

## Modelo geológico descriptivo del yacimiento laterítico San Felipe, Camaguey, Cuba

Rosa María Cobas-Botey  
Francisco Formell-Cortina  
Carlos Alberto-Leyva

### Resumen

La presencia de sílice libre en todo el perfil hace de San Felipe un depósito laterítico atípico que difiere de los yacimientos de corteza de intemperismo de la región oriental de Cuba. El presente artículo define el modelo geológico de este yacimiento como saprolítico-laterítico de níquel + cobalto. Para confeccionar el modelo geológico descriptivo de este depósito se recopiló, sistematizó y evaluó la información geológica de más de mil pozos de perforación con determinaciones para Fe, Ni, Co, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO así como resultados de estudios geofísicos, mineralógicos y geomorfológicos. Este modelo es una importante contribución al conocimiento científico de las lateritas cubanas y facilitará establecer las guías de exploración que posibiliten una mejor estimación de recursos y planificación de los futuros trabajos geológicos y mineros..

**Palabras clave:** yacimiento San Felipe; corteza de intemperismo; modelo geológico descriptivo; lateritas cubanas.

## **Descriptive geological model for the San Felipe laterite ore body, Camaguey, Cuba**

### **Abstract**

The concentration of free silica in all the profile makes San Felipe an atypical laterite deposit. It differs from the weathering crust ore bodies located in the western region of Cuba. The geologic model of this ore body is defined to be saprolite-laterite of nickel plus cobalt. The geologic information of more than a thousand drills was recollected, systematized and evaluated to design the descriptive geologic model of this ore body with determinations for Fe, Ni, Co, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO in addition to the results obtained from geophysical, mineralogical and geo-morphological investigations. This model is a key contribution to the scientific knowledge of the Cuban laterite ore and will facilitate the implementation of exploration guidelines allowing a better estimation of resources and planning of future geological and mining Works.

**Keywords:** San Felipe ore body; weathering crust; descriptive geological model; Cuban laterite ore.

## 1. INTRODUCCIÓN

El Programa de Modelación de Yacimientos se inició a nivel internacional en 1983 con la finalidad de promover técnicas de avanzada en la exploración y evaluación de los recursos minerales para apoyar el desarrollo sostenible de los países en desarrollo. Es un programa conjunto de la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS) y la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

En Cuba se inicia en el año 2000 como aplicación práctica de la metodología de modelación de yacimientos. A partir de la información existente, su análisis, procesamiento, generalización y transformación en modelos descriptivos, se proponen tres modelos para los yacimientos lateríticos de Fe-Ni-Co en la faja ofiolítica Mayarí-Baracoa en Cuba oriental (Ariosa 2000).

Las lateritas desarrolladas en la región central de Cuba poseen características diferentes; están representadas por el yacimiento San Felipe, desarrollado sobre las ofiolitas emplazadas en Camagüey donde las condiciones físico-químicas y geomorfológicas, entre otras, le confieren características geológicas específicas para las que no existe un modelo descriptivo.

Por tal motivo se elabora un modelo descriptivo para el yacimiento San Felipe, que puede servir de base para posteriores investigaciones de exploración, técnico-mineras y tecnológicas. El modelo ha sido definido como saprolítico laterítico de níquel y cobalto, no establecido en Cuba en los modelos anteriores (Ariosa 2000), ni en los modelos internacionales lateríticos para el níquel (38a), para las lateritas bauxíticas (38b) y el laterítico-saprolítico de Au (38g), Cox y Singer (1986, 1986, 1987), el laterítico de hierro (B01), el laterítico de níquel (B02), el laterítico-saprolítico de oro (B03) y el bauxítico de aluminio (B04) definidos por la *British Columbia*. (British Columbia Mineral Deposit Profiles, 2010).

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El modelo se construyó con la información recopilada, evaluada y procesada sobre la geología del depósito San Felipe a partir de investigaciones geológicas realizadas durante los años 1998 al 2000, disponibles en el archivo de la Oficina Nacional de Recursos Minerales de Cuba. Se procesó información correspondientes a 1000 pozos o calas de perforación vertical que representan un total de 14 821,65 metros, con un muestreo realizado a paso de 1 m, en redes de 500x200 m, 200x200 m, 100x100 m, 50x50 m, hasta 25x25 m en algunas áreas y en el área noroeste a 1000x1000 m, así como determinaciones químicas por el método de ICP (Plasma Inductivamente Acoplado) para 7 elementos (Fe, Ni, Co, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,

MgO) y las determinaciones de humedad para cada una de las muestras tomadas.

Se dispuso además de la información captada con el método de sondeo eléctrico vertical y polarización inducida (SEV-PI), cargabilidad, resistividad, GPR, entre otros métodos, recogiendo con estas técnicas resultados que aportan al conocimiento geológico y por ende a la elaboración de un modelo geológico descriptivo más robusto. El empleo de estas técnicas aportan información sobre el límite limonita - saprolita, es decir, el límite de la corteza con la roca no intemperizada. Los estudios mineralógicos se realizaron empleando diferentes métodos como: análisis de difracción de rayos X (DRX) tanto de muestras en polvo como de agregados orientados (AO, AO+EG, AO+550°C) y microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS) y de transmisión (TEM-AEM).

El estudio de la composición sustancial de las muestras se realizó sobre la base de análisis petro-mineralógico, granulométrico y de fases. Se les realizó análisis cualitativo por Difracción de RX (DRX) y composición química de los minerales en el *Scanning Electronic Microscope* (SEM) o (MEB) con sistema de microanálisis por dispersión de energía (EDS).

La clasificación del modelo se realizó atendiendo a las propuestas de clasificaciones ya existentes para minerales lateríticos de níquel y oro realizadas por Cox y Singer (1986) en el *U.S. Geological Survey Bulletin* y a las presentadas por el *British Columbia Mineral Deposit Profiles*.

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

El modelo geológico descriptivo del depósito San Felipe se define como saprolítico laterítico de níquel+cobalto. Las características de este depósito lo ubican como un caso particular en Cuba y uno de los pocos en el mundo, dejando establecidas sus diferencias con los depósitos lateríticos desarrollados en el norte de la región oriental al presentar rasgos geoquímicos y mineralógicos específicos. La presencia inusual de la sílice libre y contenida en el perfil excede la que se presenta en los demás yacimientos de níquel cubanos; sus bajos contenidos de hierro, la presencia de minerales arcillosos esmectíticos, que además controlan la mineralización de níquel, lo hacen diferente a los conocidos en la región oriental y occidental de Cuba.

#### **3.1. Características geológicas**

El origen de la morfoestructura de San Felipe se asocia a la probable existencia de una antigua corteza de intemperismo que se desarrolló en toda el área del actual peniplano de Camagüey. En estas condiciones, las

aguas sobresaturadas en sílice y magnesio que tenían una lenta circulación y una lenta extracción del sistema, precipitaban la sílice y el magnesio rellenando fundamentalmente las grietas prototectónicas y las zonas de fallas de las ultrabasitas. (Formell y Cobas 1998, 1999; Formell 1999).

El depósito San Felipe es una corteza de intemperismo de tipo manto lineal. Por la suave caída de sus cotas hacia el noroeste se puede hablar de la presencia de una cuesta, aunque se le conoce como meseta de San Felipe. El depósito cubre parte del terreno de corteza oceánica de Camagüey, el cual forma una cuña orientada en dirección NW-SE que ha sido obducida a través de una falla de sobrecorrimiento de bajo ángulo sobre el terreno del margen continental de Norteamérica en el Cretácico Superior tardío o Cenozoico temprano. Ese segmento de la corteza oceánica fue emplazado en la superficie a lo largo de una zona de subducción, originalmente de buzamiento sur durante la colisión oblicua dextral de arco de isla volcánico cubano contra el cratón de Norteamérica que resultó en el cierre y sutura de la zona de subducción (Formell 2002).

Las rocas del segmento oceánico están generalmente representadas por las tectonitas ultramáficas, los cúmulos máficos, diques paralelos de diabasas y basaltos oceánicos, todos ellos comprendidos en un conjunto tectónico, arqueado e imbricado, de fallas y pliegues de sobrecorrimiento, que rompieron la secuencia estratigráfica normal de la corteza oceánica.

Durante el Terciario se desarrolló una potente corteza de intemperismo laterítica saprolítica arcillosa de tipo areal la cual se profundizó formando una corteza de intemperismo de tipo bolsón, facilitado por la existencia de zonas de debilidad tectónica. En este ambiente la sílice y el magnesio extraídos por las aguas agresivas que circulaban lentamente eran precipitados en el fondo de la corteza de intemperismo en forma de sílice libre (ópalos y calcedonia) y magnesita. Posteriormente, durante el Terciario tardío-Cuaternario esa corteza de intemperismo fue totalmente lavada, invirtiéndose el relieve y quedando el depósito San Felipe como un remanente de erosión, gracias precisamente a la presencia de sílice secundaria que se comportó como barrera e impidió la erosión del área. Ulteriormente, una nueva corteza de intemperismo se desarrolló sobre el antiguo relieve erodado saturado de sílice libre fragmentada en forma de ópalos y calcedonias (Formell y Cobas 1998, 1999).

El depósito San Felipe tiene una dirección general NW-SE, paralela a la dirección estructural de la falla Cubitas de la que la separa un valle de tipo graben de mantos de sobrecorrimiento. Se define como una meseta de tipo horst en una zona de antiguos sobrecorrimientos, caracterizada por laderas

abruptas al suroeste, este y noreste y una ladera que se desarrolla al noroeste y que desciende de forma muy suave hasta alcanzar el nivel del peniplano general. El límite oeste coincide con la falla de sobrecorrimiento que limita el terreno de corteza oceánica del terreno de arco de islas volcánico el cual cabalga a las ultrabasitas con un ángulo suave que no sobrepasa los 30°.

### **3.2. Modelo descriptivo de San Felipe**

San Felipe es un depósito de corteza de intemperismo a partir de rocas ultramáficas y constituye una meseta elevada sobre el nivel del peniplano regional de Camagüey. En los bordes de la meseta la corteza de intemperismo desaparece y afloran rocas ultramáficas frescas representadas principalmente por harzburgitas serpentinizadas. En toda la superficie de la meseta se observan bloques sueltos, aislados, de coraza de hierro con sílice libre (*harpan, duricrust*) y de sílice. Estos bloques que se distribuyen irregularmente aumentan su presencia y sus contenidos de sílice hacia la periferia de la meseta, observándose que predomina la coraza de hierro silícea (Formell y Cobas 1998, 1999).

La sílice libre es omnipresente en el perfil de la corteza de San Felipe y está representada por fragmentos de diferentes tamaños y bloques de ópalos que varían en color del rojo al pardo, blanco y verde, notándose un aumento hacia la periferia. También se debe destacar la presencia en profundidad de bloques de coraza de hierro muy silicificados en el seno de las serpentinitas nontronitizadas. Estos elementos por si, apoyan la hipótesis de que en San Felipe al menos se observan dos generaciones de cortezas de intemperismo de las rocas ultramáficas:

1. Una más antigua representada por relictos de sílice libre en forma de ópalos que se desarrollan por doquier y fragmentos de coraza de hierro en profundidad en el perfil;
2. Una más joven que constituye las menas actuales y que se habría desarrollado sobre los relictos de la antigua corteza de intemperismo que fue lavada y erodada.

La acción combinada de los procesos exógenos y tectónicos determinaron la evolución y las características del perfil de intemperismo constituido esencialmente por menas arcillosas esmectíticas silicatadas. Las condiciones de la transferencia de las aguas muy lentas en San Felipe dieron lugar a un perfil muy complejo de la corteza de intemperismo con la participación inusual de la sílice, tanto libre como combinada, resultado de la difícil extracción de las aguas altamente mineralizadas del sistema. La zonación

transicional del perfil de San Felipe, de arriba hacia abajo, agrupando los horizontes en tres zonas, es como sigue:

- *Zona de las Limonitas*

Representada por los ocres no texturales con perdigones o concreciones (ONTCP), ocres no texturales (ONT) y ocres texturales limoníticos (OTL). Como se muestra en la Tabla 1 y la Figura 1, estos horizontes son más ricos en Fe,  $Al_2O_3$  y  $Cr_2O_3$  y más pobres en Mg. Los contenidos de Ni son bajos y la  $SiO_2$  se encuentra en concentraciones elevadas. El horizonte de los OTL posee concentraciones de óxidos e hidróxidos de hierro, el Mn se encuentra en forma de pátinas y se concentran ahí los mayores contenidos de Co. Por los valores que ya comienza a alcanzar el Ni en este horizonte, puede ser considerado dentro de la envolvente mineral.

Tabla 1. Composición química y humedad del horizonte limonítico, %

Litología	Ni	Fe	Co	$SiO_2$	MgO	$Al_2O_3$	$Cr_2O_3$	% Humedad
ONTCP	0.40	32.4	0.05	25.9	0.54	11.9	2.21	16.97
ONT	0.45	27.1	0.034	39.4	1.15	7.8	1.70	22.49
OTL	0.83	26.0	0.065	40.9	2.68	6.3	1.54	31.25

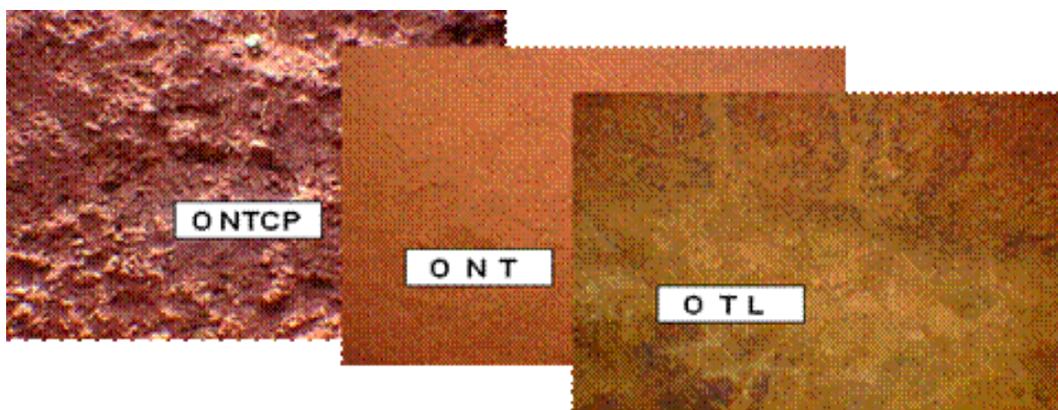


Figura 1. Fotos tomadas en profundidad durante la excavación de un pozo criollo en el horizonte limonítico.

- *Zona de las Saprolitas*

Está representada por los ocres texturales nontroníticos (OTN), las serpentinitas nontroníticas (SN) y las serpentinas lixiviadas (SL). Es una zona menos oxidada, por lo que ya no se observa la coloración rojiza como se muestra en la Figura 2. Se incrementan los valores de Ni,  $SiO_2$  y MgO, mientras los de Co decrecen. Las mayores concentraciones del Ni se encuentra en las serpentinitas nontroníticas, como se puede observar en la Tabla 2. Dentro de las SL comienza una disminución del Ni y un aumento

del MgO. Excepcionalmente se localizan contenidos importantes de Ni en las serpentinitas lixiviadas.

Tabla 2. Composición química y humedad del horizonte saprolítico, %

<b>Litología</b>	<b>Ni</b>	<b>Fe</b>	<b>Co</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>MgO</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>% Humedad</b>
OTS	0.98	21.7	0.053	46.0	4.9	4.8	1.42	35.76
SN	1.05	14.3	0.035	48.1	14.2	3.4	1.01	36.69
SL	0.75	11.4	0,022	47.5	22.7	2.4	0.83	32.44

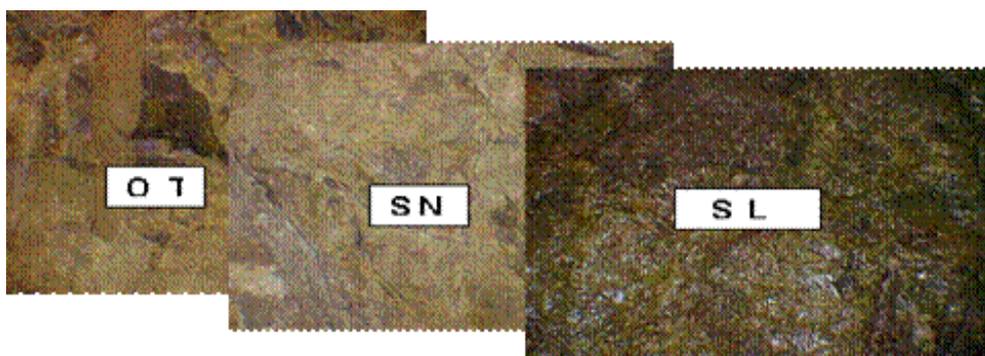


Figura 2. Fotos tomadas en profundidad durante la excavación de un pozo criollo en el horizonte saprolítico.

- *Zona del Basamento*

El basamento posee forma sinusoidal, con bolsones y elevaciones alternantes y está representado fundamentalmente por harzburgitas serpentinizadas desintegradas, dunitas muy poco representadas y se han reportado raras ocurrencias de materiales leucocráticos. En esta zona todos los elementos disminuyen notablemente a excepción del MgO que aumenta y la SiO<sub>2</sub>, que aun cuando ha disminuido, se mantiene alta como se observa en la Tabla 3.

Tabla 3. Composición química y humedad del basamento, %

<b>Litología</b>	<b>Ni</b>	<b>Fe</b>	<b>Co</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>MgO</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>% Humedad</b>
Roca	0.39	7.10	0.013	40.9	31.7	1.34	0.55	14.9

Este basamento está representado por rocas de la asociación ofiolítica, con un predominio en lo fundamental de la zona de transición o MTZ compuesto por las peridotitas (harzburgitas, lherzolitas, wherlitas), dunitas, diques de piroxenitas, gabros, microgabros y diabasas (Figura 3).

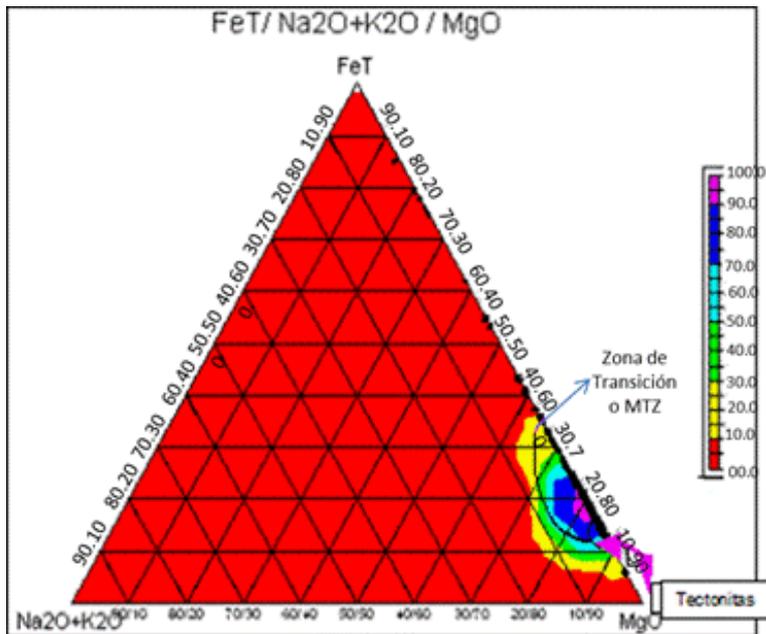


Figura 3. Diagrama petrológico AFM del depósito San Felipe.

La edad de la corteza niquelífera en San Felipe no es más antigua que el Plioceno y se habría desarrollado sobre los relictos silíceos de una corteza de intemperismo más antigua que fue lavada y erodada (Formell y Cobas 1998).

### 3.2.1. Texturas y Estructuras

El yacimiento presenta una zonalidad litológica en profundidad, con un cambio transicional entre los horizontes. En la zona esmectítica la textura primaria del protolito prácticamente no se preserva. La lizardita se observa parcialmente reemplazada por esmectita. Las imágenes de TEM muestran agregados escamosos de esmectitas y granos con síntomas de disolución en la lizardita.

En general las muestras conservan la estructura primaria de la peridotita serpentizada (textura mallada) formada durante el proceso de serpentización de fondo oceánico (Figura 4). En los núcleos de los olivinos se observa un agregado criptocristalino de color verde que se identifica como un mineral del grupo de las esmectitas (sm) (Gallardo 2011).

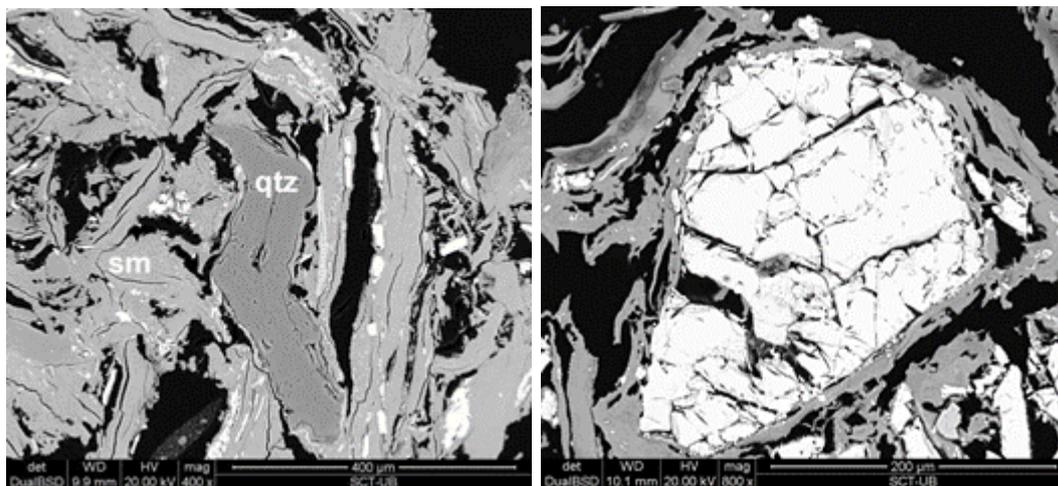


Figura 4. Fotos de electrones retrodispersados de agregados criptocristalinos de esmectita, cuarzo y óxidos de hierro, (izq) y de electrones retrodispersados de un cristal de óxido o hidróxido de hierro (der). Tomado de Gallardo (2011).

La zona esmectítica está dominada por minerales del grupo de la esmectita y en menor proporción por lizardita y maghemita. Los espectros de DRX en forma de agregado orientado muestran un pico intenso a  $14.7 \text{ \AA}$ , indicando la presencia de una esmectita con 2 capas de agua. Al calentar colapsa la estructura a  $9.9 \text{ \AA}$  y cuando se satura con etilenglicol el espaciado aumenta a  $17.3 \text{ \AA}$ . Los valores del espaciado (060) son de  $1.51 \text{ \AA}$ , valor característico de una esmectita dioctaédrica rica en Fe (Gallardo 2011).

### 3.2.2. Mineralogía de las menas

Las menas en general están constituidas por smectitas (nontronita y montmorillonita), óxidos e hidróxidos de Fe ricas en trevorita, minerales del grupo de la serpentina,  $\text{SiO}_2$  libre y cloritas, así como otros minerales presentes en pequeñas cantidades como la moscovita, cromita y óxidos de Mn con ernieniquelita, el cual es un óxido de manganeso y níquel hidratado que se encuentra muy entrecrecido con los otros minerales de manganeso, por lo tanto, no fue posible determinar sus características físicas. Los minerales arcillosos representan más del 60% de los minerales útiles, y se concentran en las fracciones finas (Cabrera 2005).

El mineral de níquel se encuentra fundamentalmente como inclusiones dentro de los aluminosilicatos (arcillas) y silicatos de magnesio (serpentina) y en menor proporción asociado con las cromitas y los óxidos de manganeso.

La composición granulométrica se caracteriza por un alto contenido de las fracciones finas (52-76%  $-0.074 \text{ mm}$ ) debido al predominio de los minerales

arcillosos en su composición mineralógica, siendo los principales portadores de Ni, éste se recupera en un 57-85% en la fracción  $-0.074$  mm.

Los minerales de níquel identificados fueron: silicato de níquel, cromitas niquelíferas y en menor proporción los cloratos de níquel hidratados en los minerales ferrosos así como en las sílices, la mayor proporción la tienen los minerales amorfos (Cabrera 2005).

### **3.2.3. Control de las menas**

Las menas niquelíferas están asociadas a las arcillas esmectíticas, se distribuyen de forma regular y continua por todo el depósito y su potencia promedio es de 10 m. Los principales minerales portadores de Ni y Co son las esmectitas que se presentan fundamentalmente en forma escamosa, la limonita, la serpentina y los óxidos de manganeso, siendo los minerales útiles mayoritarios y representan un 65-82% de la masa total, concentrados por lo general en las fracciones finas (Marín 2011)

### **3.2.4. Rasgos geoquímicos**

En la Figura 5 se muestran los contenidos por litologías y en la Tabla 4 la codificación utilizada. La sílice está presente con una distribución errática en todo el perfil y aparece no solo en los silicatos sino también en forma de sílice libre como ópalos, calcedonias y marshalitas. Los contenidos de Mg también son elevados comparados con otros yacimientos lateríticos cubanos. El Ni está asociado a las esmectitas, menas silicatadas ricas en Ni, por tal razón se distribuyen también de forma errática en todo el perfil (ver gráfico, en color verde el Ni), el Co es bajo por su usual asociación con el Fe, que para este yacimiento es bajo. Estas características entre otras hacen las diferencias con otros yacimientos lateríticos cubanos.

Los colores que identifican cada uno de los porcentajes de los elementos en las barras del gráfico se encuentran ordenados en la leyenda en el mismo orden.

La clasificación litológica empleada fue definida durante los trabajos realizados en las campañas de perforación y difiere en parte por las empleadas en los yacimientos de la región oriental, por las características específicas de este depósito.

Tabla 4. Codificación litológica utilizada

Código	Horizonte del corte de intemperismo
Lit 1	Coraza de $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$
Lit 2	Limonita con pisolitos y coraza de $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$
Lit 3	Limonita no textural sin pisolitos
Lit 4	Limonita textural (Zona de transicional)
Lit 5	Ocre no textural nontronítico (Limonita >Serpentina)
Lit 6	Serpentina nontronitizada (Nontronita > Serpentina )
Lit 7	Serpentina lixiviada
Lit 8	Roca madre (Peridotita)
Lit 81	Harzburgitas Serpentinizadas

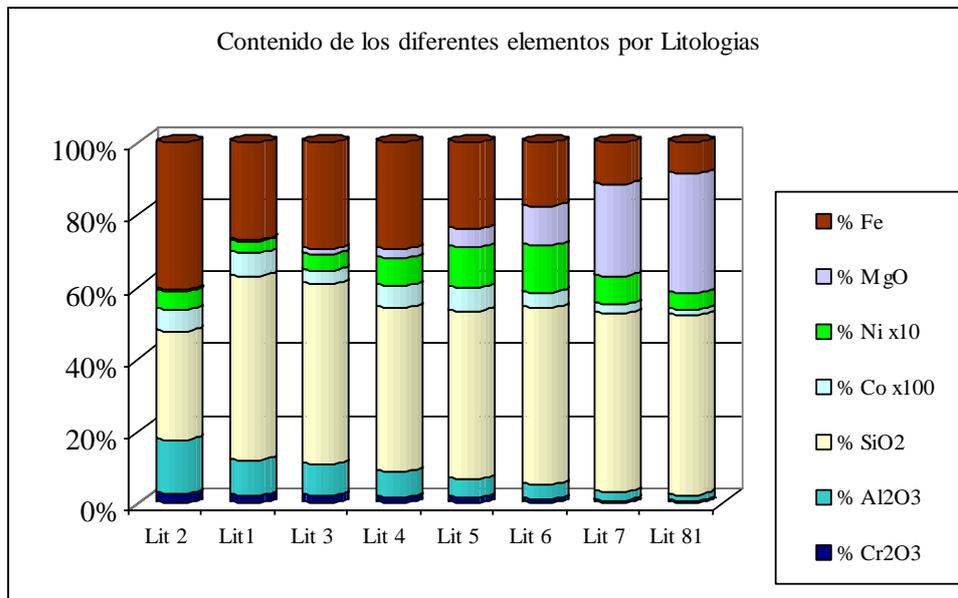


Figura 5. Contenido de los diferentes elementos químicos por litologías.

### 3.2.5. Rasgos geofísicos

La variabilidad de la resistividad y cargabilidad tienen relación con altas concentraciones de minerales arcillosos y la sílice libre presente en todo el corte. Las zonas y en ocasiones los horizontes pueden ser identificados por la resistividad y la cargabilidad, por lo que se determina la frontera limonítica saprolítica y saprolitas-rocas madres. Este método da la potencia de la corteza, se logra diferenciar los horizontes y el relieve del basamento. A continuación se presenta el Modelo de Interpretación según sondeo eléctrico vertical-polarización inducida (SEV-PI). (Escobar y otros 1998).

11	45			4	Cargabilidad ( mV/V )	
270	30	12	35	1000	Resistividad ( Ohm-m )	
L L L	S S S	Π Π Π			Horizonte	
 	  	 	Π Π Π			Litología

### 3.2.6. Limitantes económicas

Las características geológicas estudiadas no constituyen limitaciones económicas para la posible explotación de este yacimiento. Se ha comprobado que con un adecuado estudio tecnológico se definen con claridad las técnicas de explotación y procesamiento del mismo. Este yacimiento tiene características químicas y mineralógicas similares al yacimiento Murrin Murrin el cual se procesa con la tecnología de lixiviación ácida a presión y al depósito Shevchenko que se procesa en Kazajstán para ferroaleaciones.

### 3.2.7. Usos finales e importancia

Por las características geológicas del depósito se recomienda su uso preferiblemente para ferroaleaciones o para la extracción de menas de níquel y cobalto por vía ácida. Es un yacimiento grande y una fuente importante de Ni y Co que puede ampliar la producción de Níquel de Cuba. Teniendo en cuenta que es un recurso mineral no renovable, debe ser estudiado y explotado de modo sostenible.

## 4. CONCLUSIONES

1. Se realizó el modelo geológico descriptivo de San Felipe, caracterizando integralmente el mismo. Su confección se realiza por primera vez en Cuba y cumple con las tendencias actuales de los servicios geológicos internacionales para la descripción, sistematización y organización referencial de los yacimientos minerales. Servirá para la mejor organización y desarrollo de los trabajos de búsqueda, exploración y explotación de los yacimientos ferro-cobalto-niquelíferos de Cuba.
2. El Modelo Geológico del Yacimiento San Felipe se define como saprolítico laterítico de níquel + cobalto, no definido hasta ahora en el país ni a nivel internacional para el níquel.

3. La envolvente mineral del depósito está asociada a arcillas esmectíticas las que se distribuyen de forma regular y continua por todo el depósito.
4. La presencia de la sílice libre y contenida en todo el perfil hacen de San Felipe un depósito atípico dentro de los yacimientos lateríticos cubanos.

## 5. REFERENCIAS

- BRITISH COLUMBIA MINERAL DEPOSIT PROFILES. 2010: List by Deposit Group. Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources. Recuperado de [http://www.empr.gov.bc.ca/Mining/Geoscience/MineralDepositProfiles/ListbyDepositGroup/Pages/default.aspx\[2010-05-06](http://www.empr.gov.bc.ca/Mining/Geoscience/MineralDepositProfiles/ListbyDepositGroup/Pages/default.aspx[2010-05-06)
- CABRERA, I. & ALONSO, A. 2005: Evaluación de los minerales portadores de níquel en ultrabasitas del peniplano Camagüey y comparación con depósitos del macizo Moa-Baracoa. Grupo Informático, División Desarrollo Tecnológico, CIPIIM *Boletín INFOMIN* 5, Mayo 2005.
- COBAS-BOTEY, R. 2016: Caracterización geológica de las lateritas en diferentes regiones metalogénicas: comparación de los yacimientos San Felipe y Piloto. *Minería & Geología*, 32(1): 48-59.
- DENNIS P. COX AND DONALD A. SINGER (Editors) 1986: Mineral Deposit Models. *U.S. Geological Survey Bulletin* 1693.
- DENNIS COX, DONALD SINGER, EDUARDO RODRIGUEZ (Editores) 1987: Modelos de Yacimientos Minerales. United States Department of the Interior Geological Survey. Open File Report :87-486.
- ESCOBAR E. 1998: Algunos resultados de las investigaciones geofísicas en cortezas lateríticas niquelíferas Investigaciones geofísicas en el Yacimiento San Felipe. Geominera S.A.
- FORMELL. F., COBAS. R. M., RAVELO. L., BARYOLO L., GONZÁLEZ V. 1998: Programa de perforación orientativa. Primera fase proyecto San Felipe. SAN FELIPE MINING. Inv. 5208. Oficina Nacional de Recursos Minerales.
- FORMELL C. F. 2002: Diferencias en el desarrollo morfoestructural de las regiones metalogénicas exógenas de Oriente septentrional y Camagüey Central y su influencia en la formación de las cortezas de intemperismo niquelíferas. IV Congreso Cubano de Geología, La Habana. Cuba.
- FORMELL, C. F., COBAS B. R. M. 1999: Informe III Comité de Administración San Felipe Mining.
- GALLARDO T., TAULER E., GARCÍA-ROMERO E., PROENZA J.A., SUÁREZ-BARRIOS M., CHANG A. 2011: Caracterización Mineralógica de las Esmectitas Niquelíferas del Yacimiento de San Felipe (Camagüey, Cuba). *Macla*, 15 :89-90.

MARÍN, P. 2011: Caracterización del perfil laterítico rico en níquel de San Felipe (Cuba) y Separación de fases minerales mediante caída de partículas en un fluido viscoso. Departamento de Cristalografía, Mineralogía i Depósitos Minerales (Facultad de Geología). Universidad de Barcelona. Febrero 2011.

**Rosa María Cobas-Botey**, [rcobas@oc.minen.cu](mailto:rcobas@oc.minen.cu)

Ministerio de Energía y Minas. Dirección de Geología, La Habana, Cuba.

**Francisco Formell-Cortina**, [ffcformell@gmail.com](mailto:ffcformell@gmail.com)

Doctor en Ciencias Geológicas. Jubilado

**Carlos Alberto-Leyva**, [cleyva@ismm.edu.cu](mailto:cleyva@ismm.edu.cu)

Doctor en Ciencias Geológicas. Departamento de Geología.

Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez” Moa, Holguín, Cuba

## Monitoreo geodésico de los asentamientos en tanques verticales de almacenamiento de combustible

Luis Enrique Acosta-González  
Sergio Edilio Ricardo-Desdín  
Yusleydis Cano-Ricardo  
Elizabeth Rivas-Freeman

### Resumen

Se estudió el comportamiento de los asentamientos de un tanque vertical para el almacenamiento de combustible. El monitoreo se realizó por el método geodésico de la nivelación geométrica de alta precisión de segunda categoría. Durante el proceso constructivo se varió el proyecto original, sustituyendo la cimentación profunda por una superficial, a partir del empleo de técnicas de compactación para el mejoramiento de la resistencia del suelo. Los valores de deformación obtenidos dieron una valiosa información sobre el uso de la variante de cimentación propuesta en función del tiempo y las cargas, registrándose un asentamiento máximo absoluto de 132,6 mm. Los desplazamientos en los puntos de control, situados en el perímetro del tanque, tuvieron un carácter diferencial con un valor máximo de 44,2 mm lo que provocó el agrietamiento de la estructura de cimentación.

**Palabras clave:** tanques de almacenamiento; monitoreo; deformación; asentamiento; prueba de carga.

## Geodesic monitoring of settling in vertical fuel tanks

### **Abstract**

The behavior of the settling in a vertical tank used for fuel storage was studied. Monitoring was conducted using the geodesic model for the geometric leveling of high accuracy category II. The original project varied during construction by replacing deep foundations with a surface one applying compaction techniques to improve soil resistance. The deformation values obtained provided valuable information on the implementation of the proposed foundation alternative depending on time and loads. The maximum settling was reported to be 132,6 mm. The displacements in the control points located in the perimeter of the tank had a distinct nature with a maximum of 44,2 mm, which caused the foundation structure to crack.

**Keywords:** storage tanks; monitoring; deformation; settling; load test.

## 1. INTRODUCCIÓN

El monitoreo de las deformaciones de grandes estructuras tecnológicas ha sido una realidad en las últimas décadas, debido a que las mismas pueden causar daños y perjuicios severos a las obras o lesiones a las personas y en el peor de los casos las pérdidas de vidas humanas. Estas deformaciones pueden atribuirse a varias causas, como una investigación incompleta de las condiciones ingeniero geológico de la cimentación, la construcción inapropiada de la misma, así como insuficiente conocimiento de las condiciones de operación y la ocurrencia de eventos naturales como ciclones y terremotos (Acosta & García 2007).

En todos los casos la supervisión continua o espaciada del comportamiento de la estructura, permite detectar los desplazamientos, que pueden ser utilizados en la verificación de las hipótesis y teorías de la construcción relacionadas con la mecánica de los suelos y en la seguridad operacional de la obra. Por lo que, las observaciones y registro de las deformaciones no solo presentan interés científico para el diseño geotécnico, sino también son indicadores del comportamiento a largo plazo de las construcciones (Heunecke & Welsch 2000; Acosta-González 2011).

Las cimentaciones constituyen el sustento para la estabilidad de las obras y se diseñan fijando parámetros con ciertos valores límites para resistir las deformaciones, pero en la práctica se construye en lugares complejos y los fenómenos (naturales y artificiales) provocan un comportamiento del suelo que difiere de las condiciones previstas en la investigación y ensayos de laboratorio (Das 2008). De esta forma se afecta la seguridad operacional, debido a que las particularidades estructurales y la interrelación tecnológica de las unidades industriales que integran las fábricas modernas y las edificaciones requieren tolerancias mínimas en las deformaciones (asentamientos y desplazamientos horizontales) para su funcionamiento y estabilidad (Acosta-González 2011).

En los tanques de almacenamiento (API 653 2009) durante los procesos de construcción y explotación es necesaria la inspección dimensional y no destructiva de los mismos con el empleo de los métodos geodésicos y geotécnicos. Dentro de los parámetros principales a controlar durante el monitoreo se encuentran los asentamientos.

Al realizar un estudio del monitoreo de estructuras similares se evidencian las limitaciones siguientes (Acosta-González 2011):

- No se cuenta de antemano con el valor permisible de la deformación.
- Datos insuficientes del estudio ingeniero geológico.

- Las mediciones geodésicas se realizan solamente en el perímetro de la cimentación de la estructura, sin considerar la ubicación de puntos en la parte central, que según (Godoy & Sosa 2003; Savvaidis 2003) es la zona donde ocurren las mayores deformaciones.
- No se realizan las mediciones siguiendo la correspondencia del crecimiento de la carga sobre su base, omitiendo en ocasiones la prueba de carga de agua e interrumpiendo las mediciones radicalmente, sin la previa valoración de los modelos de pronósticos.
- Las observaciones no se realizan de forma permanente y automatizada con la utilización de otros dispositivos, no geodésicos (instrumentación geotécnica y sensores).
- No se coloca una densidad suficiente de puntos de control en las bases (cimentaciones), limitando la obtención del modelo óptimo de las deformaciones.

Durante los últimos años se han propuesto varios métodos de diseño, basados en las consideraciones teóricas o resultados para la evaluación de los modelos, pero los conocimientos sobre la capacidad portante y asentamientos de cimentaciones superficiales y profundas presenta sus limitaciones, debido a la falta de datos que pueden proporcionar los ensayos de campo a escala real (Heunecke & Welsch 2000; Recarey 2000). Por lo tanto, cualquier variante similar de este caso para el monitoreo de los asentamientos en las cimentaciones de depósitos, ofrecen información valiosa sobre el mecanismo real de la deformación y el rol de los factores que afectan el comportamiento de los pilotes en grupo y otras soluciones de cimentación (Savvaidis & Ifadis 2001).

El objetivo de esta investigación fue el monitoreo geodésico de los asentamientos de un tanque vertical para el almacenamiento de combustible con capacidad de 15 000 t, situado en el área industrial de la región niquelífera de la provincia Holguín. La vigilancia de esta obra se ha llevado a cabo, teniendo en cuenta que por material guardado, un comportamiento inesperado o daño de la estructura produciría el derrame del líquido con consecuencias adversas para el medio ambiente y la seguridad operacional de la industria.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. Inspección del asentamiento en tanques de almacenamiento**

Tanques de almacenamiento se denomina al conjunto de recintos y recipientes que contengan o puedan contener líquidos tóxicos, combustibles e inflamables y están presentes en la mayoría de las industrias. Por tal

motivo no se concibe su construcción sin un programa riguroso de inspección (API 653 2009; Jaca et al. 2013).

Dentro de la inspección general se debe tener en consideración el estudio por verticalidad, redondez, asentamiento y medición de espesores de las placas que conforman el cuerpo, fondo y el techo del tanque (API 653 2009; Fernández et al. 2011).

Para determinar los efectos del asentamiento en los tanques de almacenamiento, es común monitorear puntos de control situados en la base de la cimentación. En la mayoría de los casos, el programa de monitoreo se inicia con la construcción y continúa durante las operaciones, realizando las mediciones con una frecuencia planeada, basada en las predicciones del asentamiento del suelo. Para los tanques existentes que no tengan información inicial, el programa de monitoreo se debe basar en la historia previa al servicio (API 653 2009)

Los tanques de almacenamiento son estructuras relativamente flexibles y pueden tolerar mayores asentamientos que otras obras de la ingeniería. Sin embargo según (USACE 2002; DYCTA 2005; NC 1:2007; API 650 2010) existe un límite para el asentamiento esperado para ser estimado en el diseño con cierta seguridad. Los efectos indeseables más significativos de los asentamientos (absolutos y diferenciales) en los tanques de almacenamiento son:

- El asentamiento absoluto del tanque.
- El asentamiento diferencial de una parte que puede provocar esfuerzos internos adicionales no previstos en las interconexiones de las tuberías.
- El asentamiento diferencial a lo largo del perímetro, que puede generar sobre tensiones en la superestructura.
- El asentamiento diferencial entre el tanque y las tuberías externas.

El asentamiento absoluto se puede predecir a partir de los ensayos geotécnicos de los suelos. Este no genera esfuerzos adicionales en la estructura debido a que su comportamiento es uniforme, sin embargo, cuando son excesivos pueden afectar la interconexiones (tuberías, boquillas), generando esfuerzos no previstos en el diseño. Según NC. 1 (2007), el asiento absoluto medio ( $\bar{S}$ ) se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\overline{S_C} = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i \cdot S_{CAi})}{\sum_{i=1}^n (A_i)} \quad (1)$$

Donde:

$S_{CAi}$  – Asiento absoluto del cimientado (i).

$A_i$  – Área de cimientado (i).

n – Cantidad total de cimientados del objeto de obra.

Los asentamientos diferenciales se producen cuando el desplazamiento es desigual en la base de la cimentación, estos producen la inclinación del tanque y del borde del perímetro del tanque, generando la inclinación del líquido con la respectiva acumulación de tensiones y deformaciones en un área, pudiendo ocasionar daños en la estructura (base y fondo) y en las interconexiones (tuberías, boquillas). Esta deformación es relativa, que normalmente se representa por la distorsión angular ( $\beta$ ) y se calcula por la siguiente expresión (NC. 1 2007):

$$\tan \beta = \frac{\Delta S_{CA}}{L_c} \quad (2)$$

Donde:

$\Delta S_{CA}$  – Asiento diferencial entre dos cimientados aislados contiguos o diferencia de desplazamiento vertical (flecha) en un tramo de un cimientado corrido o balsa.

$L_c$  – Distancia entre dos cimientados aislados o distancia entre los puntos donde se mide la diferencia de flecha de un cimientado corrido o balsa.

## 2.2. Características de la estructura

La estructura está compuesta por un tanque cilíndrico vertical con capacidad de almacenamiento de 15 000 t de combustible, con un diámetro exterior de 32 m y una altura de 22,5 m terminado por una bóveda de acero. La superestructura se cimentó sobre un anillo circular de hormigón armado de 0,9 m de espesor, a 1,40 m sobre la superficie del terreno. El peso muerto de la estructura es aproximadamente de 3 000 t (Geocuba 2002). Figura 1.



Figura 1. Tanque de almacenamiento de combustible.

### 2.3. Diseño y consideraciones de la cimentación

Debido a que durante el estudio ingeniero geológico (Geocuba 2002) se encontraron capas de suelo de baja resistencia se proyectó una cimentación profunda sobre pilotes en grupo, no obstante, a partir del mejoramiento de las condiciones del suelo por técnicas de fortalecimiento a partir de la compactación de columnas de Macadán confinado en capas de 30 cm, fue variada la concepción inicial de proyecto por una cimentación superficial. Figura 2.

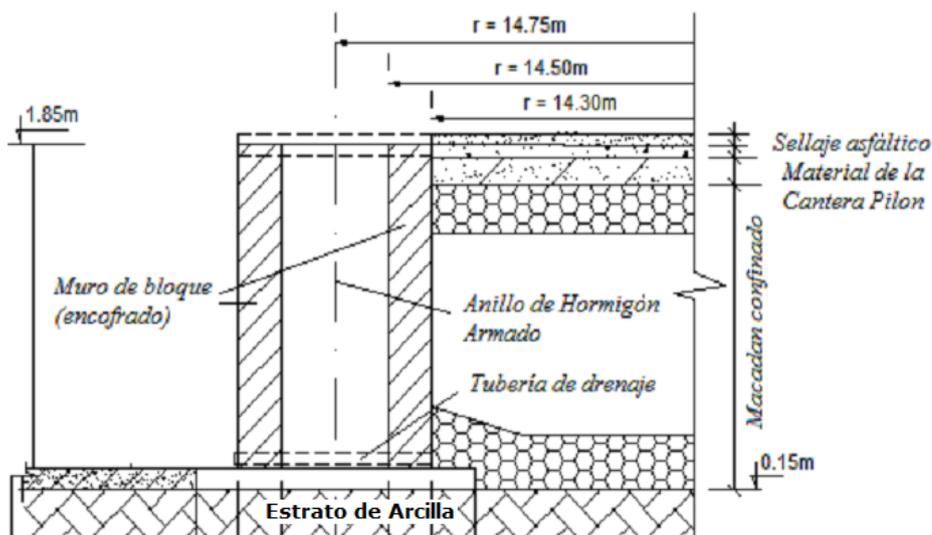


Figura 2. Detalle de la cimentación del tanque.

La cimentación se apoya sobre un estrato homogéneo de arcilla de un valor promedio de 6.10 m. Su descripción se muestra en la Tabla 1 (Geocuba 2002).

Tabla 1. Características del suelo que soporta la cimentación

Suelo (Capa)	Denominación	$\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )	I <sub>p</sub>	$\phi^0$	C (kg/cm <sup>2</sup> )	E (kpa)
1	Arcilla calcárea blanca, amarillenta hasta cremo-amarillenta con presencia de limo, aleurita, y escasa de grava fina, consistencia media hasta dura.	1.96	0.16	11	0.2	13 300

Teniendo en cuenta la interacción entre el suelo y la estructura en una masa o espacio semi-infinito, el asentamiento total predicho (Geocuba 2002) fue de 14.7 cm. El valor normado según (USACE 2002; DYCTA 2005; NC 1:2007; API 650 2010) es de 20 cm.

#### 2.4. Método geodésico

El monitoreo de los asentamientos se inició inmediatamente de la terminación de la estructura, realizando siete ciclos de observaciones durante la prueba de la carga de agua y fue continuado durante el proceso de operación en servicio.

Para el monitoreo de los asentamientos de la base del tanque fueron colocadas seis marcas (T1, T2,..., T6) alrededor de su perímetro y tres referencias (PR1, PR2 y C8) fuera del área de influencia del bulbo de presiones que ejerce la cimentación. Figura 3.

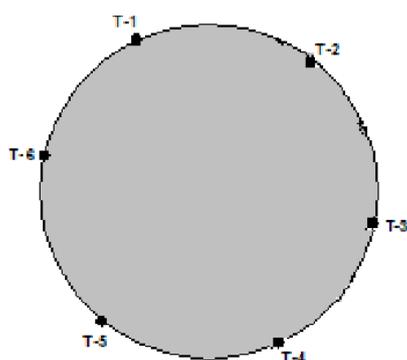


Figura 3. Distribución de las marcas en la periferia del tanque.

Para la determinación de los asentamientos de las marcas en función de las cargas y el tiempo fue usado el método geodésico de la nivelación de alta precisión de 2<sup>da</sup> categoría. Las mediciones se realizaron con un nivel automático con micrómetro óptico WILD N3. En cada ciclo se realizó la nivelación de los puntos de referencia y puntos de control, manteniendo los mismos requisitos técnicos, así como el ajuste de las observaciones (Savvaidis 2003; MET 30-27 2004). De esta forma fue determinada las alturas de los puntos de control para cada periodo. El desplazamiento

vertical o asentamiento de las marcas se determinó comparando las alturas entre cada ciclo.

Los ciclos de observaciones fueron definidos en función del crecimiento de la carga sobre su base (0, 25, 50, 75 y 100%), tomándose como patrón la prueba de la carga de agua. Figura 4.

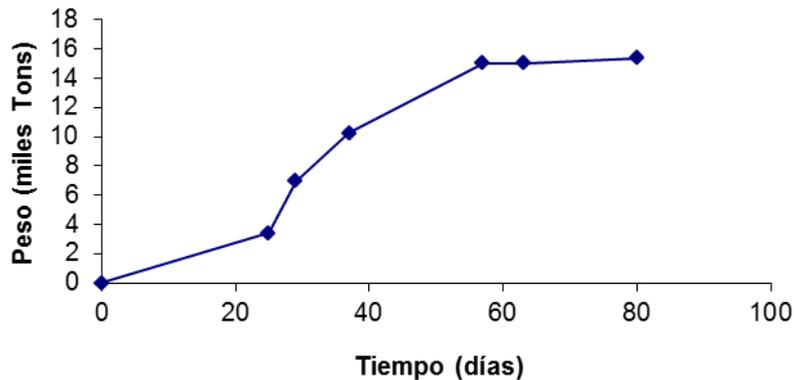


Figura 4. Prueba de la carga de agua.

El tanque se llenó gradualmente hasta 15 000 t de agua en aproximadamente 88 días. El agua se mantuvo durante una semana con el 100 % de llenado, luego se aplicó una sobrecarga (102 %) que se mantuvo por 17 días y finalmente se vació lentamente (descarga) en un periodo de ocho días.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El comportamiento de los asentamientos de los puntos de control, generalmente siguen el proceso de carga y descarga del tanque, describiendo dos etapas (Recarey 2000), la primera un comportamiento lineal y la segunda no lineal (Figura 5).

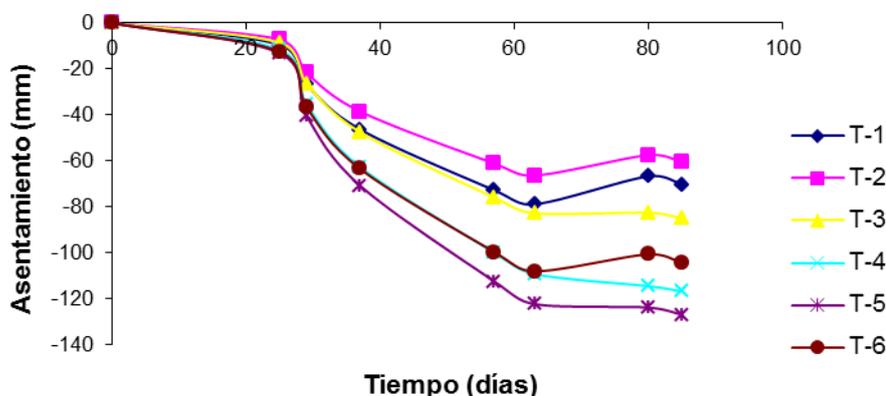


Figura 5. Asentamiento de los puntos de control.

A partir del ciclo cinco (100% de la carga) se observa una tendencia a la atenuación de los asentamientos, con independencia que se mantiene esta carga por un periodo de seis días, además de aplicar una sobrecarga

(102%) de manera constante por 17 días y del proceso de descarga que se puede visualizar en el último tramo de la curva. Después de la sobrecarga y del vaciado del tanque no se produjo una recuperación significativa de las deformaciones.

Esta tendencia a la atenuación de las deformaciones se corresponde con el reacomodo de las partículas como parte del proceso de consolidación del suelo.

El asentamiento medio observado durante la prueba de la carga de agua fue de 94 mm y el desplazamiento máximo absoluto se registró en el punto de control T-5, con un valor de 127,4 mm.

El comportamiento de los desplazamientos durante la prueba de la carga de agua tuvo un carácter diferencial, demostrado por una diferencia de 44.2 mm entre el valor promedio de las marcas del extremo Norte (T1, T2 y T3) con las del extremo Sur (T4, T5 y T6), lo que ha inducido esfuerzos adicionales en los elementos estructurales produciendo grietas que evidencian el fallo de la estructura de cimentación (Figura 6).



Figura 6. Grietas en la estructura (Acosta-González 2011).

La profundidad y dimensiones de las grietas aumentan en la dirección del área de mayores asentamientos, donde se encuentran ubicadas las marcas T4, T5 y T6.

Acosta-González (2011) refiere que el modelo de la deformación vertical del tanque de combustible fue muy similar al comportamiento observado en los otros tanques de almacenamiento, lo que puede ser producto de estar sustentado sobre suelos de baja resistencia (compresibles). Con la diferencia que en el caso de la cimentación sobre pilotes no sufrió agrietamiento.

Durante el proceso de explotación (carga de servicio) se continuó con el monitoreo de los asentamientos del tanque, con una periodicidad cercana a los dos años, realizando un total de 13 ciclos de observaciones. Este intervalo fue variado en algunos casos producto de eventos meteorológicos extremos y por el incremento de la actividad sísmica en la zona. Figura 7.

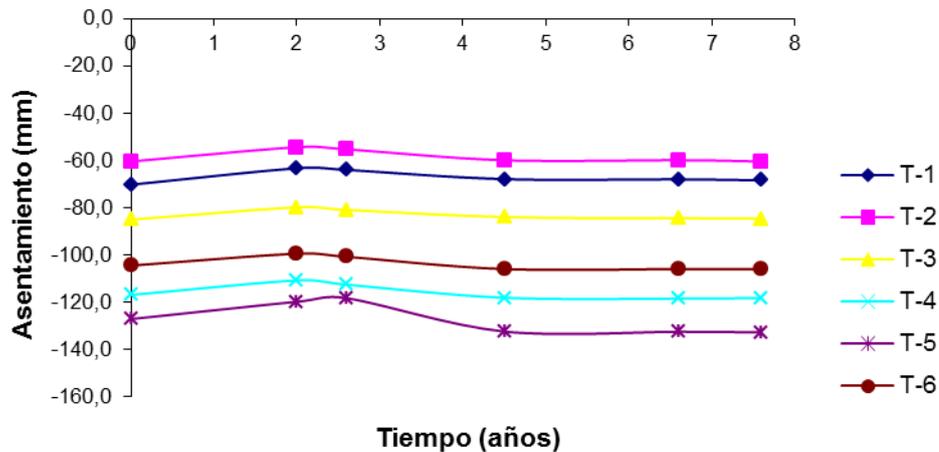


Figura 7. Asentamientos durante el proceso de explotación.

Los asentamientos durante el proceso de explotación no son representativos, debido a que las diferencias entre los últimos tres ciclos de observaciones no sobrepasan el error de determinación de los mismos, existe una tendencia a su atenuación por el proceso de consolidación del suelo.

El valor máximo de asentamiento observado durante el periodo de observaciones fue de 132,6 mm, el cual no se ha incrementado en el tiempo, lo que evidencia la conclusión del proceso de monitoreo a partir de mediciones geodésicas reiteradas. No obstante, se continuará la vigilancia teniendo en cuenta las grietas de la estructura de cimentación (Acosta-González 2011).

#### 4. CONCLUSIONES

- El asentamiento medio observado durante la prueba de la carga de agua fue de 94 mm, que representa el 63,9 % del valor predicho y el 47 % del establecido en la NC 1 (2007). Lo que evidencia la necesidad de utilizar el método geodésico como patrón para comprobar y ajustar estos valores.
- El asentamiento máximo absoluto durante el proceso de monitoreo se produjo en el punto de control T-5, alcanzando un valor de 132,4 mm.
- El mayor asentamiento diferencial entre los puntos de control fue de 44,2 mm, que sobrepasa el valor estimado en los cálculos y en las normas de construcción, lo que ha generado esfuerzos adicionales no previstos en el diseño, con la respectiva concentración de tensiones en el área de mayor deformación, produciendo el agrietamiento (fallo) de la estructura de cimentación.

- Los asentamientos diferenciales entre los puntos de control periféricos sucesivos, pueden ser producto a la variabilidad del perfil del suelo y por la diferenciación en la compactación del mismo.
- Existe una tendencia a la estabilización de los asentamientos en el proceso de explotación, teniendo en cuenta que la diferencia entre sus ciclos no sobrepasa su error de determinación.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los colaboradores de la Empresa Geocuba Oriente Norte, a los técnicos y especialistas del Taller de Geodesia de la Agencia Geocuba Holguín, por los datos y el apoyo en las investigaciones de campo y gabinete. A los árbitros anónimos y editores, por sus valiosos señalamientos y comentarios.

## 6. REFERENCIAS

- ACOSTA-GONZÁLEZ, L.E. 2011: Monitoreo del nivel de vulnerabilidad geotécnica en estructuras por métodos geodésicos ". Memorias VII Congreso Internacional Geomática. ISBN 978-959-723-01-7.
- ACOSTA, L.E. & GARCÍA, J. 2007: La Geodesia en los estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgos de desastres. Informática, XII Convención y Expo Internacional. La Habana, Cuba. <http://www.bvs.hn/cu-2007/ponencias/GEO/GEO-106.pdf>
- API 650. 2010: Welded steel tanks for oil storage, American Petroleum Institute, Washington, D.C.
- API 653. 2009: Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction. Publicación de la American Petroleum Institute. Fourth edition. Washington, D.C.
- DAS, B.M. 2008. Fundamentals of geotechnical engineering. Third edition. CL-Engineering ed.. ISBN-10: 0-495-29572-8.
- DYCTA. 2005: Norma Inglesa. Diseño y Cálculo de Tanques de Almacenamiento. 130 pág.
- FERNÁNDEZ, S.; JACA, R.C. & GODOY, L.A. 2011: Descenso de apoyos en el revestimiento lateral de naves industriales. *Mecánica Computacional*, 30: 857-874.
- GEOCUBA. 2002: Informe sobre las observaciones de los asentamientos por métodos geodésicos en el Tanque de combustible 1 de la CTE de Felton.
- GODOY, L.A. & SOSA, E.M. 2003: Localized support settlements of thin-walled storage tanks. *Thin-Walled Structures*, 41 :941-955.

- HEUNECKE, O. & WELSCH, W. 2000: A Contribution to Terminology and Classification of Deformation Models in Engineering Surveys. *Journal of Geospatial Engineering*, 2(1) :35-44
- JACA, R.C; BURGOS, C. A. & GODOY, L. A. 2013: Evaluación de fallas de tanques horizontales de almacenamiento de fluidos. *Mecánica Computacional* 32 :3463-3482.
- MET 30-27. GEOCUBA. 2004: Metodología para el control de deformaciones de obras a partir de métodos geodésicos.
- NC 1: 2007: Norma para el diseño geotécnico de cimentaciones superficiales.
- RECAREY, C.A. 2000: Modelación del terreno y las estructuras en el dominio del tiempo. Memorias 4to. Simposio Internacional de Estructuras, Geotecnia y Materiales de Construcción. La Habana, Cuba.
- SAVVAIDIS, P. & IFADIS I. 2001: Geodetic Monitoring of the Deformation of a 50,000 t Sugar Storage Tank Founded on 124 Long Bored Piles. Proceedings of Inter. Symp. On Geodetic, Photogrammetric and Satellite Technologies, Sofia, 160-167.
- SAVVAIDIS, P. 2003: Long term geodetic monitoring of the deformation of a liquid storage tank founded on piles. Proceedings, 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece.
- USACE.EM.1110-2-1009. 2002: "U.S. Army Corps of Engineers Manual". Structural deformation Surveying. Washington, DC 20314-1000, Junio.

**Luis Enrique Acosta-González**, [luis.acosta@uho.edu.cu](mailto:luis.acosta@uho.edu.cu)

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Universidad de Holguín, Cuba.

**Sergio Edilio Ricardo-Desdín**, [sergior@geodesa.geocuba.cu](mailto:sergior@geodesa.geocuba.cu)

Doctor en Ciencias Técnicas. Investigador Auxiliar. Geocuba Geodesa, Cuba.

**Yusleydis Cano-Ricardo**, [yusleydis@uho.edu.cu](mailto:yusleydis@uho.edu.cu)

Ingeniero civil. Profesor Instructor. Universidad de Holguín, Cuba

**Elizabeth Rivas-Freeman**, [erivas@uho.edu.cu](mailto:erivas@uho.edu.cu)

Ingeniero civil. Profesor Asistente. Universidad de Holguín, Cuba

# **Comportamiento autoafín de redes de drenaje controladas estructuralmente. Caso de estudio río San Cristóbal, Pinar del Río**

Robert Ramírez-Hernández  
Dámaso Cáceres-Govea

## **Resumen**

Con la aplicación del análisis fractal a la red de drenaje del río San Cristóbal se pudo describir y cuantificar la complejidad de esta red y asociarla a las estructuras geológicas, fracturas y fallas presentes en el área. El análisis fractal autoafín permitió comprobar el desarrollo desigual de esta red en las direcciones longitudinal y transversal de las corrientes. El valor de la dimensión fractal promedio de las corrientes, bajo el supuesto de autoafinidad, es 1,04 indicando el predominio de corrientes rectas controladas tectónicamente, mientras que la dimensión fractal de la red, obtenida bajo condición de autosimilitud, toma valores de 1,59 y 1,47. Bajo el supuesto de autoafinidad, la dimensión de lagunaridad es igual a 1,86 y el coeficiente de Hurst 0,86 lo que muestra el acentuado control estructural sobre el drenaje. Las direcciones principales de las corrientes se asocian a las de zonas de debilidad creadas por el avance diferencial de los mantos durante los cabalgamientos o a las fracturas secundarias de Riedel, relacionadas con la transcurrencia de falla Pinar.

**Palabras clave:** redes de drenaje; río San Cristóbal; fractales; autoafinidad; lagunaridad.

## **Self-affine behavior of structurally controlled river networks. Case of study San Cristóbal river. Pinar del río**

### **Abstract**

Geological structure influences the form, length and slope of rivers. An approach never used in the area is the fractal analysis for river networks, which allowed to describe and quantify the complexity of this network and associate it to geological structures and faults in the area. Self-similar fractal analysis allowed to prove the unequal river network development in longitudinal and transversal directions. The average fractal value, under self-similarity assumption, is 1,04, indicating the prevalence of straight superficial currents, tectonically controlled, while the river network fractal dimension takes values of 1,59 and 1,47. Under assumptions of self-affinity, the lacunarity dimension takes the value of 1,86 and the Hurst coefficient is 0,86, indicating the structural control on drainage. The main rivers directions coincide with zones of geological weaknesses, originated during the overthrust event, or secondary Riedel fractures related to the left-lateral movement of Pinar fault.

**Keywords:** drainage nets; San Cristobal river; fractals; lacunarity; self-affine.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las redes de drenaje son el resultado de la interacción compleja de los procesos geológicos y las condiciones climáticas que favorecieron el surgimiento del drenaje, que a su vez modela el relieve actual. Por lo tanto, en el relieve queda reflejada la evolución climática, hidrogeológica y geológica de la región donde se ha desarrollado la red de drenaje, a diferentes escalas espacio-temporales.

Estudios de las redes de drenaje, sus configuraciones y parámetros que describen su morfometría han aparecido publicados en los trabajos de Horton (1932, 1945); Strahler (1946); Schumm (1956); Hack (1957); Hack (1973) y Rodríguez-Iturbe et al. (1992). Horton (1932, 1945) fue el primero en reconocer las características de invarianza de la red de drenaje al establecer las leyes de escala: relación de bifurcación ( $R_B$ ), relación de longitud ( $R_L$ ) y relación de área ( $R_A$ ).

Los objetos naturales que poseen una estructura espacial compleja pueden estudiarse como fractales. Para el caso particular de las redes de drenaje dos dimensiones fractales pueden calcularse, una dimensión fractal promedio ( $\mathbf{d}$ ), que describe la sinuosidad de una corriente y la dimensión fractal de toda la red ( $\mathbf{D}$ ), relacionada con las características de ramificación o compacidad del sistema (La Barbera & Rosso 1989; Tarboton, 1996). Según Schuller et al. (2001) la geometría fractal es útil para describir patrones irregulares y fragmentados. Estos patrones se repiten a diferentes escalas, de ahí el concepto de invarianza de escala o autosimilitud.

A partir del análisis entre la longitud de las corrientes y el área de las cuencas de drenaje Mandelbrot (1977) llegó a la conclusión que la dimensión fractal de cursos de agua independientes ( $\mathbf{d}$ ) era igual a 1,2, mientras que la dimensión fractal de todo el sistema ( $\mathbf{D}$ ) era igual o próximo a 2.

### 1.1. Fractales autosimilares

La autosimilitud de la red de drenaje puede establecerse en un inicio a partir del cálculo de parámetros morfométricos o leyes de las cuencas hidrográficas, establecidos por Horton (1932, 1945) y Schumm (1956), cuyas definiciones matemáticas son:

$$a) R_B = \frac{N_{u-1}}{N_u} \quad b) R_L = \frac{L_u}{L_{u-1}} \quad c) R_A = \frac{A_u}{A_{u-1}} \quad (1)$$

donde  $R_B$ ,  $R_L$  y  $R_A$  son la relación de bifurcación, la relación de longitud y la relación de área respectivamente.

Sólo en pocas ocasiones estas leyes se cumplen estrictamente; esto se debe a que el desarrollo de redes estructuralmente hortonianas son raras en la naturaleza. Kirchner (1993) mostró que las leyes de invarianza al cambio de escala son estadísticamente inevitables en casi todas las redes y que no dependen de la estructura de la red. Este autor plantea que las leyes son una consecuencia del sistema jerárquico de ordenamiento de las corrientes creado por Strahler (1952) y que no necesariamente responden a una estructura fractal de la red.

La aplicación de las leyes de Horton se basa en el establecimiento de un sistema jerárquico de ordenamiento o clasificación de la red, entre los cuales el más utilizado es el establecido por Strahler (1952), Figura 1.

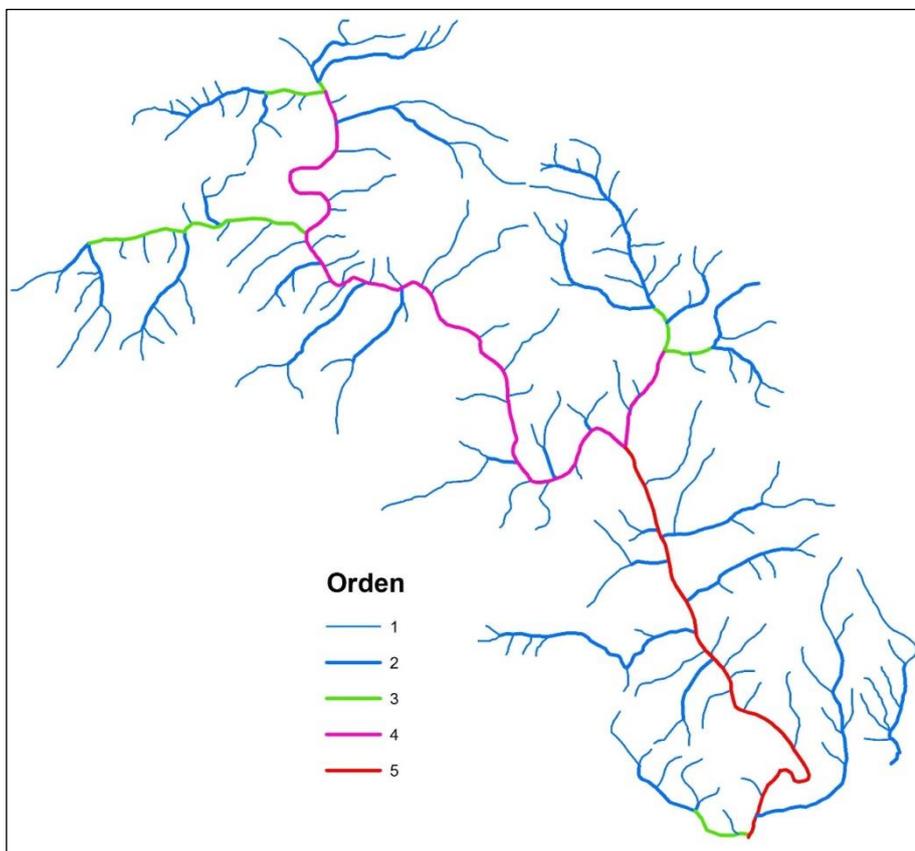


Figura 1. Clasificación de la red de drenaje, según Strahler (1952).

La dimensión fractal de la corriente principal ( $D_s$ ) (Ec. 2), así como para toda la red ( $D_b$ ) (Ec. 3) se determinaron según Rosso et al. (1991) y Liu (1992).

$$D_s = d = 2 \cdot \frac{\ln R_L}{\ln R_A} \quad (2)$$

$$D_b = 2 \cdot \frac{\log R_B}{\log R_A} \quad (3)$$

## 1.2. Características geológicas

La cuenca del río San Cristóbal se ubica en la provincia Artemisa, Cuba occidental, entre los 22° 44' 30.0" y 22° 49' 0.0" de latitud norte, y los 83° 3' 0.0" y 83° 7' 0.0" de longitud oeste, con una superficie de 37 km<sup>2</sup> (Figura 2). Esta cuenca se ubica en la unidad de cabalgamientos de Sierra del Rosario/Alturas de Pizarras del Norte/Esperanza definida por Cobiella-Reguera (2008).

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; Ordaz et al., 2013).

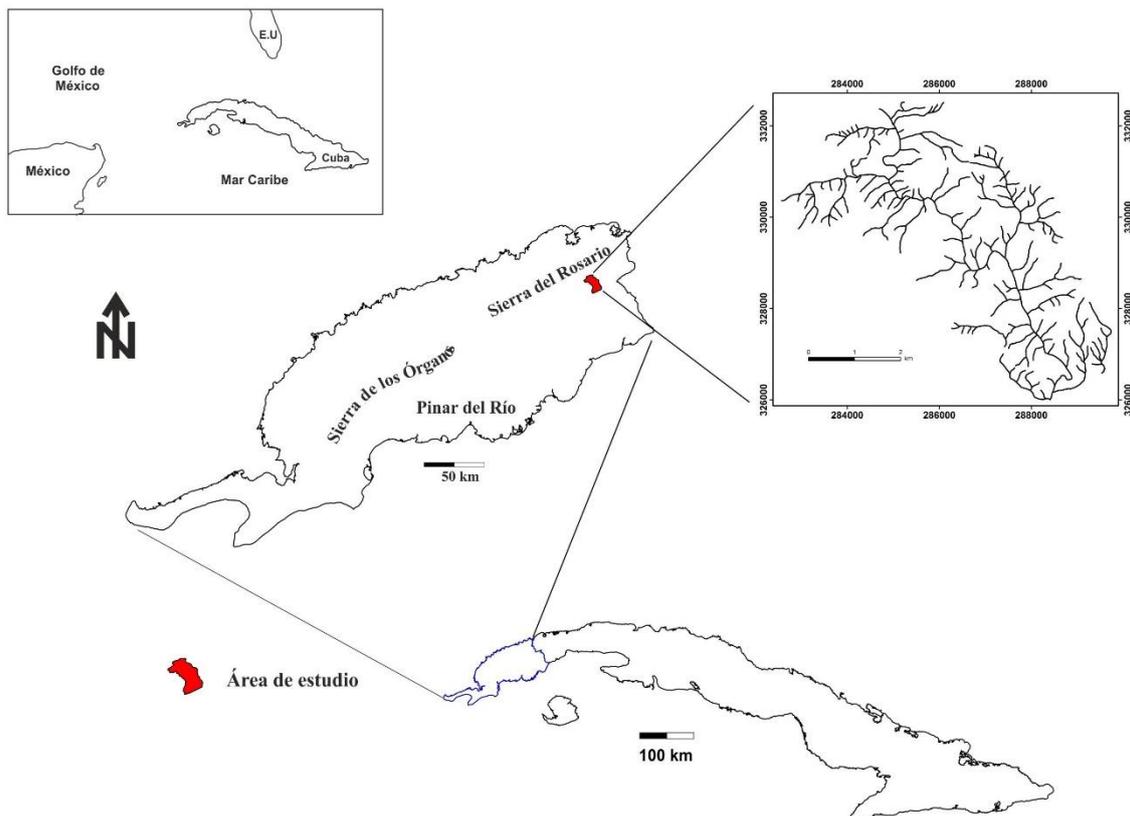


Figura 2. Ubicación geográfica del área de estudio. La imagen en la parte superior derecha representa la red de drenaje de la cuenca del río San Cristóbal.

Estos estudios han estado dirigidos al análisis microtectónico y la observación de indicadores cinemáticos para reconstruir la dirección de los esfuerzos máximos horizontales, principales responsables de la evolución de las morfoestructuras actuales.

Hasta el presente no se conoce ningún trabajo en nuestro país que aborde los estudios fractales de las redes de drenaje, ni la vinculación que estas redes poseen con la estructura geológica de las áreas donde se desarrollan. Es por ello que se aplica la teoría de los fractales autosimilares y autoafines a la resolución de este problema, además de realizar un estudio de las principales direcciones de los lineamientos presentes en el área y su comparación con las direcciones de las corrientes de diferentes órdenes.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Extracción de la red de drenaje

La extracción de la red de drenaje se realizó de forma manual, sobre las hojas cartográficas San Cristóbal y Soroa, escala 1:25 000. Esta red se clasificó siguiendo el método propuesto por Strahler (1952). Para determinar la longitud euclidiana de las corrientes se determinaron los puntos iniciales y finales de cada segmento. El área de drenaje de cada río fue digitalizada utilizando como base las hojas cartográficas antes mencionadas, así como el modelo de elevación digital escala 1:25 0000. Con estos parámetros se construyeron los gráficos utilizados en la determinación de las características fractales de la cuenca.

### 2.2. Cálculo de la dimensión fractal

Nikora & Sapozhnikov (1993) y Nikora et al. (1996) plantean que la mayoría de las redes de drenaje no son autosimilares, por lo que extienden el desarrollo de la teoría de las redes fractales autosimilares hacia las redes fractales autoafines. Según estos autores existen dos exponentes de escala: uno en la dirección longitudinal y otro en la dirección transversal de la red. Para la determinación de los exponentes de escala establecen las relaciones entre los tamaños característicos longitudinal (Ec. 4a) y transversal (Ec. 4b) del drenaje con respecto a la longitud total de las corrientes  $Z$ , además de formular la relación entre el tamaño característico longitudinal de la cuenca y la longitud de una corriente principal (Ec. 4c).

$$a) l \propto Z^{v_l} \quad b) w \propto Z^{v_w} \quad c) L \propto l^{1/v_{li}} \quad (4)$$

En estas ecuaciones  $V_l$  y  $V_w$  representan los exponentes de escala en las direcciones longitudinal y transversal,  $V_{li} = V_l$ , respectivamente, al tiempo que  $l$  y  $w$  son los tamaños característicos de la red en las direcciones mencionadas; de forma práctica estos exponentes de escala se calculan:

$$a) v_l = \frac{\beta v_{li}}{\varepsilon} \quad b) v_w = \frac{(1-\beta v_{li})}{\varepsilon} \quad (5)$$

En el caso de  $V_{li}$  debe probarse, mediante gráficos logarítmicos de longitud euclidiana vs longitud real de las corrientes, la hipótesis que plantea que las corrientes a escalas pequeñas son autosimilares (Sapozhnikov &

Nikora, 1993; Nikora, 1994b en Nikora et al., 1996). Si los exponentes  $V_I$  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 ( $D_G$ ), la cual se obtiene como:

$$D_G = \frac{2}{v_l + v_l} \quad (6)$$

Nikora & Sapozhnikov (1993) interpretaron la relación  $V_w/V_I$  como el exponente de Hurst,  $H$ , de acuerdo a lo sugerido por Mandelbrot (1986). El exponente de Hurst caracteriza el grado de autoafinidad de la red; mientras más alejado de 1, más autoafín es la red. Con el propósito de establecer una comparación entre los valores fractales promedio para las corrientes y para la red, la dimensión fractal es estimada por otros métodos recogidos en la literatura. Rosso et al. (1991) proponen para una corriente:

$$d = \max\left(1, 2 \frac{\log R_B}{\log R_A}\right) \quad (7)$$

La Barbera & Rosso (1990) derivan una nueva expresión para el cálculo de la dimensión fractal de toda la red:

$$D = \left(\frac{1}{2-d}\right) \frac{\log R_B}{\log R_L} \quad (8)$$

### 3. RESULTADOS

La Tabla 1 recoge los parámetros morfométricos de la red de drenaje descritos por las ecuaciones 1a)-1c). Se muestran, además, los intervalos en los que deben variar estos parámetros y el valor más común.

Tabla 1. Parámetros morfométricos para la cuenca del río San Cristóbal

Índice	Valor calculado	Intervalo probable	Moda
$R_B$	3.79	3-5	4
$R_L$	2.39	1.5-3	2
$R_A$	6.14	3-6	...

Como puede apreciarse los valores de los índices morfométricos se ubican en los intervalos probables, con la excepción de  $R_A$ , el cual excede ligeramente los valores promedios observados en la mayoría de las cuencas reportadas por varios autores. Corrientes de orden 1 de grandes longitudes, también una de las corrientes de orden 4, y las pequeñas áreas de las subcuencas de los ríos de estos órdenes son las razones que justifican el valor elevado de  $R_A$ .

### 3.1. Valor fractal bajo supuesto de autosimilitud

La dimensión fractal para las corrientes individuales fue estimada según Takayasu (1990), Rosso et al. (1991) y Liu (1992). Los valores obtenidos por cada uno de los métodos fueron: 1,04, 1,47 y 0,96. Cabe recordar que los dos últimos autores consideran las redes de drenaje como autosimilares y por lo tanto emplean los coeficientes de Horton para el cálculo de la dimensión fractal, a diferencia del primer autor quien se basa en las longitudes real y euclidiana 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.

La dimensión fractal de la red se estimó empleando todos los valores de  $d$ , con el propósito de comparar el efecto de las variaciones de este parámetro sobre  $D$ . Los valores obtenidos, según La Barbera & Rosso (1990), Ec. 8, son: 1,59, 2,87 y 1,47. El valor de 2,87 no es posible, debido a que el valor fractal máximo de una red que se comporta como un modelo topológico aleatorio es igual a 2. Los valores de 1,59 y 1,47 pueden considerarse similares, pues el rango de variación es 0,12. Se aprecia en los estimados de  $D$  la importancia del método de cálculo de la dimensión fractal promedio de las corrientes,  $d$ . Entonces, se puede asumir que la dimensión fractal para la red es 1,53, la cual es el promedio de 1,59 y 1,47.

### 3.2. Valor fractal bajo supuesto de autoafinidad

Nikora & Sapozhnikov (1993) y Nikora et al. (1996) no consideran las redes de drenaje como objetos naturales autosimilares sino autoafines. O sea, que consideran que ocurren cambios de escala en las direcciones longitudinal y transversal de las corrientes. Esta definición, en opinión de los autores de este trabajo, se ajusta más a las condiciones en las cuales se desarrollan las redes de drenaje. Para calcular la dimensión de lagunaridad ( $D_G$ ) por este método es necesario determinar los exponentes característicos transversal y longitudinal de toda la red, lo que se realiza gráficamente, Figura 3.

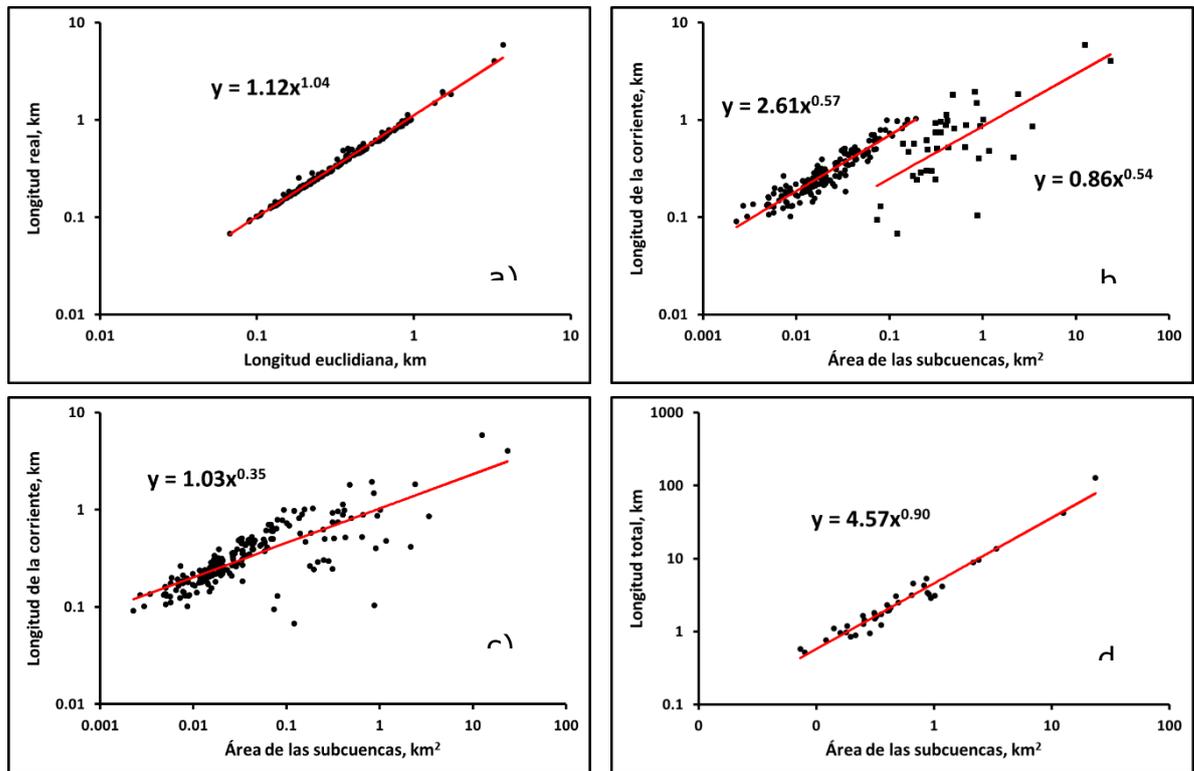


Figura 3. Relaciones entre longitudes y áreas en la cuenca del río San Cristóbal, utilizadas en el cálculo de los coeficientes  $v_{li}$ ,  $\beta$  y  $\varepsilon$ . Todos los exponentes se emplean en el cálculo de la dimensión de lagunaridad  $D_G$ .

La dimensión fractal promedio,  $d$ , es igual a 1,04, Figura 3a). La Figura 3b) describe la relación entre el área drenada por cada corriente principal y la longitud de la misma. Los ríos de orden 1, representados con puntos, han sido separados de los ríos de orden superior, y la recta ajustada posee una pendiente  $\beta = 0,57$ . El valor de la pendiente  $\beta$  para las corrientes de orden 2 en adelante es 0,54. La pendiente de la recta  $\beta$  para todas las corrientes es 0,35, Figura 3c). La Figura 3d) expresa la relación entre la suma de las longitudes de cada corriente y el área de drenaje de cada subcuenca que encierra estas corrientes,  $\varepsilon = 0,90$ .

## 4. DISCUSIÓN

### 4.1. Comportamiento autoafín

La dimensión de lagunaridad, independientemente de los valores de  $\beta$  utilizados en el cálculo, es igual a 1,80. Sin embargo, el efecto de  $\beta$  es particularmente importante en el cálculo de los parámetros de escala en las direcciones longitudinal,  $v_l$ , y transversal,  $v_w$ . Para  $\beta = 0,54$  los valores de  $v_l$  y  $v_w$  son 0,60 y 0,51, y el coeficiente de Hurst  $H_{lw} = 0,86$ , confirmando la presencia de una red autoafín. Sin embargo, para  $\beta = 0,35$  los valores de  $v_l$  y  $v_w$  son 0,39 y 0,72 y  $H_{lw} = 1,83$ , lo cual es un valor anómalo. Este valor

anómalo pudiera estar dado porque la red se comporta como multifractal en lugar de fractal. Con el propósito de comparar los resultados obtenidos en este trabajo y otros lugares del mundo se incluye la Tabla 2.

Tabla 2. Valores  $v_l$ ,  $v_w$  y  $H_{lw}$  para algunos ríos y regiones del mundo (Tomado de Nikora et al., 1996)

Región	$v_l$	$v_w$	$H_{lw}$
Rumanía	0,56-0,75	0,44-0,48	0,64-0,83
Italia	0,53-0,64	0,38-0,59	0,72
Estados Unidos	0,52-0,88	0,38-0,51	0,66-1,0
Moldavia	0,62	0,43	0,69
Ucrania	0,61-0,63	0,45-0,48	0,74-0,76

Como puede observarse los valores calculados para el río San Cristóbal caen en el rango de valores obtenidos para otras cuencas en varias regiones del mundo. Corrientes principales encajadas en sus cauces, con pendientes elevadas a ambos lados y un medio geológico, con predominio de rocas carbonatadas, hacen que se violen sistemáticamente las leyes de Horton sobre la composición del drenaje. Estas condiciones acentúan el carácter autoafín de la red de drenaje del río San Cristóbal, aunque no queda totalmente claro porqué las corrientes de orden 1 se desplazan hacia la izquierda en el gráfico de la Figura 3b), con respecto al resto de las corrientes de orden superior.

#### 4.2. Análisis tectono-estructural del drenaje

Como bien puede apreciarse en la Figura 1, la red de drenaje del río San Cristóbal se caracteriza por la presencia de corrientes rectas, paralelas, subparalelas y con cambios bruscos de dirección, además, es frecuente observar intercepciones entre ellos formando ángulos cercanos a los 90°, todo lo cual apunta al control tectónico y estructural sobre el drenaje. Las corrientes de orden 4 y 5 tienen una dirección preferencial NW-SE, Figura 4b), 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.

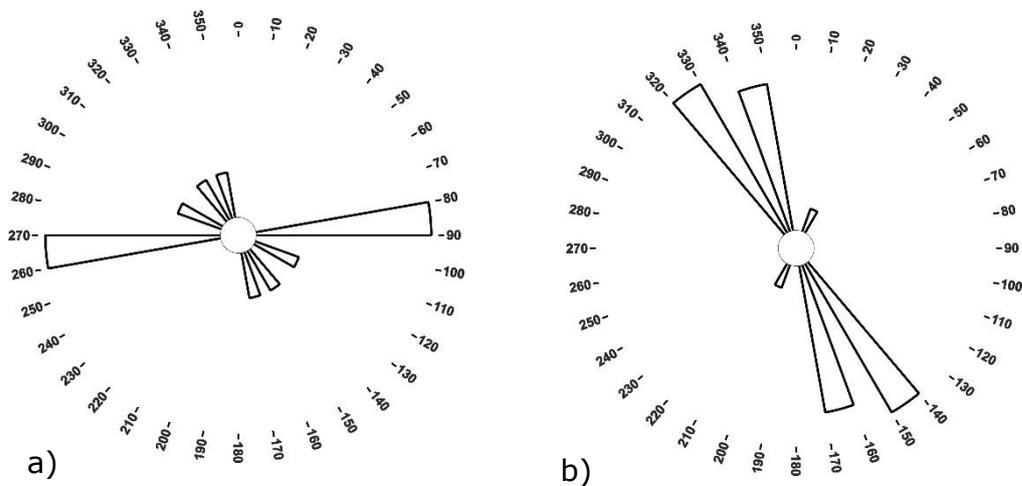


Figura 4. Direcciones principales de las corrientes agrupadas por órdenes: a) orden 3, b) órdenes 4 y 5.

Sin embargo, las corrientes de orden 3, Figura 4a), muestran una dirección predominante al E, asociadas directamente a las fracturas primarias de Riedel, mientras que las corrientes de orden 1 y 2 varían indistintamente y se alinean principalmente de acuerdo a las fracturas secundarias de Riedel, Figuras 5a) y 5b).

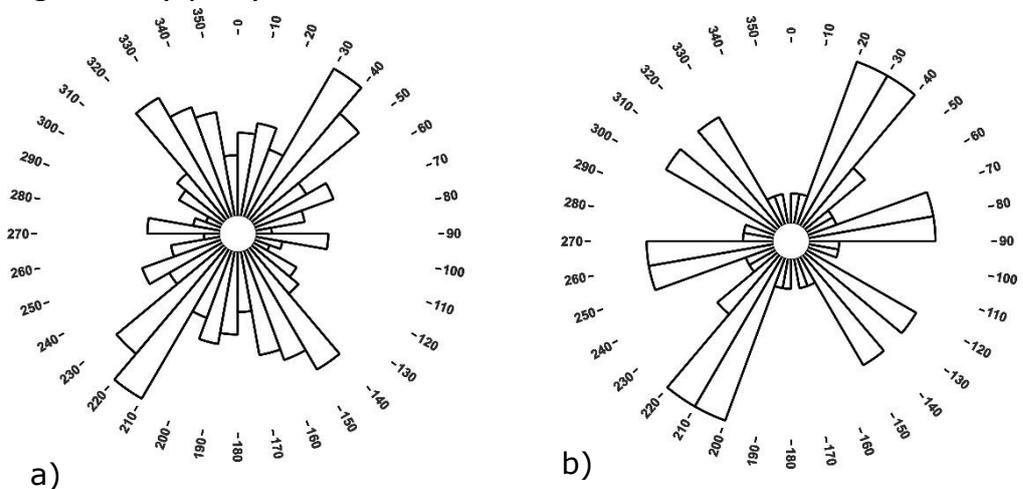


Figura 5. Direcciones principales de las corrientes agrupadas por órdenes: a) orden 1, b) orden 2.

La coincidencia entre las direcciones de los alineamientos y las direcciones de las corrientes superficiales confirma el predominio de la estructura sobre la litología en el desarrollo de la red de drenaje.

## 5. CONCLUSIONES

- Los valores de la dimensión fractal de las corrientes: 1,04 y 1,47 caen en el rango de valores observados en otras cuencas del mundo. El valor 0,96 pudiera deberse a que las leyes de Horton no se comportan invariables en la cuenca. Se asume 1,04 como valor real

para  $d$ , ya que su cálculo no depende de supuestos, sino de las longitudes real y euclidiana de las corrientes. La dimensión fractal promedio de la red de drenaje, bajo condición de autosimilitud es igual a 1,53. El valor  $D$  igual a 2,87 es un valor anómalo, para el cual, con el grado de estudio actual, no existe explicación práctica.

- Considerar la red como autoafín ofrece mejores resultados, no sólo al producir un valor  $D_G$  igual a 1,86, más próximo a 2, sino por la posibilidad de calcular el coeficiente de Hurst y obtener un estimado del grado de autosimilitud, el cual es 0,86. El desplazamiento de las corrientes de orden 1 respecto al resto en el gráfico de longitud vs área aún carece de fundamentación, por lo que se requieren nuevos estudios en este sentido. Las direcciones de las corrientes de diferentes órdenes responden en primer lugar al patrón de fracturas creadas durante los cabalgamientos y en segundo lugar a las fracturas Riedel que se originaron como consecuencia de la rotación del máximo estrés compresivo.

## 6. REFERENCIAS

- 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.
- HACK, J.T. 1973: Stream-profile analysis and stream-gradient index. *U.S. Geological Survey, Journal Research*, 1(4): 421-429.
- 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.
- KIRCHNER, J.W. 1993: Statistical inevitability of Horton's laws and the apparent randomness of stream channel networks. *Geology*, 21: 521-594.
- LA BARBERA, P., ROSSO, R. 1989: On the fractal dimension of stream networks. *Water Resources Research*, 25(4): 735-741.

- 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. 1986: Self-affine fractal sets. En: Pietronero, L., Tosatti, E. (Eds.), *Fractals in Physics*. North-Holland, Amsterdam.
- 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., HERNÁNDEZ-SANTANA, J.R., COFIÑO, C.E., MÉNDEZ, A.P., GALAZ, G. 2013: Análisis estructural y morfotectónico en los municipios San Cristóbal y Candelaria, Cuba Occidental: contribución a los estudios de peligrosidad sísmica de la falla Pinar. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, (82): 7-23*.
- 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.
- RODRÍGUEZ-ÍTURBE, I., RINALDO, A., RIGON, R., BRAS, R.L., MARANI, A., IJJÁSZ-VÁSQUEZ, E. 1991: Energy dissipation, runoff production, and the three-dimensional structure of river basins. *Water Resources Research*, 28(4): 1095-1103.
- 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.
- SCHULLER, D.J., RAO, A.R., JEONG, G.D. 2001: Fractal characteristics of dense stream networks. *Journal of Hydrology*, 243: 1–16
- SCHUMM, S. A. 1956: Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological Society of America Bulletin*, 67: 597-646.
- 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: 923–938.
- TAKAYASU, H. 1990: *Fractals in the physical sciences*. Manchester University Press, Manchester.

TARBOTON, D. G. 1996: Fractal river networks, Horton's laws and Tokunaga cyclicity. *Journal of Hydrology* 187(1-2): 105-117.

**Robert Ramírez-Hernández**, [robertrh@upr.edu.cu](mailto:robertrh@upr.edu.cu)

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

**Dámaso Cáceres-Govea**, [dcaceres@upr.edu.cu](mailto:dcaceres@upr.edu.cu)

Doctor en Ciencias Geológicas. Profesor Titular. Universidad de Pinar del Río, Cuba

## Estudio fraccional densométrico de la mena laterítica: evaluación del enriquecimiento

Alberto Hernández-Flores  
George Agyei  
Arturo Luis Rojas-Purón

### Resumen

Se realiza el análisis fraccional al intervalo granulométrico  $-2,0+0,074$  mm de una muestra del yacimiento Punta Gorda, atendiendo a las propiedades físicas de diámetro y densidad de las partículas. Mediante la combinación del análisis de cribado y de la separación de las fracciones de densidad con el empleo de diferentes medios densos se obtiene la función bidimensional de distribución, por el grosor o diámetro y por la densidad, y a través del análisis químico se determina la función experimental. Se realiza la evaluación del beneficio con el empleo del modelo Teoría de separación y se obtienen los parámetros tecnológicos. Como resultado fundamental se logra un concentrado con la separación de la mayor cantidad del magnesio y aluminio de 94,89 % y 91,15 %, respectivamente. Esto permite pronosticar un mejoramiento en la calidad y estabilidad de la mena de alimentación al proceso extractivo y diversificar el uso del recursos.

**Palabras clave:** granulometría; análisis fraccional; enriquecimiento; mena laterítica; densidad; función de distribución.

## Fractional densometric assessment for the laterite ore body: Enrichment evaluation

### Abstract

The purpose of this investigation is to conduct a fractional analysis to a Punta Gorda ore sample within the granulometric interval of 2,0+0,074 mm considering physical characteristics, diameter and particle density. A bi-dimensional function is obtained by the thickness or diameter and by the density through the combination of screening analysis and density fraction separation with the use of different dense media. The experimental function is determined through chemical analysis. The evaluation of the benefits is carried out using method of the separation theory and the technological parameters are obtained. The main result is a concentrate with the separation of a higher percent of magnesium and aluminum of 94,89 % and 91,15 %, respectively. This allows foreseeing the improvement of the quality and stability of the ore feed to the mining process and diversifying the use of resources.

**Keywords:** granulometry; fractional analysis; enrichment; laterite ore body; density; distribution function.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las investigaciones geológicas sobre yacimientos lateríticos desarrolladas en Cuba y otras regiones (Almaguer & Zamarsky 1993, Almaguer 1995; Ponce & Carrillo 1988; Rojas 1995; Rojas et al. 2005; Tokashiki et al. 2003; Valix & Cheung 2002), indican contrastes significativos en la concentración de los diferentes elementos químicos y compuestos mineralógicos en dependencia de las propiedades físicas diámetro y la densidad de las partículas que lo componen. Se observa por ejemplo el predominio de las granulometrías finas, más del 75% de la masa mineral tiene dimensiones menores a 200 mallas y dentro de estas alrededor del 50% de las partículas se encuentran por debajo de los 10 micrómetros de diámetro. El hierro y el níquel se concentran hacia las clases de tamaños más finas, por el contrario el contenido de sílice y el magnesio resulta predominante en las partículas de mayor tamaño, mientras que los minerales que contienen de manera significativa cobalto, cromo y manganeso se concentran en clases de tamaño intermedias que oscila entre 20 y 200 micrómetros.

Los estudios de caracterización realizados a los yacimientos Punta Gorda (Vera 2001) manifiestan el predominio de los óxidos ferrosos en casi todo el perfil, pero con la tendencia a concentrarse en mayor medida hacia las clases granulométricas más finas, por ejemplo la goethita ( $\text{FeOOH}$ ) fase mineralógica principal portadora de níquel presenta la tendencia a concentrarse en las partículas de mayor fineza, al mismo tiempo fases mineralógicas como la gibbsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) y lizardita ( $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$ ) se concentran hacia las clases de tamaño de mayor grosor.

La densidad de las partículas como propiedad física que caracteriza el comportamiento de las fases minerales en los yacimiento lateríticos ha sido poco estudiada debido a lo complejo que resulta manejar una gran masa de partículas finas y muy finas, sin embargo se conoce que entre las fases mineralógicas principales existe contraste respecto a la densidad, por ejemplo la densidad de las fases que están compuestas fundamentalmente de óxidos ferrosos oscila entre 4 y 5,2  $\text{g/cm}^3$ , y fases como gibbsita, lizardita, cuarzo, litioforita poseen una densidad que oscila entre 2,43 y 2,7  $\text{g/cm}^3$  (Hernández 1997; Hernández et al. 2000; Hernández, Trujillo & Toirac 2009, Hernández et al 2010).

En la actualidad no se aprovechan todas las potencialidades que ofrece el contraste en la concentración de los elementos químicos y compuestos mineralógicos de acuerdo a las propiedades físicas de las partículas que componen los yacimientos lateríticos. Es por ello que el objetivo del trabajo sea estudiar en el yacimiento Punta Gorda el contraste que manifiestan las

partículas que componen la mena laterítica en cuanto a las propiedades físicas diámetro y densidad para su posible enriquecimiento.

El yacimiento Punta Gorda es un típico depósito residual de hierro, níquel, y cobalto, asociado a una corteza de meteorización desarrollada en forma de un potente manto, esencialmente laterítico casi continuo, sobre un macizo de rocas ultrabásicas serpentinizadas, que se puede caracterizar por aspectos entre los que destacan los geológicos y geoquímicos (Rojas et al. 2005 ).

La mineralogía del yacimiento Punta Gorda es sumamente compleja y está constituida por óxidos, esméctitas, minerales del grupo de la serpentina y minerales primarios de las ultramafitas serpentinizadas; no menos de 30 minerales se alimentan al proceso metalúrgico de la planta proveniente de este yacimiento.

En el horizonte limonítico del yacimiento, la goethita representa alrededor del 70 % de la mena niquelífera del horizonte. Por otra parte el mineral principal portador de cobalto resulta ser la asbolana - m (Co, Ni)  $O.MnO_2 \cdot nH_2O$ , que se distribuye en todo el corte del perfil, además de otros minerales de manganeso como la pirolusita y el psilomelano.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

El estudio se realizó con una muestra tecnológica tomada en el yacimiento Punta Gorda y elaborada en el frente de explotación, desde el fondo hasta el techo, que abarca los pozos 44 y 45 del bloque M-49, con una potencia de 35,1m y 24m, respectivamente. La muestra se preparó por el método del cono y del anillo hasta obtener una masa necesaria de 1 400 kg. La investigación se desarrolló según el esquema que se expone en la figura 1.

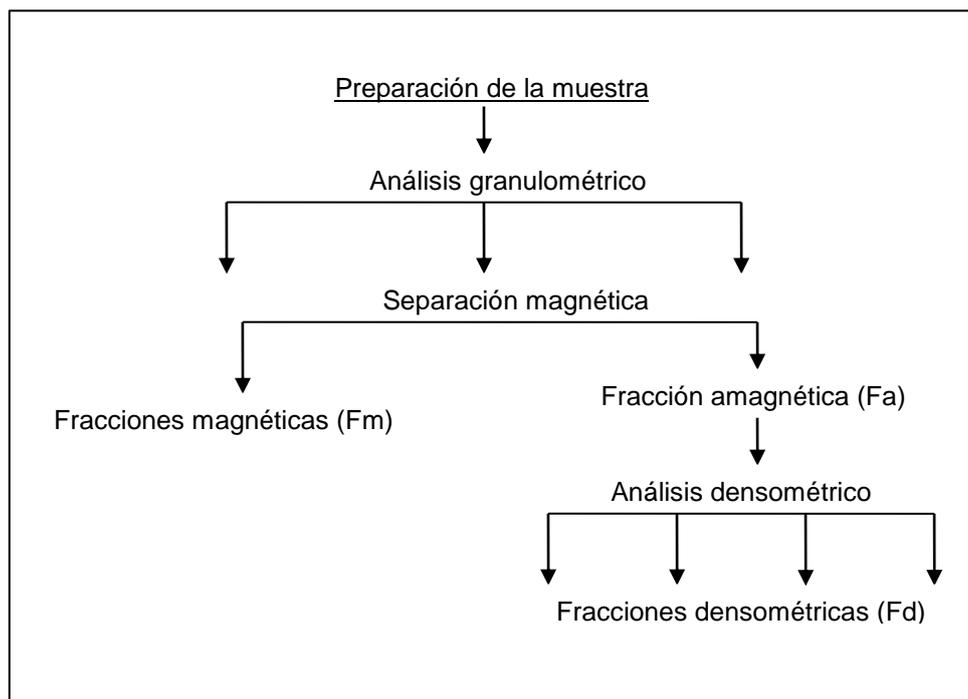


Figura. 1 Esquema de trabajo utilizado en la investigación.

Para la realización de los análisis fraccionarios se utilizaron juego de tamices según serie de Taylor desde 10mm hasta 0,045mm con modulo de escala 2, Para la caracterización de los productos o fracciones obtenidos de las separaciones granulométrica y densométrica se utilizan las siguientes técnicas analíticas: Fluorescencia de Rayos- X, Phillips PW 1480 y Absorción Atómica. Microscopio óptico modelo AXIOLAB POL de la CARL ZEISS, Difracción de Rayos - X utilizando un difractómetro alemán del tipo HZG - 4. Para el registro y tratamiento de los datos roentgenométricos se emplearon el software ANALIZE, para las determinaciones cualitativas de minerales y AUTOQUAN, para las determinaciones cuantitativas de la SEIFERT X - Ray Technology (Versión 2.26), de procedencia alemana. También se empleó El difractómetro de la marca PHILIPS, modelo PW 3710 BASED. En el proceso de lectura e interpretación de los difractogramas obtenidos se emplearon los software APD (PHILIPS) y el Xpert High Score 1b. 2002, con la base de datos de la ICDD (Internacional Center for Diffraction Data) de 1998. Se empleó el equipamiento conjugado TG y ATD según modelo PL - STA Thermal Science con analizador térmico simultáneo STA 1000/1500, de la Stanton Rederoff Ltd, (Agyey, 2006). Para el estudio en medios densos se utiliza el tetrabromoetano,  $\text{CHBr}_2$ .  $\text{CHBr}_2$ . PRS líquido orgánico denso, inerte con densidad de  $2,935\text{g/cm}^3$  entre 20 y 24 °C, contenido de agua de 0, 05%, buena filtración y poco volátil (Agyey 2006). Como métodos de investigación científica se emplearon en análisis

fraccionario y el modelo Teoría de separación de minerales útiles (Mitrofanov 1980; Tijonov 1990).

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Análisis granulométrico

Los resultados del análisis granulométrico de la muestra del yacimiento Punta Gorda (Tabla 1) indican similitud con otros yacimiento cubanos y con yacimientos de otras regiones en cuanto a la composición granulométrica; existe predominio de las fracciones finas particularmente por debajo de 0,2 mm y la clase de tamaño menor a 0,045 mm resulta mayoritaria (68,79 %).

Tabla 1. Resultados experimentales de análisis granulométrico de la mena niquelífera de Punta Gorda

Clase de tamaño (mm)	Salida %	Salida acumulativa (+)	Salida acumulativa (-)
-10+8	0,1	0,1	100
-8+4	0,63	0,73	99,9
-4+2	0,36	1,09	99,27
-2+1	2,28	3,37	98,91
-1.+0.4	5,53	8,9	96,63
-0.4+0.2	4,28	13,18	91,1
-0.2+0.074	10,12	23,3	86,82
0.071+0.044	7,9	31,2	76,7
-0.044	68,79	100	68,79

Se distinguen tres grupos, respecto a la composición granulométrica de la muestra. Una parte, que se caracteriza por su granulometría gruesa, mayor de 2 mm, que representan aproximadamente el 1,0 % de la muestra. Un grupo granulométrico intermedio, compuesto por las fracciones menores de 2,0 mm y mayores de 0,2 mm, que representan alrededor del 13 % y El tercer grupo con una granulometría más fina, menor de 0,2 mm, que resulta mayoritaria y constituye cerca del 87 % de la muestra, este debe ser el grupo granulométrico que decide el comportamiento de la laterita de balance del yacimiento Punta Gorda. Resulta significativo que en la composición granulométrica las fracciones menores de 1,0 mm, representan el 96,63 % de la masa total.

### 3.1.1. Concentración de los elementos químicos en las clases granulométricas.

La laterita de balance del yacimiento Punta Gorda es esencialmente ferrosa, donde el hierro se concentra en valores entre un 20 % y un 49,7 % en las diferentes fracciones granulométricas, se encuentran además como elementos mayoritarios (Figura 2) en esta mena el MgO, Al, SiO<sub>2</sub>, Cr, y Mn. El níquel y el cobalto aparecen como microelementos pero de mucho interés desde el punto de vista técnico y económico. Los resultados del análisis granulométrico y químico efectuado al yacimiento Punta Gorda resultan atractivos para evaluar la posibilidad y efectividad de la introducción del proceso de beneficio con vistas a concentrar o separar los elementos químicos y compuestos que componen la mena laterítica, se observa la tendencia del hierro y el níquel a concentrarse hacia las clases de tamaño más finas, por el contrario la sílice y el magnesio lo hacen hacia las mayores granulometrías, es decir existe contraste en la concentración de estos en virtud de la diferencia del diámetro de las partículas de la mena (figura 3)

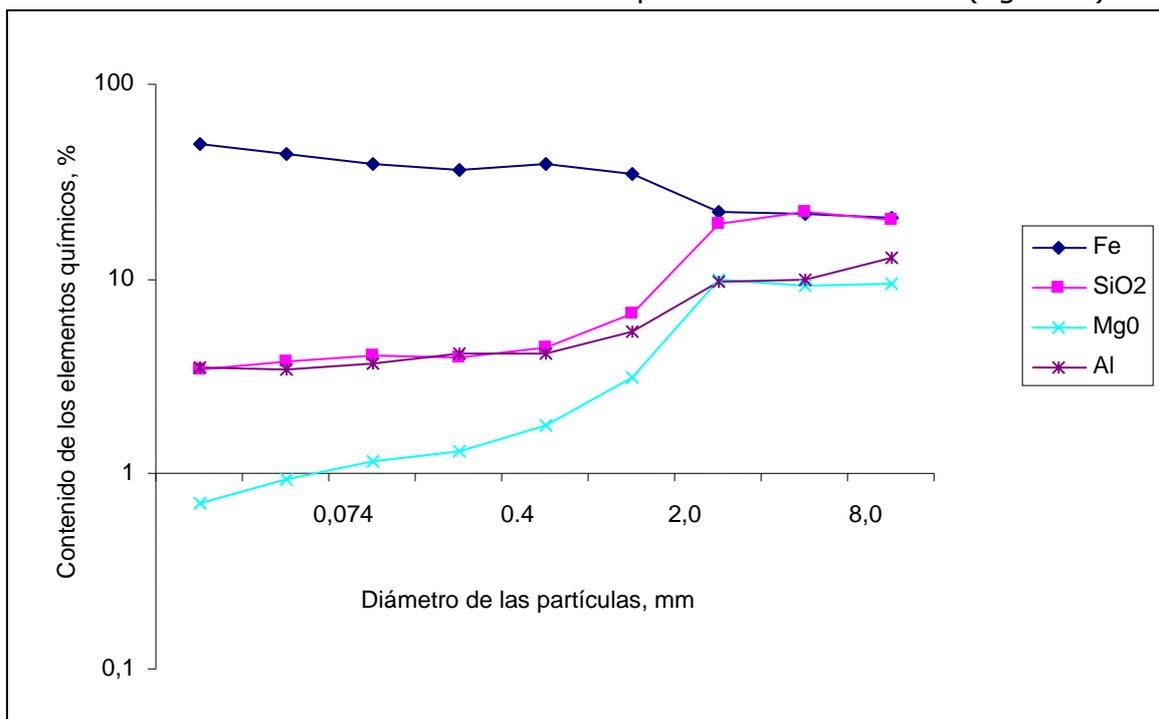


Figura 2. Variación de contenido de los componentes mayoritarios, Fe-Al-MgO-SiO<sub>2</sub> en la laterita de balance del yacimiento Punta Gorda

En la figura 3 se expone la distribución en las diferentes clases de tamaño de los elementos químicos cobalto, manganeso, cromo y aluminio donde se aprecia la tendencia de los dos primeros a concentrarse fundamentalmente en los intervalos de tamaño intermedios que varía desde 20  $\mu$ m hasta los 200  $\mu$ m.

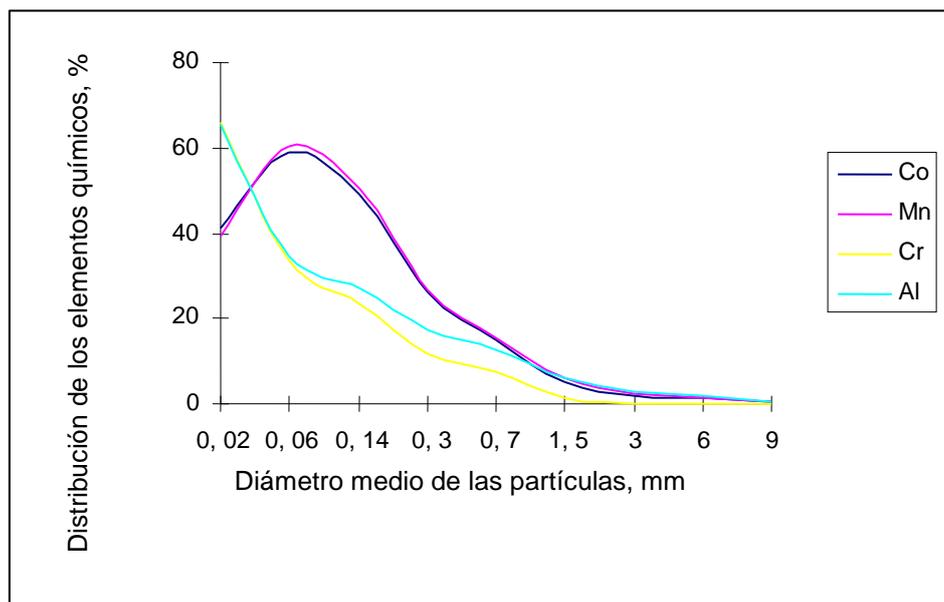


Figura 3. Distribución de los elementos químicos por clases granulométricas (Co-Mn-Cr-Al)

Las curvas que describen la concentración y la distribución de los principales elementos químicos que componen la muestra (figura 3 y 4) manifiestan contraste en cuanto a su concentración en los intervalos granulométricos estudiados, por ejemplo el magnesio que constituye un componente nocivo tanto para la tecnología HPAL como para la tecnología Caron incrementa su contenido gradualmente en la medida que aumenta el diámetro de las partículas, de manera similar resulta el comportamiento de la sílice.

### 3.1.2. Mineralogía de las fracciones granulométricas

La determinación cuantitativa por clases granulométricas se realizó con empleo del software AUTOQUAN (Agyei 2006, 2010) en las fracciones comprendidas entre 10 y 2,0 mm es apreciable la concentración de las fases cloritas, gibbsita y lizardita lo que se corresponde con los altos contenido de aluminio, magnesio y sílice expuestos en los resultados del análisis químico, la goethita se concentra mayoritariamente en todas las clases de tamaño, pero alcanza el máximo contenido en las fracciones menores a 0,2 mm y principalmente en la clase -0,044 mm. Esta concentración de la goethita hacia las clases de mayor tamaño puede ser una de las causas del alto contenido de níquel en ellas, aunque por la poca masa que representan las fracciones mayores a 4 mm la distribución de níquel no sobrepasa el 3 % del total.

En la figura 4 las curvas que describen la concentración de las fases mineralógicas en dependencia del diámetro de las partículas, presentan similitud en la trayectoria que describen las curvas de los elementos químicos expuesto en las figuras 3 y 4 la goethita, fase mineralógica

compuesta por óxido ferroso y principal portadora de níquel resulta mayoritaria en la composición de la mena laterítica y presenta la tendencia a disminuir su concentración en la medida que se incrementa el diámetro de las partículas, por su parte las fases restantes que contienen fundamentalmente elementos químicos como aluminio, sílice y magnesio se incrementan en su contenido en la medida que aumenta la granulometría de las partículas.

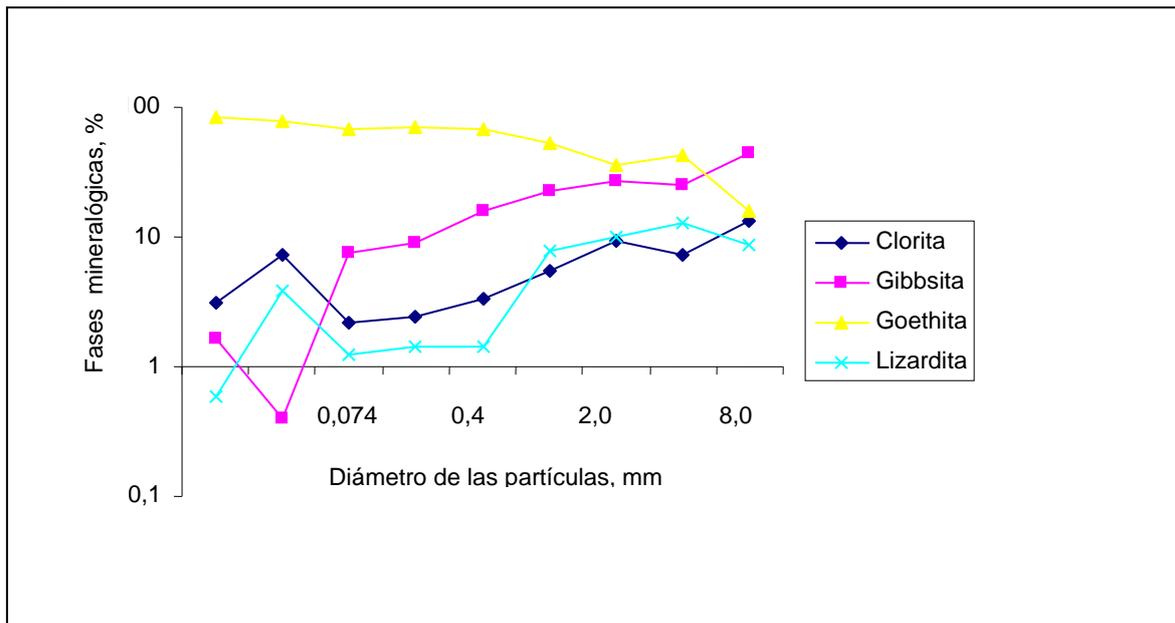


Figura 4. Contenido de las fases mineralógicas según diámetro de las partículas.

Los resultados de los análisis mineralógicos ponen de manifiesto el predominio de fases de óxidos de hierro principalmente la goethita. En las figuras 5, 6 y 7 se exponen los difractogramas del análisis mineralógico efectuado a las diferentes clases granulométricas.

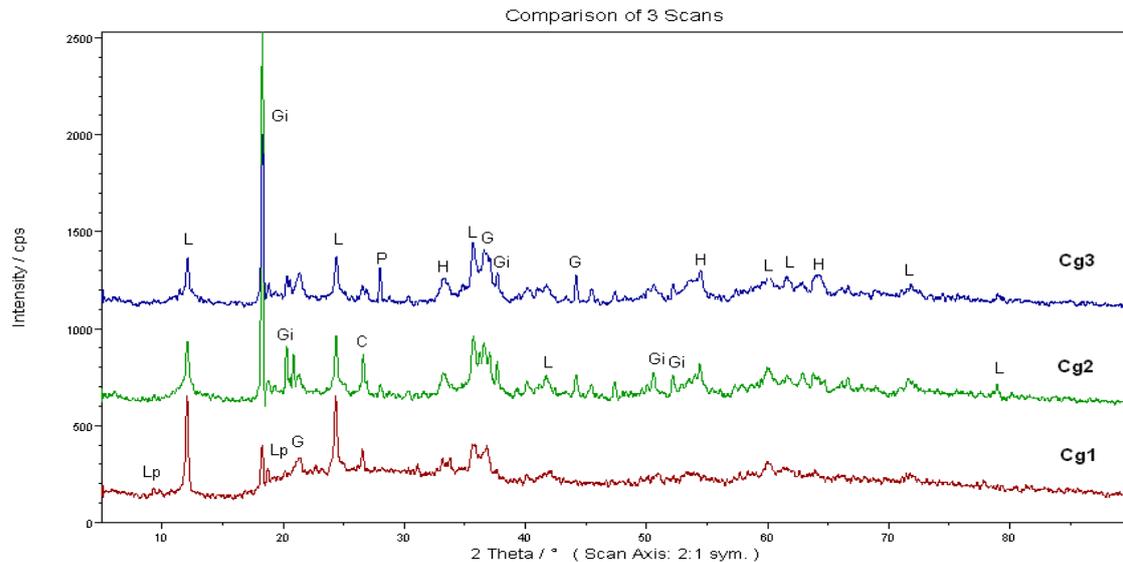


Figura 5. Difractograma de rayos  $-X$  de las fracciones granulométricas (-10+8mm); (-8+4 mm); (-4+2 mm. G: Goethita, Gi: Gibbsita, H: Hematita, L: Lizardita, C: Cuarzo

Es significativa también la presencia de gibbsita, sobre todo en las fracciones más gruesas, y en tercer orden están los silicatos de magnesio: una fase de serpentina y clorita, que se concentran en las fracciones de mayor grosor. Se detectan las fases de hematita, maghemita y magnesioferrita, aunque en contenidos por debajo del 10 %.

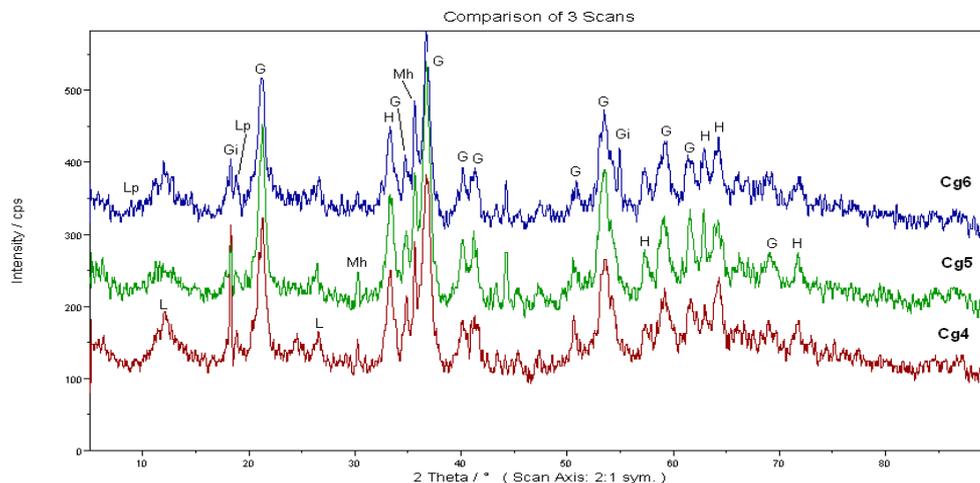


Figura 6. Difractograma de rayos  $-X$  de las fracciones granulométricas (-2+1 mm); (-1+0,4 mm); (-0,4+0,2 mm). G: Goethita, Gi: Gibbsita, H: Hematita, L: Lizardita, Mh: maghemita, Lp: Lioforita.

En la fracción -10+8 mm se reporta la presencia de cuarzo, que llega a alcanzar valores próximos al 10 %. La magnetita sólo se detecta en dos muestras y en poca cantidad. En la clase de tamaño comprendida de 2,0 a 0,074 mm se observó una fase de manganeso, la lioforita detectada por difracción de rayos  $-X$  según los reflejos  $4,72 \text{ \AA}$  y  $9,49 \text{ \AA}$ .

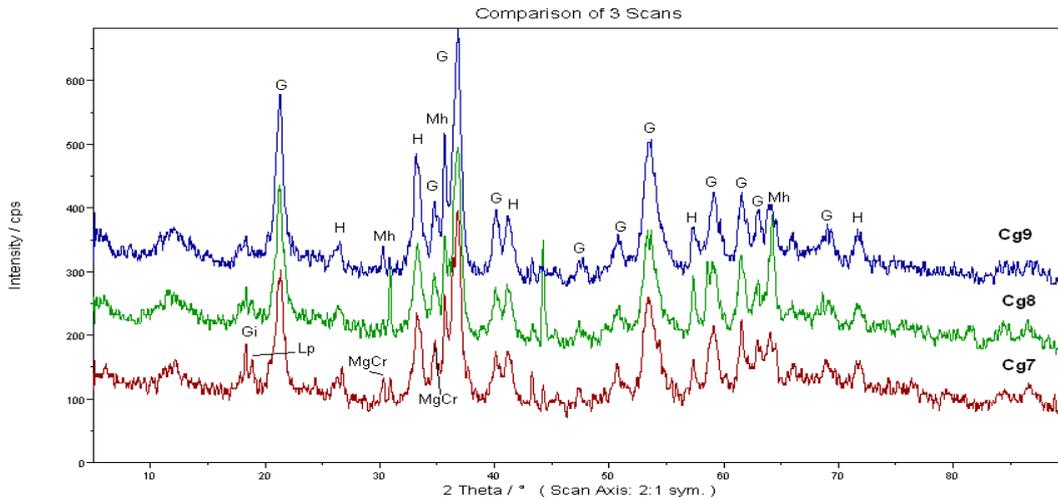


Figura 7. Difractograma de rayos -X de las fracciones granulométricas (-0,2+0,071 mm); (-0,071+0,044 mm); (-0,044+0 mm). G: Goethita, Gi: Gibbsita, H: Hematita, Mh: maghemita, Lp: Litioforita.

**3.2. Análisis densométrico**

En la tabla 2 aparecen los resultados de la determinación de la densidad para cada clase granulométrica, y se aprecia como tendencia que hacia las clases de mayor tamaño en la que se concentran los granos gruesos disminuye la densidad de la fracción (Hernández 2009, 2010; Ageyi, Rojas & Hernández 2010).

Tabla 2. Densidad de las fracciones granulométricas del yacimiento Punta Gorda.

Clase de tamaño, mm	+8,0	+4,0	+2,0	+1,0	+0,4	+0,2	+0,074	+0,044	-0,044
Densidad de la clase, g/cm <sup>3</sup>	2,52	2,54	2,59	2,82	3,01	2,92	2,94	3,48	3,40

Del estudio de caracterización para determinar la densidad de las clases granulométricas del yacimiento Punta Gorda se pueden establecer tres grupos que coinciden con la composición granulométrica de la muestra pero en proporción inversa; un grupo de partículas ligeras que se concentran en las clases de mayor tamaño, un segundo grupo de partículas caracterizadas por una densidad intermedia cuyo rango oscila entre 2,92 g/cm<sup>3</sup> y 3,01 g/cm<sup>3</sup>, que se concentran en las fracciones intermedias desde 1,0 hasta 0,071 mm, y un tercer grupo de partículas pesadas que se concentran en las clases granulométricas más finas menores a 0,071 mm con un rango de densidad de 3,40 g/cm<sup>3</sup> a 3,48 g/cm<sup>3</sup>

en la que deben predominar las fases mineralógicas compuestas por óxido de hierro como la goethita cuya densidad es superior a 4 g/cm<sup>3</sup>.

La mena en su composición granulométrica posee un amplio espectro de partículas, desde las microscópicas que resultan mayoritarias hasta los granos con decenas de milímetros, las partículas muy pequeñas del orden de los micrómetros por su gran superficie específica y sus propiedades superficiales como electroconductividad y composición iónica tienden a la formación de conglomerados lo que altera su comportamiento en el medio acuoso, en el medio aéreo se requiere de una humedad muy pequeña para el manejo eficiente de estas partículas. También se conoce de la diferencia en la concentración de las fases mineralógicas en función del diámetro de las partículas, las fases gibbsita, lizardita, cuarzo, portadoras de elementos químicos como aluminio, magnesio y sílice se concentran en las mayores granulometrías, pero además la densidad de estas fase minerales oscila entre los 2,4 y los 2,7 g/cm<sup>3</sup> es decir son la fases más ligeras. Por estas razones y en aras de evitar el efecto de aglomeración de las partículas muy pequeñas y el fenómeno de isodromía o equis sedimentación, es que el análisis fraccional densométrico se efectúa para las clases de tamaño comprendidas en el intervalo de partículas de 2 a 0,074 mm, que representa el 22,21 % de la muestra.

La función bidimensional de distribución por el grosor o diámetro  $\xi_1$   $\gamma(\xi_1, \xi_2)$  se obtiene por la combinación del análisis de cribado y de la separación de las fracciones con el empleo de diferentes densidades del medio, y mediante el análisis químico se determina  $\beta(\xi_1, \xi_2)$ , los valores de la función distribución en masa para cada intervalo granulométrico  $\xi_1$  y de cada densidad del medio  $\xi_2$ ,  $\gamma(\xi_1, \xi_2)$  se obtuvo por la ecuación:

$$\gamma(\xi_1, \xi_2) = \frac{\gamma(\xi_1)\gamma(\xi_2)}{\Delta\xi_1 * \Delta\xi_2} \quad (1)$$

Donde:

$\gamma(\xi_1, \xi_2)$  - función de distribución,

$\gamma(\xi_1)$  - salida o porcentaje en peso de la fracción granulométrica, %.

$\gamma(\xi_2)$  - salida o porcentaje en peso de la fracción de densidad, %

$\Delta\xi_1$  - magnitud del intervalo o fracción granulométrica.

$\Delta\xi_2$  - magnitud del intervalo o fracción de densidad.

Los resultados del análisis fraccionario densométrico para los principales elementos químicos (níquel, cobalto, hierro, magnesio, sílice, aluminio, cromo y manganeso) que componen la mena laterítica se exponen en la tabla 3, en la primera columna después de la magnitud de la clase de tamaño aparecen en las filas segunda la salida de la clase granulométrica en porcentaje respecto a la muestra total. La distribución de la masa de partículas de mineral en función de su diámetro y densidad manifiesta la tendencia al incremento progresivo de las fracciones ligeras en la medida que aumenta la granulometría, y en la medida que disminuye el diámetro de las partículas se experimenta una mayor concentración de las fracciones pesadas.

Tabla 3. Resultados del análisis fraccional densométrico

Clase de tamaño en mm	Densidad del medio, g/cm <sup>3</sup>	Salida de las fracciones densométricas $\gamma(\xi_2)$ , %	Función de distribución $\gamma(\xi_1, \xi_2)$	Función experimental $\beta(\xi_1, \xi_2)$					
				Ni	Co	Fe	MgO	Cr	Al
0,2+0,074 (15,21)	2,40	9,27	0,54	2,01	0,429	36,67	0,73	0,65	3,82
	2,60	6,12	0,36	2,01	0,349	23,36	0,85	0,72	4,15
	2,80	6,33	0,37	1,02	0,230	27,88	0,66	0,74	4,17
	2,92	78,28	1,53	1,72	0,368	39,56	0,69	2,89	3,88
0,4+0,2 (1,02)	2,40	18,32	0,04	2,28	0,266	27,84	3,1	0,07	5,58
	2,60	3,70	0,009	1,53	0,313	30,32	1,1	0,02	6,1
	2,80	3,98	0,01	1,70	0,518	28,59	0,59	0,01	6,19
	2,92	74,0	0,06	1,60	0,554	31,91	0,54	0,10	5,14
1+0,4 (0,91)	2,40	30,25	0,23	1,94	0,192	19,52	5,52	0,21	15,49
	2,60	1,10	0,0008	2,16	0,120	20,5	2,14	0,00	6,28
	2,80	2,39	0,018	1,66	0,288	20,83	2,49	0,00	6,01
	2,92	66,26	0,01	1,33	0,454	25,9	1,33	0,00	5,64
-2+1 (5,07)	2,40	73,54	0,18	1,74	0,124	20,64	4,89	0,06	9,94
	2,60	2,90	0,007	1,93	0,065	33,0	3,35	0,00	4,51
	2,80	3,58	0,009	1,69	0,72	33,61	2,84	0,01	4,51
	2,92		0,02	1,06	0,835	38,06	1,01	0,03	4,24

El níquel reporta mayores concentraciones en el intervalo granulométrico desde -0,4 mm hasta 0,071 mm para densidades de 2,40 y 2,60 g/cm<sup>3</sup> con valores que oscila entre 2,01 % y 2,28 %, la tendencia en la concentración del níquel observada de los experimentos no guarda relación con le

densidad de la fase goethita, pero sí con la fineza de las partículas que la componen. Es conocido que la goethita posee una densidad entre 4 y 4,4 g/cm<sup>3</sup> pero el análisis mineralógico cuantitativo expresa la tendencia a concentrarse en las clases de tamaño más finas. El contenido de cobalto se presenta con un comportamiento irregular, aunque las mayores concentraciones se observan en la clase de tamaño -2+1 mm, para las densidades de 2,80 y 2,92 g/cm<sup>3</sup> con valores de 0,720 g/cm<sup>3</sup> y 0,835 g/cm<sup>3</sup> respectivamente.

Los mayores contenidos de magnesio y aluminio se reportan para la fracción más ligera (densidad de 2,40 g/cm<sup>3</sup>) en el intervalo de tamaño -1+0,4 mm con valores de 15,49 % y 5,52 % respectivamente.

### 3.3. Evaluación del beneficio de la mena

Las ecuaciones básicas para realizar el cálculo de los parámetros tecnológicos son:

$$\bar{\gamma}_{conc} = 100 \int_{\xi_{1min}}^{\xi_{1max}} \int_{\xi_{2min}}^{\xi_{2max}} \gamma(\xi_1, \xi_2) \varepsilon_{conc}(\xi_1, \xi_2) d\xi_1 d\xi_2 \quad (2)$$

$$\bar{\beta}_{conc} = \frac{100}{\gamma_{conc}} \int_{\xi_{1min}}^{\xi_{1max}} \int_{\xi_{2min}}^{\xi_{2max}} \beta(\xi_1, \xi_2) \gamma(\xi_1, \xi_2) \varepsilon_{conc}(\xi_1, \xi_2) d\xi_1 d\xi_2 \quad (3)$$

$$\bar{\varepsilon}_{conc} = \frac{\bar{\gamma}_{conc} \cdot \bar{\beta}_{conc}}{\bar{\beta}_{inic}} \quad (4)$$

En la tabla 4 están representadas cuatro clases de grosor y cinco fracciones de intensidad de corriente, cada grupo de partículas  $\Delta\xi_i \Delta\xi_j$  se caracteriza por cuatro números en el siguiente orden:  $100\gamma(\xi_i, \xi_j) \Delta\xi_i \Delta\xi_j$ ,  $\gamma(\xi_i, \xi_j)$ , cm<sup>3</sup>/(mm.g);  $\beta(\xi_i, \xi_j)$ , % de níquel, cobalto, magnesio y aluminio de la izquierda a derecha (tercera fila)

La característica principal de separación  $\varepsilon_{conc}(\xi_i, \xi_j)$ . se toma de una separación escalonada o ideal: Las partículas que están por encima de la línea de separación  $\varphi_s$  pasan completamente al concentrado ( $\varepsilon_{conc} = 1$ ); las que están por debajo se obtienen totalmente solo en las colas ( $\varepsilon_{conc} = 0$ ); esta línea separadora o de demarcación en el ejemplo que se explica ha sido seleccionada convenientemente por el contenido magnesio en las partículas: Las que contienen magnesio por encima del 2,49 % y un contenido de aluminio superior a 6,01 % se envían a las colas, por esta

razón las que están por encima de  $\varphi_s$  tienen un  $\varepsilon_{conc}(\xi_i, \xi_j)=1$ , las que están por debajo  $\varepsilon_{conc}(\xi_i, \xi_j)=0$ .

Para el cálculo de  $\bar{\gamma}_{conc}$  según la fórmula (2) es necesario sumar el producto de cifras primeras y cuartas solo por encima de  $\varphi_s$ , debido a que las primeras cifras que son menores que  $\varphi_s$  se multiplican por la integral  $\varepsilon_{conc}(\xi_i, \xi_j)=0$ .

Entonces se obtiene:

$$\bar{\gamma}_{conc} = (16,33 + 0,91 + 0,93 + 2,31 + 1,92 + 0,036 + 0,04 + 0,144 + 0,07 + 0,24) = 22,93\%$$

Tabla 4. Valores de las funciones bidimensionales.

$\xi_1, \text{ mm}$	Valores de las funciones $\xi_2, \text{ g/cm}^3$			
	0 - 2,40 ( j = 1 )	2,40 - 2,60 ( j = 2 )	2,60 - 2,80 ( j = 3 )	2,80 - 2,92 ( j = 4 )
0,2+0,0 74 ( i = 1 )	16,33 0,54 (2,01)(0,429) (0,73)(3,82) 1,0	0,91 0,36 (2,01)(0,349) (0,85)(4,15) 1,0	0,93 0,37 (1,02)(0,23) (0,66)(4,17) 1,0	2,31 1,53 (1,72)(0,368)(0,69) (3,88) 1,0
-	1,92 0,04	0,036 0,009	0,04 0,01	0,144 0,006
0,4+0,2 ( i = 2 )	(2,28)(0,266) (3,10)(6,10) 1,0	(1,53)(0,313) (1,10)(6,10) 1,0	(1,70)(0,518) (0,59)(6,19) 1,0	(1,60)(0,554)(0,54) (5,14) 1,0
$\varphi_s$	33,12 0,23	0,0096 0,0008	2,16 0,018	0,07 0,01
1,0+0,4 ( i = 3 )	(1,94)(0,192) (5,52)(15,5) 0,0	(2,16)(0,12) (2,14)(6,28) 0,0	(1,66)(0,288) (2,49)(6,01) 0,0	(1,33)(0,454)(1,33) (5,64) 0,0
-2,0 + 1,0 ( i = 4 )	4,32 0,18 (1,74)(0,124) (4,89)(9,94) 0,0	0,14 0,007 (1,93)(0,065) (3,35)(4,51) 0,0	0,180 0,009 (1,69)(0,72) (2,84)(4,51) 0,0	0,24 0,02 (1,06)(0,835)(1,08) (4,24) 0,0
				..... $\varphi_s$

El cálculo de  $\bar{\beta}_{conc}$  se realiza por la ecuación (3) y es necesario sumar los productos de las cifras primeras y terceras por encima de  $\varphi_s$ , y este resultado se divide por  $\bar{\gamma}_{conc}$ .

Al evaluar el posible beneficio de la mena atendiendo al análisis fraccional magnético se puede pronosticar un concentrado con la siguiente composición y recuperación de los elementos fundamentales:

Para el níquel:

$$\bar{\beta}_{conc} = \frac{100}{\gamma_{conc}} = (16,33 \cdot 2,01 + 0,91 \cdot 2,01 + \dots + 0,07 \cdot 1,33 + 0,24 \cdot 1,06) = 1,95\%$$

$$\bar{\varepsilon}_{conc} = \frac{\bar{\beta}_{conc} \cdot \bar{\gamma}_{conc}}{\beta_{inic}} = \frac{1,95 \cdot 22,93}{1,85} = 24,17\%$$

Para el cobalto:

$$\bar{\beta}_{conc} = \frac{100}{\gamma_{conc}} = (16,33 \cdot 0,429 + 0,91 \cdot 0,349 + \dots + 0,07 \cdot 0,454 + 0,24 \cdot 0,835) = 0,40\%$$

$$\bar{\varepsilon}_{conc} = \frac{\bar{\beta}_{conc} \cdot \bar{\gamma}_{conc}}{\beta_{inic}} = \frac{0,40 \cdot 22,93}{0,212} = 24,17\%$$

Para el magnesio:

$$\bar{\beta}_{conc} = \frac{100}{\gamma_{conc}} = (16,33 \cdot 0,73 + 0,91 \cdot 0,85 + \dots + 0,07 \cdot 1,33 + 0,24 \cdot 1,08) = 0,936\%$$

$$\bar{\varepsilon}_{conc} = \frac{\bar{\beta}_{conc} \cdot \bar{\gamma}_{conc}}{\beta_{inic}} = \frac{0,93 \cdot 22,93}{4,17} = 5,11\%$$

Para el aluminio:

$$\bar{\beta}_{conc} = \frac{100}{\gamma_{conc}} = (16,33 \cdot 3,82 + 0,91 \cdot 4,15 + \dots + 0,07 \cdot 5,64 + 0,24 \cdot 4,24) = 4,03\%$$

$$\bar{\varepsilon}_{conc} = \frac{\bar{\beta}_{conc} \cdot \bar{\gamma}_{conc}}{\beta_{inic}} = \frac{4,03 \cdot 22,93}{10,38} = 8,9\%$$

De la misma manera para el cromo se puede pronosticar que:

$$\bar{\beta}_{conc} = \frac{100}{\gamma_{conc}} = 0,82\%$$

$$\bar{\varepsilon}_{conc} = \frac{\bar{\beta}_{conc} \cdot \bar{\gamma}_{conc}}{\beta_{inic}} = \frac{0,82 \cdot 22,93}{0,28} = 67,15\%$$

Los resultados que se exhiben en la tabla 4 corroboran las regularidades establecidas en los trabajos de caracterización realizados con anterioridad (Rojas et al 2005; Hernández et al 2010), se observa la concentración del cobalto hacía las clases granulométricas intermedias, para todas las funciones bidimensionales  $\beta(\xi_i, \xi_j)$  los mayores valores se corresponden con el intervalo de densidad comprendido entre  $2,80 \text{ g/cm}^3$  y  $2,92 \text{ g/cm}^3$  particularmente en la fracción pesada de la clase de tamaño  $-2,0+1,0 \text{ mm}$  [(i=4, j=4)] el contenido de cobalto alcanza el 0,835 %. Tanto el magnesio como el aluminio exhiben las mayores concentraciones en los intervalos granulométricos  $-1,0+0,4 \text{ mm}$  y  $-2,0+1,0 \text{ mm}$ , y para una densidad del medio de  $2,40 \text{ g/cm}^3$  lo que se corresponde con su presencia en fases mineralógicas que se caracterizadas por un diámetro relativamente grande de sus partículas y densidades que oscilan alrededor de  $2,50 \text{ g/cm}^3$  como la lizardita  $\text{Mg}_2(\text{Si}_2\text{O}_2)$  y la gibbsita  $(\text{Al}(\text{OH})_3)$ .

Los resultados (figura 8) de la evaluación de enriquecimiento de la mena e indican la posibilidad de concentrar los elementos químicos que componen el intervalo granulométrico  $-2,0+1,0 \text{ mm}$  en diferentes fracciones de tamaño y de densidad; se puede obtener un producto denominado convenientemente *concentrado* compuesto por todas las fracciones granulométricas inferiores a  $0,4 \text{ mm}$  más las fracciones gruesas y pesadas [(i=3, j=4 ; i=4, j=4)] caracterizado por el alto contenido de níquel, cobalto y cromo, y otro producto denominado *colas del proceso* donde se concentran significativamente el magnesio y el aluminio. Esto puede contribuir a la diversificación del uso de la mena laterítica y la racionalidad en la explotación del recurso.

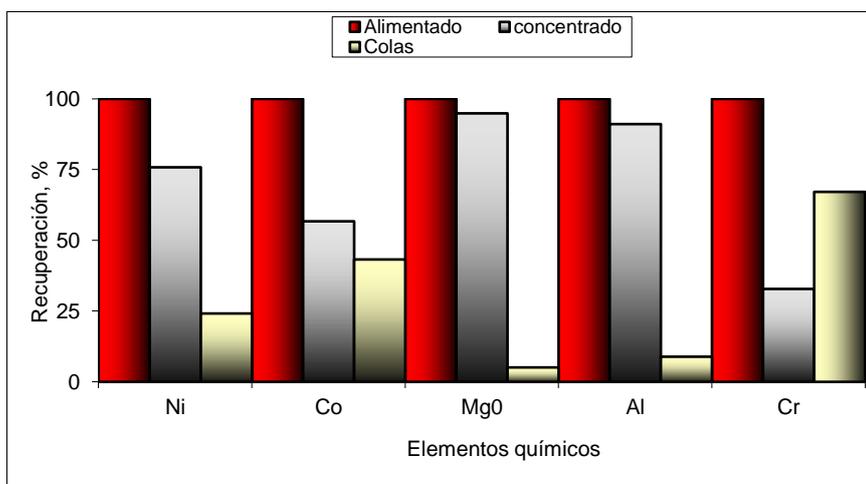


Figura 8. Resultados de la modelación del proceso de beneficio.

En cuanto a la distribución o recuperación de los elementos químicos fundamentales en los productos del beneficio, resulta atractivo el hecho de que en el producto colas del proceso formado por las fracciones de mayor grosor (-2,0+0,4 mm) y que presentan valores de densidad entre 2,4 y 2,8 g/cm<sup>3</sup> se obtienen considerables recuperaciones de cobalto y cromo con valores de 43,26 % y 67,15 % respectivamente.

#### 4. CONCLUSIONES

- El empleo del contraste que manifiestan la fracción granulométrica comprendida en el intervalo -2,0+0,074 mm de la mena laterítica respecto al diámetro y densidad de las partículas que la componen, permite la separación y concentración de los elementos químicos. Se puede obtener un producto comprendido en el intervalo granulométrico -2,0+0,4 mm y en un rango de densidad de 2,40 g/cm<sup>3</sup> a 2,80 g/cm<sup>3</sup> en el que se distribuye el 94,89 % y el 91,1 % de magnesio y aluminio respectivamente, lo que se puede utilizar como vía para mejorar la calidad de la mena de alimentación al proceso extractivo y a la vez aprovechar estos recursos para otros fines.

#### 5. REFERENCIAS

- AGEYI, G.; ROJAS, A. & HERNÁNDEZ, A. 2010: Distribución fraccional de metales y minerales en la laterita de balance del yacimiento Punta Gorda, Moa, Cuba *Minería y Geología*, 26 (4): 36-52.
- AGEYI, G. 2006: Distribución fraccional de las especies metálicas y mineralógicas de la mena niquelífera de un perfil del yacimiento Punta Gorda, Moa, Cuba Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. [Instituto Superior Minero Metalúrgico] Moa, Cuba. 92p
- ALMAGUER A. & ZAMARSKY, V. 1993: Estudio de la distribución del Fe, Ni y Co en los tamaños de granos que componen el perfil de las cortezas de intemperismo de las rocas ultrabásicas hasta su desarrollo laterítico y su relación con la mineralógica. *Minería y Geología*, 10(2): 17-24.
- ALMAGUER, A. 1995: Cortezas de intemperismo: algunas características de sus partículas finas. *Minería y Geología*, 12(1): 9-19.
- HERNÁNDEZ, A. 1997: Preparación húmeda de la mena laterítica, [Instituto Superior Minero Metalúrgico], Moa (Tesis doctoral): 94p.
- HERNÁNDEZ, A.; FALCÓN, J.; LEGRÁ, A.; TRUJILLO, R. & TOIRÁC, M. 2000: Análisis teórico del beneficio de la laterita. *Minería y Geología*, 27 (3-4): 73-78.

- HERNÁNDEZ, A; TRUJILLO, R & TOIRÁC, M, M, 2009: Separación y concentración de fases minerales en la mena laterítica. *Minería y Geología*, 25(4): 1-14.
- HERNÁNDEZ, A.; LEGRÁ, A.; TRUJILLO, R. & TOIRÁC, M. 2010: Beneficio de la mena laterítica actualidad y perspectivas. *Minería y Geología*, 26 (1): 76-95.
- PONCE, N. & CARRILLO, D. 1988: Mineralogía y composición sustancial de las muestras patrones de lateritas. *Serie Geológica*, 3: 75-82.
- ROJAS, A. 1995: Principales fases minerales portadores de níquel en los horizontes lateríticos, [Instituto Superior Minero Metalúrgico] Moa, (Tesis doctoral), 75p.
- ROJAS PURON, A.; OROZCO, G; VERA, O.; ARDERÍ, A. 2005: Caracterización mineralógica de los perfiles lateríticos del yacimiento Punta Gorda, I Convención Cubana de Ciencias de la Tierra (Memorias), La Habana, abril 2005, ISSN 0258 5979.
- MITROFANOV, K. A. 1980: Investigación de la capacidad de enriquecimiento de los minerales. Editorial Nedra, Moscú: 365p
- TIJONOV, O.N. 1990: Beneficio de minerales útiles en Asia, África y América Latina. Ed. Nedra, San Petersburgo, 260 p.
- TOKASHIKI, Y. HENTONA, M., SHIMO, L., ARACHCHI, P. 2003: Improvement of the successive selective dissolution procedure for the separation of birnessite, lithiophorite, and goethite in soil 311emperatu nodules, Soil Science Society American Journal, Division S,5, *Petrology* 67: 837-843.
- Valix, M. & Cheung, H. 2002: Study of phase transformation of laterite ores at high temperature. *Minerals Engineering*, 15: 607-612.
- VERA SARDIÑAS, O. 2001: Procedimiento para la determinación de las redes racionales de explotación de los yacimientos de níquel y cobalto en la región Moa, [Instituto Superior Minero Metalúrgico], Moa (Tesis doctoral), 111 p.

**Alberto Hernández Flores**, [ahflores@inor.ciiq.minem.cu](mailto:ahflores@inor.ciiq.minem.cu)

Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular Adjunto  
Centro de Ingeniería e Investigaciones Químicas. La Habana, Cuba

**George Agyei**, [geogeagyei@yahoo.com](mailto:geogeagyei@yahoo.com)

Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor  
Universidad de Minas y Tecnología, Tarkwa, Ghana

**Luis Arturo Rojas Purón**, [artrojaspuron@ismm.edu.cu](mailto:artrojaspuron@ismm.edu.cu)

Doctor en Ciencias Geológicas. Profesor Auxiliar.  
Departamento de Geología. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba

## **Efecto de la velocidad angular y la presión en el proceso de soldadura por fricción radial en una aleación de aluminio AA 5754**

Elís Efraín Guzmán-Romero  
Tomás H. Fernández-Columbié  
Dayanis Alcántara-Borges  
Isnel Rodríguez-González

### **Resumen**

El objetivo del presente estudio fue determinar la relación entre las transformaciones de fases ocurridas durante la soldadura por fricción radial de una aleación de aluminio AA 5754 de 12 mm de diámetro. El proceso se realizó en un torno 16 K 20 considerando para la unión parámetros de 1 200 y 1 400 rev/min con una presión de 0,9 y 1,9 MPa respectivamente. Se determinó que la temperatura de fricción disminuye en la medida que se incrementa el número de revoluciones, así como la variación metalúrgica tanto en la zona afectada termo-mecánicamente, como en la afectada térmicamente. Los perfiles de dureza demuestran el incremento por el efecto del flujo plástico, las variaciones metalúrgicas y la presencia de precipitados.

**Palabras clave:** soldadura; fricción rotativa; transformación de fases; microestructura; precipitados; aleación AA 5754.

## **Effect of angular velocity and pressure in radial friction welding of AA 5754 aluminum alloy**

### **Abstract**

The objective of this investigation is to determine the relation between the transformations of phases occurring during the rotational friction welding of AA 5754 12-mm-diameter aluminum alloys. The process was carried out using a 16 K 20 lathe based on joint parameters ranging between 1 200 and 1 400 rev/min with a pressure of 0,9 and 1,9 MPa, respectively. It was determined that the friction temperature decreases as the number of revolutions increases as well as the metallurgical variation both in the thermo-mechanically affected area and in the thermally affected area. The hardness profiles show the increase by the plastic flow effect, metallurgical variations and the existence of precipitates.

**Keywords:** welding; rotational friction; transformation of phases; micro-structure, precipitates, AA 5754 alloy.

## 1. INTRODUCCIÓN

La soldadura por fricción radial (o rotativa) tiene la finalidad de lograr uniones en materiales con perfiles cilíndricos que no pueden soldarse de forma convencional. Por las características de la soldadura, también se le conoce como un proceso de unión de dos piezas en estado sólido; es utilizado en muchas áreas de la industria manufacturera (Falla 2012).

Otros autores, entre los que se encuentran Longhurst (2010) y Weglowski (2011), consideran que la soldadura por fricción es un novedoso proceso de estado sólido que supera los procedimientos convencionales de soldadura por arco eléctrico, el mismo permite obtener uniones sanas sin provocar la fusión del material base, a temperaturas mucho menores que las producidas en los mencionados métodos convencionales. Se espera que las propiedades mecánicas de la junta mejoren con respecto a los procesos convencionales, ya que al soportar un ciclo térmico menos severo se reduce el deterioro de las propiedades mecánicas en la zona afectada por el calor de dichas aleaciones.

La soldadura por fricción radial es un proceso notablemente simple, la pieza gira y una onda de calor plastifica el metal circundante y realiza una unión transistorizada. La misma se realiza mediante tres funciones primarias: (1) calentamiento de la pieza (2) el movimiento de material para producir la unión y (3) la contención del metal caliente bajo la fricción (Colligan y Mishra 2008). La calefacción se genera por la fricción en rotación y por la deformación plástica entre las piezas. El calentamiento localizado plastifica el material y la rotación lleva al movimiento del frente a la parte de atrás de la sonda para realizar el cordón en la medida que el proceso avanza.

Durante el proceso, los parámetros de la soldadura combinados ejercen un efecto significativo en el modelo de flujo material y distribución de temperatura, mientras influye en la evolución de la microestructura del material, la formación y las propiedades mecánicas de la junta (Tra *et al.* 2010; Oosterkamp *et al.* 2004).

Zimmer *et al.* (2010) plantean que aunque se considera un procedimiento de soldadura de estado sólido, en algunas circunstancias puede producirse una película fundida en la cara interna, pese a ello, la soldadura final nunca presenta indicios de un estado fundido a causa del extenso trabajo en caliente que tiene lugar durante la etapa final del proceso.

Según Peel *et al.* (2003) en el conformado por deformación plástica, tanto la deformación interna del material como el rozamiento entre pieza y herramienta contribuyen a una generación de calor que se traduce en un aumento de la temperatura, al aplicar fuerza externa, como es el proceso

de deformación, provoca alta densidad de dislocaciones, lo cual favorece el aumento del límite elástico, en el que las dislocaciones lograrán endurecerlo y aumentar su resistencia a la deformación plástica.

El objetivo del trabajo es establecer el comportamiento microestructural de una aleación de aluminio expuesta al proceso de soldadura por fricción radial, a partir de la velocidad angular y la presión ejercida, realizada en un torno convencional 16 K 20.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Materiales empleados

La soldadura fue desarrollada en un torno 16 K 20, se emplearon probetas cilíndricas de 12 mm de diámetro, de una aleación de aluminio AA 5754. Para el proceso de soldadura por fricción radial o de torque, la pieza fija se instaló en un portabroca y la que rota en un plato autocentrante de tres muelas. En la figura 1 se muestra el montaje de las piezas para realizar la soldadura a tope, y en la tabla 1 aparece la composición química estándar de la aleación de aluminio AA 5754.

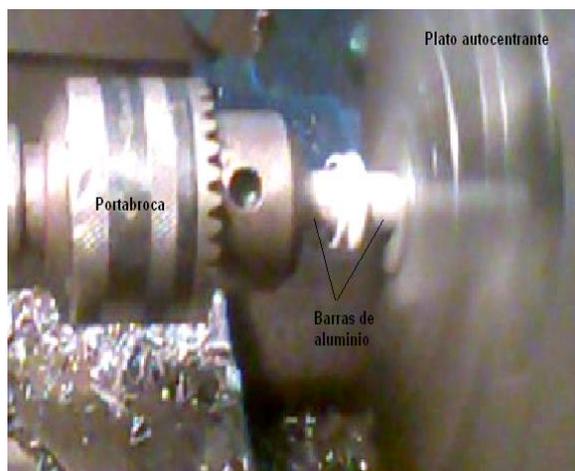


Figura 1. Instalación del proceso de soldadura a tope de la aleación de aluminio.

Tabla 1. Composición química estándar de la aleación de aluminio AA 5754. Fuente: ANSI/AWS A5.10-92.

Nomenclatura	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Mg	Ti	Zn	Al
AA 5754	0,40	0,40	0,10	0,40-4,90	0,30	2,6-3,6	0,15	0,25	Resto

Las aleaciones Al-Mg (AA 5XXX) con alto contenido de magnesio están clasificadas en el grupo cinco de las no tratables térmicamente, son suministradas en forma recocida y endurecida en frío. El elemento magnesio promueve el endurecimiento por trabajo en frío, reduciendo la energía de falla concentrada. Presentan normalmente una buena resistencia a la corrosión, pero debe tenerse cuidado durante el procesamiento para evitar

la formación continua de precipitados  $\beta$ - $Mg_2Al_3$  en los límites de grano, los cuales pueden promover la corrosión intergranular, criterio que ha sido reportado por Engler (2014).

## 2.2. Obtención de las uniones soldadas

Las uniones de soldadura por fricción radial en las barras de aluminio se obtuvieron variando el tiempo en la etapa de calentamiento y el avance del torno en la etapa de forjado, manteniendo constante la velocidad de rotación y la presión. En la tabla 2 se muestran los parámetros del proceso. Fue elaborado, mediante un diseño factorial  $N=2K$  (N-es el número de experimentos y K es el número de variables, siendo 2 el número de niveles).

Las probetas fueron sometidas a proceso de soldadura según los diferentes niveles establecidos en la tabla 1, el tiempo de duración de las soldaduras fue de 100 s.

Tabla 2. Parámetros de soldadura

Niveles	Variables		Salida
	Número rev (rev/min)	Presión (MPa)	Temperatura de fricción (°C)
(-1)	1 200	0,9	
(+1)	1 400	1,9	
Ensayo			
1	1 200	0,9	Tf <sub>1</sub>
2	1 400	0,9	Tf <sub>2</sub>
3	1 200	1,9	Tf <sub>3</sub>
4	1 400	1,9	Tf <sub>4</sub>

## 2.3. Microestructura de la aleación

En el análisis microestructural se empleó un microscopio óptico. Para revelar las estructuras, luego de la preparación metalográfica de las muestras, se tuvo en cuenta procedimientos como: corte, desbaste y pulido, se realizó el ataque químico para ello se empleó una solución de 15 ml de HCl concentrado más 10 ml de HF al 48 %, diluido en 85 ml de agua desmineralizada. La figura 2 se corresponde con la aleación de aluminio AA 5754.

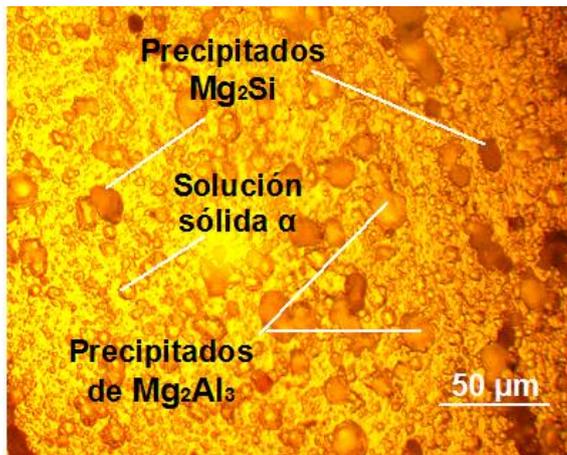


Figura 2. Microestructura de la aleación de aluminio AA 5754.

La microestructura presenta cristales pequeños y una red continua de partículas finas del compuesto intermetálico  $Mg_2Al_3$ , llamada fase  $\beta$ , en los límites de grano. Se observan granos equiaxiales de aluminio, predominantemente. Ocurre la precipitación en el interior de los granos. En los límites de granos se llegan a formar largos precipitados de  $Mg_2Al_3$ .

#### 2.4. Ensayo de microdureza

Para la medición de la microdureza se utilizó un microdurómetro, con objetivo acromático acoplado y compensación libre trinocular de tubo inclinado a  $30^\circ$ . Las superficies de las probetas se prepararon de la misma manera que para el análisis microestructural, desbaste y pulido, la carga aplicada fue de 0,49 N, en un tiempo de 15 s, replicando tres veces la medición para tomar los valores medios de la misma. El indentador empleado fue el de pirámide de diamante, con un ángulo de  $136^\circ$  según la ASTM E 92 - 82. En la figura 3 se muestran las zonas donde se realizó el análisis de dureza.

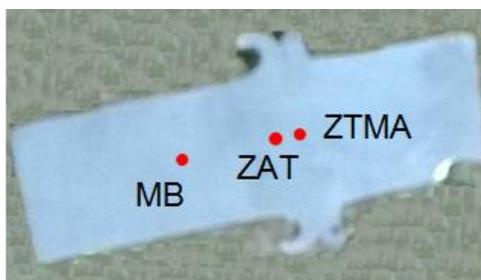


Figura 3. Puntos de medición de durezas en las diferentes zonas.

**Material Base (MB):** zona del material lo suficientemente alejado de la junta que no es afectado por la deformación plástica o el ciclo térmico, mantiene sus propiedades mecánicas o microestructura.

**Zona Termo-Mecánicamente Afectada (ZTMA):** zona única para el proceso de soldadura por fricción radial, en ella tiene influencia la deformación plástica y el calentamiento del material en las propiedades mecánicas y en la microestructura, es posible que la deformación plástica no sea suficiente para que ocurra recristalización dinámica de la microestructura, adicionalmente, en esta región puede presentarse crecimiento o disolución de precipitados.

**Zona afectada térmicamente (ZAT):** zona del material que no sufre ninguna deformación plástica, pero que debido al calor generado durante el proceso, puede sufrir cambios microestructurales y en sus propiedades mecánicas.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Composición química

De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis espectral, como se muestra en la tabla 3, los elementos presentes en la composición química se encuentran dentro de los intervalos especificados, además la presencia de elementos no especificados es inferior al valor máximo permitido. El elemento magnesio permite una mayor deformación, pero menor dureza ya que este elemento favorece y acelera la precipitación.

Tabla 3. Resultados del análisis de la composición química de la aleación AA 5754, en %

Nomenclatura	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Mg	Ti	Zn	Al
AA 5754	0,28	0,30	0,10	0,52	0,26	3,25	0,15	0,15	Resto

#### 3.2. Resultados de las temperaturas del proceso

Los resultados obtenidos en las temperaturas (tabla 4) con un pirómetro digital, en dependencia de cada variación de los parámetros de soldadura, con un 53 % de la temperatura de fusión de la aleación de aluminio, el máximo valor se obtiene al disminuir la velocidad de rotación, así mismo, la menor fuerza axial sobre la junta también ejerce un ligero efecto en el pico de temperatura.

Tabla 4. Resultados de los parámetros de soldadura

Niveles	Variables		Salida
	Número rev (rev/min)	Presión (MPa)	Temperatura de fricción (°C)
(-1)	1 200	0,9	
(+1)	1 400	1,9	
Ensayo			
1	1 200	0,9	350
2	1 400	0,9	338
3	1 200	1,9	348
4	1 400	1,9	318

Cuando la temperatura aumenta, debido a la fricción y sobrepasa la temperatura de la precipitación, ocurre un sobre envejecimiento que causa una coalescencia de los precipitados finos en la estructura de la aleación y reduce la dureza en esta zona. La resistencia aumenta con el aumento de velocidad lo cual está correspondencia con un menor calor aportado y un ciclo térmico menos prolongado. Esto puede coincidir con una mayor dureza de la zona térmicamente afectada y posiblemente con una menor alteración metalúrgica.

### 3.3. Análisis microestructural de la ZTMA

La evolución de la microestructura durante el proceso de soldadura depende de diferentes parámetros, la composición química y tratamientos térmicos del o los materiales a unir. Estos parámetros también definen la entrada de calor y el tamaño de las zonas afectadas en la junta, los tratamientos térmicos definen la microestructura inicial del material mientras que la composición química y la microestructura permiten definir los mecanismos de endurecimiento y crecimiento o disolución de precipitados.

En la figura 4 se muestra la zona térmomecánicamente afectada (ZTMA) y la zona afectada térmicamente (ZAT) para la condición de 1 200 rev/min y presión de 0,9 MPa.

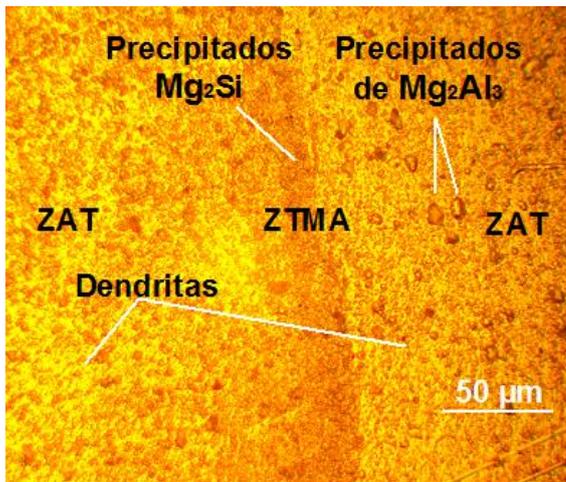


Figura 4. Microestructura para 1 200 rev/min y presión de 0,9 MPa.

La microestructura de la zona central (ZTMA) muestra granos muy finos, lo cual puede ser producto de una recristalización dinámica, se observa una reorientación de los granos originales y cierto grado de recristalización. En la otra zona (ZAT) el efecto térmico produjo una disminución en el tamaño de los granos, pero no como en la ZTMA.

La microestructura está compuesta por precipitados de  $Mg_2Si$  y precipitados de  $Mg_2Al_3$ , así como por segregaciones dendríticas en ambas ZAT de la unión. Lo anterior se debe principalmente a las variaciones en la temperatura dentro de ésta zona.

### 3.3.1. Análisis microestructural para la condición de 1 400 rev/min y 0,9 MPA

En la figura 5 se muestra el comportamiento microestructural obtenido para la condición de 1 400 rev/min y 0,9 MPA.

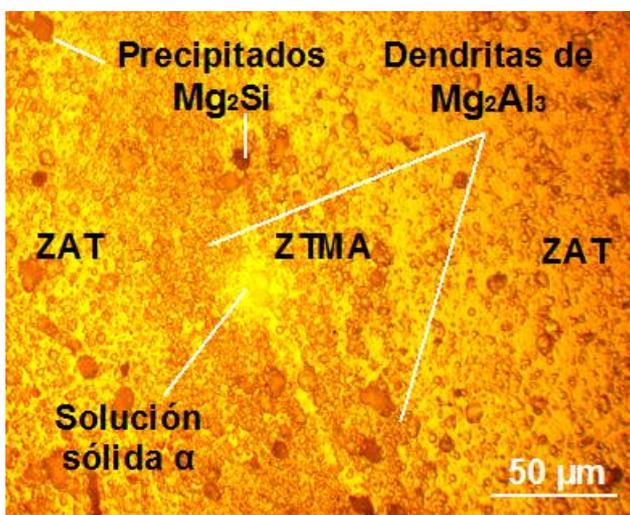


Figura 5. Microestructura para 1 400 rev/min y 0,9 MPA

En la zona afectada térmicamente (ZAT) se presentan las regiones de transición de a la zona termomecánicamente afectada (ZTMA) (ver figura 5). Se aprecian variaciones abruptas en la microestructura ya que se observa el paso de una región con distribución y tamaño de los granos similar al del material base, a una región con tamaño de grano fino, comparable con el que se presenta en la zona de mezcla. La estructura de la zona de fusión en la zona soldada está constituida por una matriz de solución sólida  $\alpha$  con segregaciones dendríticas de  $MgAl$ , con dispersiones de precipitados de  $Mg_2Al_3$  producto de la solidificación y por acción del calor transmitido por las sucesivas capas de metal fundido.

### 3.3.2. Análisis microestructural para la condición de 1 200 rev/min y 1,9 MPA

La figura 6 se corresponde con el análisis de la ZTMA y la ZAT.

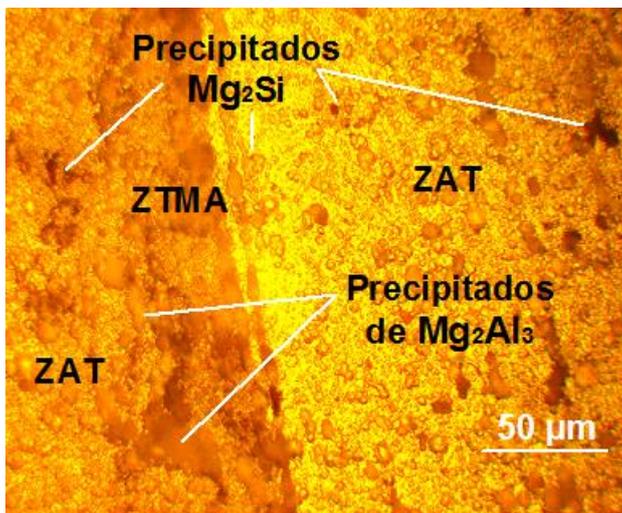


Figura 6. Microestructura para 1 200 rev/min y 1,9 MPA

En la figura 6 se observa una la matriz altamente texturada del material base y los granos recristalizados en la zona afectada térmicamente (ZAT), en la ZTMA se aprecia a partir del límite o interfase con los granos que conforman el cordón de la unión. Se puede apreciar el crecimiento de los precipitados de  $Mg_2Al_3$ , cuyos cristales se distinguen de las formas típicas encontradas en el material base. La primera zona está conformada por el grupo de granos ubicados en ambos extremos del ancho de cordón, resultados que coinciden con Mishra y Mahoney (2007).

El comportamiento obtenido se debe a la ubicación de esta zona, que es la primera en solidificar, por encontrarse más cerca al medio ambiente y segundo porque parte del calor contenido por el metal fundido se disipa a través del material base que se encuentra a mucho menor temperatura que

el charco de soldadura, criterio también planteado por Tokaji y Uematsu (2009).

La solubilidad del compuesto  $Mg_2Si$ , en aluminio, varía en función de la temperatura, por un lado y del exceso de magnesio, por otro.

### 3.3.3. Análisis microestructural para la condición de 1 400 rev/min y 1,9 MPA

Se analiza la microestructura de la sección transversal de la región soldada para la condición de 1 400 rev/min y 1,9 MPA, donde se observa la ZTMA y la ZAT. La figura 7 muestra este comportamiento.

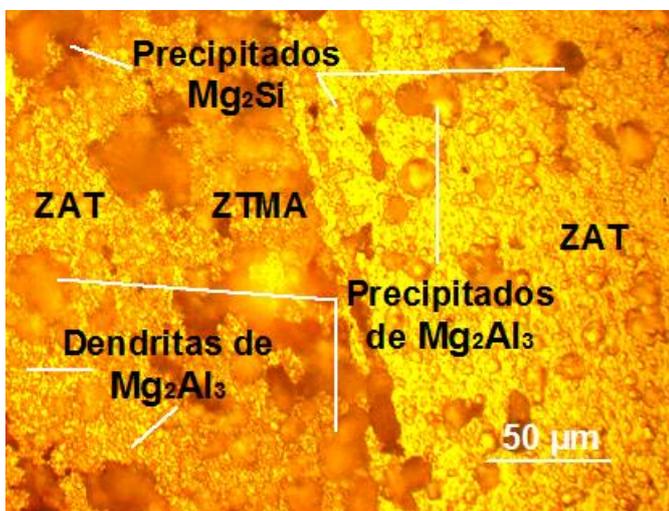


Figura 7. Microestructura para 1 400 rev/min y 1,9 MPA

Se observa (figura 7) una zona de transición o zona afectada térmicamente, donde se ha formado segregaciones dendríticas. Además ha sido afectada por el cambio térmico y una deformación plástica con menos intensidad que en la zona termomecánicamente afectada (ZTMA). La ZTMA se observa diferenciada por el reducido tamaño de grano, donde existe la presencia de precipitados de  $Mg_2Al_3$  de mayor tamaño que los observados en las otras condiciones de soldadura.

La causa de este tamaño en el tipo de grano de esa zona que aparecen como consecuencia de dos eventos simultáneos que se presentan; el primero se asocia a la elevada deformación plástica, que se genera en el material por el flujo plástico a que es sometido, situación ésta que promueve una alta velocidad de nucleación de los granos recrystalizados; la segunda, se relaciona con que la temperatura alcanzada en dicha zona resulta relativamente baja con lo cual la velocidad de crecimiento de los núcleos disminuye. Esta combinación de efectos resulta en el pequeño tamaño de grano resultante que se obtiene en tal zona de la soldadura.

Se puede encontrar la presencia de precipitados posiblemente de AlMgSi y AlMgSiFe, los cuales aumentan de tamaño luego de realizada la soldadura, también se encontraron, en la zona de la unión, tamaños de granos más pequeños en comparación a la zona afectada térmicamente producto de una recristalización y que la dureza es mayor en la zona de la unión y varía al alejarse de la misma, pero sin sobrepasar el máximo de dureza en la unión, aspecto que fue reflejado por Seshagirao *et al.* (2015) quienes expusieron que la formación de diversas estructuras durante el proceso de fricción se debe al efecto de la presión.

Se ha encontrado, de acuerdo con Peel *et al.* (2003), que la mayoría de las aleaciones aluminio-magnesio no son endurecibles por precipitación, pero en el caso de la aleación AA 5754 se presenta un endurecimiento de este tipo debido a la presencia del silicio.

### 3.4. Análisis de la microdureza

En la tabla 5 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de dureza realizados en las diferentes zonas del proceso de soldadura por fricción rotativa de la aleación AA 5754. Los perfiles de dureza fueron realizados para las diferentes condiciones.

Tabla 5. Durezas realizadas en las uniones

Probeta	Número rev (rev/min)	Presión (MPa)	Dureza MB (HV)	Dureza ZAT (HV)	Dureza ZTMA (HV)
1	1 200	0,9	55	64	69
2	1 400	0,9	55	57	60
3	1 200	1,9	55	62	64
4	1 400	1,9	55	54	58

Se puede observar la variación de la dureza que experimentan las uniones soldadas, de las probetas, con diferentes velocidades de rotación y diferentes presiones. Partiendo desde el metal base, la dureza se reduce más en la ZAT con respecto a la ZTMA donde presenta un ligero incremento cerca de la periferia. Para la condición de soldadura de 1 400 rev/min y 1,9 MPa, se indica una ligera tendencia a la disminución de la microdureza por el incremento en la velocidad de rotación.

Los perfiles de microdureza de las zonas soldadas (ZTMA), en todos los casos mostraron valores superiores, como resultado del endurecimiento, por precipitación, que se produce en la aleación debido a la presencia del silicio. Esta zona presenta una estructura de grano más fino, como resultado del rápido enfriamiento del baño de soldadura.

#### 4. CONCLUSIONES

- En la medida que se incrementa la velocidad de soldadura por fricción de la aleación de aluminio AA 5754, existe menor calor de aporte y un ciclo térmico menos prolongado, pero se produce una disminución en el tamaño del grano.
- El análisis microestructural permitió identificar que independientemente de los parámetros de soldadura, empleados en el proceso y por la temperatura de fricción obtenida, existe la presencia de precipitados como el  $Mg_2Si$  y el  $Mg_2Al_3$  que incrementan la dureza.
- Los ensayos de microdureza revelaron que en la medida que se pasa de la ZTMA a la ZAT, la misma se incrementa, debido a la deformación plástica que se genera en el material por el flujo plástico y por las variaciones metalúrgicas.

#### 5. REFERENCIAS

ANSI/AWS A5.10-92.

ASTM E 92 – 82.

COLLIGAN, K.; MISHRA, R. 2008: A conceptual model for the process variables related to heat generation in friction stir welding of aluminum. *Scripta Materialia*. 58(5): 327-331.

ENGLER, O. 2014: Texture and anisotropy in the Al-Mg alloy AA 5005-Part I: Texture evolution during rolling and recrystallization. *Materials Science and Engineering*. A (618): 654-662.

FALLA, R.; QUINTANA, K.; FRANCO, F.; SÁNCHEZ, N. 2012: Propiedades mecánicas de soldadura por fricción agitación de punto en aleación de aluminio AA6063-T5. *Prospect*. 10 (1): 79-84.

LONGHURST, A. 2010: Torque control of friction stir welding for manufacturing and automation". *Int J Adv Manuf Technol*. 12 (5): 905-913.

MISHRA, R.; MAHONEY, M. 2007: Friction Stir Welding and Processing. Ohio: ASM International. p. 333.

OOSTERKAMP, A.; OOSTERKAMP, L.; NORDEIDE, A. 2004: Kissing bond' phenomena in solid-state welds of aluminum alloys. *Welding Journal*, 83 (8): 225-S.

PEEL, M.; STEUWER, A.; PREUSS, M.; WITHERS, P. 2003: Microstructure, mechanical properties and residual stresses as a function of welding speed in aluminium AA5083 friction stir welds. *Acta Materialia*. 51(16): 4791-4801.

- SESHAGIRIRAO, B.; SIVARAMAKRISHNA, V.; SAIKRISHNAPRASAD, G. 2015: Experimental Investigation of Rotary Friction Welding Parameters of Aluminum (H-30) and Mild Steel (AISI-1040). *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 4(5): 2920-2925.
- TOKAJI, K.; UEMATSU, Y. 2009. Comparison of fatigue behavior between resistance spot and friction stir spot welded aluminum alloy sheets. *Science and Technology of Welding and Joining* 14(1): 62-68.
- TRA, T.; SEINO, M.; SAKAGUCHI, M.; OKAZAKI, M. 2010: Fatigue crack propagation behavior relevant to inhomogeneous microstructure of friction stir welding AA6063-T5. *Journal of solid mechanics and materials engineering* 4(6): 840-848.
- WEGLOWSKI, A. 2011. Friction stir processing - analysis of the process. *Archives of metallurgy and materials* 56 (11): 779-788.
- ZIMMER, S.; LANGLOIS, L.; LAYE, J.; BIGOT, R. 2010. Experimental investigation of the influence of the FSW plunge processing parameters on the maximum generated force and torque. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 47(1-4): 201-215.

**Elís Efraín Guzmán-Romero**, [eguzman@ismm.edu.cu](mailto:eguzman@ismm.edu.cu)

Profesor asistente. Especialista en Diseño y Mecánica. Departamento de Mecánica  
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba

**Tomás Fernández-Columbié**, [tfernandez@ismm.edu.cu](mailto: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](mailto:dalcantara@ismm.edu.cu)

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

**Isnel Rodríguez-González**, [irgonzalez@ismm.edu.cu](mailto:irgonzalez@ismm.edu.cu)

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

## Análisis del intercambio de calor e incrustaciones en un sistema de enfriadores de ácido sulfhídrico

Andres A. Sánchez-Escalona  
Ever Góngora-Leyva  
Carlos Zalazar-Oliva  
Edel Álvarez-Hernández

### Resumen

Los enfriadores de ácido sulfhídrico (intercambiadores de calor de tubo y coraza enchaquetados) tienen la función de enfriar desde 416,15 K hasta 310,15 K el gas producido, así como de separar el azufre arrastrado por los gases que salen de la torre del reactor. Mediante el método de experimentación pasiva se realizó la investigación en un banco de enfriadores en operaciones, con el objetivo determinar los coeficientes de transferencia de calor y el grado de incrustaciones basado en su resistencia térmica. Se corroboró que la operación de estos equipos fuera de los parámetros de diseño provoca incremento de la temperatura del gas a la salida y del arrastre de azufre en estado líquido. La pérdida de eficiencia está influenciada por la presencia de elementos incrustantes en el fluido, que provoca variaciones en el coeficiente global de transferencia de calor. Se estableció la tendencia lineal de resistencia térmica de las incrustaciones en función del tiempo para tres valores de flujo de gas.

**Palabras clave:** ácido sulfhídrico; intercambiador de calor; enchaquetado; coeficientes de transferencia de calor; incrustaciones.

## Heat exchange and fouling analysis on a set of hydrogen sulphide gas coolers

### Abstract

The sulphide acid coolers are tube and shell jacketed heat exchangers designed to cool down the produced gas from 416,15 K to 310,15 K in addition to separate the sulphur carried over by the outlet gas from the reactor tower. The investigation was carried out by applying the passive experimentation process in an online cooler set in order to determine the heat transfer rates and fouling based on heat resistance. It was corroborated that the operation of this equipment outside design parameters increases outlet gas temperature and liquid sulphur carryovers. Efficiency loss is caused by fouling elements in the fluid, which results in changes in the overall heat transfer rate. The linear tendency of the fouling heat resistance based on time for three gas flowrates.

**Keywords:** hydrogen sulfide; heat exchanger; jacketed; heat transfer rates; fouling.

## 1. INTRODUCCIÓN

El ácido sulfhídrico es un gas inflamable y nocivo para la salud, utilizado en la producción de compuestos químicos y en el procesamiento de minerales. En la minería y la metalurgia se emplea para el "envenenamiento" y la activación de catalizadores, en el tratamiento de superficies metálicas, en la producción de agua pesada para la industria nuclear, así como en la producción de sulfuros metálicos y purificación del níquel, manganeso, ácido clorhídrico y sulfúrico (Chou *et al.* 2014; Unitel 2016).

Según Unitel (2016), la vía común para producir ácido sulfhídrico con alta pureza es hacer reaccionar azufre líquido con hidrógeno gaseoso dentro de un reactor y su torre de enfriamiento. Luego, en el banco de enfriadores de ácido sulfhídrico se disminuye la temperatura del gas producido desde 416,15 K hasta 310,15 K y se separa el azufre remanente arrastrado por los gases que salen de la torre del reactor.

La operación de estos intercambiadores de calor fuera de los parámetros de diseño provoca el aumento de la temperatura del ácido sulfhídrico a la salida de los equipos, e incrementa los arrastres de azufre que causan tupiciones, obstrucciones de válvulas y daño a los compresores, recipientes y tuberías instalados corriente-abajo.

Younger (2004) y Kimtantas & Taylor (2016), quienes emplean el término "condensadores de azufre" para describir equipos con una función semejante dentro del proceso Claus (recuperación de azufre a partir de la conversión del ácido sulfhídrico), plantean que las desviaciones de los parámetros normales de operación provocan que el azufre permanezca suspendido en la fase gaseosa como una neblina, que fluye a través de los intercambiadores sin separarse, reduciendo la capacidad general de recuperación del banco.

Otros autores han evaluado la influencia de las incrustaciones en la pérdida de eficiencia en intercambiadores de calor, mediante mediciones de los parámetros fundamentales que intervienen en el proceso de intercambio térmico y determinación de los coeficientes globales de transferencia de calor (Torres-Tamayo *et al.* 2011; Al-Hallaf 2013; Ardsomang *et al.* 2013; Linge *et al.* 2016). Sin embargo, los resultados obtenidos en los estudios precedentes no se adecuan a intercambiadores de calor enchaquetados con ciclos cortos de trabajo (8 h).

En tal sentido, esta investigación tiene como objetivo determinar los coeficientes de transferencia de calor de los intercambiadores y el grado de incrustaciones, para un banco de enfriadores de ácido sulfhídrico. Su

incidencia es notable en el proceso de producción de sulfuros mixtos de níquel y cobalto.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. Metodología**

Para el análisis del proceso de enfriamiento de ácido sulfhídrico, en intercambiadores de tubos y coraza enchaquetados, se realizó el estudio del comportamiento de las variables que intervienen en el proceso mediante la experimentación pasiva. La comprobación de los intercambiadores se efectuó mediante los procedimientos de cálculo convencionales: Diferencia de Temperaturas Media Logarítmica (DTML) y Efectividad – Número de Unidades de Transferencia ( $\epsilon$ -NTU).

Para simplificación de los cálculos se hacen los siguientes supuestos:

- Los intercambiadores operan en condiciones de estado estacionario.
- Los coeficientes globales de transferencia de calor entre los fluidos se mantienen constantes a través del intercambiador.
- Las propiedades termo-físicas de los fluidos no varían.
- No existen cambios de fase.
- Se desprecia la transferencia de calor hacia el medio ambiente.
- Los cambios de energía potencial y cinética son despreciables.
- La transferencia de calor por conducción longitudinal en los fluidos, y en la pared de los tubos y de la coraza, es insignificante.
- La temperatura de los fluidos es uniforme en cada sección transversal del intercambiador.
- En un mismo turno de operación el flujo de Ácido sulfhídrico es constante.
- Las mediciones del flujo de agua que circula del lado de los tubos y del lado de la chaqueta se efectuaron en ramales comunes, por lo que se asume la mitad del flujo para cada intercambiador suponiendo que las caídas de presión en los equipos son similares.

### **2.2. Descripción de la instalación**

El sistema de enfriamiento de Ácido sulfhídrico estudiado está compuesto por cuatro intercambiadores de calor de tubos y coraza enchaquetados. Cada pareja (dos equipos en serie) fue diseñada para transferir 138 kW de calor, a través de un área de 49,2 m<sup>2</sup>. Los equipos poseen un aislamiento térmico adecuado.

En cada unidad el Ácido sulfhídrico gaseoso hace su recorrido del lado de la coraza, en un solo pase, mientras que el agua circula del lado de los tubos, con cuatro pases, y por la chaqueta de la coraza (Figura 1).

Cada pareja de intercambiadores opera 8 h en modo de enfriamiento del ácido sulfhídrico, y luego se sacan de operación para suministrarle vapor (por el lado de los tubos y la chaqueta de la coraza) durante 4 o 6 h con el objetivo de eliminar el Azufre incrustado en su interior. Mientras una pareja opera en el ciclo de enfriamiento la otra trabaja en modo drenaje de Azufre, y viceversa.

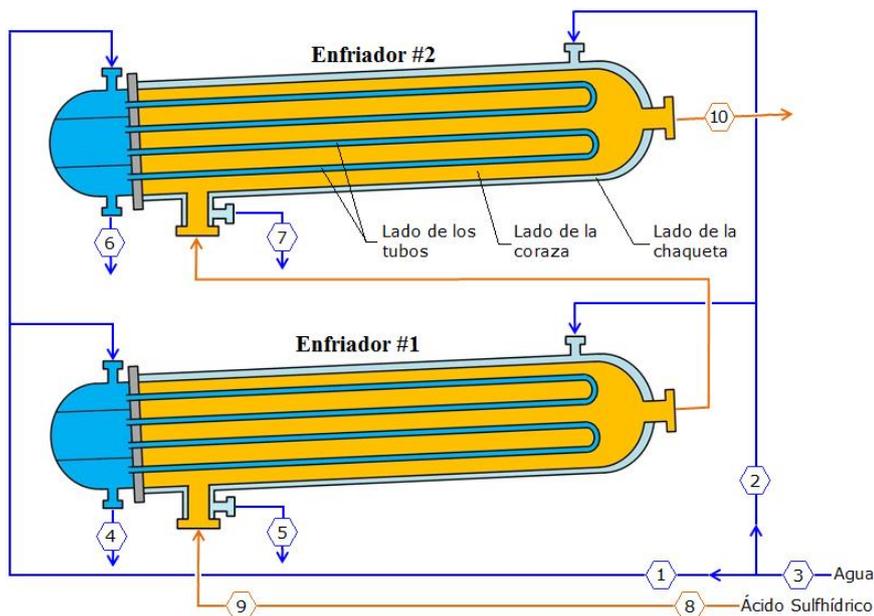


Figura 1. Esquema de una pareja de enfriadores de Ácido sulfhídrico y puntos de medición.

### 2.3. Técnica experimental

Debido al régimen de producción ininterrumpido en que se encuentra el objeto de estudio fue necesario aplicar un experimento pasivo (diseño de investigación no experimental del tipo longitudinal, de tendencia), donde se observa el diapasón de variación de las variables controladas que identifican el proceso.

Las mediciones de los parámetros fundamentales que intervienen en el proceso de intercambio térmico que ocurre en los enfriadores de Ácido sulfhídrico se realizaron sin la manipulación de las variables, analizando los fenómenos de transferencia de calor como se manifiestan en su contexto.

A continuación se listan los parámetros registrados (puntos de medición según la Figura 1):

1. Flujo volumétrico de agua alimentado del lado de los tubos

2. Flujo volumétrico de agua alimentado del lado de la chaqueta
3. Temperatura del agua a la entrada del banco de enfriadores
4. Temperatura del agua por los tubos a la salida del enfriador #1
5. Temperatura del agua por la chaqueta a la salida del enfriador#1
6. Temperatura del agua por los tubos a la salida del enfriador #2
7. Temperatura del agua por la chaqueta a la salida del enfriador#2
8. Flujo másico de ácido sulfhídrico alimentado a los enfriadores
9. Temperatura del ácido sulfhídrico a la entrada del enfriador #1
10. Temperatura del ácido sulfhídrico a la salida del enfriador #2

Los instrumentos correspondientes y sus características técnicas son:

- Temperatura del agua y del ácido sulfhídrico: termopozos y termómetros bimetálicos industriales Ashcroft.
- Flujo de agua: caudalímetro ultrasónico Proline Prosonic Flow 93T.
- Flujo de ácido sulfhídrico: señal de proceso que se envía a un PLC Siemens S7-400 y mediante Citect SCADA 7.10 la variable se almacena y se muestra en el ordenador del panel de control.

En la experimentación se ejecutaron tres corridas en días alternos, durante 8 h a partir de la puesta en funcionamiento de una misma pareja en modo de enfriamiento. Durante cada ciclo se ejecutaron 20 mediciones. Para garantizar la validez de los experimentos y disminuir los errores de observación se efectuaron tres réplicas.

#### 2.4. Síntesis del procedimiento de cálculo

Para la comprobación del funcionamiento de los enfriadores de Ácido sulfhídrico estudiados se empleó el método de DTML, sugerido cuando se conocen las temperaturas de entrada y de salida de los fluidos (TEMA 2007; Kakaç & Liu 2002; Kerner 2011; Torres-Tamayo *et al.* 2011; Ardsomang *et al.* 2013).

Este método, representado mediante la ecuación 1, permite diseñar o evaluar el funcionamiento de los intercambiadores de calor.

$$Q = A \cdot U \cdot \Delta T_{mi} \cdot F \quad (1)$$

Como en la instalación no se registra la temperatura del gas a la salida del enfriador #1, se realiza un balance de masa y energía, según muestra la ecuación 2.

$$T_{g1} = T_{g0} - \left[ \frac{\dot{m}_{a1} \cdot Cp_{a1} \cdot (T_{a1} - T_{a0}) + \dot{m}_{a'1} \cdot Cp_{a'1} \cdot (T_{a'1} - T_{a0})}{\dot{m}_g \cdot Cp_{g1}} \right] \quad (2)$$

De forma análoga, la temperatura del gas a la salida del enfriador #2 se comprueba mediante la ecuación 3.

$$T_{g2} = T_{g1} - \left[ \frac{\dot{m}_{a2} \cdot Cp_{a2} \cdot (T_{a2} - T_{a0}) + \dot{m}_{a'2} \cdot Cp_{a'2} \cdot (T_{a'2} - T_{a0})}{\dot{m}_g \cdot Cp_{g2}} \right] \quad (3)$$

A partir de las temperaturas, el calor transferido en cada enfriador se determina mediante las expresiones 4 y 5.

$$Q_1 = \dot{m}_g \cdot Cp_{g1} \cdot (T_{g0} - T_{g1}) \quad (4)$$

$$Q_2 = \dot{m}_g \cdot Cp_{g2} \cdot (T_{g1} - T_{g2}) \quad (5)$$

Los coeficientes de transferencia de calor actuales se pueden calcular mediante la ecuación 6, obtenida al despejar en la ecuación 1. En el caso de intercambiadores con tres fluidos y dos vías principales de intercambio térmico se determinan dos coeficientes globales de transferencia (Peigné *et al.* 2013; Ghiwala & Matawala 2014; Saurabh *et al.* 2016).

$$U_{actual} = \frac{Q}{A \cdot \Delta T_{ml} \cdot F} \quad (6)$$

Las expresiones 7 y 8 se emplean para la determinación teórica de los coeficientes globales de transferencia en intercambiadores de calor, asumiendo que están exentos de impurezas (Kakaç & Liu 2002; Kerner 2011; Ghiwala & Matawala 2014).

Para el intercambio de calor tubos-coraza:

$$U_{limpio(tub-cor)} = \left[ \frac{d_e}{d_i \cdot h_a} + \frac{d_e \cdot \ln(d_e / d_i)}{2 \cdot k_{tubo}} + \frac{1}{h_g} \right]^{-1} \quad (7)$$

Para el intercambio de calor coraza-chaqueta:

$$U_{limpio(cor-chq)} = \left[ \frac{1}{h_g} + \frac{D_i \cdot \ln(D_e / D_i)}{2 \cdot k_{coraza}} + \frac{D_i}{D_e \cdot h_{a'}} \right]^{-1} \quad (8)$$

Los coeficientes individuales de transferencia de calor ( $h_a$ ,  $h_g$  y  $h_{a'}$ ) se calcularon, respectivamente, de la siguiente manera:

- Lado de los tubos: Nusselt determinado mediante las ecuaciones de Sieder & Tate (Kakaç & Liu 2002; Radulescu *et al.* 2015).
- Lado de la coraza: método de Taborek, admitido como más preciso, confiable y completo de la literatura de libre acceso (Thome 2010).
- Lado de la chaqueta (anillo exterior): Nusselt según correlación sugerida por Ghiwala & Matawala (2014) para flujo laminar.

Basado en el método de la  $\varepsilon$ -NTU, la efectividad térmica total de un intercambiador se define como la proporción entre la magnitud real de transferencia de calor y la máxima transferencia de calor posible (Kakaç & Liu 2002). Por lo tanto, la eficiencia térmica de los enfriadores de Ácido sulfhídrico, donde intervienen tres fluidos, se determina mediante la ecuación 9 (Peigné *et al.* 2013).

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_g \cdot C_{p_g} \cdot \Delta T_g}{C_{\min(\text{tub-cor})} \cdot (T_{g0} - T_{a0}) + C_{\min(\text{cor-chq})} \cdot (T_{g0} - T_{a0})} \quad (9)$$

Finalmente, los valores de resistencia térmica de las incrustaciones se estimaron empleando la expresión 10 (Kakaç & Liu 2002; Kerner 2011; Torres-Tamayo *et al.* 2011).

$$R_f = \frac{1}{U_{actual}} - \frac{1}{U_{limpio}} \quad (10)$$

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Evaluación de los parámetros de operación

El flujo de agua alimentado a los intercambiadores representó entre un 53,5 y 56,6 % del valor de diseño (2,974 kg/s). Los restantes parámetros de entrada se encuentran dentro de los valores prefijados.

La temperatura del Ácido sulfhídrico gaseoso a la salida del banco de enfriadores nunca alcanzó el valor establecido por diseño (310,15 K). Sin embargo, mientras mayor es el flujo másico del gas menor es su

temperatura a la salida de los intercambiadores, aunque ello repercute negativamente en la eficiencia de separación del Azufre.

La temperatura del agua a la salida del enfriador #1 excedió los 318,15 K . Por encima de esta cifra la formación de incrustaciones introducidas por el agua se duplica (Kakaç & Liu 2002; Mukherjee 2004). Esta tendencia fue menos acentuada en el enfriador #2.

### 3.2. Intercambio térmico

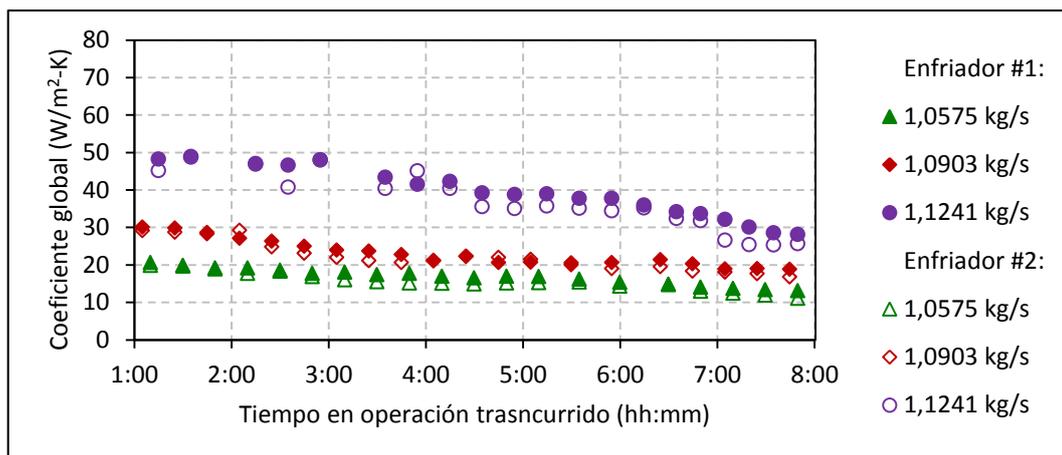
El calor total intercambiado en la pareja de enfriadores osciló entre 52 y 105 kW , inferior a lo especificado por diseño (138 kW).

La mayor transferencia de energía térmica tuvo lugar en el enfriador #1, con valores que oscilaron entre 56,2 y 72,2 % del calor total intercambiado. El mayor intercambio de calor en la primera etapa se debe principalmente a una mayor diferencia media de temperaturas.

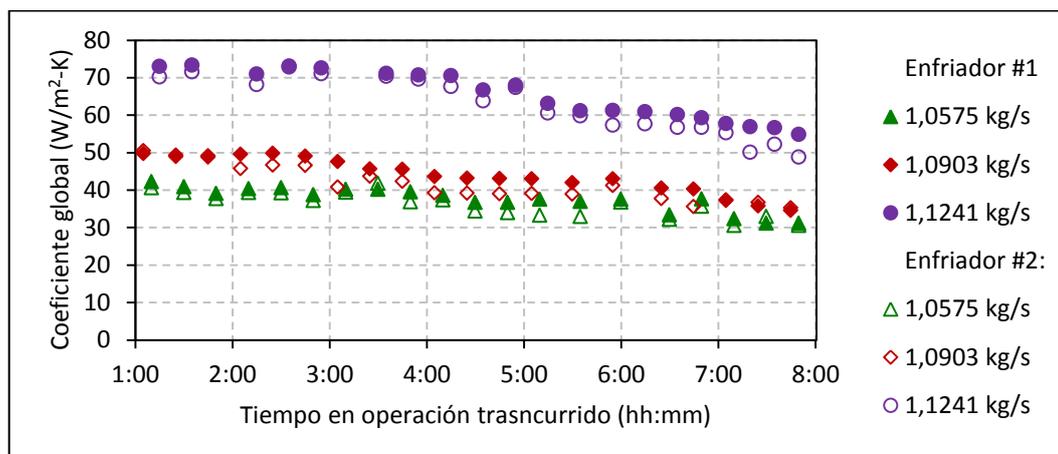
Mukherjee (2004) analizó un intercambiador de corazas múltiples con arreglo serie/paralelo y determinó que el 76 % de la carga térmica se transfiere en la primera etapa, mientras que el otro 24 % se transfiere en la segunda. Sus resultados se aproximan a los del presente estudio.

### 3.3. Coeficientes de transferencia de calor

Los coeficientes globales de transferencia de calor determinados están dentro del rango de valores preliminares dado por Kakaç & Liu (2002): 10 a 250 W/(m<sup>2</sup>·K) para el intercambio entre gases y agua (Figura 2).



a) Intercambio tubos-coraza



### b) Intercambio coraza-chaqueta

Figura 2. Comportamiento del coeficiente de transferencia de calor actual en función del tiempo, para diferentes flujos de gas.

En las 8 h que dura el ciclo de enfriamiento del ácido sulfhídrico se observó tendencia decreciente del coeficiente global de transferencia de calor con el transcurso del tiempo, debido fundamentalmente a un incremento de las incrustaciones de azufre.

Los resultados obtenidos muestran mayores valores del coeficiente global de transferencia de calor con el incremento del flujo de ácido sulfhídrico. A pesar de que la mayor transferencia de calor tiene lugar en el enfriador #1, el comportamiento del coeficiente global es similar en el intercambiador #2. Para las corridas experimentales efectuadas el fluido "de control" es el ácido sulfhídrico que fluye por la coraza, ya que posee el menor coeficiente individual de transferencia de calor por convección.

### 3.4. Eficiencia térmica

La eficiencia térmica mostró un comportamiento análogo al del coeficiente global de transferencia de calor: tendencia decreciente con el transcurso del tiempo y patrón similar en ambas etapas. Los valores obtenidos oscilaron entre 13,3 y 32,0 % , con 21,9 % como promedio.

Los bajos valores de eficiencia térmica obtenidos se le atribuyen a:

- Existencia de dos vías principales de transferencia de calor y, como resultado, presencia del doble de resistencias a la transferencia de energía térmica comparado con intercambiadores sencillos.
- Bajo calor específico a presión constante del ácido sulfhídrico gaseoso, que promedia 1085 J/(kg·K).

Peigné *et al.* (2013) también obtuvieron bajos valores de eficiencia para equipos con tres fluidos: 17,7 % para intercambiadores de calor de tubos

concéntricos triples sin aislamiento térmico; y 18,3 % para el mismo tipo de intercambiadores con un aislamiento adecuado.

Las incrustaciones tienen un impacto significativo sobre la eficiencia térmica de la instalación, guardando una relación inversa (Figura 3).

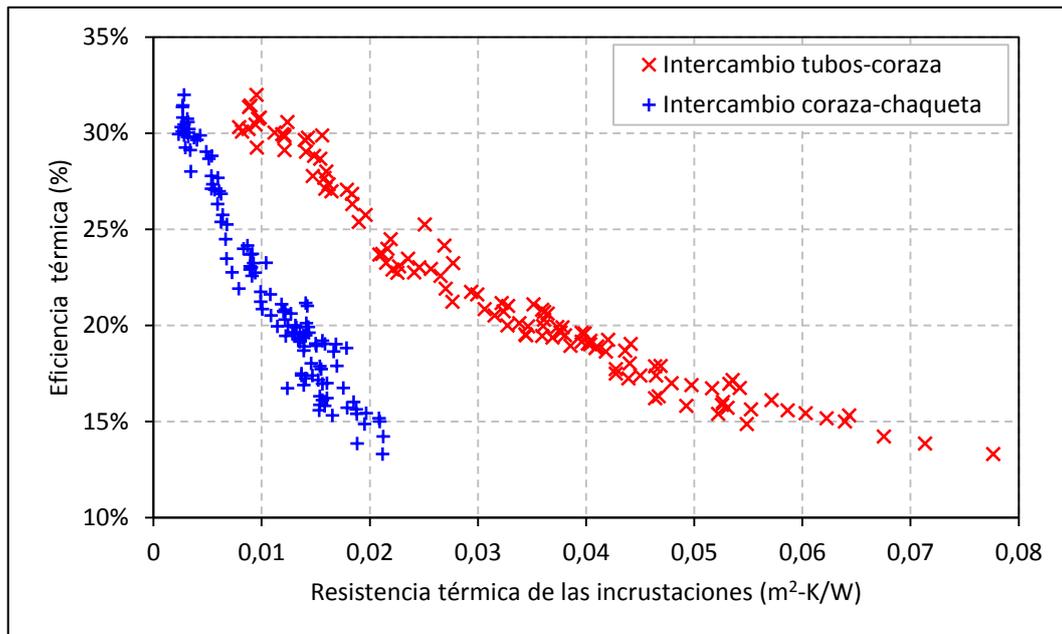


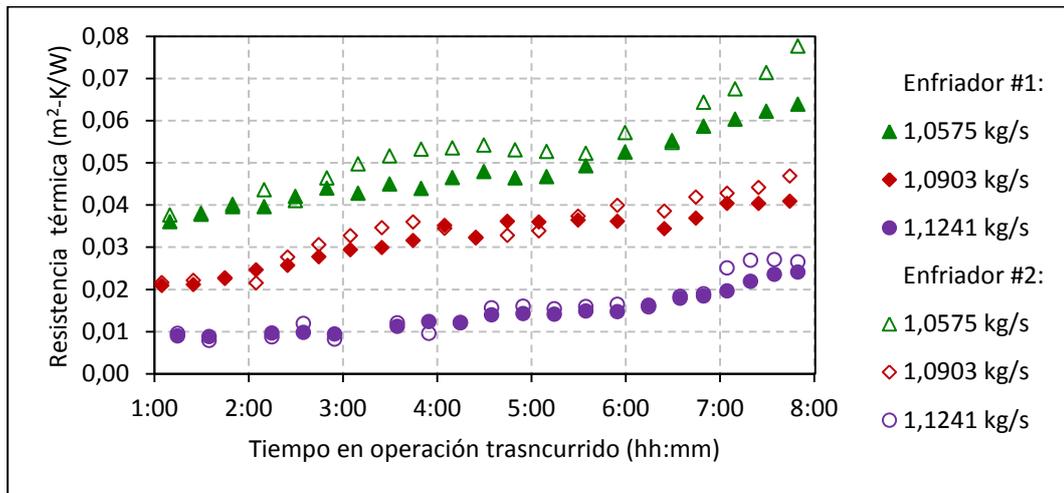
Figura 3. Influencia de las incrustaciones en la pérdida de eficiencia de la instalación.

### 3.5. Análisis de las incrustaciones

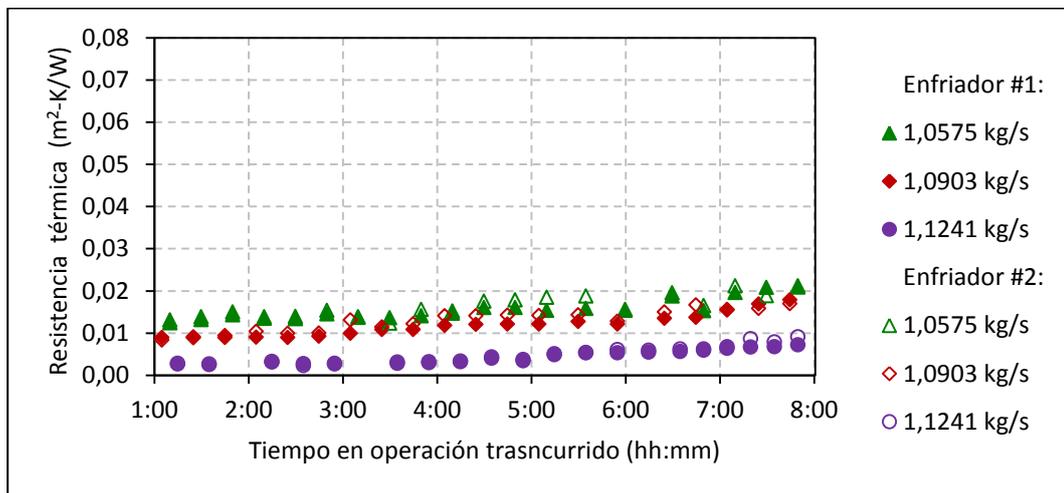
Algunos autores (Kakaç & Liu 2002; Kerner 2011) hacen referencia sólo a cinco mecanismos básicos de ensuciamiento por incrustaciones. Sin embargo, Mukherjee (2004), TEMA (2007) y Al-Hallaf (2013) mencionan otros mecanismos (incrustaciones por precipitación / por solidificación) que caracterizan mejor las deposiciones de Azufre que se van acumulando en el banco de enfriadores de ácido sulfhídrico.

Los resultados de esta investigación muestran una tendencia al incremento de la resistencia térmica de las incrustaciones con el tiempo, acentuado para el intercambio tubos-coraza (Figura 4). Este comportamiento obedece a la deposición paulatina del azufre arrastrado por los gases debido a la disminución de su temperatura. El mayor volumen de incrustaciones se deposita en el haz de tubos.

Bajos valores de resistencia térmica de las incrustaciones al finalizar el ciclo de trabajo pueden relacionarse con una menor efectividad de separación del azufre arrastrado por el ácido sulfhídrico dentro de los intercambiadores, lo cual constituye una de sus funciones.



a) Intercambio tubos-coraza



b) Intercambio coraza-chaqueta

Figura 4. Resistencia térmica de las incrustaciones en función del tiempo, para diferentes flujos de gas.

Los mecanismos de incrustaciones son un fenómeno complejo e impredecible (Mukherjee 2004), por lo que los resultados obtenidos no se pueden encasillar con exactitud dentro de ninguna curva predictora descrita en las referencias consultadas (Kakaç & Liu 2002; Al-Hallaf 2013; Ardsomang *et al.* 2013): lineal, con caída, asintótica, serrucho.

No obstante, para el haz de tubos (intercambio tubos-coraza) se determinó la tendencia al incremento de la resistencia térmica de las incrustaciones en función del tiempo, basado en un análisis de regresión lineal (Tabla 1).

Debido a que la instalación no cuenta con herramientas ni métodos para cuantificar la eficiencia de separación del Azufre dentro del banco de enfriadores de ácido sulfhídrico, podría trabajarse un modelo para su estimación basado en la resistencia térmica de las incrustaciones.

Tabla 1. Incremento por hora de la resistencia térmica de las incrustaciones

Flujo de gas (kg/s)	Incremento de la resistencia térmica ( $m^2 \cdot K/W$ )/h	Coefficiente de determinación $R^2$
1,0575	$4,347 \cdot 10^{-3}$	0,833
1,0903	$3,216 \cdot 10^{-3}$	0,890
1,1241	$2,514 \cdot 10^{-3}$	0,838

#### 4. CONCLUSIONES

- La operación de los enfriadores de ácido sulfhídrico fuera de los parámetros de diseño afecta el proceso productivo.
- La mayor transferencia de calor tiene lugar en el enfriador #1, lo cual influye directamente en su deterioro técnico prematuro.
- La pérdida de eficiencia está influenciada por las partículas de azufre que acarrea el ácido sulfhídrico gaseoso, cuyos elementos incrustantes provocan variaciones en el coeficiente global.
- Coincidiendo con Mukherjee (2004) y Al-Hallaf (2013) la velocidad del fluido es una de las variables cruciales que influye sobre el grado de ensuciamiento. Altas velocidades minimizan las incrustaciones.
- Para el haz de tubos (intercambio tubos-coraza) se estableció la tendencia lineal de resistencia térmica de las incrustaciones en función del tiempo, para tres valores de flujo másico del gas.

#### 5. NOMENCLATURA

- $A$ : Área de transferencia de calor;  $m^2$   
 $C$ : Capacitancia térmica del flujo;  $J/(s \cdot K)$   
 $C_{min}$ : Capacitancia térmica mínima;  $J/(s \cdot K)$   
 $C_p$ : Calor específico a presión constante;  $J/(kg \cdot K)$   
 $d$ : Diámetro de los tubos; m  
 $D$ : Diámetro de la coraza; m  
 $\varepsilon$ : Eficiencia (o efectividad) térmica; %  
 $F$ : Factor de corrección de la DTML  
 $h$ : Coeficiente individual de transferencia de calor;  $W/(m^2 \cdot K)$   
 $k$ : Conductividad térmica;  $W/(m \cdot K)$   
 $\dot{m}$ : Flujo másico; kg/s  
 $Q$ : Calor transferido durante el proceso; W  
 $R_f$ : Resistencia térmica de las incrustaciones;  $m^2 \cdot K/W$   
 $T$ : Temperatura; K  
 $\Delta T_{ml}$ : Diferencia de temperatura media logarítmica; K  
 $U$ : Coeficiente global de transferencia de calor;  $W/(m^2 \cdot K)$

## Subíndices:

- 0 Referido a las condiciones de entrada.
- 1 Referido al enfriador #1. En el caso de  $T$ , salida del enfriador #1.
- 2 Referido al enfriador #2. En el caso de  $T$ , salida del enfriador #2.
- a Referido al agua del lado de los tubos.
- a' Referido al agua del lado de la chaqueta.
- g Referido al Ácido sulfhídrico gaseoso del lado de la coraza.
- e Referido al lado exterior.
- i Referido al lado interior.

**6. REFERENCIAS**

- AL-HALLAF, W. A. A. 2013: Theoretical Study on Heat Transfer in the Presence of Fouling. *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*. 14(1): 47-53.
- ARDSOMANG, T.; HINES, J. W. & UPADHYAYA, B. R. 2013: Heat Exchanger Fouling and Estimation of Remaining Useful Life. En: Annual Conference of Prognostics and Health Management Society. Memorias. Knoxville, Tennessee, Estados Unidos, 1-9.
- CHOU, S.; OGDEN, J. M.; POHL, H. R.; SCINICARIELLO, F.; INGERMAN, L.; BARBER, L. & CITRA, M. 2014: *Draft Toxicological Profile for Hydrogen Sulphide and Carbonyl Sulphide*. U.S. Department of Health and Human Services, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Atlanta, 317 p.
- GHIWALA, T. M. & MATAWALA, V. K. 2014: Sizing of triple concentric pipe heat exchanger. *International Journal of Engineering Development and Research*. 2(2): 1683-1692.
- KAKAÇ, S. & LIU, H. 2002: *Heat exchangers. Selection, rating and thermal design*. 2ed. CRC Press, New York. 491 p.
- KERNER, J. 2011: Understanding Fouling. *Chemical Engineering*. Junio: 35-41.
- KIMTANTAS, C. L. & TAYLOR, M. A. 2016: Downsizing a Claus Sulphur Recovery Unit. En: REFCOMM® (Refining Community). Presentación Bechtel Hydrocarbon Technology Solutions Inc. Galveston, Texas, Estados Unidos, 2-6 mayo, 1-36.
- LINGE, P. M.; KORANE, A. B. & KAPATKAR, V. N. 2016: Performance Study of Triple Concentric Pipe Heat Exchanger. *International Engineering Research Journal (IERJ)*. Ed. esp., Junio: 629-634.
- MUKHERJEE, R. 2004: *Practical Thermal Design of Shell-and-Tube Heat Exchangers*. Begell House, Inc., Nueva York, 228 p.
- PEIGNÉ, P.; INARD, C. & DRUETTE, L. 2013: Ventilation Heat Recovery from Wood-Burning Domestic Flues. A Theoretical Analysis Based on a Triple Concentric Tube Heat Exchanger. *Energies*. 6(-): 351-373.

- RADULESCU, S.; NEGOITA, I. L. & ONUTU, I. 2015: Heat Transfer Coefficient for Hydrocracked Oil Flow in Laminar Regime through an Annular Space. *Rev. Chim. (Bucarest)*. 66(1): 83-87.
- SAURABH, D.; TAMKHADE, P. K. & LELE, M. M. 2016: Design Development and Heat Transfer Analysis of Triple Concentric Tube Heat Exchanger. *International Journal of Current Engineering and Technology (IJCET)*. 5 :246-251.
- TEMA. *Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association*. TEMA, 9na ed. Nueva York: Tubular Exchanger Manufacturers Association, Inc., 2007.
- THOME, J. R. 2010: Chapter 3 Single-Phase Shell-Side Flows and Heat Transfer. En: THOME, J. R. *Engineering Data Book III*. Wolverine Tube, Inc., Lausanne, Switzerland, 3-1-3-13.
- TORRES-TAMAYO, E.; QUINTANA-CHARLOT, L. E.; VEGA-ÁRIAS, O. & RETIRADO-MEDIACEJA, Y. 2011: Coeficientes de transferencia de calor y pérdida de eficiencia en intercambiadores de calor de placas durante el enfriamiento del licor amoniacal. *Minería y Geología*. 27(2):67-83.
- UNITEL. 2016: *Hydrogen Sulphide (H<sub>2</sub>S) Production Technology*. Unitel Technologies [en línea]. Consulta: 19 dic 2016. Disponible en: [http://www.uniteltech.com/literature\\_182468/Hydrogen\\_Sulfide\\_\(H2S\)\\_Production\\_Technology](http://www.uniteltech.com/literature_182468/Hydrogen_Sulfide_(H2S)_Production_Technology)
- YOUNGER, A. H. 2004: Sulphur Recovery. En: YOUNGER, A. H. *Natural Gas Processing Principles and Technology – Part II*. University of Calgary, Alberta. pp. 20-1-20-60.

**Andrés Adrian Sánchez-Escalona**, [aescalon@moanickel.com.cu](mailto:aescalon@moanickel.com.cu)

Ingeniero Mecánico. Subdirección de Ingeniería, Departamento de Mecánica  
Moa Nickel S.A.- Pedro Sotto Alba. Moa, Holguín, Cuba

**Ever Góngora-Leyva**, [egongora@ismm.edu.cu](mailto:egongora@ismm.edu.cu)

Profesor Auxiliar. Doctor en Ciencias Técnicas. Facultad de Metalurgia y Electromecánica  
Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Holguín, Cuba

**Carlos Zalazar-Oliva**, [czalazar@ismm.edu.cu](mailto:czalazar@ismm.edu.cu)

Profesor Instructor. Máster en Electromecánica. Centro de Estudio de Energía y  
Tecnología Avanzada de Moa. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Holguín, Cuba

**Edel Álvarez-Hernández**, [ealvarez@moanickel.com.cu](mailto:ealvarez@moanickel.com.cu)

Ingeniero Químico. Subdirección de Tecnología, Departamento de Tecnología de los Procesos  
Moa Nickel S.A.- Pedro Sotto Alba. Moa, Holguín, Cuba

## **Evaluación de la calidad de las aguas para consumo humano en la comunidad venezolana de San Valentín, Maracaibo**

Irguin A. Bracho-Fernández  
Moraima Fernández-Rodríguez

### **Resumen**

La investigación tuvo el propósito de evaluar la potabilidad del agua para consumo humano en la comunidad de San Valentín, ubicada en el sector Ancón Bajo II, en el municipio venezolano de Maracaibo. Diez muestras de distintas fuentes de abasto fueron analizadas desde el punto de vista físico, químico y bacteriológico. Como método de análisis se utilizó el método estándar, cuyos resultados fueron comparados con los valores establecidos como aceptables por las normas sanitarias venezolanas para la calidad del agua potable y los catálogos de calidad de agua emitidos por la Organización Mundial de la Salud. Se concluye que el agua de la tubería de aducción requiere tratamiento convencional completo para su purificación, mientras que el agua de los pozos requiere tratamiento de desalinización. La cañada Irragorry está altamente contaminada por lo que no es una opción como fuente de abastecimiento.

**Palabras clave:** calidad del agua; agua potable; contaminación ambiental; comunidad San Valentín; Venezuela.

## **Assessment of water quality for human consumption in the venezuelan community of San Valentin, Maracaibo**

### **Abstract**

The objective of the investigation was to evaluate the suitability of the water for human consumption in the community of San Valentin which is located in the sector of Ancon Bajo II, in the municipality of Maracaibo in Venezuela. Ten samples of different water supply sources were tested and evaluated from the physical, chemical and bacteriological points of view. The standard method was used for the analysis. The test results were compared with the values set by Venezuelan Drinking Water Quality Standards and water quality catalogues issued by the World Health Organization. It is concluded that the water supply pipe requires an overall conventional treatment for purification while pit water requires desalinization treatment. Irragorry ravine is highly contaminated so it is not an alternative water supply source.

**Keywords:** water quality; drinking water; environmental contamination; community of San Valentine; Venezuela.

## 1. INTRODUCCIÓN

Se estima que el 4% del total de muertes en el mundo se deben a problemas relacionados con el agua, desagüe e higiene (Prus et al. 2002). Estudios realizados en países desarrollados indican que la mayoría de las aguas superficiales tienen niveles de contaminación que deben ser evaluados y resueltos en los procesos de tratamiento y desinfección del agua para consumo humano (Craun et el 2002; Carmena et al. 2007).

Venezuela no escapa a esta problemática mundial. En el sector Ancón Bajo II (Figura 1), perteneciente a la parroquia Venancio Pulgar, municipio Maracaibo, se asienta la comunidad San Valentín. Esta carece de una completa infraestructura con servicios básicos que garanticen el consumo de agua de probada calidad sanitaria. A ello se suma el hecho de que los drenajes naturales, próximos a sus desembocaduras (laguna el gran Eneal, Lago de Maracaibo) se encuentran contaminados por aguas residuales.



Figura 1. Ubicación del sector Ancón Bajo II.

Al no contar con suministro adecuado de agua potable, los habitantes de la comunidad invierten parte de sus presupuestos familiares en financiar redes informales, equipos de bombeo, dispositivos de almacenamiento e incluso el pago a distribuidores privados.

Considerando la inexistencia de un control sanitario actualizado sobre la calidad del agua en la comunidad San Valentín, se realiza esta investigación, cuyo propósito fue evaluar específicamente la potabilidad del agua para consumo humano.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó un diagnóstico participativo comunitario que permitió determinar en la comunidad campesina San Valentín, las principales fuentes de abasto de agua para consumo humano. El diagnóstico se obtuvo mediante entrevistas, encuestas y la observación directa como herramientas metodológicas. De ahí se pudo conocer que las fuentes de abasto de agua (Figura 2) de la comunidad son fundamentalmente las siguientes:

1. Cisternas independientes. El agua proviene en su mayoría de la tubería de aducción o de los puntos de llenado de los vehículos cisternas.
2. Tubería de aducción ubicada en el límite sur de la comunidad, obtenida de tomas ilegales.
3. Botellones plásticos de 19 L de capacidad. Agua supuestamente mineral, adquirida principalmente por distribución directa del proveedor, quien la oferta en cada vivienda del sector y en diversos establecimientos fuera de la comunidad, en especial en el sector Los Morales.
4. Pozos construidos de manera artesanal, revestidos con anillos de concreto prefabricados.
5. Drenajes naturales.



Figura 2. Imágenes de algunas de las fuentes de abasto. Izq. Pozo artesanal; Centro: Cisterna; Der. Tubería de aducción.

Para evaluar la calidad de las aguas se realizó un muestreo hidroquímico. Se tomaron en total diez muestras: siete en los pozos artesanales ubicados dentro de distintas granjas en la comunidad, una del agua embotellada, otra en la tubería de aducción, y una en un drenaje natural (Cañada Iragorry). In situ se efectuaron mediciones de los parámetros pH, salinidad, conductividad, cloro residual y se observó el aspecto del agua (Figura 3). A continuación se detallan los puntos de muestreo:

- Muestra 1. Pozo granja San Martín
- Muestra 2. Pozo granja La Zeta
- Muestra 3. Pozo granja El Bosque
- Muestra 4. Pozo Granja Los Cascabeles
- Muestra 5. Pozo Granja San Benito
- Muestra 6. Pozo Granja Monte Santo
- Muestra 7. Pozo granja La Estancia
- Muestra 8. Botellón de agua
- Muestra 9. Tubería de aducción
- Muestra 10. Cañada Irragorry



Figura 3. Medición in situ de las propiedades del agua.

El análisis físicoquímico y bacteriológico se realizó en el laboratorio de calidad de agua "Alonso de Ojeda" siguiendo la metodología establecida en el Método Estándar para el análisis de aguas y aguas residuales (AWWA, APHA y WEF), 21 edición del 2005 (Tabla 1).

Tabla 1. Parámetros analizados y método analítico utilizado

<b>Propiedad</b>	<b>Método Analítico</b>
Aspecto	Organoléptico
Olor	Organoléptico
Cloro Residual (mg/L)	Comparación
Salinidad (mg/L)	Potenciómetro
Conductividad $\mu\text{S/cm}$	Electrométrico
pH	Potenciómetro
Color Aparente Unid Pt - Co	Comparación
Color Real Unid Pt - Co	Comparación
Turbiedad Unid NTU	Nefelométricas
Cloruro (Cl) (mg/L)	Volumétrico
Sulfato ( $\text{SO}_4$ ) (mg/L)	Fotométrico
Fluoruro (F) (mg/L)	Fotométrico
Calcio (Ca) (mg/L)	Cálculos
Magnesio (Mg) (mg/L)	Cálculos
Sodio - Potasio (Na + K) (mg/L)	Cálculos
Hierro Total (Fe) (mg/L)	Fotométrico
Manganeso total (Mn) (mg/L)	Fotométrico
Anhídrido Carbónico Libre ( $\text{CO}_2$ )	Cálculos
Alcalinidad Total (mg/L)	Volumétrico
Dureza Total (mg/L)	Volumétrico
Dureza Carbonática (mg/L)	Volumétrico
Dureza No Carbonática (mg/L)	Volumétrico
Minerales Disueltos (mg/L)	Cálculos
Índice Langelier pH - pHs	Volumétrico
Dureza Cálcica (mg/L)	Volumétrico
Aluminio Residual (mg/L)	Fotométrico
Heterótrofos Aeróbicos (ufc/mL)	Recuento de Placas
Índice de Coliformes totales (NMP / 100 mL)	Fermentación de tubos múltiples y Florocourt
Índice de Coliformes fecales (NMP / 100 mL)	

Fuente: Laboratorio de Calidad de agua. Planta Potabilizadora Alonso de Ojeda. Hidrologo (2014).

Los resultados de los análisis físico-químicos y bacteriológicos fueron comparados con las normas venezolanas para la calidad de agua (1995) y con los estándares de la Organización Mundial de la Salud (OMS 2006).

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las fuentes de abasto de agua bajo análisis en este estudio, las propiedades físicas y químicas se mantienen, generalmente, dentro de los rangos permisibles por ambas normas para el consumo humano (Tablas 2 y 3), salvo algunas excepciones aquí reveladas.

Tabla 2. Propiedades físicas y organolépticas

Muestras	Aspecto	Olor	Cloro residual (mg/L)	Salinidad (mg/L)	Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	pH	Color Aparente Unid Pt - Co	Color Real Unid Pt - Co	Turbidez NTU
San Martin	Claro	Aceptable	No	5000,00	9580,00	5,98	10,00	5,00	1,06
La Zeta	Claro	Aceptable	No	4630,00	10110,00	6,05	5,00	4,00	1,19
El Bosque	Claro	Aceptable	No	293,00	850,90	6,00	10,00	5,00	3,59
Los Cascabeles	Claro	Aceptable	No	4100,00	8294,00	5,71	5,00	4,00	3,44
San Benito Casa Azul	Turbio	Aceptable	No	204,00	540,10	6,62	150,00	75,00	85,30
Monte Santo	Ligeramente turbio	Aceptable	No	1350,00	2518,00	6,57	15,00	7,00	10,70
La Estancia	Claro	Aceptable	No	2990,00	5718,00	5,57	5,00	4,00	1,48
Botellón	Claro	Aceptable	No	126,00	496,10	7,68	5,00	4,00	1,20
Tubería de Aducción	Claro	Aceptable	No	129,00	246,90	7,48	5,00	4,00	2,01
Cañada Irragorry	Verdoso	Fétido	No	429,00	9555,00	8,05	30,00	15,00	9,42

Tabla 3. Resultados del análisis químico

Muestras	Cl- (mg/L)	SO <sub>4</sub> (mg/L)	F (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Na + K (mg/L)	Fe (mg/L)	CO <sub>2</sub>
San Martin	3260,00	393,00	0,26	80,24	40,48	2187,97	0,165	245,83
La Zeta	3280,00	588,00	0,55	76,56	36,89	2325,48	0,094	265,57
El Bosque	200,00	133,70	0,17	29,28	15,26	165,69	0,243	156,67
Los Cascabeles	2950,00	449,00	0,34	81,68	50,50	1980,30	0,340	315,83
San Benito	140,00	33,80	0,02	30,04	17,67	111,69	2,488	63,44
Monte Santo	870,00	130,00	0,29	82,24	47,04	485,18	0,455	191,25
La Estancia	2150,00	255,00	0,17	100,40	37,42	1351,09	0,240	242,16

Botellón	125,00	29,00	0,06	38,96	3,26	76,04	0,272	2,79
Tubería de aducción	21,30	10,20	0,51	31,60	6,32	11,77	0,155	5,64
Cañada Irragorry	3750,00	388,00	0,51	110,80	34,89	2535,82	0,437	3,51
<b>Muestras</b>	<b>Alcalinidad T (mg/L)</b>	<b>Dureza T. (mg/L)</b>	<b>Dureza Carb. (mg/L)</b>	<b>Dureza No Carb (mg/L)</b>	<b>Minerales Disueltos (mg/L)</b>	<b>Indice Langelier pH</b>	<b>Dureza Cal. (mg/L)</b>	<b>Aluminio Res. (mg/L)</b>
San Martín	118,00	367,20	118,00	249,20	6106,08	-1,50	200,60	0,021
La Zeta	162,00	343,20	162,00	181,20	6505,22	-1,52	191,40	0,023
El Bosque	75,20	136,00	75,20	60,80	636,09	-1,53	73,20	0,019
Los Cascabeles	75,80	412,00	75,80	336,20	5614,63	-2,00	204,20	0,022
San Benito	158,60	147,80	147,80	0,00	529,19	-1,16	75,10	0,021
Monte Santo	91,80	399,20	91,80	307,40	1727,20	-1,10	205,60	0,02
La Estancia	44,80	405,00	44,80	360,20	3948,98	-2,30	251,00	0,02
Botellón	69,80	110,80	69,80	41,00	357,74	-0,50	97,40	0,02
Tubería de aducción	90,20	105,00	90,20	14,80	191,89	-0,50	79,00	0,02
Cañada Irragorry	242,40	420,60	242,40	178,20	7116,19	0,16	277,00	0,02

Desde el punto de vista bacteriológico, las fuentes de abasto están contaminadas al superar los valores establecidos por las normas. En todos los casos el examen bacteriológico indicó la presencia de heterótrofos aeróbicos y coliformes totales (Tabla 4).

Los pozos de las granjas San Martín, La Zeta, Los Cascabeles, Monte Santo y La Estancia revelaron valores elevados que superan las normas venezolanas para salinidad y minerales disueltos y las de la OMS para los cloruros. El agua de los pozos de San Martín y El Bosque tienen un pH ligeramente ácido, de alrededor de 6, por debajo del mínimo permitido. Los pozos de las fincas San Benito y Monte Santo presentan niveles de turbiedad que sobrepasan los admitidos por ambas normas (Figuras 4, 5 y 6).

Tabla 4. Resultados bacteriológicos

Muestras	Heterótrofos aeróbicos (ufc/mL)	Índice de coliformes totales (NMP/100 mL)	Índice de coliformes fecales (NMP/100 mL)
San Martín	1,00	<3	<3
La Zeta	12,00	4,00	4,00
El Bosque	4,00	<3	<3
Los Cascabeles	60,00	4,00	4,00
San Benito	28,00	9,00	9,00
Monte Santo	72,00	4,00	4,00
La Estancia	20,00	<3	<3
Botellón	56,00	9,00	9,00
Tubería de aducción	25,00	<3	<3
Cañada Irragorry	---	---	---
Límite máximo permisible para agua potable	100,00	<1,1	<1,1

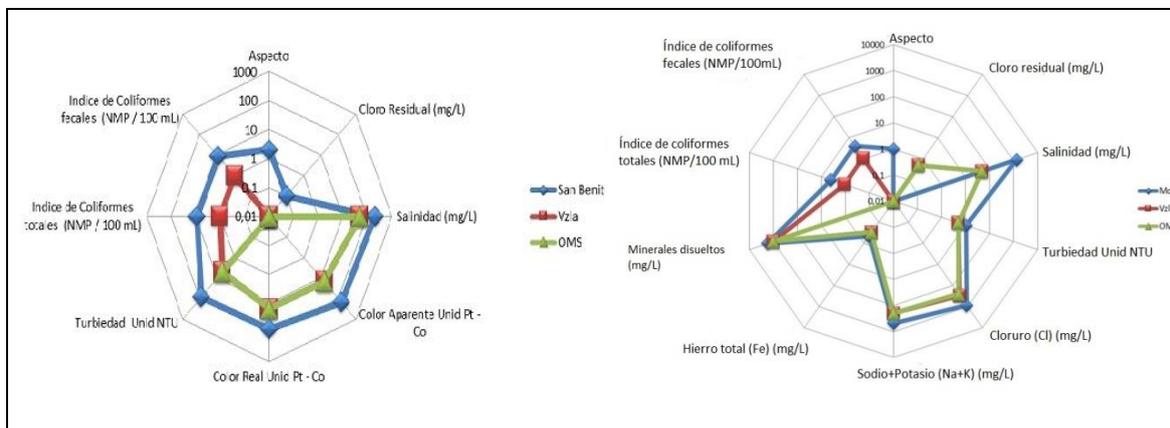


Figura 4. Parámetros fuera de norma en los pozos San Benito (izq.) y Monte Santo (der.)

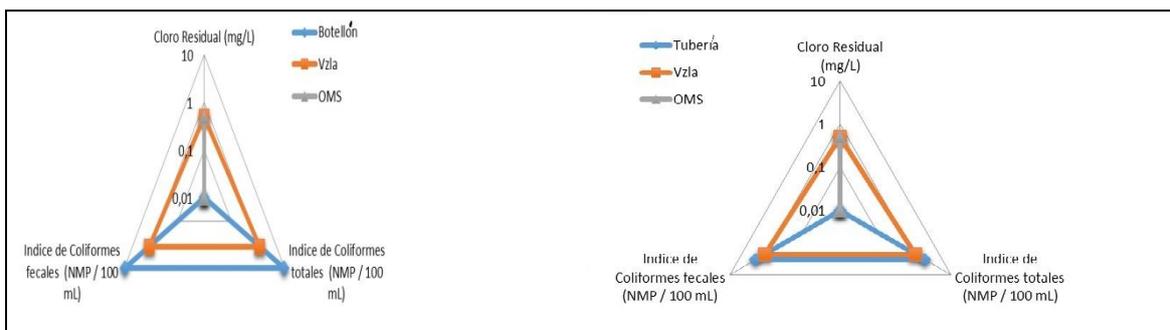


Figura 5. Parámetros fuera de norma. Botellón (izq.), Tubería (der.)

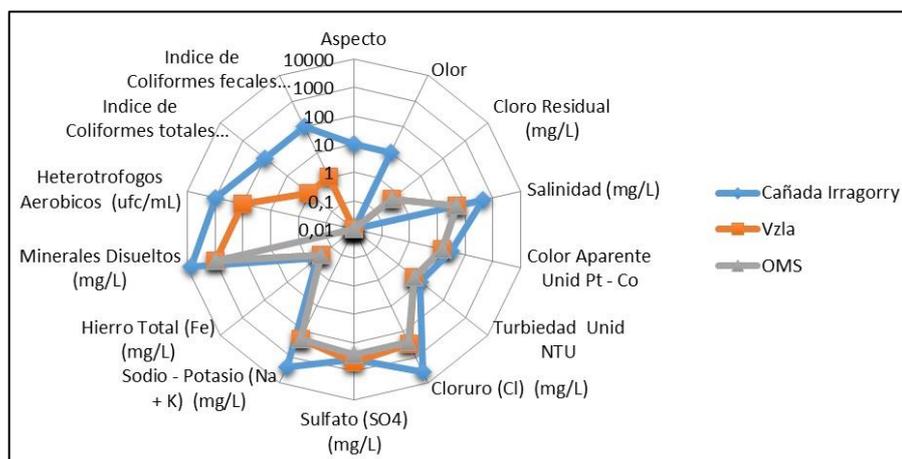


Figura 6. Parámetros fuera de norma. Cañada Irragorry

Las fuentes de contaminación de las aguas en el sector de estudio son principalmente las actividades agrícolas y el uso de productos químicos para prevenir enfermedades en las cosechas. Estos químicos adicionan elementos alóctonos que se consideran fuentes contaminantes. Sumado a lo anterior, y no menos importante, es la actividad vacuna, porcina y aviar en el área, las que aportan desechos orgánicos al suelo que percolan junto a las aguas de escorrentía pudiendo encontrar canales de permeabilidad vertical que los conduzcan hasta el acuífero, contaminando con coliformes totales y fecales las aguas subterráneas.

Otra fuente de contaminación son los pozos sépticos y letrinas, debido a que la comunidad no dispone de servicio básico de recolección de aguas negras, sino que las mismas son trasladadas a los afluentes naturales superficiales -quebradas Irragorry, Fénix y la laguna el Gran Eneal- generando contaminación de las masas de aguas superficiales. Esta contaminación por desechos orgánicos humanos generan problemas de salud pública tanto dentro de la comunidad como fuera de ella, al colocar en el mercado municipal el agua embotellada procedente de fuentes no seguras desde el punto de vista sanitario.

Existe además contaminación por procesos naturales; en este sentido se observa la alta concentración de sales en las aguas de los pozos. Tales niveles de salinidad son atribuidos principalmente a una intrusión salina proveniente del Lago de Maracaibo, que aporta altas concentraciones de cloruros inferidos por la cercanía de este con la comunidad.

Lo antes expuesto hace imprescindible la adecuada vigilancia de las fuentes de abastecimiento de agua de consumo, tanto en condiciones normales como durante los periodos en los que se produce un deterioro transitorio de la calidad del agua. Se recomienda establecer el control bacteriológico

estricto y sistemático de los coliformes totales, fecales y otras bacterias que pudieran estar presentes en las aguas de abasto.

Es impostergable la implementación de programas de gestión de la calidad del agua de consumo, garantizar la potabilización y el almacenamiento adecuado, aplicar tratamiento permanente de desinfección (cloración) y corrección del pH por aplicación de cal. Se recomienda igualmente el diseño de redes de tuberías para la distribución a presión de agua de consumo a viviendas individuales, edificios y grifos comunitarios, como un componente importante que contribuye al progreso y la salud de la comunidad.

#### 4. CONCLUSIONES

- Las principales fuentes de contaminación que afectan la calidad de las aguas de consumo humano en la comunidad de San Valentín son las actividades agropecuarias y los procesos naturales.
- Los resultados de los análisis físico-químicos y bacteriológicos demuestran que el agua de la tubería de aducción requiere tratamiento convencional completo para su potabilización.
- Las aguas de pozo de las granjas San Martín, La Zeta, Los Cascabeles, Monte Santo, San Benito y La Estancia son salobres y para ser potabilizadas requieren un tratamiento de desalinización.
- La Cañada Irragorry está altamente contaminada (aguas servidas) por lo que de ninguna manera es una opción como fuente de abastecimiento.

#### 5. REFERENCIAS

- CARMENA D, AQUINAGALDE X, ZIGORRAGA C, FERNÁNDEZ- CRESPO JC, OCIO JA. 2007: Presence of Giardia cysts and Cryptosporidium oocyst in drinking water supplies in northern Spain. *J Appl Microbiol.* 102(3): 619-29.
- CRAUN GF, NWACHUKU N, CALDERON RL, CRAUN MF. 2002: Outbreaks in drinking-waters systems, 1991-1998. *J Environ Health* 65(1): 16-23.
- DIRECTRICES DE LA OMS para la calidad del agua potable, establecidas en Génova, 1993, disponible en: <http://www.lenntech.es/estandares-calidad-agua-oms.htm#ixzz3YOBxAZsT> Acceso: 20 /4/ 2015.
- NORMAS OFICIALES PARA LA CALIDAD DEL AGUA VENEZUELA, 1995: Disponibles en: [www.bvsde.ops-oms.org/bvsacg/e/cd-cagua/ref/text/43.pdf](http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacg/e/cd-cagua/ref/text/43.pdf) Acceso: 15/7/2016
- OMS (ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD) 2006: Guías para la calidad del agua potable. 3 ed. Disponible en: [www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/gdwq3rev/es](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3rev/es) Acceso: 15/7/2016

PRÜS A, KAY D, FEWTRELL L, BARTRAM J. 2002: Estimating the burden of disease from water, sanitation, and hygiene at a global level. *Environ Health Perspect.* 110(5): 537-42.

**Irguin Alberto Bracho-Fernández**, [irguinbracho@hotmail.com](mailto:irguinbracho@hotmail.com)

Ingeniero en Petróleo. Coordinador del Departamento de Geología e Hidrocarburos  
Instituto Universitario de Tecnología de Maracaibo, Venezuela

**Moraima Fernández-Rodríguez**, [mfernandez@ismm.edu.cu](mailto:mfernandez@ismm.edu.cu)

Máster en Ciencias Ambientales. Profesora Auxiliar  
Instituto Superior Minero-Metalúrgico de Moa, Cuba

## Evaluación ambiental del depósito de residuos sólidos de Katenguenha, Angola

Inocêncio Bau-Satula  
Mayda Ulloa-Carcasés  
Juelmo Gola-Cahimba

### Resumen

En la localidad de Huambo (Angola) la deposición de residuos sólidos en el vertedero conocido como Katenguenha constituye un grave problema ambiental. El presente trabajo tuvo el propósito de evaluar los efectos que sobre el medio ambiente produce este vertedero. Para ello se aplicó el método de criterios relevantes integrados (CRI) para identificar y evaluar los impactos ambientales. Los resultados mostraron que el vertedero de residuos sólidos en Katenguenha impacta negativamente todos los medios (físico, biológico y social) y los impactos clasifican en su mayoría como de categoría II, con un Valor de Impacto Ambiental superior a 6.

**Palabras clave:** método de criterios relevantes integrados; impacto ambiental; estudio geoambiental; deposición residuos sólidos; Katenguenha.

## **Environmental assessment for the solids waste pond in Katenguenha, Angola**

### **Abstract**

Deposition of solid wastes in the Katenguenha dump site is a serious environmental issue in the locality of Huambo (Angola). The objective of this work is to assess the environmental impact caused by solid waste deposition. The integrated relevant criteria method was used to identify and evaluate the environmental impact. The results indicated that the solid waste dump site has a negative impact on all environmental aspects (physical, biological and social). They are category II environment impacts with an environmental impact rate above 6.

**Keywords:** integrated relevant criteria method; impact assessment; environment; solid wastes; Katenguenha..

## 1. INTRODUCCIÓN

Entre los problemas ambientales que impactan urbes y poblados en la actualidad se encuentra la deposición final de los residuos sólidos (Soto & Infante 2016). Cuando la deposición tiene lugar en vertederos a cielo abierto deriva en un problema ambiental con repercusión en la salud humana (Pérez-Jiménez et al. 2011). El manejo ineficiente de los residuos sólidos origina contaminación en los suelos, el aire y el agua, fundamentalmente. En ese sentido se buscan alternativas que favorezcan la gestión de los residuos sólidos urbanos de forma compatible con el medio ambiente, como el reciclaje de los residuos, pues se calcula que el 95 % de los residuos sólidos se puede reducir aprovechando estas técnicas (Desafío Ecológico 2012).

La angolana provincia de Huambo carece de sistemas para el manejo y tratamiento adecuado de los residuos sólidos. En esta localidad existen únicamente depósitos a cielo abierto que no disponen siquiera del equipamiento necesario para el tratamiento de estos residuos, a pesar de que la Ley Constitucional de la República de Angola, en su Artículo 24, plantea que todos los ciudadanos tienen el derecho de vivir en un medio ambiente saludable, y adopta las medidas pertinentes para la protección del medio ambiente; sin embargo, estas leyes en la práctica no tienen cabal cumplimiento.

Desde las instituciones educacionales es perfectamente posible generar importantes proyectos de educación ambiental y de manejo de los residuos sólidos que involucren a alumnos, docentes y personal de apoyo a tomar una mayor conciencia ante esta problemática (SEMARNAT 2006).

La presente investigación se realiza con el objetivo de identificar y evaluar, mediante la metodología de criterios relevantes integrados (CRI), los impactos ambientales producidos por la deposición de residuos sólidos en Katenguenha, localidad de Huambo.

### 1.1. Caracterización del área de estudio

El depósito de residuos sólidos de Katenguenha se ubica en el sector de Gongoinga, al extremo sur del municipio de Huambo y cuenta aproximadamente con 3 000 habitantes, según censo de 2014. Geográficamente limita al norte con el barrio de Santo António y la parte baja del curso del río Kulimahãla, al sur con las aldeas vecinas y el río Kunene, al este con la comuna de Calima y el río Kuando y al oeste con el río Kunhongãmuia y sus afluentes (Figura 1). La principal fuente de alimentación de estos ríos y arroyos son las aguas subterráneas y las precipitaciones atmosféricas.

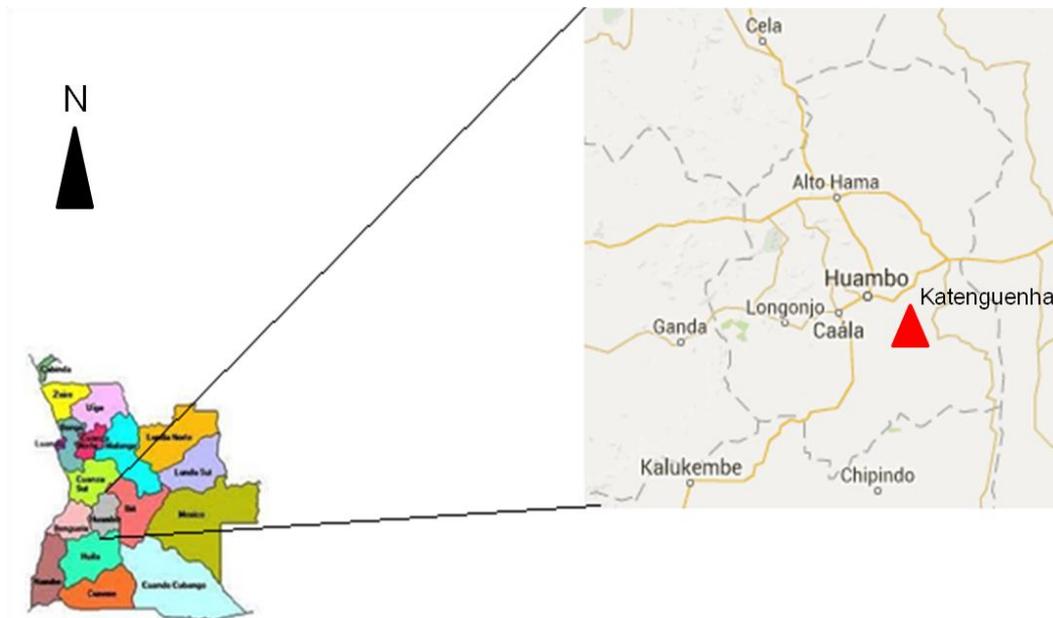


Figura 1. Ubicación de Katenguenha.

Geología: debido a la influencia de los ríos que le atraviesan, Katenguenha presenta una geomorfología variada, desde planicie, sierras y cadenas de montaña, planalto y grandes divisorias de cuencas hidrográficas. El área de estudio pertenece a una región donde predomina un terreno montañoso, formado por rocas metamórficas, magmáticas y rocas sedimentarias.

Fauna y flora: en el área habitan varias especies de chimpancés, papagayos, gulungo, elefantes, murciélagos, impalas, chitas, hienas, leopardos, pacaças, cocodrilos, jacarés y giboia. La flora está representada por sabanas secas con árboles o arbustos, pino, cedro, onduco, omanda, omone, omaco, tchandala, eucalipto y variados árboles frutales.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de esta investigación se siguió la metodología general ilustrada en la Figura 2.

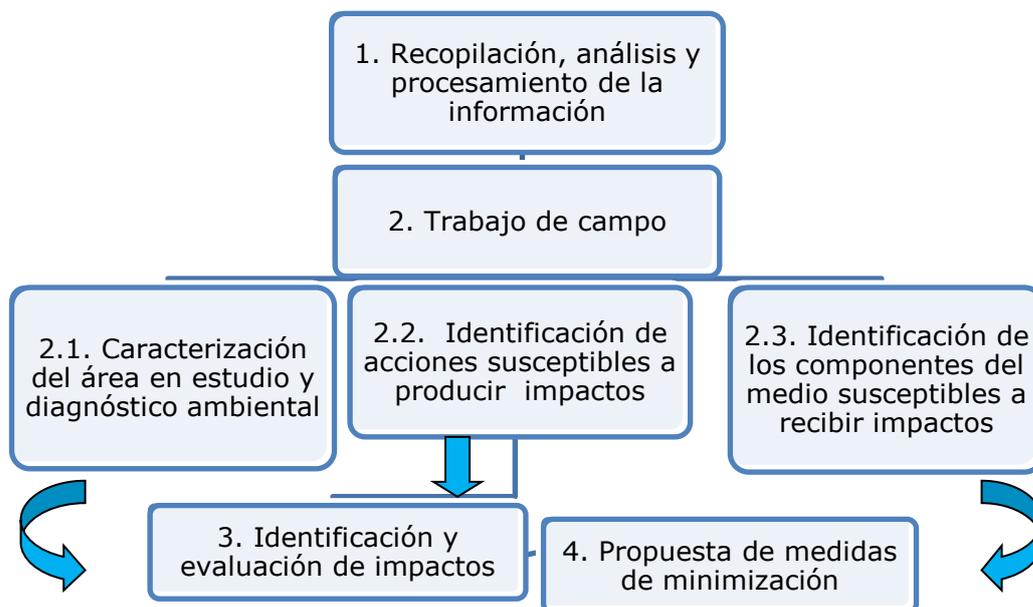


Figura 2. Etapas metodológicas de la investigación.

**1. Recopilación, análisis y procesamiento de la información:** Esta fase fue instituida a partir de la revisión sobre los antecedentes de la temática en estudio.

## 2. Trabajo de campo

**2.1. Caracterización del área en estudio y diagnóstico ambiental.** Es el análisis del área de estudio desde el punto de vista ambiental.

**2.2. Identificación de acciones susceptibles a producir impactos.** Se definen como las causas que desencadenan los impactos, según la magnitud, cantidad y localización espacial, desde el momento que se producen. Para identificar las acciones capaces de producir impactos sobre los componentes del medio se aplicaron técnicas de consultas de expertos y entrevistas (BID 1997).

**2.3. Identificación de los componentes del medio susceptibles a recibir impactos.** La identificación de los componentes ambientales afectados se realizó utilizando las mismas técnicas que en el caso anterior.

**3. Identificación y evaluación de impactos.** Se identificaron y evaluaron los impactos aplicando el método de criterios relevantes integrados (CRI) de Buroz (1990).

El método de CRI se basa en un análisis multicriterio, partiendo de la idea de que un impacto ambiental se puede estimar a partir de la discusión y análisis de criterios con valoración ambiental, los cuales se seleccionan dependiendo de la naturaleza del proyecto. Este método consiste en asignar

valores a los efectos adversos relevantes de acuerdo a los criterios de extensión, intensidad, duración, reversibilidad y riesgo, para de esta manera alcanzar el valor de impacto ambiental por efecto y la jerarquización de los mismos.

Este método permite el estudio pormenorizado de las acciones e impactos y la esquematización de los resultados de la evaluación de impacto ambiental. Constituye esta una técnica excelente para la identificación y análisis de los impactos ambientales, además, de que facilita la descripción de cada impacto en su medio y su efecto en detalle para luego evaluarlo cuantitativamente a partir de los criterios de evaluación.

La metodología CRI considera como indicadores de impactos los siguientes:

- Intensidad (I): cuantificación de la fuerza, peso o rigor con que se manifiesta el proceso o impacto puesto en marcha.
- Extensión (E): influencia espacial o superficie afectada por la acción antrópica. Es decir, medida del ámbito espacial o de superficie donde ocurre la afectación.
- Duración (D): lapso o tiempo que dura la perturbación. Período durante el cual se sienten las repercusiones del proyecto o número de años que dura la acción que genera el impacto.
- Reversibilidad (Rv): la posibilidad o dificultad para retornar a la situación actual.
- Riesgo (Ri): probabilidad de que el efecto ocurra.

La escala de valores para todos los indicadores está comprendida entre 1 y 10 (Tabla 1).

Para el cálculo del VIA se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{VIA} = I \times W_i + E \times W_e + D \times W_d + R_v \times W_{Rv} + R_i \times W_{Ri}$$

Donde:

I-Intensidad;

E-Extensión;

D-Duración;

Rv-Reversibilidad;

Ri-Riesgo;

Wi=0,3; We=0,2; Wd=0,1; WRv=0,2; WRI=0,2 - Pesos con que se ponderan los indicadores del VIA.

El VIA permite establecer las categorías de impactos (Tabla 2).

Tabla 1. Escala de valoración de indicadores

Valor	Intensidad	Extensión	Duración	Reversibilidad	Riesgo
6-10	Alta	Generalizada > 75 %	Larga (> 5 años)	Irreversible (baja capacidad o irrecuperable)	Alto >50 %
3-5	Media	Local o extensiva de 10-75 %	Media (2>5 años)	Medianamente reversible de 11 a 20 años, largo plazo	Medio (10 a 50 %)
1-2	Baja	Puntual < 10 %	Corta (<2 años)	Reversible (a corto plazo <de 10 años)	Bajo <10 %

Tabla 2. Jerarquización de los impactos a partir del (VIA)

Categoría	Probabilidad de ocurrencia	Valor de VIA
I	Muy alta	VIA >8
II	Alta	6 < VIA ≤ 8
III	Moderada	4 < VIA ≤ 6
IV	Baja	VIA ≤ 4

Las medidas ambientales de prevención, mitigación o corrección se elaboraron en función de las categorías asignadas:

- CATEGORÍA I. Probabilidad de ocurrencia muy alta. VIA mayor o igual a 8. Máxima atención. Medidas preventivas para evitar su manifestación.
- CATEGORÍA II. Probabilidad de ocurrencia alta. VIA entre 6 y 8. Medidas mitigantes o correctivas (preferiblemente estas últimas). Normalmente exigen monitoreo o seguimiento.
- CATEGORÍA III. Probabilidad de ocurrencia moderada. VIA entre 4 y 6. Medidas preventivas, que pueden sustituirse por mitigantes, correctivas o compensatorias cuando el impacto se produzca, si aquellas resultaran costosas.
- CATEGORÍA IV. Probabilidad de ocurrencia baja o media. VIA menor o igual a 4. No se aplican medidas, a menos que se trate de áreas críticas o de medidas muy económicas.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Identificación de las acciones y componentes del medio

Se identificaron las principales acciones susceptibles de producir impactos ambientales: recolección, ineficiente manejo, transportación y deposición. Los componentes del medio susceptibles de recibir los impactos son el medio físico, la biota y el medio social.

#### 3.2 Resultados del método de CRI

La Tabla 3 expone los principales impactos sobre los tres medios afectados.

Tabla 3. Impactos identificados mediante el método de CRI

<b>Código</b>	<b>Impactos</b>
<b>Medio Físico</b>	
MF-01 (Aire)	Pérdida de la calidad del aire
MF-02 (Suelo)	Contaminación de los suelos
MF-03 (Agua)	Contaminación de las aguas superficiales
MF-04 (Paisaje)	Alteración de la calidad visual
<b>Medio Biológico</b>	
MB-01 (Flora)	Destrucción de la vegetación
MB-02 (Fauna)	Migración de las especies
<b>Medio Social</b>	
MS-01 (Sociedad)	Proliferación de enfermedades

#### Impactos al medio físico

a) MF- 01: Pérdida de la calidad del aire.

- Acciones generadoras: Recolección, transportación y deposición.
- Efectos: La alteración de la calidad del aire por la generación de malos olores y gases afecta la fauna y la salud del hombre. El polvo y los residuos, levantados por el viento y los materiales arrastrados por posibles escorrentías superficiales, llegan a los terrenos de cultivo y caminos cercanos, interrumpiendo la actividad agrícola y el tránsito vehicular, lo cual incrementa el efecto antihigiénico y estético desagradable.
- Descripción del impacto: Dado la ausencia de condiciones, en la localidad de Katenguenha se ha optado por realizar quemas incontroladas de los residuos, que contribuyen a la difusión de malos olores y deterioro de la calidad de aire (CETAC 2014).
- Determinación del VIA: Los valores obtenidos de cada indicador se introducen en la fórmula y se ubican en la Tabla 4.

$$\text{VIA} = 10 \times 0,3 + 8 \times 0,2 + 9 \times 0,1 + 2 \times 0,2 + 8 \times 0,2 = 7,5.$$

Tabla 4. Jerarquización del impacto sobre el aire

Medio afectado	I	E	D	Rv	Ri	VIA	Categoría
Aire	10	8	9	2	8	7,5	II

b) MF - 02. Contaminación de los suelos.

- Acciones generadoras: Transportación y deposición fina.
- Efectos: Los efectos de este impacto se agravan cada vez más, dado que en esta localidad no existe sistema de filtros, canales para recolección y sistema de tratamiento de residuos líquidos que se infiltran en el terreno, contaminando los suelos y las fuentes de agua subterráneas.
- Descripción del impacto: el suelo del área no cumple con condiciones técnicas para una adecuada deposición de desechos sólidos, debido a que no han sido acondicionada ni construida técnicamente para este fin.
- Determinación del VIA

$$\text{VIA} = 10 \times 0,3 + 8 \times 0,2 + 7 \times 0,1 + 3 \times 0,2 + 5 \times 0,2 = 6,9.$$

Tabla 5. Jerarquización del impacto sobre el suelo

Medio afectado	I	E	D	Rv	Ri	VIA	Categoría
Suelo	10	8	7	3	5	6,9	II

c) MF- 03. Contaminación de las aguas superficiales.

- Acciones generadoras: transportación y deposición final.
- Efectos: cerca del área se encuentran varios arroyos. La fuente de contaminación sobre estas aguas está dada por el arrastre de los residuos y la deposición de estos cerca de estos afluentes.
- Descripción del impacto: la deposición inadecuada de residuos sólidos es uno de los principales focos contaminantes de las aguas superficiales. Dado el ineficiente acondicionamiento del sitio, las prácticas de vaciado de los residuos sólidos en la localidad se efectúa sin ningún control manejo y planificación, lo que genera impactos negativos en los diferentes componentes del medio ambiente.
- Determinación del VIA

$$VIA = 3 \times 0,3 + 3 \times 0,2 + 7 \times 0,1 + 1 \times 0,2 + 8 \times 0,2 = 4.$$

Tabla 6. Jerarquización del impacto sobre el agua

Medio afectado	I	E	D	Rv	Ri	VIA	Categoría
Aguas superficiales	3	3	7	1	8	4	III

d) MF- 04: Alteración de la calidad visual.

- Acciones generadoras: Transportación y deposición final.
- Efectos: esta alteración se evidencia por un panorama desagradable a la vista de quien transita por el lugar, debido a la presencia de residuos sólidos dispuestos en montículos sin control.
- Descripción del impacto: la deposición de desechos sólidos provoca modificaciones en el medio, así como el deterioro del paisaje.
- Determinación del VIA

$$VIA = 10 \times 0,3 + 8 \times 0,2 + 8 \times 0,1 + 1 \times 0,2 + 4 \times 0,2 = 6,4.$$

Tabla 7. Jerarquización del impacto sobre el paisaje

Medio afectado	I	E	D	Rv	Ri	VIA	Categoría
Paisaje	10	8	8	1	4	6,4	II

### Impactos al medio biológico

e) MB - 01: Destrucción de la vegetación.

- Acciones generadoras: transportación y deposición final.
- Efectos: en el sitio se observan especies vegetales que disminuyen por la circulación de los camiones al depositar los residuos.
- Descripción del impacto: la deposición inadecuada de residuos sólidos en el área de estudio constituye un factor fundamental en la destrucción de la vegetación de esta localidad.
- Determinación del VIA

$$VIA = 8 \times 0,3 + 8 \times 0,2 + 8 \times 0,1 + 4 \times 0,2 + 2 \times 0,2 = 6.$$

Tabla 8. Jerarquización del impacto sobre la flora

Medio afectado	I	E	D	Rv	Ri	VIA	Categoría
Flora	8	8	8	4	2	6	II

f) MB-02: Migración de las especies.

- Acciones generadoras: Tráfico de vehículos y deposición final.
- Efectos: dadas las modificaciones en el área de estudio se incrementan las migraciones de algunas especies.
- Descripción del impacto: este impacto negativo permite analizar las condiciones de esta etapa operativa en la que está encausado el proyecto, ya que ocurre migración de algunas especies.
- Determinación del VIA

$$\text{VIA} = 8 \times 0,3 + 9 \times 0,2 + 8 \times 0,1 + 1 \times 0,2 + 7 \times 0,2 = 6,6.$$

Tabla 9. Jerarquización del impacto sobre la fauna

Medio afectado	I	E	D	Rv	Ri	VIA	Categoría
Fauna	8	9	8	1	7	6,6	II

### Impacto al medio social

g) MS - 03: Proliferación de enfermedades.

- Acciones generadoras: recolección, transportación y deposición final.
- Efectos: Katenguenha, no dispone de servicio de vigilancia, inspección, puerta en el acceso principal y cercos perimetrales. No se controla el ingreso de personas, animales grandes, ni vehículos; igualmente es desordenado el vaciado de residuos, lo que causa la proliferación de vectores como roedores y transmisores de enfermedades, así como los impactos producidos por la deposición de residuos sólidos y los riesgos a que se somete la población del área. Se entrevistaron 170 familias que reportaron haber sufrido trastornos osteomusculares reflejados en dolor de cintura, de piernas y de cuello, poliomielitis, gripe y tos, relacionados con el polvo y gases que se producen al depositar los residuos; además, síntomas gastrointestinales, tifus y hepatitis, problemas de órganos de los sentidos, principalmente los ojos.
- Descripción del impacto: Los agentes etiológicos de enfermedades pueden ser transportados por macro y micro vectores (llevan los microorganismos en las partes externas del cuerpo), tales como: perros, gatos, ratones, gaviotas, mosquitos, bacterias, hongos, moscas, cucarachas, piojos, pulgas, roedores y otros. Igualmente, los microorganismos pueden transmitirse a través de vómitos, heces o líquidos de los vectores (Pérez-Jiménez et al. 2011).
- Determinación del VIA

$$VIA = 10 \times 0,3 + 5 \times 0,2 + 9 \times 0,1 + 2 \times 0,2 + 7 \times 0,2 = 6,7.$$

Tabla 10. Jerarquización del impacto sobre la sociedad y la economía

Medio afectado	I	E	D	Rv	Ri	VIA	Categoría
Sociedad	10	5	9	2	7	6,7	II

### 3.4. Evaluación final de los impactos sobre cada medio afectado

- Aire

Se clasifica como de Categoría II, la probabilidad de ocurrencia es alta, con VIA entre 6 y 8. Se recomiendan medidas correctoras como: cierre del depósito, construcción de un relleno sanitario conforme a las normas de manejo ambiental establecido por ley, instalación de barreras rompe vientos y cubrimiento con lonas de los residuos a transportar.

- Suelo

Se considera de Categoría II y el mismo posee una probabilidad de ocurrencia alta, con VIA entre 6 y 8. Se recomienda: Compactación final del suelo y de los residuos sólidos para reacondicionar el terreno de acuerdo a las características topográficas. Se deberá suavizar pendientes, rellenar depresiones y nivelar el terreno con tierra de similares características que la del entorno.

- Agua

Se describe como de Categoría III, probabilidad de ocurrencia es moderada, con VIA entre 4 y 6. Como parte de las medidas se recomienda: recuperar y reestructurar el depósito de acuerdo con un relleno sanitario; mantener los depósitos de residuos sólidos distantes de los cauces de los ríos; tratar el vertido de los residuos en un lugar técnicamente seleccionado según la protección de las aguas y del suelo, diseñado conforme a las medidas de manejo ambiental establecidas según la ley; Construcción de drenajes perimetrales, un sistema captación de lixiviados tales como: drenes captadores.

- Flora

Se reconoce como de Categoría II, con una probabilidad de ocurrencia alta, con valores de VIA entre 6 y 8. Se establecen como medidas: efectuar el vaciado de tierra para cubrir los residuos, lo que permite la estabilización del suelo y facilita la revegetación natural.

- Fauna

Se clasifica como de Categoría II, la probabilidad de ocurrencia es alta, con valores de VIA entre 6 y 8. Se recomienda como medida: insertar especies endémicas en la zona poscierre del depósito.

- Paisaje

Se apunta como de Categoría II, la probabilidad de ocurrencia es alta, VIA mayor de 6. Se recomienda medidas correctivas tales como: instalación de valla informativa sobre la vía de acceso, en la parte alta y baja, entrada y salida del sitio, para informar los riesgos que implica la inadecuada deposición de residuos sólidos; servicio de vigilancia y cierre del lugar: se debe construir una cerca con malla sobre el borde de la vía para evitar que vehículos depositen los residuos desordenadamente y, por su accesibilidad, debe disponer de un servicio de guardia para controlar la entrada y salida de personas y animales; realizar la compactación de los residuos a través de capas.

- Sociedad

Se clasifica como de Categoría II, la probabilidad de ocurrencia es alta, con VIA entre 6 y 8. Se recomienda tomar medidas mitigantes y correctivas: erradicación de vectores, roedores y plagas, a partir de fumigaciones periódicas; realizar chequeos médicos con frecuencia a la población cercana al depósito; educación ambiental: se debe educar e incentivar a la comunidad a través de campañas de sensibilización para desarrollar una cultura del reciclaje y el tratamiento de residuos sólidos que, además de generar beneficios económicos, minimicen los impactos causados a la población y al medio ambiente.

#### 4. CONCLUSIONES

- Se identificaron los principales impactos ambientales que se producen durante la deposición de residuos sólidos de Katenguenha, a partir de considerar las principales acciones susceptibles de producir dichos impactos (consumismo, recolección, transportación y deposición final de los mismos) y su interacción con los componentes del medio (suelo, aire, agua, flora, fauna y paisaje). Estas acciones afectan en mayor o menor medida todos los componentes del medio.
- La aplicación del método CRI permitió identificar y valorar los impactos ambientales producto de la gestión incorrecta del vertedero de residuos sólidos de la ciudad de Katenguenha. Los impactos con mayor probabilidad de ocurrencia se evalúan como categoría II y poseen un VIA de 6 a 8, excepto el medio físico agua que es de

categoría III ( $4 < VIA < 6$ ), con probabilidad de ocurrencia moderada.

## 5. REFERENCIAS

- BID (BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO). 1997: Guía para Evaluación de Impacto Ambiental para Proyectos de Residuos Sólidos Municipales. Procedimientos Básicos. Washington.
- BUROZ, E. 1990: *La gestión ambiental: Marco de referencia para las evaluaciones de impacto ambiental*. Fundación Polar, Caracas, 376 p.
- CETAC. 2014: Centro de Ecología Tropical y Alteraciones Climáticas. Huambo-Angola.
- DESAFÍO ECOLÓGICO. 2012: Calentamiento global. Grupo Tercer Milenio, México D.F.
- PÉREZ-JIMÉNEZ D. DIAGO-GARRIDO, Y. & CORONA-MIRANDA, B.; ESPINOSA- DÍAZ, R.; GONZÁLEZ PÉREZ, J.E. 2011: Enfoque actual de la salud ambiental. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología* 49(1): 84-92.
- LEY DE BASIS DEL AMBIENTE DE LA REPUBLICA DE ANGOLA. 2013: Artículo 1. Principios de la protección del ambiente, promoción de la Calidad de Vida y del uso racional de Recursos Naturales.
- SEMARNAT. 2006: La educación ambiental y uso adecuado de los residuos. Consultado: 8 may 2016. Disponible en: [http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3285/1/nom\\_150\\_semarnat\\_2006.pdf](http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3285/1/nom_150_semarnat_2006.pdf)
- SOTO, S. E. M. & INFANTE, A. R. 2016: Evaluación geológica ambiental para ubicar un relleno sanitario manual en la parroquia Mene de Mauroa. *Minería y Geología* 32(2): 87-101.

**Inocêncio Bau-Satula**, [ibau@ismm.edu.cu](mailto:ibau@ismm.edu.cu)

Lic. en Geografía. Universidad Agostino Neto, Luanda, Angola

**Mayda Ulloa-Carcasés**, [mulloac@imm.edu.cu](mailto:mulloac@imm.edu.cu)

Doctora en Ciencias Económicas. Departamento de Minas  
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba

**Juelmo Gola-Cahimba**, [jmgolacahimba@gmail.com](mailto:jmgolacahimba@gmail.com)

Máster en Ciencias Geológicas. Departamento de Geología  
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba