

ESTUDIO PRELIMINAR DE ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS EN SEDIMENTOS Y AGUAS DE LA PRESA DE COLAS DEL YACIMIENTO JÚCARO.**PRELIMINARY STUDY OF POTENTIALLY TOXIC ELEMENTS IN SEDIMENTS AND WATERS OF TAILINGS DAMS TO JUCARO DEPOSIT**

Emet Dominguez López ⁽¹⁾, Ramón Guillermo Pérez Vázquez ⁽²⁾, Emidio Estévez Cruz ⁽³⁾.

Esta investigación está dirigida a conocer el comportamiento de elementos potencialmente tóxicos (EPTs) como el Pb, Zn, Cu en aguas, sedimentos, y el grado de contaminación que pueden causar al entorno, provocado por la explotación del Yacimiento Júcaro. El trabajo de campo consistió en el muestreo de sedimentos y aguas en la presa de colas, acompañado de mediciones de pH. Utilizando el método de Espectrometría de Absorción Atómica, se detectaron concentraciones de Cu, Pb y Zn en las muestras de aguas, permisibles para los límites máximos de contaminación según la norma cubana NC 27: 2012. Igualmente para evaluar la composición química de los sedimentos se utilizó la técnica antes mencionada, hallándose pequeñas concentraciones de CuO y ZnO. Por otra parte, mediante el método de polvo difractométrico de rayos-X se obtuvieron varias fases minerales, entre las que se encuentran la scorodita y jarosita, que pueden retener de forma natural la migración de plomo. Los EPTs antes analizados no son causantes de contaminación porque no rebasaron los límites de contaminación permisibles en aguas ni sedimentos y se consideran resultados positivos para la investigación.

Palabras clave: Elementos Potencialmente Tóxicos, Yacimiento Júcaro, presa de colas.

This research is directed to know the behavior of Potentially Toxic Elements (PTEs) like Cu, Pb, Zn in waters, sediments and the degree of contamination caused by the operation of the Jucaro deposit. The fieldwork was made by taking samples of sediments and waters accompanied by pH measurements. For chemical analysis of waters was used Atomic Absorption Spectroscopy detecting Cu, Pb, and Zn in permissible concentrations for maximum pollution limits according to the Cuban norm NC 27: 2012. The same technical was used for obtained small concentrations of CuO and ZnO. By the method of powder diffractometric of X- rays were found scorodite and jarosite to retain naturally the migration of lead and arsenic. The PTEs analyzed do not exceed the limits of permissible concentration in water or sediment and was valued positive results for the investigation.

Keywords: Potentially Toxic Elements, Jucaro deposit, tailings dam

Recibido: 24 de marzo del 2016

Aprobado en su forma original: 27 de abril del 2016

(1) Instituto de Geología y Paleontología. Vía Blanca No 1002 y Línea del Ferrocarril, San Miguel del Padrón. CP 11000. La Habana. Cuba. Correo electrónico: emet@igp.minem.cu

(2) Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE). Calle 114, # 11901, e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao. La Habana. Cuba: monico@civil.cujae.edu.cu

(3) Universidad de Pinar del Río. Hermanos Saiz Montes de Oca. Martí Final # 202. Pinar del Río. Cuba: elmidio@geo.upr.edu.cu

INTRODUCCIÓN

El Yacimiento cuprífero-sulfuroso Júcaro se encuentra alojado en las secuencias vulcanógenas sedimentarias de la Fm. Encrucijada.

Los principales minerales presentes en la mena de este yacimiento son pirita, calcopirita, magnetita, hematita, marcasita, galena, arsenopirita, esfalerita. También están asociados minerales de ganga como el cuarzo, clorita enriquecida en Fe, carbonatos, sericitas y otros. La zona de oxidación del yacimiento está caracterizada por la mineralización secundaria siguiente: calcosina, covelina, bornita, cobre nativo y óxidos e hidróxidos de Fe. El total del recurso del yacimiento estimado previamente fue 2,6 MT con un promedio 1,98% de Cu y 20,91% S, mediante el uso de métodos de cálculo manuales (Esteves, 1999).

Su explotación comenzó a partir de 1979, de sus menas se extrajeron concentrados de calcopirita y pirita (Cruz, 1993).

Actualmente el Yacimiento Júcaro se encuentra cerrado, la presa de colas formada por los materiales de los residuos mineros se localiza a varios metros de la mina, la misma contaba con un dique de contención que colapsó por un golpe de agua, esto provocó el restablecimiento de la escorrentía superficial de las aguas, dando lugar a la formación de cárcavas (*figura 1*), que alcanzan en algunas zonas aproximadamente 2 m de altura y varios metros de largo y a la contaminación del agua con los materiales de las colas.

En esta zona de desarrollo de cárcavas las aguas superficiales se han contaminado con los minerales sulfurosos y férricos de las colas dando lugar a una coloración rojiza.

Debido a la situación presente en esta presa de cola se decidió emprender una investigación preliminar destinada a conocer el comportamiento de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs) en las aguas y en los sedimentos ya que hasta el momento no se conocía si la existencia de estos pudieran ser causantes de contaminación, para ello se

realizó un muestreo en el mes de marzo del año 2014, en donde se tomaron 10 muestras de aguas y 9 muestras de sedimentos, que posteriormente fueron llevadas a la Dirección de Caracterización de materiales-Centro para la Industria Minera y Metalúrgica (CIPIMM) para su análisis químico.

Se decidieron analizar Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs) pues este término se refiere a los elementos esenciales y no esenciales que pueden generar síntomas de toxicidad e inhibición del crecimiento en las plantas, contaminar los suelos y las aguas.

Según Vodke *et al.*, 2005, la excavación de minas, la remoción de minerales y el proceso y la extracción de metales puede causar daños ambientales y, en casos extremos, destruir el ecosistema; por ejemplo, se pueden dañar tierras de cultivo, favorecer la erosión y contaminar cuerpos de agua con sales solubles de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs), como As, Se, Pb, Cd y óxidos de S, entre otros. Aun, elementos sin propiedades tóxicas en baja concentración, como Zn^{2+} o Ni^{2+} y, especialmente Cu^{2+} , son tóxicos en concentraciones mayores. Los EPTs de mayor importancia ambiental son As, Be, Cd, Cu, Cr, Hg, Pb, Se, Tl, V y Zn, que se encuentran regulados en varias partes del mundo y comúnmente presentes en sitios contaminados.



Fig.1. Dos vistas de la presa de colas del Yacimiento Júcaro donde se aprecian la cárcava formada por la escorrentía superficial del agua y los procesos de erosión.

MATERIALES Y MÉTODOS

Mediante el método manual en la recolección de muestras, se tomaron 10 muestras

representativas de aguas (tabla 1) y se muestrearon los sedimentos de las colas mediante el método de surco, se tomaron 9 muestras de sedimentos, (tabla 2).

Se realizó el proceso de control y vigilancia del muestreo, preservación y análisis (cadena de custodia), en donde se describieron los datos de muestreo, la identificación de las muestras, parámetros y métodos analíticos requeridos, fechas y horas de muestreo, nombre del recolector, así como el número y tipo de envase que posteriormente fueron llevadas al laboratorio. Nos apoyamos en los métodos estándares internacionales para el muestreo de aguas.

Las muestras de sedimentos fueron etiquetadas con rotuladores grasos,

introduciendo además un duplicado en su interior. El muestreo se acompañó de una documentación (Ficha de Campo) con una serie de datos que incluyó las siglas de la muestra, (coordenadas marcadas por GPS) y localidad, la fecha de recogida, la litología de la roca madre, el tipo de suelo, siguiendo el manual de métodos de muestreo y preservación de muestras de las sustancias prioritarias.

Se utilizó todo el equipo y material de muestreo pertinente para la recolección: envases de vidrio para las muestras de aguas, bolsas de plástico para tomar sedimentos. Se realizaron mediciones de pH con el empleo de pH METER MODEL PHB-4.

Tabla 1. Muestras de agua tomadas en la presa de colas del Yacimiento Júcaro.

X	Y	Nº Puntos	Muestras	Descripción
270155.63	339090.66	1	J -1	A las orillas del embalse cercano a la presa de colas.
270153.78	339158.37	2	J -2	Aguas superficiales en la presa de colas
270117.69	339223.5	3	J -3	Aguas superficiales cercano al dique de la presa de colas
270109.19	339226.71	4	J -4	Aguas superficiales de la presa de colas.
270143.75	339250.19	5	-	No se muestreo
270043.16	339387.66	6	J -5	Aguas superficiales, cerca del alcantarillado, a unos metros después de la rotura de dique.
270073.93	339156.48	7	J -6	Aguas superficiales, unos metros aguas debajo de la presa de colas.
270068.27	339159.64	8	J -7	Aguas superficiales en la cárcava
270070.8	339138.07	9	J -8	Aguas superficiales en la cárcava
		10	J -9	Aguas superficiales en la cárcava

Tabla 2. Muestras de sedimentos tomadas en la presa de colas de la mina Júcaro.

Nº Puntos	Muestras	Descripción
1	-	No se muestro
2	J S-1	Mezcla de material oxidado y fresco de la presa de colas
3	J S-2	Sedimentos del lecho del arroyo
4	J S-3	Sedimentos cercanos al afluente
5	-	No se muestreó
6	J S-4	Sedimentos cercanos al arroyo cerca de la alcantarilla
7	J S-5	Sedimentos tomados en la zona trasera de dique de contención
8	-	No se muestreó
10	J PC-2	En las paredes de la cárcava de la presa de colas, al inicio
11	-	No se muestreó
12	J PC-3	En las paredes de la cárcava de la presa de colas
13	J PC-4	Muestra tomada en la zona oxidada de la presa de colas
14	-	Límites de la presa de colas
15	J SP-1	Sedimentos del patio de la mina

Parte experimental:

Las muestras de aguas y sedimentos tomadas en la presa de colas fueron llevadas a la Dirección de Caracterización de Materiales-CIPIMM (Centro para la Industria Minera y Metalúrgica).

Para realizar los análisis químicos a las muestras de aguas y sedimentos se utilizó el equipo de Espectroscopia de Absorción Atómica VARIAN, modelo AA 240.

Para las lecturas de los analitos se emplearon los siguientes parámetros instrumentales de operación: (1) modo de medición del instrumento: absorbancia, (2) modo de calibración: concentración, (3) algoritmo de calibración: lineal, (4) tipo de llama: aire/acetileno, (5) flujo de aire: 13,50 ml/min y flujo de acetileno: 2,0 ml/min.

Se emplearon las condiciones analíticas generales (tabla 3) para la espectrofotometría de absorción atómica con llama.

Tabla 3. Condiciones analíticas generales según la norma cubana NC ISO 11047.

Elemento	Longitud de Onda (nm)	Tipo de Llama	Cloruro de Lantano	Principales Interferencias	Corrección de Fondo
Cobre	324.8	Aire oxidante / acetileno	No		Deuterio
Plomo	217.0	Aire oxidante / acetileno	No		Deuterio
Zinc	213.9	Aire oxidante / acetileno	No		Deuterio

Para determinar la composición de fases (composición mineralógica) se utilizó el método de polvos difractométrico de Rayos-X (tabla 4), y se registraron en un equipo Philips modelo PW – 1710.

Tabla 4. Parámetros de operación utilizados por el equipo de difracción de rayos (DRX).

Goniómetro	vertical
Sistema de focalización	Bragg-Brentano
Radiación K α	Fe
Filtro	Mn
Diferencia de potencial aplicada	30 kV
Corriente anódica	20 mA
La calibración del equipo se chequea con patrón externo	Silicio
Registro angular	6-800 (2 θ)

Todos los difractogramas se registraron según variante de medición punto a punto; paso angular de 0,050 (2 θ), a un tiempo de medición en cada posición angular de 3 segundos.

Los resultados numéricos de intensidades relativas y ángulos de difracción se convirtieron en difractogramas continuos con el empleo del programa "Origin 7.0". Las distancias interplanares se determinaron con el programa Ttod para PC. El análisis cualitativo de fases se realizó con la utilización de la base de datos PCPDFWIN; versión 1.30, JCPDS-ICDD / 2002, compatible con Windows 98 para Office 2000. Todos los análisis están certificados por la ISO 17025, sistema de calidad del laboratorio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

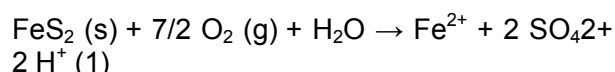
➤ Análisis del pH medido en las aguas superficiales de la presa de colas.

Acompañado del muestreo de agua se midió pH in situ. El pH medido en el campo (tabla 3), fue dividido en tres clases: aguas muy ácidas (3-4.5), aguas débilmente ácidas (4.5-7) y aguas débilmente alcalinas (7-8.22).

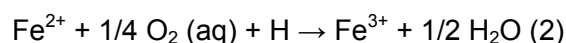
Cuando el pH está entre 2.5-4.5, se producen altos niveles de sulfatos y la acidez y el Fe total aumentan, la relación Fe³⁺/Fe²⁺ es baja. Esta etapa ocurre predominantemente por la actividad de los ferroxidantes. (Ferguson y Ericsson, 1988 en: García, 2011).

El pH más bajo se midió en zonas de la cárcava, donde se produce una reacción entre los minerales sulfurosos de las colas y el agua. El pH entre 2.5-4.5 se midió en los puntos 8, 9, 10.

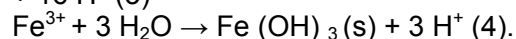
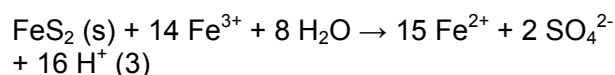
La reacción general que controla este proceso es:



En presencia de oxígeno, el hierro ferroso sufre la reacción:



El hierro férrico que se produce puede oxidar nueva pirita (reacción 3) o precipitar como hidróxido férrico (reacción 4).



Las aguas débilmente ácidas con valores de pH entre 4.5-7 se encuentran cercanas al dique de la presa de colas y en la llanura de inundación. Las aguas en esta zona son débilmente ácidas porque se diluyen con el agua aportada por los afluentes.

Las aguas débilmente alcalinas con valores de pH 7-8.22 se relaciona con aquellas aguas que se encuentran cercanas a la presa de colas, ejemplo: el embalse, el cual no ha sido contaminado por los EPTs de la presa de colas y en otras zonas donde la escorrentía superficial no ha formado cárcavas aún, no se ha generado una reacción entre los sulfuros.

Desde el punto 1 hasta el punto 7 los valores de pH son superiores a 4.5. Cuando los valores de pH se encuentran por encima de 4,5 corresponden a una etapa donde los sulfatos y el Fe que puedan existir presentan poca o ninguna acidez y las reacciones que puedan tener lugar estarán regidas por oxidación bacteriana directa (Ferguson y Ericsson, 1988 en: García, 2011).

Tabla 5. Mediciones de pH en aguas del Yacimiento Júcaro.

Nº Puntos	X	Y	pH in situ
1	270155.63	339090.66	7.34
2	270153.78	339158.37	7.86
3	270117.69	339223.5	8.22
4	270109.19	339226.71	4.95
5	270143.75	339250.19	4.91
7	270043.16	339387.66	6.6
8	270073.93	339156.48	3.83
9	270068.27	339159.64	3
10	270070.8	339138.07	4.5

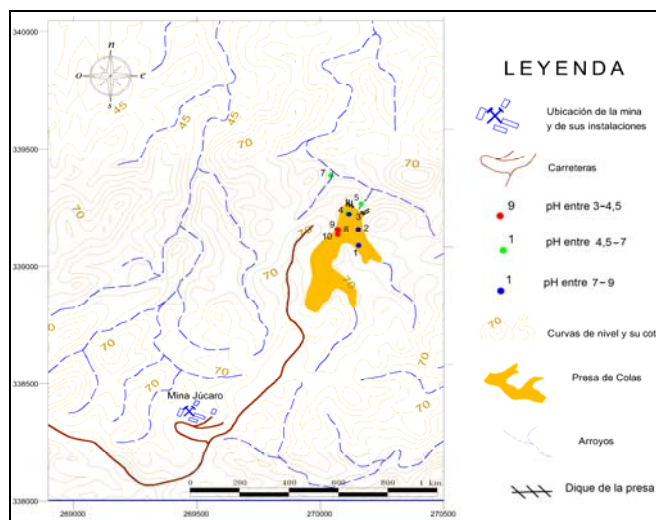


Fig 2. Mapa de ubicación del pH medido en presa de colas

Análisis de los Elementos Potencialmente Tóxicos en aguas

Las muestras de aguas superficiales y efluentes de mina tomadas en su mayoría en la presa de colas y cercana a esta fueron

analizadas químicamente para conocer el comportamiento de los EPTs.

Los EPTs Cu, Pb, Zn como se observa en la (tabla 6), se debe a que la mena principal de este yacimiento es la pirita (FeS₂) y la calcopirita (CuFeS₂).

Tabla 6. Elementos Potencialmente Tóxicos analizados en las muestras.

No de Puntos	Muestras	Elementos (mg/l)				
		Cu	Pb	Zn	Fe total	S total
1	J-1	0.5	0.1	0.2	0.5	91
2	J-2	0.5	0.1	0.2	0.5	30
3	J-3	0.5	0.1	0.2	0.5	82
4	J-4	0.5	0.14	0.2	0.28	97
6	J-5	0.5	0.12	0.9	0.5	300
7	J-6	0.5	0.1	0.97	0.5	440
8	J-7	1.6	0.1	0.85	0.66	840
9	J-8	2.9	0.18	0.03	1.8	2000
10	J-9	4.3	0.1	0.022	1.9	900

Fuente: Dirección de Caracterización de materiales-CIPIMM, 2014.

Como se observan en los resultados de la tabla anterior tanto las concentraciones de Cu, Pb, Zn y de Fe total se encuentran muy bajas.

En tanto las concentraciones de S total son altas. Los minerales meníferos están compuestos por sulfuros, el azufre en el medio, ha contaminado las aguas y a su vez la ha acidificado.

Las concentraciones por EPTs siguen la siguiente secuencia: Zn>Cu>Pb. El Fe puede migrar en forma de sulfato o de soluciones coloidales.

El Zn la propiedad de disolverse con facilidad en forma de sulfato o de cloruro y de esta forma es arrastrado por las aguas superficiales.

Las mayores concentraciones de Cu detectadas en las muestras se encuentran en zonas que coinciden con el valor de pH más bajo medido. En las cárcavas de la presa de colas se produce una reacción entre las aguas superficiales y los minerales sulfurosos de las colas, desarrollando la acidez de las aguas.

La coloración rojiza de las aguas (*figura 3*) se presencia en estas zonas donde existen mayores concentraciones de óxidos e hidróxidos de Fe y la oxidación de minerales sulfurosos y un pH=3.



Fig. 3. Muestra de agua tomada en la presa de colas con presencia de Cu, Pb, Fe, S.

Las concentraciones de los Elementos Potencialmente Tóxicos analizados en las aguas de la presa de colas de la mina Júcaro son inferiores a los Límites Máximos Permisibles Promedio (LMPP), para los parámetros de los residuales líquidos de contaminación según la Norma Cubana NC 27: 2012, ya que si comparamos los resultados promedios de la muestras (*tabla 7*) son inferiores a los límites de contaminación.

Tabla 7. Concentraciones promedios de EPTs en aguas en comparación con los Límites Máximos Permisibles Promedio en Cuba.

EPT (mg/L)	Cobre	Plomo	Zinc (total)
Promedio de concentraciones en Júcaro	1,31	0,12	0,41
Concentración Máxima permisible	5,0	1,0	1,5

Análisis de óxidos mayoritarios en sedimentos.

En las muestras de sedimentos tomadas se observan que los óxidos de Cu y Zn se encuentran en muy pequeñas concentraciones, como trazas, siendo muy

superior los contenidos de Fe₂O₃ (tabla 8), esto se explica por la composición básicamente pirítica de los depósitos de cola y la buena recuperación del proceso de beneficio de las menas, con la oxidación de los minerales que se encuentran en los sedimentos de las colas.

Tabla 8. Contenido de óxidos en las muestras de sedimentos.

No de Puntos	Muestras	Elementos (%)				
		CuO	Fe ₂ O ₃	ZnO	SiO ₂	MnO
2	JS-1	<0.04	32.67	0.08	36.46	0.12
3	JS-2	0.07	35.81	0.15	35.74	0.16
4	JS-3	0.04	33.85	0.12	37.52	0.15
6	JS-4	0.06	35.59	0.11	42.33	0.10
7	JS-5	0.05	34.22	0.11	44.86	0.11
10	JPC-2	0.08	31.54	0.11	38.19	0.18
12	JPC-3	< 0.04	35.77	-	38.56	0.09
13	JPC-4	< 0.04	33.91	0.02	41.18	0.08
15	JSP-1	0.08	32.94	0.11	43.73	0.15

Fuente: Dirección de Caracterización de materiales-CIPIMM, Año 2014.

El Cu es muy estable en zonas oxidadas (Arioza, 1989). Las paredes de la cárcava están más expuestas a la oxidación que otras zonas de la presa de colas, como la muestra tomada JPC-2, (figura 4).

En cuanto al Fe₂O₃ y el MnO presentan una peculiaridad. El Fe y el Mn tienen cargas opuestas cuando el Mn se encuentra en forma de hidrosol presenta carga negativa. En consecuencia los sedimentos oxidados ricos en manganeso contienen frecuentemente cantidades notables de otros metales (Arioza, 1989).

Según el Perfil de mercado del Sílice, publicado en 2013 por la Coordinación General de desarrollo minero mexicano, el SiO₂ por causa de su estabilidad química y física es el mineral detrítico más abundante, constituye un compuesto químico puro, ya que su composición suele ser 100% de SiO₂ (46.7% de Si y 53.3% de O₂). El cuarzo es un mineral de ganga de este yacimiento.

En el caso del zinc aunque no aparece en altas concentraciones en las muestras de las colas,

lo encontramos como mineral presente en la mena, como esfalerita.



Fig.4. Muestra de sedimentos tomada en la presa de colas. El diagrama de rosa, destaca los óxidos Mn (amarillo), Cu (rojo), Zn (azul).

Resultados obtenidos en el análisis de fase

En el análisis realizado a las muestras de sedimentos se detectó la presencia de las

fases cuarzo, clorita, pirita, albita, yeso y calcita (figura 5). En la muestra JPC-4 se

obtuvo además jarosita ($KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$) y scorodita ($FeAsO_4 \cdot 2H_2O$) en la figura 6.

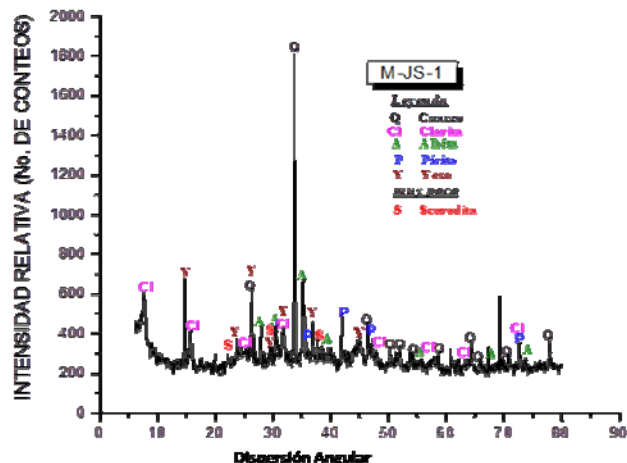


Fig.5. Difractograma de las fases minerales de la muestra M-JS-1.
 Fuente: Dirección de Caracterización de materiales-CIPIMM. (Centro para la Industria Minera y Metalúrgica). Año 2014.

La muestra M-JS-1, presenta una composición mineralógica variada. En primer lugar la presencia de cuarzo, albita que son minerales de ganga del yacimiento, la clorita se observa producto de las alteraciones hidrotermales (cloritización). Es común en este tipo de menas

la presencia de yeso. La pirita es uno de los principales minerales meníferos. En esta muestra se encontró scorodita ($FeAsO_4 \cdot 2H_2O$), que se forma por la oxidación arsenopirita ($FeAsS$), mineral presente en la mena del yacimiento.

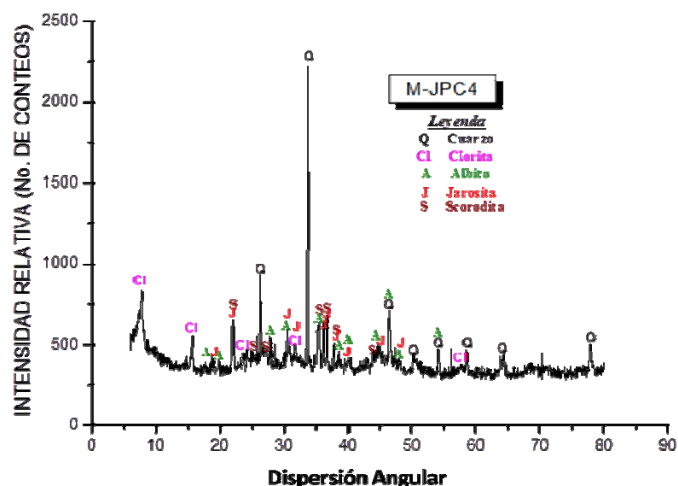
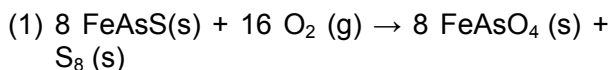


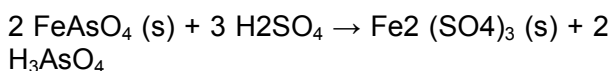
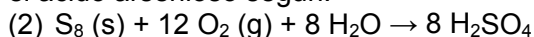
Fig.6. Difractograma de las fases minerales de la muestra M-JPC-4.
 Fuente: Dirección de Caracterización de materiales-CIPIMM. (Centro para la Industria Minera y Metalúrgica). Año 2014.

En el caso de la jarosita se formó debido a la meteorización de los sulfuros de hierro de las colas.

En el caso de la scorodita tanto la oxidación in situ como la acción bacteriana (Guerrero, 2005 en Casanova *et al.*, 2011) logran la transformación de arsenopirita en scorodita por oxidación química (Foster, 1998 en Casanova *et al.*, 2011):

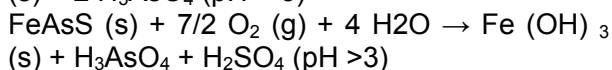
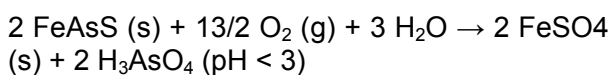


Como puede verse, durante el proceso se forma el octazufre elemental que reacciona con el dióxígeno del aire y el agua del medio dando lugar a la formación del ácido sulfúrico y el ácido arsenioso según:

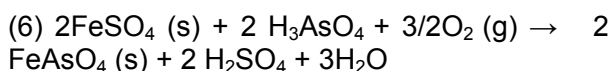


Para que estas reacciones transcurran es importante considerar la acidez del medio (Foster, 1998 en Casanova *et al.*, 2011) y el conjunto de reacciones de drenaje ácido (4) – (7) siguientes:

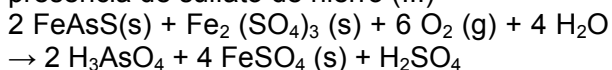
Oxidación e hidrólisis del sulfuro scorodita



Oxidación catalítica del Fe (II) → Fe (III) en presencia de microorganismos acidófilos (Thiobacillus Ferrooxidans)



Reacción de oxidación de la scorodita en presencia de sulfato de hierro (III)



La presencia de iones Fe (III) según la reacción anterior potencian el ciclo continuo de oxidación del sulfuro primario arsenopirita presente en sólidos sulfurados.

CONCLUSIONES

1. Según el pH medido en las aguas de la presa de colas la acidez del agua, se restringe a zonas específicas de las cárcavas.
2. La contaminación por Pb, Cu y Zn no presentan un problema ambiental ya que se encuentra por debajo de límites máximos permisibles promedio en Cuba.
3. Lo altos contenidos de azufre en las colas se debe a la contaminación de las aguas superficiales en las cárcavas.
4. Tanto el zinc como el cobre en las muestras de sedimentos de las colas, se encuentran en concentraciones muy bajas, casi cercanas al límite de detección del equipo utilizado.
5. En los análisis de fases evidenció la composición mineralógica del yacimiento y la presencia de jarosita y scorodita, minerales formados a partir de la alteración y oxidación de los minerales de las menas.

BIBLIOGRAFÍA

- Arioza, J. 1989. Curso de yacimientos de minerales metálicos. Tipos genéticos. Editorial Pueblo y Educación, La Habana, Cuba, 172 p.
- Casanova A., Alonso J., 2011. Aplicación de la difracción de Rayos-X para la caracterización y estudio de los concentrados de arsenopirita con diferentes grados de intemperismo. IX Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, pp. 14-22. La Habana, Cuba. http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2011_Diaz_Castro_MIN5-P17.pdf
- Cruz, E. M. (1993). Papel del vulcanismo básico y cupro-pirítico de la zona occidental de Cuba. Tesis de Doctorado. Departamento de Geología, Universidad de Pinar del Río. Cuba, 110-p.
- Estévez, E. (1999). 3D Orebody modelling and resource estimation of the Jucar deposit, Pinar del Rio, Cuba. Holland. Tesis de Maestría, Institute for aerospace survey and earth sciences, Holland, 77- p.
- García Ch., (2011). Estudio ambiental de las áreas afectadas por la actividad minera del depósito Santa Lucía. Tesis de pregrado. Departamento de geología, Universidad de Pinar del Río, 73-p.

Manual de métodos de muestreo y preservación de muestras de las sustancias para las matrices prioritarias del proname, 2012. México, 55-p.

Norma cubana NC 27: 2012. Norma Cubana de Vertimiento de Aguas Residuales a las Aguas Terrestres y de Alcantarillado.

Norma cubana NC ISO 11047. Calidad del suelo. Determinación de cadmio, cromo, cobalto, cobre, plomo, manganeso. Métodos de espectrometría.

Perfil de mercado del sílice. Coordinación general de minería. Dirección general de desarrollo minero. México

www.economia.gob.mx/files/.../estadisticas_perfiles_silice_0513.pdf

Standard Methods for examination of water and wastewater. Edition 20th, 1999. United State of American.

Volke T., et al., 2005. Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación. pp- 35.36. México
<https://books.google.com.cu/algunos+metales+no+i mplican+peligro+para+los+sistemas+biol%C>.