manera se determina el ancho mínimo de la banda, al cual debe sumársele el margen de seguridad y luego debe ser normalizado.

En esta nueva fase de optimización se puede analizar, según plantea el paso citado en el párrafo anterior del algoritmo, cuál es el conjunto de rodillos y su respectiva geometría que garantizan el mejor desempeño del transportador. Para su cumplimiento se define la fase siguiente.

- Obtener el número de rodillos y los ángulos que se forman entre ellos cuando se define la geometría de la artesa, de manera que se alcance un diseño que, manteniendo la productividad y la velocidad pedidas, minimice el valor del ancho de banda calculado.

4.2. Optimización teniendo en cuenta el diseño de la artesa

La optimización de la artesa (del área AT) constituye una etapa importante para el diseño energético de los transportadores de banda (Sierra 2010). El diseño del perfil de cada artesa se basa en conocer las dimensiones de cada rodillo, el ángulo que forman entre ellos y las longitudes de los márgenes de seguridad del material (Ms) y de los rodillos (Rs) (ecuación 29). En la presente investigación se obtiene el modelo que permite la obtención del número de rodillos y los ángulos que forman entre ellos, cuando se define la geometría de la artesa, de manera que se obtenga un diseño que, manteniendo la productividad y la velocidad pedidas, minimice el valor del ancho de banda calculado (modelo 24).

La optimización se logra si se realiza: puesto que estas longitudes y ángulos son magnitudes continuas, entonces debe procederse a una discretización de cada una de las variables que modelan dichas magnitudes y para ello, para cada variable X , se define su valor inicial X_1 , su valor final X_2 y el paso de cambio de un valor a otro δ_x .

La fase descrita en el epígrafe anterior se integra en un lazo que involucra tres fases más, que permite refinar las soluciones en cada iteración, como parte de un diseño que optimice cada una de estas fases, entonces optimizará globalmente todo el diseño (Sierra 2010).

El método de optimización creado para resolver el problema de optimización del diseño energético se ha seleccionado como método básico, según Sierra (2010), que consiste en lo siguiente:

1. Discretizar los valores de las variables. Con este procedimiento el problema queda escrito como un problema de optimización combinatoria.
2. Aplicar el método exhaustivo, que consiste en evaluar las restricciones para cada una de las combinaciones de los valores discretos de las variables. Cuando cierta combinación de valores de las variables satisface las restricciones, entonces, se dice que se obtuvo una solución factible.
3. Evaluar la función objetivo para todas las soluciones factibles y seleccionar las mejores soluciones, según sea adecuado (combinaciones que generen el menor o los menores valores o que generen el mayor o los mayores valores).

La ventaja de este método es que no se presentan complicaciones relacionadas con la continuidad, aleatoriedad, derivabilidad, etc. de las funciones objetivo y las restricciones. Las desventajas del método están

relacionadas con la correcta selección de la discretización de manera que se contemple el análisis del mayor número de casos y se logre obtener la solución en un tiempo razonable, para lo cual es imprescindible el uso de medios de cómputo automatizados.

El diálogo programado para realizar esta optimización se muestra en la Figura 3, según el software TRANSBANDAS. Nótese que en ese caso solo se evaluarán las combinaciones de hasta tres rodillos.

Figura 3. Datos para buscar la combinación de rodillos para conformar una artesa óptima.

Como resultado se obtiene una lista de soluciones factibles de acuerdo a esta ventana del software TRANSBANDAS, por ejemplo; según caso de estudio en Sierra (2010):

Valor de Velocidad Real: 3,145

Número de rodillos: 3

Longitud del rodillo central: 123 mm

Longitud del otro rodillo: 225 mm

Ángulo que forma el rodillo central con los otros: 44°

Ancho de la banda $B_e=0,613$ m.

Y se informa el mejor resultado, es decir, aquella configuración que garantiza la productividad pedida para una velocidad admisible no diferente

un 5 % de la velocidad sugerida y que tenga el ancho de banda lo menor posible. Una variante de este método es seleccionar la configuración que minimice el valor de la resistencia del tramo analizado (W_T).

5. CONCLUSIONES

- La fundamentación de un nuevo enfoque para el cálculo del área de la sección transversal del material acarreado sobre la banda del transportador sirve de base para la optimización energética durante el diseño.
- El modelo presentado para la determinación del área de la sección transversal de la carga sobre la banda permite establecer un enfoque para el cálculo preciso del de la banda.

6. REFERENCIAS

- CEMA (Conveyor Equipment Manufacturers Association). 1999: *Belt conveyors for bulk materials*. Preparado para la conferencia de la CEMA. BELT BOOK SIXTH EDITION. United States, 770 p.
- Dunlop Conveyor Belt Design Manual. 24/05/2004. Disponible en: http://www.ckit.co.za/Secure/Conveyor/Troughed/belt_tension/Dunlop/Belting.
- FMC Corporation, Conveyor Equipment Division. 1990: Catálogo: link-belt. Belt conveyor idlers. P.O. Box 1370, Tupelo, Mississipi 38802. Copyright. CED 12^a59020. Printed in USA.
- GERONTIEV, B. I. & KARLIN, N. T. 1962: *Transporte minero*. Niedra, Moscú, 347 p.
- GRIGORIEV, B. N. 1986: *Máquinas y complejos de transporte para el laboreo subterráneo*. Niedra, Moscú, 415 p.
- NOVOYILOV, M. G. 1985: *Trabajos mineros a cielo abierto*. Niedra, Moscú, 315 p.
- MATIUSHEV, L. G. & SUMIN, V. M. 1985: *Dispositivos de las fábricas de enriquecimiento*. Niedra, Moscú.
- ORIO, G. J. M. & AGUILAR, P. F. 1995: *Máquinas de transporte continuo*. Pueblo y Educación, 235 p.
- PEREDA, H. S. & POLANCO, A. R. G. 1999: *Transporte minero*. Félix Varela, La Habana, 363 p.
- Phoenix Conveyor Belts. 2004: Design fundamentals SYSTEMS GMBH. Hannoversche Strasse 88. D-21079 Hamburg, Germany. DIN 22101. Consultado: 10 may 2009. Disponible en: www.phoenix-ag.com.
- POTAPOV, N. G. 1980: *Máquinas de transporte*. Niedra, Moscú, 261 p.
- PROK Internacional. Catálogo: balance conveyor idlers. Design and manufacturing engineers, P.O. Box 465. Mulgrave North, 3170.
- RICAURTE, C. J. 2009: *Precisiones en la determinación del factor de forma de las arenas industriales en transportadores de banda*. A. A. Legrá-

- Lobaina, A. Turro Breff (Tutores). Tesis de maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- ROCMAN. 2001a: *Catálogo rodillos electro soldados*. Mondragón, España.
- ROCMAN. 2001b: *Catálogo rodillos, guirnaldas y tambores*. Mondragón, España.
- ROTRANS. 1990: (Catálogo). Empresa dedicada a la fabricación de elemento para transporte continuo. Burgos.
- RULMECA, K. 2007: *Interroll. Rollers and components for bulk handling*. Italy.
- QUESADA, W. 1993: Coeficiente constructivo en transportadores de banda. *Minería y Geología* 10(3): 70-75.
- SHUBIN, V. S. & PEDRE, C. 1986: *Diseño de máquinas industriales*. T. III. Pueblo y Educación, La Habana, 364 p.
- SIERRA, R. J. 2010: *Optimización energética en el diseño de transportadores de banda para el mineral laterítico cubano*. Arístides Alejandro Legrá Lobaina (Tutor). Tesis de doctorado. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 100 p.
- SPIVAKOSKI, A. O. & DIMITRIEV, B G. 1982: *Teoría de los transportadores de banda*. Nauta, Moscú, 363 p.
- SPIVAKOSKI, A O. 1982: *Transportadores de banda para la industria minera*. Niedra, Moscú, 345 p.
- VASILIEV, K. A. & NIKOLAIEV, A. K. 2003: *Máquinas de transporte*. Nauka, Sant Petersburgo, 124 p.
- VASILIEV, K. A.; NIKOLAIEV, A. K. & CAZONOV, K. G. 2006: *Máquinas de cargas y transporte de las plantas de beneficio de minerales*. Nauka, Sant Petersburgo, 358 p.
- ZELIENKII, O. B. & PETROV, A. C. 1986: *Manual para proyectos de transportadores de banda*. Niedra, Moscú, 222 p.

Roberto J. Sierra-Pérez, rsierra@ismm.edu.cu

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

Arístides A. Legrá Lobaina, alegra@ismm.edu.cu

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

Yoni Sierra-González, yonisierra85@gmail.com

Ingeniero Mecánico. Empresa NOVACERO, Ecuador

María E. Torres-Santander, epciencia@citmahlg.cu

Máster en Ciencias. Delegación Territorial CITMA, Holguín, Cuba

Metal accumulation in surface sediment of the urban and industrial coastal area of the municipality of Moa (Cuba): distribution and pollution assessment

Yosbanis Cervantes-Guerra
Allan Pierra-Conde
Alina Rodríguez-Infante
Yuri Almaguer-Carmenates
Hans Jürgen-Gursky
Jo Van-Caneghem
Carlo Vandecasteele

Resumen

The investigation is to evaluate the accumulation of ten elements (Al, Cr, Fe, Mn, Ni, Co, As, Cu, Pb and Zn) in surface sediments from the urban and industrial coastal area of Moa. Human activity has influenced the region, which has been developing in one of the most important mining regions of Cuba since the middle of the past century. Two methods were used to assess the contamination of the sediments: the estimation of metal enrichment by calculating the index of geo-accumulation (Igeo) and the interpretation of the data obtained based on quality criteria. The overall range of concentrations is 15.7 - 83.5 mg g⁻¹ for aluminum, 1.4 - 17.9 mg g⁻¹ for chromium, 22.8 - 379.5 mg g⁻¹ for iron, 1.5 - 56.2 mg g⁻¹ for manganese, 0.9 - 6.2 mg g⁻¹ for nickel, 56 - 1094 µg g⁻¹ for cobalt, 6 - 126 µg g⁻¹ for arsenic, 17 to 146 µg g⁻¹ for copper, 6 - 66 µg g⁻¹ for lead, and 64 - 576 µg g⁻¹ for zinc. The results obtained from the studied coastal zone show a high level of pollution in surface sediments. The spatial distribution of the elements varied according to the analyzed elements: Al, Cr, Fe and Ni showed high levels of concentration throughout the studied zone; Mn, Co, Cu, As and Zn are in a higher proportion in Moa Bay Cay. In the case of As and Pb, higher concentrations were located at the deltas of Moa and Cayo Guam rivers and also in some areas in the west of the bay.

Palabras clave: Moa Bay Cay; geoaccumulation index; contamination in marine sediments; mining impacts; geoenvironmental study.

Acumulación de metales en sedimentos superficiales de la zona costera urbana e industrial del municipio de Moa (Cuba): distribución y evaluación de la contaminación

Abstract

La investigación consiste en evaluar la acumulación de diez elementos (Al, Cr, Fe, Mn, Ni, Co, As, Cu, Pb y Zn) en los sedimentos superficiales de la zona costera urbana e industrial de Moa. La actividad humana ha influido en la región, que se está desarrollando en una de las zonas mineras más importantes de Cuba desde mediados del siglo pasado. Se utilizaron dos métodos para evaluar la contaminación de los sedimentos: la estimación del enriquecimiento de metales mediante el cálculo del índice de geoacumulación (Igeo) y la interpretación de los datos obtenidos en base a criterios de calidad. El rango general de concentraciones es de 15,7 - 83,5 mg g⁻¹ para el aluminio, 1,4 - 17,9 mg g⁻¹ para el cromo, 22,8 - 379,5 mg g⁻¹ para el hierro, 1,5 - 56,2 mg g⁻¹ para el manganeso, 0,9 - 6,2 mg g⁻¹ para el níquel, 56 - 1094 µg g⁻¹ para el cobalto, 6 - 126 µg g⁻¹ para el arsénico, 17 a 146 µg g⁻¹ para el cobre, 6 - 66 µg g⁻¹ para el plomo y 64 - 576 µg g⁻¹ para el zinc. Los resultados obtenidos de la zona costera estudiada muestran un alto nivel de contaminación en los sedimentos superficiales. La distribución espacial de los elementos varió según los elementos analizados: Al, Cr, Fe y Ni mostraron altos niveles de concentración en toda la zona estudiada; Mn, Co, Cu, As y Zn están en una proporción más alta en Bahía de Cayo Moa. En el caso de As y Pb, las concentraciones más altas se localizaron en los deltas de los ríos Moa y Cayo Guam y también en algunas áreas en el oeste de la bahía.

Keywords: Bahía de Cayo Moa; índice de geoacumulación; contaminación en sedimentos marinos; impactos mineros; estudio geoambiental.

1. INTRODUCTION

Studies about toxic elements in surface sediments are considered to be relevant for geochemical investigations on seacoasts as these elements may dissolve and be incorporated in the ecosystem, turning them into environmental risk areas (Zhu *et al.* 2012; Herrera *et al.* 2013; Gupta *et al.* 2014; Gang *et al.* 2016).

The mobility of metals is generally considered very low: they accumulate on the first centimeters of the sediment and only very small quantities reach the subsurface. Therefore, a high concentration on the surface horizon is a good diagnostic criterion for anthropogenic pollution. The coastline of the Moa Bay Cay located to the northeast of the province of Holguín, Cuba has suffered a great deterioration due to mining and metallurgical activities (Cervantes *et al.* 2011).

The municipality of Moa is the most important mining town of Cuba, with an average production of more than 60 thousand tons of nickel and cobalt on a yearly basis (National Bureau of Statistics and Information – ONEI – (2014)). Moa with a population of 75 101 inhabitants (ONEI 2014) has two mine - metallurgical plants in operation, one port and an airport.

The main impacts produced by mining operations in Moa are the disappearance of extensive areas of forests, the construction of geological exploration trails and of mining roads, and the formation of large deposits of industrial tailings. This has led to increased erosion of the land surface resulting from more than 10^6 m³/year of sediments being carried by surface streams and deposited in the Moa Bay Cay (Fernández 2009).

The coast of Moa is 50.1 km long (ONEI 2014), of which 13.9 kms (28 %) were studied. It is bordered on the north by the Atlantic Ocean, on the south by the coastal portion that covers Punta Cabagan to the mouth of the Cayo Guam River. The limits of the land in the coastal area include the city of Moa, the urban settlement of Punta Gorda, the industrial facilities and areas affected by mining operations (Figure 1).

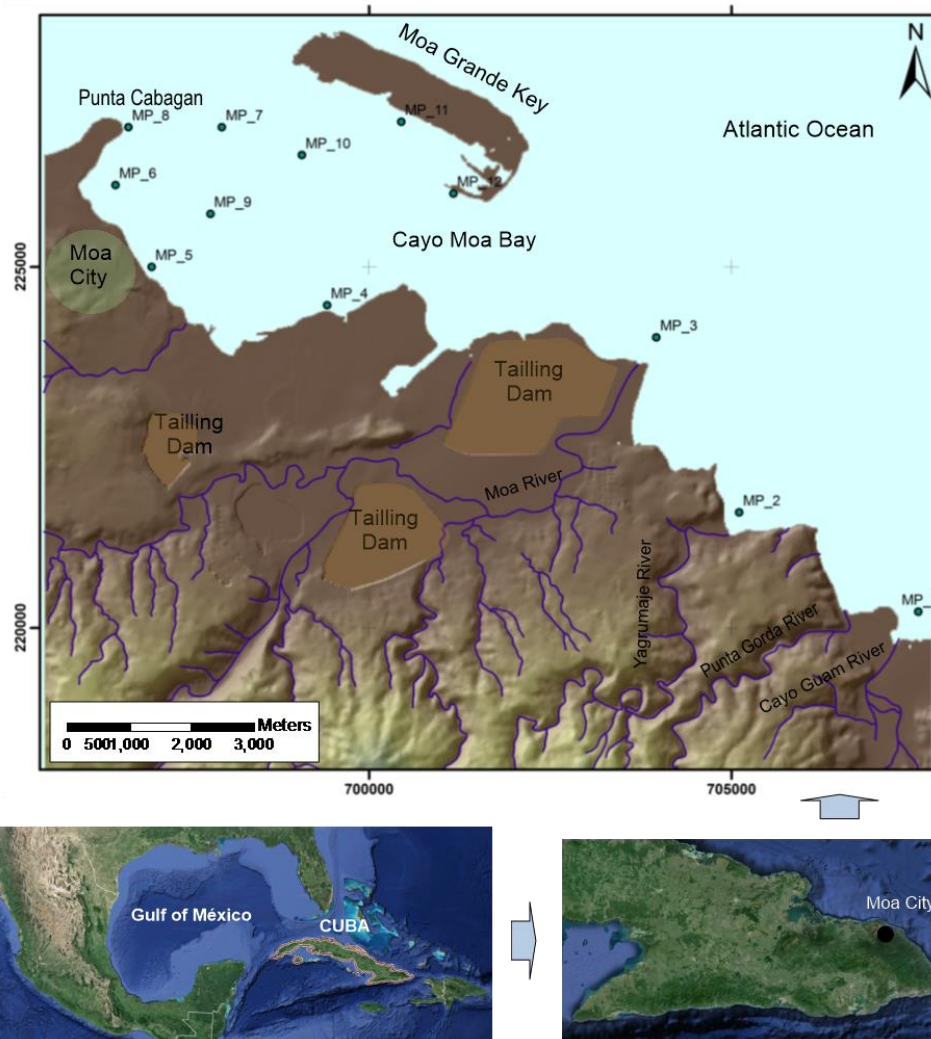


Figure 1. Geographical Location of the Study Area. Stations Used in the Research.

The studied area has a substrate formed by serpentinized ultrabasic rocks with a high degree of alteration, which was subjected to an intense tectonic activity. The degree of serpentinization in the region varies. Laterite soils lie on the serpentinized substrate, spatially located along the coast or near. Cr, Fe, Mn, Ni, Co, Cu, and Zn occur in various proportions in different profiles of the laterite soils.

At the bottom of the bay, friable quaternary clastic sediments and terrigenous biotritical prevail. The lithology is represented by four horizons (from the bottom up): calcareous grit, carbonated sandy silt, carbonated silty and terrigenous silt (Menéndez 2001).

The stream pattern in the Moa Bay Cay is ruled by the effect of tides, showing a net water movement in the western direction during high tides and less intense in the east direction during low tides (Menéndez 2001).

This implies that most waste and movement sediments carried over by the Cayo Guam, Punta Gorda, Yagrumaje and Moa rivers reach the bay and are being deposited along the coast.

2. MATERIALS ANDY METHODS

For geoaccumulation analysis, sediment samples were taken in three periods from 2009 through 2011. Twelve sampling locations were selected. These were sampled on a yearly basis for three consecutive years. Ten elements (Al, Cr, Fe, Mn, Ni, Co, As, Cu, Pb, and Zn) were determined. The average value will be used for subsequent calculations.

Samples were collected by scuba diving. A collector tube inserted into the mud allowed 50 cm of sediment to be extracted. All samples were stored in a plastic bag of about one kilogram capacity.

The evaluated area was divided into two areas of work:

Deltaic zone: In this zone, the mouth of Moa, Yagrumaje, and Cayo Guam rivers were monitored. These are the main ways through which pollutants get into the marine area; therefore, the pollution of the area is caused by sediments recently accumulated in the delta. MP 1, MP 2 and MP 3 stations were located in the deltaic zone (Figure 1).

Industrial and urban, coastal zone: This includes the lagoon of the Moa Bay Cay that is bordered on the south by the coastline of Moa city and on the north by the southern coast of the Moa Grande Cay. It extends from Punta Cabagan in the west to Moa River in the east. Stations MP 5, MP 6, MP 7, MP 8 MP 9 MP 10, MP 11 and MP 12 where located in Moa Bay Cay (Figure 1).

The samples were dried at 60 °C for 24 hours and later sieved. The fraction < 63 microns were extracted for analysis. A portion of dry sediment (0.5 g) was digested with the following mix of Suprapur® quality acid: 5 ml of HNO₃ (concentrated), 10 ml of HF (concentrated) and 7 ml of HClO₄ (concentrated) and evaporated to dryness. The residue was dissolved in 10 ml of HCl (concentrated) transferred to a Teflon flask and adjusted to 25 ml with pure deionized water of 18.2 MΩcm⁻¹. Determinations were carried out by using a Varian Vista MPX Axial ICP - AES spectrometer.

The accuracy of the analytical procedure used was checked by repeatedly analyzing reference samples (IAEA-365), and comparing the obtained values with the expected values. The quality control samples represented 10% of the total analytical load. Precision was over 50% and the results for the references samples were between 93 % and 105 % compared to the certified value.

The index value of geoaccumulation defined by Müller (1969) was used for assessing the contamination caused by sediments. This index has been used in several investigations and is proven to be a useful pollution geoinicator (Amat *et al.* 2002; ONG *et al.* 2013), (See Supporting Information SI.I).

The limits proposed by Long *et al.* (1995) were used (See Supporting Information SI.II) in order to interpret the information based on ecotoxicological criteria.

3. RESULTS AND DISCUSSIN

3.1. Sediment characterization

The color of the sediment obtained in the studied coastal area ranged between black and brown-red. The sediments most affected by suspended materials penetrating into the marine environment through Yagrumaje and Cayo Guam rivers are reddish, which is caused by laterite sediments.

However, sediments obtained from the delta of Moa River (MP 3) have a black coloration very similar to the tailings deposited near the mouth of the Moa Rive. This waste is carried over to the coast due to erosion during periods of heavy rains.

Granulometry, in most stations, shows the presence of clay or a mixture of clay with different types of sand (Table 1).

Table 1. Characteristics of surface sediments

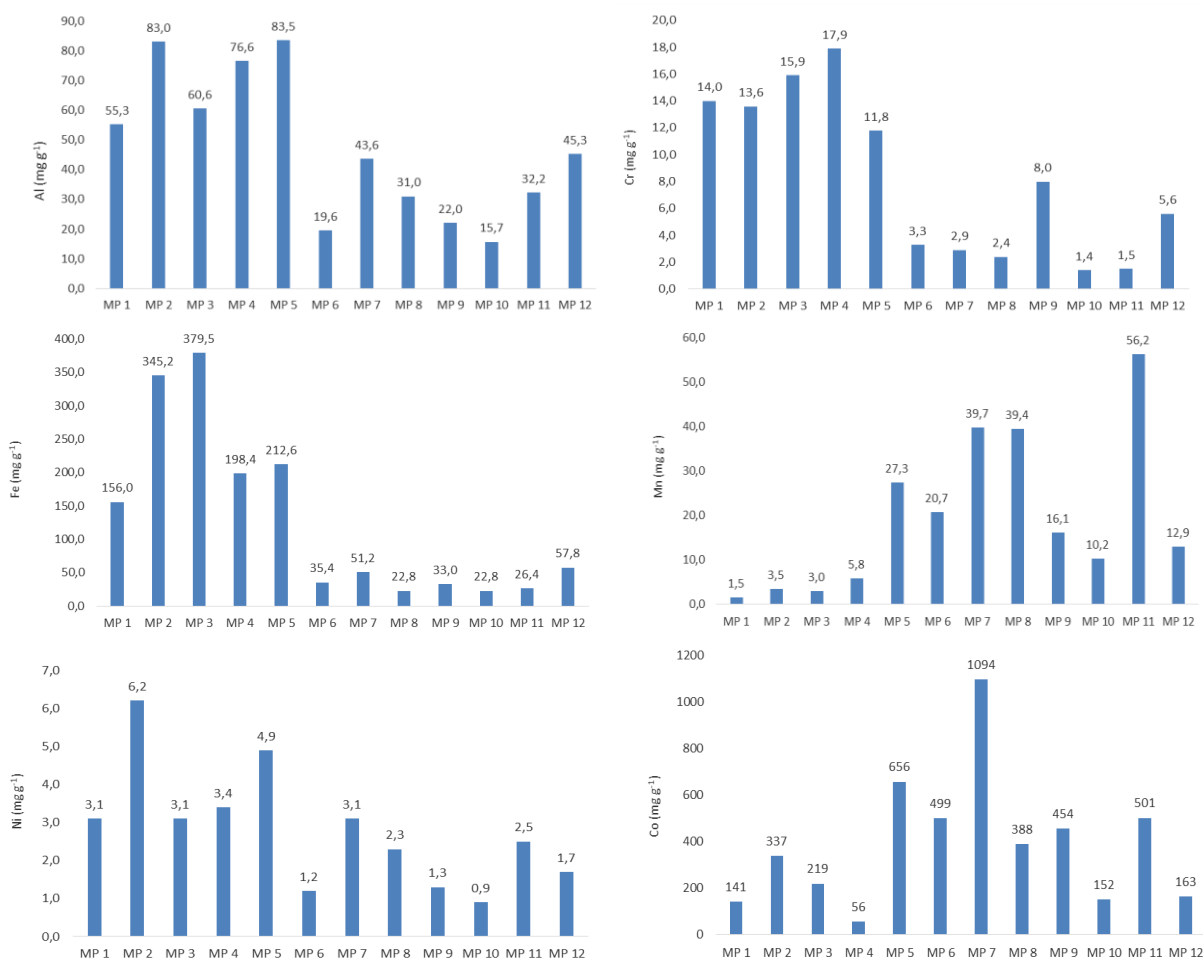
Sample	Color (visual)	Granulometric features (visual)
MP 1	Black-gray with red streaks	Fine sand
MP 2	Brown with black streaks	Clay
MP 3	Black	Clay-fine sand
MP 4	Brown - black	Sand-clay
MP 5	Brown - black	Clay-sand
MP 6	Brown-black	Clay
MP 7	Brown-black	Clay
MP 8	Brown-black	Clay
MP 9	Brown - black	Clay-fine sand
MP 10	Gray-black	Clay-fine sand
MP 11	Gray-black	Clay-sand
MP 12	Gray	Clay-sand

Factor analysis showed that the elements determined are in three groups: there is a high correlation between, Al, Cr, Ni and Fe (first group); a second group shows a high correlation between Mn, Co, Cu and Zn, and finally, a third group is formed by As and Pb (See Supporting Information SI.III).

3.2. Distribution of the elements studied

Aluminum

The area with the highest concentrations of Al covers the coastline from the west of Moa (MP 5) to the mouth of Cayo Guam River (MP 1) (Figure 2). At the MP 5 and MP 2 stations, concentrations above 80 mg g^{-1} were recorded. MP 5 is located in one of the areas receiving the largest quantities of sediments from the emerged areas and is situated on the southern shore of the Moa Bay Cay. Removal of silty sediments is high in this area, mainly caused by shallowness and the impact of climatic factors as well as dredging activity on the bay.



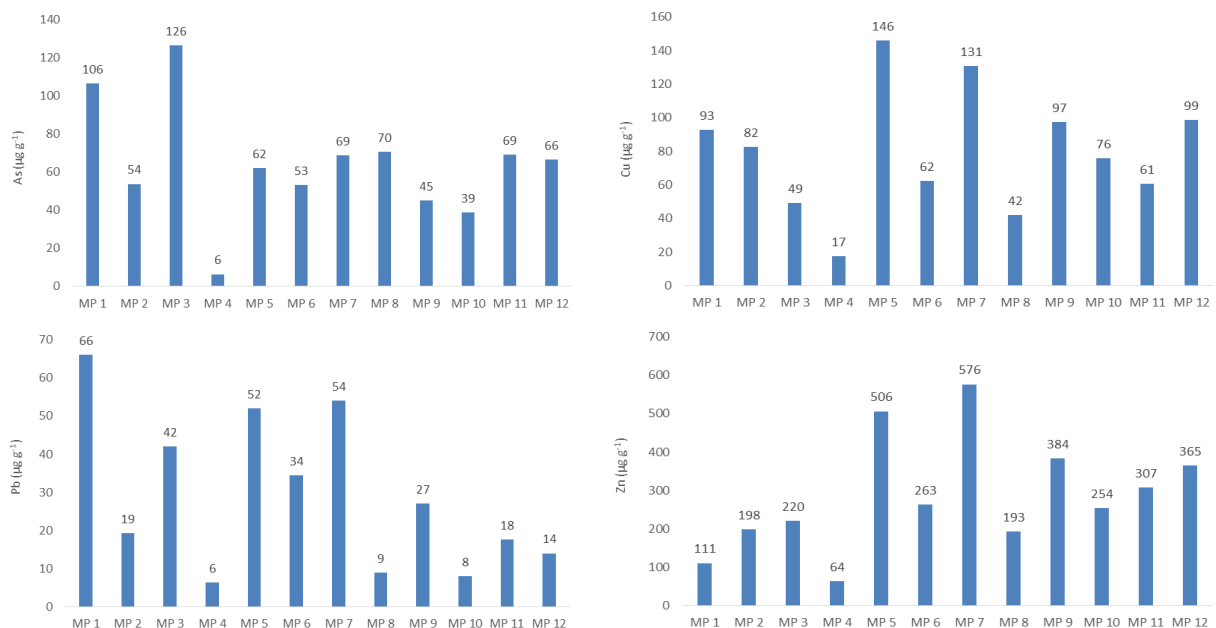


Figure 2. Metal concentrations in the surficial sediments (< 63-µm fraction) of the urban and industrial coastal area of Moa.

The delta of Yagrumaje River (MP 2) is an area where large volumes of eroded laterite sediments coming from various affected areas by the mining activity converge. Another reason explaining a high concentration of Al in this location is erosion of soil profiles in the presence of medium and low-grade bauxite in the northernmost section of the river (Bergues 2006). MP 3 and MP 4 are also close to the dumping area of liquid wastes coming from the industry with contents of Al between 4 000 and 5 000 mg /l (Cueto *et al.* 2003).

Chromium

Two zones that show differences in the chromium accumulation can be distinguished. The highest concentrations of Cr (11.8 to 17.9 mg g⁻¹) are found in the coastal area from Moa city (MP 5) to the mouth of the river Cayo Guam (MP 1) and lower concentrations (1.4 to 5.6 mg g⁻¹) are found to the west of Moa Bay Cay.

Chromium is a common element in the soils of the region; and the industrial wastes are another source of Cr going to the coast.

Iron

The studied region is one of the largest iron reserves around the world. Fe is concentrated in the tailings discharged by the existing mining industries which are stored behind dams located along the coast, for future use. In general, the concentration values are high. The concentrations of Fe

exceed 150 mg g^{-1} in five stations. Maximum concentration values were found in MP 3 (379.5 mg g^{-1}) and MP 2 (345.2 mg g^{-1}) stations, located in the deltas of Moa and Yagrumaje rivers.

Lower contents were found to the northwest of the area, where the majority of the monitored stations are located, except for MP 5 (212.6 mg g^{-1}) and MP 4 (198.4 mg g^{-1}). In the remaining stations, concentrations were all below 150 mg g^{-1} (Figure 2).

Manganese

Manganese is a metal associated to laterite soils and it is essentially found as oxides (MnO). In soil profiles, manganese oxides are phase mineral carriers of cobalt and nickel (Rojas 2012). The highest concentration values were found in the industrial and urban coastal areas. The highest value is found in MP 11 (56.2 mg g^{-1}). High concentration values of Mn are also found in MP 7 (39.7 mg g^{-1}) and MP 8 (39.4 mg g^{-1}). This is because the area of the lagoon is a basin receiving sediments, which carries Mn from the areas affected by erosion.

Nickel

Nickel is an essential element exploited by mining companies in the region. Its content in the ore ranges from 0.5 mg g^{-1} and 30 mg g^{-1} and the average in the surface sediments from the seabed is 2.8 mg g^{-1} (Figure 2). Maximum levels were found in MP 2 station (6.2 mg g^{-1}) and MP 5 (4.9 mg g^{-1}). Minimum contents were found in the lagoon, specifically in MP 10, MP 6 and MP 9 stations with values lower than 2 mg g^{-1} .

The elements of Al, Cr, Fe and Ni show a similar accumulation pattern. Higher values are found in the deltaic zone (MP 1, MP 2 and MP 3) as well as in MP 4 and MP 5 stations located in the coastal zone. This behavior is due to these elements entering the coast by the Moa, Yagrumaje and Cayo Guam rivers and due to the ocean. Currents are carried over to the lagoon.

Cobalt

Cobalt is an element under exploitation by the local mining industry. Co occurs in laterite soils in smaller quantities than Ni. Its concentration in laterite profiles of the region ranges from 0.3 mg g^{-1} to 17.1 mg g^{-1} . In urban and industrial coastal areas of Moa, the highest concentrations were found to the west of the lagoon. The highest values were found in MP 7 station with $1094 \mu\text{g g}^{-1}$. Other significant values exceeding $500 \mu\text{g g}^{-1}$ were found in MP 5 and MP 11 stations. The lowest concentrations were found in stations MP 1, MP 4, MP 10 and MP 12 (Figure 2).

Arsenic

Arsenic is an element that has never been reported to be found in surface sediments on the coast of Moa. The concentrations found here range from 6 to 126 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Figure 2). The highest concentrations were found at the mouths of the Moa River (MP 3) with 126 $\mu\text{g g}^{-1}$ and Cayo Guam River (MP 1) with 106 $\mu\text{g g}^{-1}$; on the coastline of Moa the highest value was found in MP 8 and MP 11. The concentration decreases to the northwest of the lagoon.

Arsenic is an element dissociated from the local geology, which indicates that it reaches the bay because of human activity.

Copper

The concentration of Cu ranges from 17 to 146 $\mu\text{g g}^{-1}$, with an average value of 79 $\mu\text{g g}^{-1}$. The maximum values are distributed in the lagoon. The best examples are found in MP 5 (146 $\mu\text{g g}^{-1}$) and MP 7 (130 $\mu\text{g g}^{-1}$), and the highest values in the delta zone were associated with MP 1 (92 $\mu\text{g g}^{-1}$) and MP 2 (82 $\mu\text{g g}^{-1}$). As copper is not a common metal occurring in the laterite crust, its origin is presumed to be urban and mining - metallurgical activities in the coastline zone (Figure 2).

Lead

The concentration of lead ranges from 6 to 66 $\mu\text{g g}^{-1}$. The highest concentrations are found in the mouth of Cayo Guam River (MP 1) and in the western portion of the Moa Bay Cay in MP 7 and MP 5 stations. Minimum values (below 10 $\mu\text{g g}^{-1}$) were found in MP 4, MP 10 and MP 8 (Figure 2). There is no report of Pb being found in laterites so it is assumed that its origin is associated with the industrial and urban activity.

Zinc

Laterite soils contain large amounts of iron oxides, which are known to have strong zinc-binding capacity (Mandal *et al.* 1992). In surface marine sediments, the concentration ranges from 64 to 576 $\mu\text{g g}^{-1}$, with an average value of 286 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Figure 2). The highest concentrations were found in the western portion of the Moa Bay Cay (MP 5, MP 7 and MP 9) and south of Moa Grande Cay in MP 12.

The accumulation of Zn, Cu and Co shows a pattern: the highest values are located in Moa Bay Cay specifically in MP 5 and MP 7 stations. The highest disposals of terrigenous sediments in this zone and the influence of

dumping urban and industrial wastes on the coast is the major cause of this behavior.

Average, standard deviations and ranges for all samples analysed are in the supporting information (See Supporting Information SI. IV).

3.3. Geoaccumulation index

Calculation results of the geoaccumulation index are shown in table 2. According to the ranges established by Müller (1969) for the evaluation, the analysis reveals significant pollution values for Al, Cr, Fe, Ni and Zn in each station.

Table 2. Geoaccumulation Index (Igeo) for Studied Elements

Sample	Al	Cr	Fe	Mn	Ni	Co	As	Cu	Pb	Zn
MP 1	8,52	5,54	5,12	-0,26	4,37	1,46	3,82	3,14	1,14	2,30
MP 2	9,11	5,50	6,26	0,96	5,37	2,72	2,84	2,9	-0,64	3,13
MP 3	8,65	5,73	6,4	0,74	4,36	2,10	4,04	2,22	0,48	3,29
MP 4	9,00	5,90	5,46	1,69	4,50	0,13	-0,25	0,72	-2,25	1,50
MP 5	9,12	5,30	5,56	3,92	5,03	3,68	3,05	3,80	0,79	4,49
MP 6	7,03	3,46	2,97	3,52	3,00	3,29	2,82	2,57	0,20	3,54
MP 7	8,18	3,27	3,51	4,46	4,37	4,42	3,19	3,64	0,85	4,68
MP 8	7,69	3,00	2,34	4,45	3,94	2,93	3,23	2,00	-1,74	3,10
MP 9	7,19	4,74	2,87	3,16	3,11	3,15	2,58	3,21	-0,15	3,97
MP 10	6,71	2,2	2,34	2,50	2,58	1,57	2,37	2,85	-1,94	3,49
MP 11	7,74	2,32	2,55	4,96	4,06	3,30	3,20	2,53	-0,76	3,77
MP 12	8,23	4,22	3,68	2,84	3,50	1,67	3,14	3,23	-1,12	4,02

A significant pollution in surface sediments in the entire region is observed by calculating the Igeo. Al is the element of greater accumulation in samples with a maximum Igeo value of 9.12 (MP 5) and a minimum value of 6.71 (MP 10). Cr, Fe and Ni are also metals with a high geoaccumulation. In general, the most contaminated samples were found in MP 5, MP 7, MP 2 and MP 3, indicating a significant level of pollution throughout the analyzed coastal sector.

The Mn geoaccumulation was not significant in the delta zone; however, the values increase within the lagoon and reach a maximum value in the MP 11 station. Co, As and Cu are observed as recurrent contaminants in all stations, except in MP 4.

Of all analyzed elements, Pb had the lowest geoaccumulation because only a low degree of contamination was observed in MP 1. Negative Igeo values

for Mn, As and Pb in some stations indicate that the sediments are not contaminated by these metals.

3.4. Data interpretation based on ecotoxicological criteria

According to the comparison between the obtained concentrations and the ecotoxicological criteria proposed by Long *et al.* 1995, the impact of pollution in the studied area is shown in table 3.

Table 3. Ecotoxicological Assessment for Sediments in the Studied Stations (within the limits set by Long *et al.* 1995)

Sampling Stations	Cr	Ni	As	Cu	Pb	Zn
MP 1	T	T	T	P	P	N
MP 2	T	T	P	P	N	P
MP 3	T	T	T	P	N	P
MP 4	T	T	N	N	N	N
MP 5	T	T	P	P	P	T
MP 6	T	T	P	P	N	P
MP 7	T	T	P	P	P	T
MP 8	T	T	T	P	N	P
MP 9	T	T	P	P	N	P
MP 10	T	T	P	P	N	P
MP 11	T	T	P	P	N	P
MP 12	T	T	P	P	N	P

T: Toxic environment; P: Polluted environment; N: Nontoxic (see explanation in the supporting information SI.II)

Potentially toxic levels characterize all samples, whereas the concentrations of Cr, Ni, As, Cu, Pb, and Zn in the deltaic and coastal zone sediments express a risk for the biota. The MP 5 and MP 7 stations appear to pose the highest potential biological risk throughout the coastal zone because all the elements analyzed show a potential toxicity. All samples from the deltaic zone are toxic for Cr, Ni, As and Cu. The MP 1 is potentially toxic for Pb and two samples for Zn (stations MP 2 and MP 3).

4. CONCLUSIONS

- Surface sediments from the Moa Bay Cay are characterized by having concentrations of elements that are typical of aquatic environments located in industrial and densely populated areas. This largely reflects

a relation with major impact sources, which explains the role of local industrial activities in chemically altering the quality of sediments.

- According to the Geo-accumulation Index calculated for the elements, the degree of pollution ranged from unpolluted to very strongly polluted. The results revealed the following tendencies in their order of geo-accumulation in the sediments: $Pb < Mn < Co < Cu < As < Zn < Ni < Fe < Cr < Al$. The Igeo for Al was the highest value while it was the lowest value for Pb. The ecotoxicological risks of sediments in Moa Bay Cay is very high, and more than 80 % of the samples pose a toxic risk for marine environments and its development.
- Even though there is no area that can be classified to be unpolluted based on the calculated Igeo, four stations MP 5 and MP 7 in the coastal zone and MP 3 and MP 2 in the deltaic zone have been identified as critical locations of contamination. The levels of Cr, Ni, Co, As and Cu shall be strictly monitored in the future because they appear to be associated with a potential biological risk.
- This research clearly highlights the pressing need to make great efforts to control industrial disposals in the coastal area. It also indicates that immediate measures are to be taken to minimize contamination and to prevent future pollution issues.
- The investigation results have been considered in the definition of a specific set of geoindicators for assessing and monitoring the condition of the coastal environment and can be of great help for developing an Integrated Coastal Zone Management.

5. ACKNOWLEDGMENTS

The financial support from the Technical University of Clausthal, VLIR-UOS, and the Program of Belgian Cooperation for the Development is highly appreciated. We would also like to take this opportunity to express our gratitude to the anonymous reviewers for their insightful comments.

6. REFERENCES

- AMAT, D.; Pierra, A.; Casals, I. & Vázquez, D. 2002: Estudio de la contaminación por metales pesados en sedimentos y ostiones de la bahía de Manzanillo, Cuba. *Journal of the Mexican Chemical Society* (ISSN 1665 – 9686), 46 (4): 357-361. Available on-line at: www.redalyc.org/pdf/475/47546411.pdf

- BERGUES, P. 2006: Presencia de perfiles lateríticos con intercalaciones atípicas y bauxitas en el sector septentrional del río Yagrumaje, Moa. *Minería y Geología* (ISSN 0258 5979), 22 (1): 1 - 8, Moa, Cuba. Available on-line at <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/120>
- CERVANTES, Y.; Almaguer, Y.; Pierra, A.; Orozco, G. & Gursky, H. 2011: Metales traza en sedimentos de la bahía de Cayo Moa (Cuba): evaluación preliminar de la contaminación. *Minería y Geología* (ISSN 1993 8012) 27 (4): 1-19, Moa, Cuba. Available on-line at <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/download/282/pdf>
- CESIGMA. 1997: Report on complete oceanographic study of the reef lagoon of Cayo Moa Bay. Prepared by CESIGMA – División América and GENE CAR S.A., Report, 105p. Unpublished.
- CUETO, F.; Rondón, E. & Fuentes, R. 2003: Efluente líquido (wl) de la tecnología de lixiviación ácida: alternativas de tratamiento. *Geología y Minería* (ISSN 0258 5979) 3-4: 79 – 84, Moa, Cuba. Available on-line at <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/250>
- FERNÁNDEZ, Z. 2009: Plan de MIZC para minimizar el azolvamiento en la bahía de Cayo Moa. 106p., Master Thesis, Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba. Unpublished.
- GANG, X.; Jian, L.; Shaofeng, P.; Gang, H. & Xianghuai, K. 2016: Sources and geochemical background of potentially toxic metals in surface sediments from the Zhejiang coastal mud area of the East China Sea. *Journal of Geochemical Exploration*, 168: 26 -35. DOI: 10.1016/j.gexplo.2016.06.003168
- GUPTA, S.; Jena, V.; Matic, N.; Kapralova, V. & Solanki, J. 2014: Assessment of geo-accumulation index of heavy metal and source of contamination by multivariate factor analysis. *International Journal of Hazardous Materials*, 2(2): 18-22.

- HERRERA, J; Rodríguez, J; Coto, J; Salgado, V & Borbón, H. 2013: Evaluación de metales pesados en los sedimentos superficiales del río Pirro. *Tecnología en Marcha*, 26 (1): 27-36.
- LONG, E.; Macdonald, D.; Smith, S. & Calder, F. 1995: Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environmental Management*, 19 (1): 81-97. DOI: 10.1007/BF02472006.
- MANDAL, B.; Chatterjee, J.; Hazra, G. & Mandal, L. 1992: Effect of preflooding on transformation of applied zinc and its uptake by rice in lateritic soils. *Soil Science* (ISSN: 0038-075X), 153(3): 250-257. Available on-line at http://journals.lww.com/soilsci/Fulltext/1992/03000/EFFECT_OF_PREFLOODING_ON_TRANSFORMATION_OF_APPLIED.9.aspx
- MENÉNDEZ, M. 2001: Explotación racional del yacimiento de Cienos Carbonatados en la Bahía de Cayo Moa. Guardado, R. Master Thesis. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Moa, Cuba. 78p. Unpublished.
- MÜLLER, G. 1969: Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geology Journal*, 2(3): 108 – 118.
- ONEI. 2014: Anuario estadístico de Moa 2013. Report, Moa, Cuba. Unpublished.
- ONG, M.; Menier, D.; Shazili, N. & Kamaruzzaman, B. 2013: Geochemical Characteristics of Heavy Metals Concentration in Sediments of Quiberon Bay Waters, South Brittany, France. *Oriental Journal of Chemistry*, 29(1): 39-45.
- ROJAS, A.; Romulo, S. & Orozco, G. 2012: Identificación mineralógica de los óxidos de manganeso del yacimiento laterítico Punta Gorda, Moa, Cuba. *Minería y Geología* (ISSN: 0258-8959): 28(1): 1-26. Available on-line at <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223523810001>

ZHU, H.; Zeng, G.; Jiang, M.; Liang, J.; Zhang, C.; Yin, J.; Huang, H.; Liu, Z. & Jiang, H. 2012: Ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Xiawan Port based on modified potential ecological risk index. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 22: 1470-1477.

Yosbanis Cervantes-Guerra, ycervantes@ismm.edu.cu
Mining and Metallurgist Institute of Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", Cuba

Allan Pierra-Conde, apierra@mes.gob.cu
University of Computer Science, Cuba

Alina Rodríguez-Infante, rinfante@ismm.edu.cu
Mining and Metallurgist Institute of Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", Cuba

Yuri Almaguer-Carmenates, yalmaguer97@gmail.com
. Autonomous University of Coahuila, Mexico

Hans Jürgen-Gursky, gursky@geologie.tu-clausthal.de
Technical University of Clausthal, Germany

Jo Van-Caneghem, jo.vancaneghem@kuleuven.be
Catholic University of Leuven, Belgium

Carlo Vandecasteele, carlo.vandecasteele@cit.kuleuven.be
Catholic. University of Leuven, Belgium

Metal accumulation in surface sediment of the urban and industrial coastal area of the municipality of Moa (Cuba): distribution and pollution assessment

1. SUPPORTING INFORMATION I

SI. 1- Assessing the degree of pollution

The index value of geoaccumulation defined by Müller (1969) and used in several researches because of its importance as geoindicator of pollution (Amat *et al.* 2002; ONG *et al.* 2013) was used to assess sediment contamination.

The geoaccumulation index is defined by:

$$I_{geo} = \log_2 (C_n / 1.5 B_n)$$

Where:

C_n = concentration of metal;

B_n = geochemical background value.

A company specialized in geographic and environmental solutions - CESIGMA - (1997) established the background values for Moa Bay Cay. They used as a reference by the same consultant in 2002 (Table 1).

Table 1. Values of background, mg g⁻¹

Al	Cr	Fe	Mn	Ni	Co	As	Cu	Pb	Zn
0,1	0,2	3	1,2	0,1	34	5*	7	20	15

*(Salomons & Förstener (1984))

In the case of arsenic the background value has not been identified in previous studies, so the value given as a world average in shallow water sediment, by Salomons & Förstener (1984), is reported.

According to Müller (1969), the value of I_{geo} allows to classify sediments according to the degree of pollution, as shown in Table 2.

Table 2. Quality of the sediment according to value of Igeo

Igeo	Class Igeo	Sediment quality
Around 0	0	Virtually no pollution
>0-1	1	A little polluted
>1-2	2	Moderately polluted
>2-3	3	Among moderately and strongly polluted
>3-4	4	Heavily polluted
>4-5	5	Very heavily polluted
>5	6	Extremely polluted

Source: Müller (1969)

References

- AMAT, D.; PIERRA, A.; CASALS, I. & VÁZQUEZ, D. 2002: Estudio de la contaminación por metales pesados en sedimentos y ostiones de la bahía de Manzanillo, Cuba. *Journal of the Mexican Chemical Society* (ISSN 1665 – 9686), 46 (4): 357-361. Available on-line at: www.redalyc.org/pdf/475/47546411.pdf
- CESIGMA. 1997: Report on complete oceanographic study of the reef lagoon of Cayo Moa Bay. Prepared by CESIGMA – División América and GENECA S.A., Report, 105p. Unpublished.
- MÜLLER, G. 1969: Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geology Journal*, 2(3): 108–118.
- ONG, M.; MENIER, D.; SHAZILI, N. & KAMARUZZAMAN, B. 2013: Geochemical Characteristics of Heavy Metals Concentration in Sediments of Quiberon Bay Waters, South Brittany, France. *Oriental Journal of Chemistry*, 29(1): 39-45.
- SALOMONS, W. & FÖRSTNER, U. 1984: *Metals in the Hydrocycle*. 352p, Springer-Verlag, Berlin, Germany. ISBN: 978-3642693274.

2. SUPPORTING INFORMATION II

SI. II - Data analysis based on quality criteria

In order to interpret the information based on ecotoxicological criteria the limits proposed by Long *et al.* (1995) were used. Two reference values for the concentration of metals in sediment are considered: the lowest concentration that may have adverse effects on living beings (ERL) and the

maximum tolerable level (ERM). Concentrations exceeding the latter values are considered very toxic (Accornero *et al.* 2008).

According to Long *et al.* (1995):

- If the metal concentration is below ERL, contamination is not significant.
- If the concentration of the metal exceeds ERL, but is below ERM, environment is polluted.
- If the concentration exceeds ERM, the environment is toxic.

These researchers identified and studied the effects on organisms and ecosystems of the accumulation of nine elements (As, Cr, Cd, Pb, Cu, Ni, Zn, Hg, and Ag) and their criteria have been widely accepted and based on studies conducted by the Environmental Protection Agency of the USA (USEPA) and by Accornero *et al.* (2008). Table 3 shows the limits for ecotoxicological assessment for As, Cr, Cu, Pb, Ni and Zn proposed by Long *et al.* (1995) for surface sediment.

Table 3. Limits of ecotoxicological assessment for surface sediments, Long *et al.* (1995), $\mu\text{g g}^{-1}$

Metal	ERL	ERM
Arsenic	8.2	70
Chromium	81	370
Copper	34	270
Lead	47	220
Nickel	20.9	51.6
Zinc	150	410

References

- ACCORNERO, A.; GNERRE, R. & MANFRA, L. 2008: Sediment concentrations of trace metals in the Berre Lagoon (France): An assessment of contamination. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 54 (3): 372-385. DOI: [10.1007/S00244-007-9049-6](https://doi.org/10.1007/S00244-007-9049-6)
- LONG, E.; MACDONALD, D.; SMITH, S. & CALDER, F. 1995: Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environmental Management*, 19 (1): 81-97. DOI: [10.1007/BF02472006](https://doi.org/10.1007/BF02472006).

3. SUPPORTING INFORMATION III

SI. III - Factorial analysis (Use SPSS STATISTICS software)

FACTOR

```

/VARIABLES Al Cr Fe Mn Ni Co As Cu Pb Zn
/MISSING LISTWISE
/ANALYSIS Al Cr Fe Mn Ni Co As Cu Pb Zn
/PRINT UNIVARIATE INITIAL CORRELATION SIG DET KMO INV REPR AIC
EXTRACTION ROTATION FSCORE
/FORMAT SORT
/CRITERIA MINEIGEN (1) ITERATE (25)
/EXTRACTION PC
/CRITERIA ITERATE (25)
/ROTATION VARIMAX
/METHOD=CORRELATION.
    
```

Table 4. Correlation matrix

	Al	Cr	Fe	Mn	Ni	Co	As	Cu	Pb	Zn
Al	1,000									
Cr	,807	1,000								
Fe	,815	,840	1,000							
Mn	-,348	-,689	-,566	1,000						
Ni	,901	,602	,755	-,145	1,000					
Co	-,093	-,420	-,251	,661	,135	1,000				
As	,051	,112	,325	-,029	,088	,052	1,000			
Cu	,121	-,153	-,087	,143	,213	,604	,160	1,000		
Pb	,236	,249	,236	-,061	,255	,437	,607	,600	1,000	
Zn	-,118	-,432	-,286	,501	-,019	,822	,040	,814	,345	1,000

a. Determinant = 2.10E-008

KMO and Bartlett test

Kaiser-Meyer-Olkin sampling adequacy	0,238
Bartlett's test of sphericity	Approx. Chi - squared
	gl
	Sig.
	120,811
	45
	0,000

Table 5. Rotated component matrix

	Component		
	1	2	3
Al	,975	,006	,004
Ni	,923	,198	-,021
Fe	,865	-,272	,259
Cr	,829	-,417	,189
Co	-,070	,929	,069
Zn	-,120	,917	,105
Cu	,130	,784	,338
Mn	-,420	,645	-,238
As	,014	-,023	,893
Pb	,239	,388	,810

Extraction method: Principal component analysis.

Rotation method: Varimax with Kaiser normalization.

4. SUPPORTING INFORMATION IV

SI. IV - Average, standard deviation and ranges of values for the elements studied

Elements	Average	Standard deviation	Range (sample)
Al (mg g ⁻¹)	47,4	24,5	15,7 (MP 10) – 83,5 (MP 5)
Cr (mg g ⁻¹)	8,2	6,1	1,4 (MP 10) – 17,9 (MP 4)
Fe (mg g ⁻¹)	129,4	128,4	22,8 (MP 8) – 379,5 (MP 3)
Mn (mg g ⁻¹)	19,7	17,6	1,5 (MP 1) – 56,2 (MP 11)
Ni (mg g ⁻¹)	2,8	1,6	0,9 (MP 10)– 6,2 (MP 2)
Co (µg g ⁻¹)	388,4	287,4	56 (MP 4) – 1094 (MP 7)
As (µg g ⁻¹)	63,8	30,6	6,3 (MP 4) – 126 (MP 3)
Cu (µg g ⁻¹)	79,6	36,6	17 (MP 4) – 146 (MP 5)
Pb (µg g ⁻¹)	29,1	20,3	6 (MP 4) – 66 (MP 1)
Zn (µg g ⁻¹)	286,8	151,1	64 (MP 4) – 576 (MP 7)