

Caracterización preliminar de residuos de minería aluvial en la región Madre de Dios – Perú

Preliminary characterization of aluvial mining waste in the Madre de Dios region – Peru

MSc. Flora Elsa Huamán-Paredes^{1*} <https://orcid.org/0000-0003-3818-7109>

MSc. Gregorio Urbano Palma-Figueroa² <https://orcid.org/0000-0002-8478-680X>

Ph.D. Lisveth Flores-del Pino¹ <https://orcid.org/0000-0002-0524-5432>

¹Universidad Nacional Agraria la Molina, Perú.

²Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú.

*Autor para la correspondencia. correo electrónico: ehuaman@lamolina.edu.pe

RESUMEN

En la minería aluvial de la Región de Madre de Dios- Perú, usan mercurio en el proceso de extracción del oro, generando un residuo sólido llamado arenas negras. El objetivo del trabajo fue la caracterización preliminar de estas arenas colectadas de diferentes concesiones mineras, según la guía para muestreo de suelos del Ministerio del Ambiente. El metal mercurio se determinó por espectrofotometría de emisión atómica, los parámetros físicos usando la metodología internacional para residuos sólidos y la identificación de estas fases utilizando Difracción de rayos X. La arena negra de Alto Madre de Dios reveló un valor de mercurio total de más de 275 mg.Kg⁻¹ de residuo, mientras que Inambari un valor de 13,1 mg.Kg⁻¹. Una diferencia de medias de 137,79mg.Kg⁻¹. El pH fue entre 7 y 6,5 y conductividades hasta 0,01092 S.m⁻¹. Las fases identificadas en las arenas negras fueron cuarzo, muscovita, caolinita, ilmenita, y goethita principalmente.

Palabras clave: mercurio, arenas negras, residuo minero aluvial.

ABSTRACT

In the alluvial mining of Madre de Dios-Perú región, they use mercury in the gold extraction process, generating a solid waste called Arenas Negras. The objective of the work was the preliminary characterization of these sands that were collected from different mining concessions, according to the soil sampling guideline of the Ministry of the Environment. The mercury metal was determined by atomic emission spectrophotometry, the physical parameters using the international methodology solid waste and phases with the conventional method using an X-ray Diffractometer. The Arenas Negras of high Madre de Dios revealed a total mercury value of more than 275 mg.Kg⁻¹ of waste, while Inambari a value of 13,1 mg.Kg⁻¹. An average difference of 137,79 mg.Kg⁻¹. The pH was between 7 and 6,5 and conductivities up to 0,01092 S.m⁻¹. The phases identified in the arenas negras were mainly quartz, ilmenite, hematite and goethite.

Keywords: mercury, black sands, alluvial mining waste.

Recibido: 5/10/2019

Aprobado: 30/4/2020

Introducción

La minería aurífera aluvial es una actividad desarrollada en diferentes regiones en el Perú, como Madre de Dios. En el proceso de extracción y beneficio del oro, los pequeños mineros y mineros artesanales utilizan mercurio.⁽¹⁾ Según la producción alcanzada de este metal precioso la descarga promedio de mercurio a los cuerpos de agua en Madre de Dios alcanzó 30 TM/año, liberando 400 t de mercurio al ambiente hasta el año 2007. Estas se depositan en las cercanías de los cauces de los ríos como Colorado, Inambari, Tambopata, Madre de Dios y en toda la extensión del suelo amazónico.⁽²⁻³⁾ La mayor cantidad de mercurio líquido es liberado en los molinos, canales y en el lavado de amalgama directo al río en forma de vapor cuando realizan el refogeo en depósito abierto,⁽⁴⁾ generando impactos ambientales⁽⁵⁾ y de salud, así como a la fauna de la zona.^(6,7)

En el Perú se viene elaborando un plan de recuperación de los impactos ambientales generados por la minería ilegal, así como por la pequeña minería y minería artesanal.^(8,9) Actualmente existe presencia de residuos mineros, lodos y cascajo generados a lo largo de los años de explotación del mineral, que permanecen en las zonas mineras como se indica en el inventario actualizado de pasivos ambientales.⁽¹⁰⁾

Se han realizado revisiones de métodos analíticos para estudiar la mineralogía de los desechos mineros y caracterizarlos para una buena gestión y remediación de suelos o lugares contaminados, enfatizando en la estabilidad de los minerales reactivos que contienen metales en diversas condiciones redox.^(11,12) Para clasificar residuos mineros

metalúrgicos, según su peligrosidad, se han realizado caracterizaciones midiendo: humedad, pH, conductividad, granulometría y usando el método DIN 38414-S4 para determinar el riesgo de estos residuos, llegando a clasificarlos como clase III (peligroso).⁽¹³⁾ Otros autores hicieron evaluación ambiental y caracterización nano-mineralógica de carbón y drenaje ácido de la minería del carbón, determinando por difracción de rayos X los minerales y la cristalinidad de las muestras, así como también aplicaron espectroscopia infrarroja con transformadas de Fourier (FTIR) determinando los enlaces carbono – carbono en las muestras sólidas.⁽¹⁴⁾ Son escasas las evaluaciones toxicológicas de éste tipo de residuos mineros, algunos autores plantearon usar microorganismos para evaluar peligrosidad y plantear tratamientos sustentables.⁽¹⁵⁾ Se han aplicado test simples como las curvas características de tamponamiento ácido (ABCC) y la de generación neta de ácido (GNA) y además técnicas de difracción de rayos X, para identificar fases importantes que pudiesen estar contribuyendo, ya sea a la neutralización y/o formación de drenaje ácido en el residuo, logrando caracterizar diferentes residuos de mina.⁽¹⁶⁾

Dada la necesidad de gestionar los residuos de la región Madre de Dios, llamados arenas negras, el objetivo es realizar una caracterización preliminar de éstos relaves mineros utilizando técnicas de difracción de rayos X, espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo y determinaciones fisicoquímicas como pH, conductividad y humedad, con la finalidad de plantear posteriormente tratamientos de estabilización y solidificación,⁽¹⁷⁾ vitrificación, valorización o su disposición final adecuada.

Materiales y métodos

Descripción del sitio de muestreo

La Región Madre de Dios se ubica en la región sur oriental del territorio peruano, entre las coordenadas geográficas 9°57' y 13°20', latitud sur, 68°39' y 72°31', longitud Oeste. Tiene una superficie de 85 301 Km², una población estimada de 146 387 habitantes, y de ellos alrededor de 101 787 se encuentran en Tambopata – Puerto Maldonado, alcanzando el 69.5%,⁽¹⁸⁾ donde hombres y mujeres e inclusive menores de edad, se dedican a la explotación minera del oro.⁽¹⁹⁾

Muestreo

Las muestras secas, MS2, MS3 y frescas MF1 y MF4 de residuos de arenas negras (relaves mineros) fueron cercanas a las cuencas hidrográficas del Inambari, Colorado, Alto Madre de Dios (MDD) y Bajo MDD, mostradas en la tabla 1.

Tabla 1 - Lugares de toma de muestra de residuos de arenas negras de Madre de Dios

Código muestra	Coordenadas Geográficas (Dátum WGS 84)	Cuenca Hidrográfica
----------------	--	---------------------

	Este	Norte	
MF1	351756	8550941	Inambari
MS2	340133	8604775	Colorado
MS3	491616	8609772	Bajo MDD
MF4	426604	8593687	Alto MDD

Se realizó un muestreo simple de residuos de arenas negras en época lluviosa (enero) y época seca (agosto), de diferentes concesiones mineras del departamento de Madre de Dios, según la guía para muestreo de suelos en el marco del decreto supremo, D.S. N°002-2013 del Ministerio del Medio Ambiente, MINAM.⁽²⁰⁾ Se tomaron de 4 a 6 submuestras de diferentes partes de pozos de almacenamiento y/o suelo de “playa”, anotando las coordenadas geográficas (tabla 1), consiguiendo 5 Kg de muestra, por duplicado. Se almacenó y conservó en bolsas de polietileno de alta densidad y luego fueron colocadas en recipientes de plástico duro de 5 Kg de capacidad. Se refrigeraron a 4 °C hasta proceder con los análisis.

Procesamiento en laboratorio para conseguir muestra representativa

Para procesar las muestras de arenas negras de forma representativa e iniciar las corridas experimentales se procedió a homogenizarlas eliminando las piedras de mayor tamaño y los pequeños trozos de madera. Se hizo la técnica de pila cónica y cuarteo. Se colocó las arenas negras en una superficie plana y limpia, se mezcló enérgicamente volteando las arenas negras por tres veces. Con la última vuelta se paleó la totalidad de las arenas negras hasta formar una pila cónica, agregando cada palada sobre la anterior. Se aplanó la pila cuidadosamente presionando desde su ápice, logrando una circunferencia uniforme con las arenas negras. Se dividió en cuatro partes iguales y se extrajo los dos cuartos opuestos que sirvió para hacer otra circunferencia similar a la anterior, de la cual se extrajo otros dos cuartos de arenas negras y así sucesivamente hasta que se obtuvo una muestra representativa conteniendo todo el material original. Se preservaron a 4°C.

Determinaciones realizadas a las arenas negras

Medición del pH

La determinación del pH de los residuos mineros se procedió según el método del compendio de Residuos Sólidos, de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. RS-846.⁽²¹⁾

Se colocó 0,02 Kg de muestra representativa con $2 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ de agua tipo I⁽²²⁾ en un vaso de precipitado de $5 \times 10^{-5} \text{ m}^3$, se tapó y se agitó la suspensión por 300 s. Se dejó que la suspensión del residuo permanezca por alrededor de 900 s permitiendo que el residuo

suspendido sedimento, se filtró y midió el pH de la disolución acuosa con el equipo calibrado, colocando los electrodos del peachimetro en el vaso de precipitado sumergiendo lo suficiente dentro de la disolución acuosa para establecer buen contacto eléctrico a través del hoyo de la fibra capilar del electrodo. Se usó el multiparámetro marca HANNA HI2211, rango pH -2,00 a 16,00.

Humedad

Se siguió una variante de la metodología de la Norma Técnica Peruana, NTP 339.127(ASTM- D-2216).⁽²³⁾ Se utilizó una balanza analítica Kern ADB con precisión de 0,1mg y una estufa Memert, modelo UF 160 pantalla individual, serie B515.0511 procedente de la República Federal de Alemania.

Se determinó la masa de 0,1 Kg de muestra de arenas negras y se colocó en un crisol previamente pesado, se llevó a la estufa por 18 horas a 40°C hasta masa constante. Luego que las arenas negras secan se retiraron de la estufa, colocándolos en un desecador. Se procedió de la misma manera para todas las muestras, separándolas en dos grupos: MF1, MF4 y MS2, MS3.

Conductividad

Para calibrar el equipo de conductividad, marca HANNA HI2315-01, con rango de lectura de 0,0 hasta 0,200Sm⁻¹, se usó una disolución de cloruro de potasio, KCl, 0,001M cuya conductividad eléctrica específica fue de 0,014Sm⁻¹.

Se colocó 0,02 Kg de una muestra de arenas negras secadas al aire según la norma de la Organización Internacional de Normalización, ISO 11265⁽²⁴⁾ y se añadió 1x10⁻⁴ m³ de agua reactiva, después de tapar se agito ligeramente en agitador rotativo por 1800 s de forma intermitente para mantener la muestra en suspensión. Se filtró con papel filtro de tamaño de poro de 8 micrómetros y se procedió a medir la conductividad eléctrica del filtrado directamente usando la celda de conductividad y el conductímetro, corregida a 25 °C.

Determinación de mercurio en residuo minero

Para la determinación cuantitativa de mercurio en las muestras de arenas negras se utilizó el método 200.7; determinación de metales y elementos traza en agua y residuos por espectrometría de emisión atómica de plasma acoplada inductivamente, (ICP-AES) de la agencia de protección del medio ambiente (EPA).⁽²¹⁾

Después de secar 2x10⁻³ Kg de arena negra a 60°C y de pasar por tamiz de 5 mesh, una alícuota de 1x10⁻³ Kg se mineralizó en un vaso de precipitado Phillips resistente al calor, según el método 3050 B (digestión ácida de sedimentos, lodos y suelos) de la EPA. En campana de extracción se le adicionó 4 mL 1:1 HNO₃ y 10 ml 1:4 HCl, se tapó con luna de reloj y se llevó a una plancha de calentamiento para reflujo suave, sin hervir, a 95°C por 30

minutos. Se evita hervir para que no se forme el azeótropo HCl: H₂O. Después que enfrió se transfirió cuantitativamente a una fiola de 100 mL completando con agua reactiva. Reposó la muestra toda una noche, para separar material insoluble y así quedó lista para análisis por ICP-AES en el laboratorio servicios analíticos generales, SAG, Lima- Perú. El equipo usado fue iCAP 7600-ICP-AES con bomba peristáltica de 4 canales con velocidad de 0 a 125 rpm con masa de flujo control del gas plasma de 0-20 L/min y para el nebulizador de gas de 0-1,5 L/min; rango de longitud de onda de 166-847nm y detector Chip CID86 de estado sólido de alto rendimiento.

Caracterización de fases por DRX del residuo minero

Las fases presentes en los residuos de arenas negras de Madre de Dios se detectaron mediante Difracción de rayos X (DRX). El equipo usado fue un Difractómetro marca Bruker, modelo D8-Focus que emplea un tubo de Cu con K_{α1} de $\lambda=1.5406\text{\AA}$. El rango angular de análisis (2θ) fue: 5°-90°, con un paso de 0.02°. Un generador de rayos X con voltaje de salida del tubo igual a 40 kV y una corriente de salida del tubo igual a 40mA, el tipo de detector fue PSD Lynxeye. Con este equipo se permite mover la posición de la muestra respecto al haz que incide (ω), permaneciendo en forma fija el detector (2θ), o fijar ω y mover 2θ . Las muestras se rotaron alrededor del eje perpendicular a la superficie, logrando un mejor muestreo y una señal con mayor intensidad.

Se identifican las fases sólidas presentes utilizando la base de datos internacional PDF-ICDD, (*Powder Diffraction File - International Centre for Diffraction*).⁽²⁴⁻²⁵⁾ Es necesario indicar que, debido a la naturaleza de las muestras, los difractogramas presentan orientación preferencial en algunos picos de reflexión. Asimismo, para estimar y verificar el porcentaje en peso (%W) de las principales fases identificadas, se utilizó el método RIR (*Referency Intensity Ratios*) que se basa en coeficientes de intensidad de referencia.⁽²⁵⁾

Resultados y discusión

Determinaciones de pH, conductividad y humedad

Los valores de pH de arenas negras medidos en agua a 25°C, estuvieron en el rango de moderadamente ácidos, neutros y medianamente alcalinos. Así la muestra MF4 resulto ligeramente ácida, mientras que MF1 y MS3 resultaron neutros y MS2 medianamente alcalino como se muestra en la Fig. 1a. La muestra MF4, que corresponde a alto Madre de Dios, estará más disponible a liberar los posibles iones metálicos de la matriz⁽¹²⁾ respecto a las otras muestras debido al pH encontrado. Así mismo el valor de conductividad medido para ésta muestra fue de 0,011S m⁻¹ mayor al de las muestras F1, S2 y S3 que fueron entre 3.2x10⁻³ S m⁻¹ y 4,53x10⁻³S m⁻¹(Fig. 1b).

Respecto a los valores de humedad tanto las muestras MF1 y MF4 tienen valores muy cercanos por la naturaleza de las mismas, que son “frescas”; mientras que MS2 y MS3 sus valores de humedad fueron de alrededor del 3%, como se indica en la Fig. 1c.

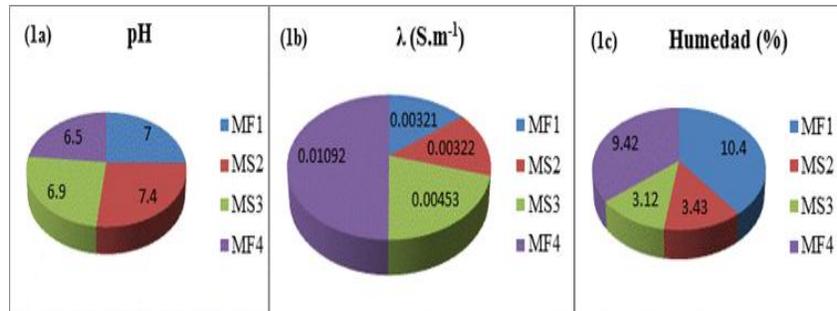


Fig. 1 - Características físicas de arenas negras. (1a) pH, (1b) conductividad y (1c) humedad

Determinación de mercurio en arenas negras

Respecto a la determinación de la concentración del mercurio en las muestras estudiadas, es en la muestra MF4 que se encontró una concentración mayor a 275mg/Kg respecto a las otras muestras, sobrepasando el valor de 260mg/Kg que recomienda la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos.⁽²¹⁾ Esta elevada concentración está relacionada con la alta conductividad encontrada para esta muestra. La disposición de los residuos inmediatamente después de todo el proceso de extracción, hace notar que este contaminante permanece en el lugar antes de volatilizarse y/o depositarse en otros compartimentos. Respecto a las muestras secas (MS) se obtuvo menores concentraciones presentando una diferencia de medias de 137,79mg/Kg lo que indica una diferencia significativa de la concentración de mercurio entre ambos estados de la muestra, como se observa en la Fig. 2.

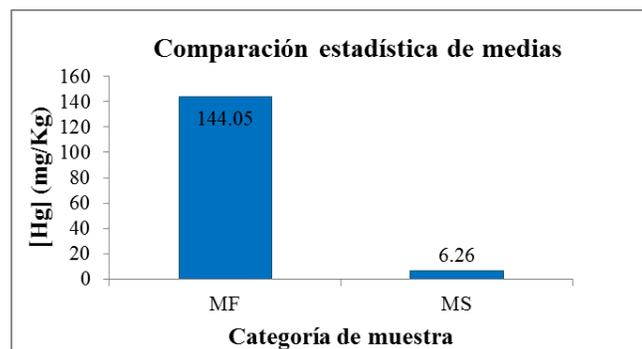


Fig. 2 - Comparación estadística de medias para muestras frescas (MF) y muestras secas (MS) en arenas negras de Madre de Dios

Caracterización de fases en el residuo minero con código MF1

En las bases del archivo de los patrones de difracción de polvos de las fichas del Centro Internacional para los datos de difracción, asociadas a las diferentes fases de las cuatro muestras de arenas negras de Madre de Dios están representadas en las figuras 3, 4 y 5.

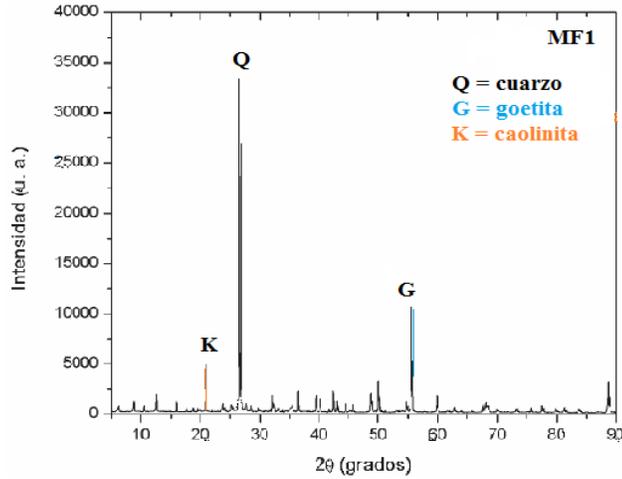


Fig. 3 - Difractograma de rayos X para la muestra MF1

El difractograma de rayos X que se muestra para MF1 revela alta intensidad para dos fases: cuarzo 54,4 % y goetita 35 % en mayor porcentaje y presencia de caolinita en 3,1%, los demás picos corresponden a las otras fases en porcentaje mucho menores.

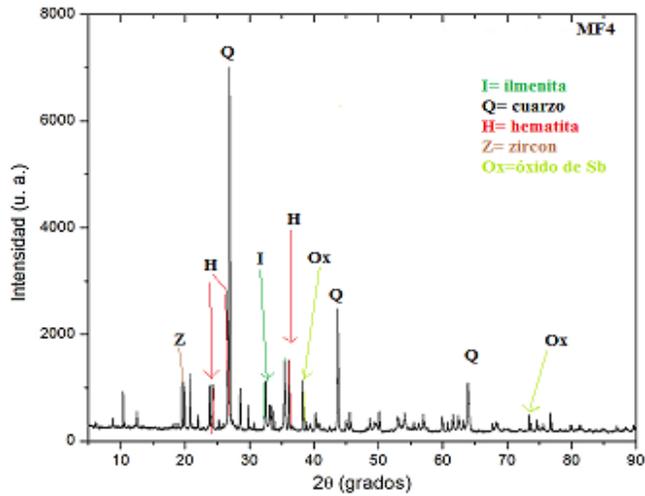


Fig. 4 - Difractograma de rayos X para la muestra MF4

El difractograma de MF4 muestra la intensidad para cuarzo con un 52,8 %, Hematita con 14,6 %, Ilmenita 9,5 % principalmente y 5,1 % correspondiente a las dos fases de antimonio, otras fases con menores porcentajes que podrían incrementar los metales calcio, magnesio aluminio están presentes. El aporte de metales en las diferentes fases es de consideración para diversas evaluaciones de estos residuos.⁽¹⁵⁾

En la Fig. 5 se presentan los Difractogramas para las muestras secas MS2 y MS3 con presencia de fases comunes: cuarzo alrededor del 50%, muscovita con un 14,6 % para MS2 y 11,6 % para MS3 y caolinita con un 25,4 % para MS3 y 4,9 % para MS2.

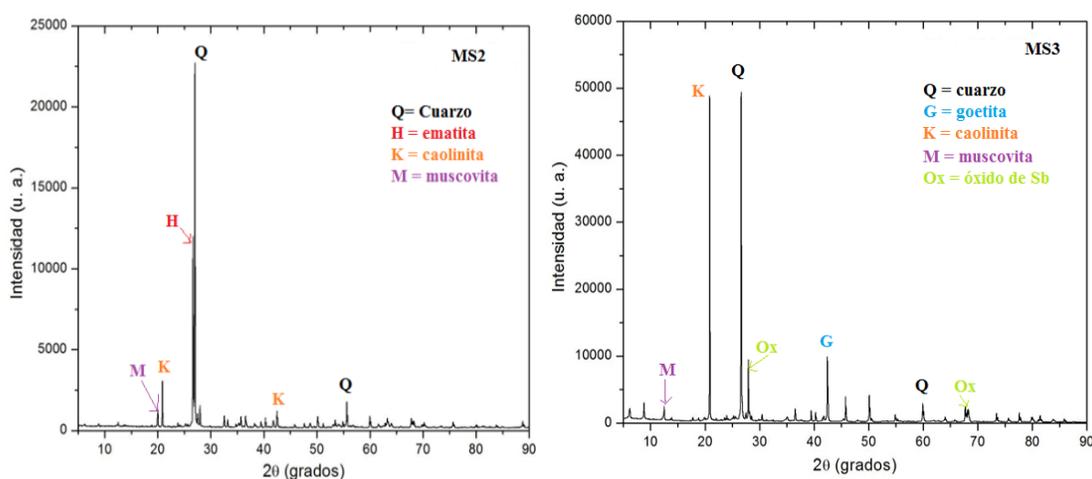


Fig. 5 - Difractograma de rayos X para las muestras secas MS2 y MS3

La muestra MS3 tiene en común la goetita y las fases de óxidos de antimonio con la muestra MF1 y MF4 respectivamente. La fase Hematita la comparten la muestra MS2 y MF4, esta fase contiene al elemento hierro así como las fases de Ilmenita, goetita y pirita. La pirita sólo se encontró en MS2. El hierro en estas muestras es de importancia para diferentes procesos tecnológicos de residuos mineros.^(13,17)

En la tabla 2 se observa todas las fases presentes en las muestras estudiadas.

Tabla 2 - Fases y porcentaje (%W) de las principales fases presentes en la muestra MF1

Fases	% peso			
	MF1	MS2	MS3	MF4
SiO ₂	54,4	49,10	48,1	52,8
Fe ₂ O ₃	----	8,2	----	14,6
FeTiO ₃	----	4,8	3,5	9,5
TiO ₂	----	2,5	----	2,1
SbO ₂	----	2,3	3,6	3,4
Sb ₂ O ₅ *1.15 (H ₂ O)	----	1,9	1,8	1,7

ZnS	----	----	----	1,9
PbS	----	2,1	2,5	1,2
FeO(OH)	35,0	----	1,2	----
(Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄)	3,1	4,9	25,4	----
KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	2,4	14,6	11,6	2,4
((Ru(CO) ₃)(PCF ₃) ₄)	1,0	----	----	----
(K(SbO)(SiO ₄))	1,2	----	----	----
(CaAl ₃ (PO ₄)(PO ₃ OH)(OH))	2,9	----	----	
Ca ₅ MgSi ₃ O ₁₂	----	----	----	3,1
Ca Mg(CO ₃) ₂	----	1,7	----	2,4
ZrSiO ₄	----	3,6	2,3	3,2
NaAlSi ₃ O ₈	----	----	----	1,7
FeS ₂	----	4,3	---	----

El cuarzo es la fase predominante en las cuatro muestras con porcentaje medio del 51,1 %, la muscovita con porcentajes de 14,6 % para MS2 y 11,6 % para MS3, mayores al de MF1 y MF4 con 2,4 % ambas. La caolinita está presente en tres muestras y es MS3 con 25,4 % mucho mayor al de MF1 y MS2; la ilmenita en MF4 con 9,5% mayor al de MS2 y MS3 con 4,8 % y 3,5 % respectivamente. Las fases de antimonio para MS3 y MF4 son mayores al de MS2. El rutenio es un metal del grupo del platino, presente en minerales poco comunes, se encontró en 1% en la muestra MF1. El titanio en la fase anatasa se encontró en MS2 y MF4. La presencia de zinc en la esfalerita en la muestra MF4 y plomo en la fase de la galena presente en MF4, MS2 y MS3 se encontraron en porcentajes que van desde 2,5% hasta 1, 2%.

Conclusiones

La caracterización preliminar de los residuos mineros de la región Madre de Dios llamados arenas negras, revelaron que la muestra fresca del Alto Madre de Dios MF4, alcanzó un valor de mercurio total mayor a 275mg.Kg⁻¹ de residuo y del Inambari 13.1 mg.Kg⁻¹ de residuo para MF1. Las muestras secas (MS) dieron menores concentraciones presentando una diferencia de medias de 137,79mg/Kg, lo que indica una diferencia significativa de la concentración de mercurio entre ambos estados de la muestra. El pH ligeramente ácido y la presencia de mercurio favorecen la conductividad tal como se encontró en la muestra MF4, el valor de 0,01092 S.m⁻¹ mayor al de MF1, MS2 y MS3. Respecto a la humedad las muestras “secas” MS2 y MS3 reportaron valores de 3,43 % y 3,12 % y no mostraron altas concentraciones del metal mercurio probablemente por su exposición por largos periodos de tiempo en la intemperie. La muestra MF4 sobrepasa el valor límite para mercurio de 260mg.Kg⁻¹, así podría estar depositándose en los diversos compartimentos ambientales

de aquellos lugares muestreados que fueron Colorado, Bajo Madre de Dios, Inambari y especialmente Alto Madre de Dios. Aplicando difracción de rayos X se detectaron en las arenas negras: cuarzo en mayor proporción, muscovita, caolinita, Ilmenita, hematita, goetita, albita, anatasa, esfalerita y galena principalmente. La presencia de algunos elementos como zinc, plomo, titanio, hierro, calcio, aluminio y silicio conformando las diferentes fases encontradas, facilitarían los posibles tratamientos tecnológicos y/o valorización de algunos de estos metales como el titanio presente en la ilmenita y anatasa. Tanto la medición del metal mercurio así como las fases en las arenas negras (relaves mineros) son de importancia en etapas preliminares de caracterización.

Referencias bibliográficas

1. OSORES PLENGUE, F. *et al.* Minería informal e ilegal y contaminación con mercurio en Madre de Dios: Un problema de salud pública. *Acta Medica Peruana*. 2012, **29**(1), 38-42. ISSN: 1728-5917.
2. BRACK EGG, A. *et al.* *Minería Aurífera en Madre de Dios y Contaminación con Mercurio: Una bomba de tiempo*. Primera Edición. Lima-Perú. Biblioteca Nacional del Perú N° 2011-05588. Súper Gráfica E.I.R.L. 2011. ISBN: 978-612-45818-7-8
3. MORENO-BRUSH, M. y otros. “¿Es el mercurio de la minería de oro en pequeña escala prevalente en el sureste de la Amazonía peruana?” *Environmental Pollution*. 2016, (218), 150-159. ISSN: 0269-7491.
4. HINOJOSA CARRASCO, O. “Concentración gravimétrica de menas auríferas”. *Revista Metalúrgica Universidad Técnica de Oruro*. 2016, (38), 38-50. ISSN: 2078-5593.
5. DEL ÁGUILA FEIJOO, M. *et al.* “Correspondencia con el editor Re: Impactos de la minería de oro artesanal y de pequeña escala en Madre de Dios, Perú: estrategias de manejo y mitigación”. *Environment International*. 2018, **111**, 133-134. ISSN: 0160-4120.
6. PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE. *El uso del mercurio en la minería del oro artesanal y en pequeña escala. Tercer módulo*. Nairobi Kenya. s.e. 2008
7. KUMAR, A. *et al.* “La presencia de la minería aurífera artesanal predice la bioacumulación de mercurio en cinco géneros de murciélagos (Chiroptera)” *Environmental Pollution*. 2018, (236), 862-870. ISSN: 0269-7491.
8. MINISTERIO DEL AMBIENTE. Decreto Legislativo que declara de interés nacional la formalización de las actividades de la pequeña minería y minería artesanal, D. L. N° 1293. El peruano. Lima. Editora Perú 2016.
9. MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS. Reglamento de la Ley de Formalización y Promoción de la Pequeña Minería y Minería Artesanal. Ley N° 27651. Decreto Supremo N°051-2009 Energía y Minas. El peruano. Lima. Editora Perú 2009
10. MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS. Actualizan Inventario Nacional de Pasivos Ambientales Mineros. Resolución Ministerial RM N° 408-2019 MEM/DM. Lima. Empresa peruana de servicios editoriales S.A.- Editora Perú 2019.

11. JAMIESON, H. *et al.* Caracterización mineralógica de residuos mineros. *Geoquímica Aplicada*. 2015, 57, 85-105. ISSN: 0883-2927
12. HUDSON–EDWARDS, K. *et al.* Caracterización, manejo y remediación de residuos mineros. *Minerales*. 2015, 5, 82-85. ISSN: 2075-163X
13. HUILLCAÑAHUI, R. Caracterización de residuos mineros metalúrgicos y su posible uso en barreras de ingeniería. *Revista del instituto de investigaciones Facultad de Geología, Minas, Metalurgia y Ciencias Geológicas, FIGMMG*. 2007, **10**(19), 87-97. ISSN 1561-0888
14. DUTTA, M. Evaluación ambiental y Caracterización nano-mineralógica de carbón, sobrecarga y sedimento de drenaje ácido de la minería del carbón de la India. *Geoscience Frontiers*. 2017, 8, 1285-1297. ISSN: 1674-9871
15. HUAMAN, E. *et al.* Efecto tóxico y ecotoxicológico de arenas negras de la minería artesanal en Madre de Dios. *Rev. Soc. Química del Perú*. 2017, **83**(4), 403-411. ISSN: 1810-634X
16. VILLANUEVA-ESCOBAR, D. *Metodología de caracterización geoquímica de residuos mineros aplicable en faena*. Tesis de ingeniero civil de Minas. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento Ingeniería de minas. Chile. 2019
17. HUAMAN-PAREDES, E.F. *Estabilización y Solidificación de mercurio en residuos sólidos mineros de Madre de Dios- Perú*. Tesis doctoral inédita. Universidad Nacional Agraria La Molina. Unidad de posgrado. Perú. 2020
18. INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA. *Sistema Estadístico Nacional. Madre de Dios. Compendio Estadístico*. [En línea]. [Fecha de consulta: 10 de septiembre del 2018]. Disponible en: https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1502/libro.pdf.
19. REPÚBLICA DEL PERÚ. DEFENSORÍA DEL PUEBLO. *Balance de la gestión estatal frente a la minería informal e ilegal en el Perú 2012 - 2014: Supervisión a las entidades de alcance Nacional y Regional*. [En línea]. [Fecha de consulta: 10 de agosto del 2017]. Disponible en: http://www.defensoria.gob.pe/modules/Downloads/informes_defensoriales/Informe-Defensorial-N-167-2.pdf
20. MINISTERIO DEL AMBIENTE. Dirección General de Calidad Ambiental. *Guía para el Muestreo de Suelos*. N° 2014-15792. Primera edición. Lima. Hecho el Depósito legal en la Biblioteca Nacional del Perú, 2014
21. AGENCIA DE PROTECCIÓN DE MEDIO AMBIENTE DE LOS ESTADOS UNIDOS. US EPA. *Métodos de ensayo para evaluación de residuos sólidos peligrosos: Compendio Residuos Sólidos, SW-846. Determinación de metales y elementos traza en agua y residuos por espectrometría de emisión atómica de plasma acoplada inductivamente, (ICP-AES)*. [En línea]. [Consulta: 10 de febrero del 2017]. Disponible en: <https://www.epa.gov/hw-sw846/sw-846-compendium>
22. SOCIEDAD AMERICANA PARA PRUEBAS Y MATERIALES (ASTM). *Especificación estándar para agua reactiva*. 1986. [En línea]. [Consulta: 13 de marzo del 2019]. Disponible en: <https://www.astm.org/database.cart/historical/D1193-91.htm>
23. NORMA TÉCNICA PERUANA NTP 339.127:1998 (revisada el 2014). *Método de ensayo para determinar el contenido de humedad de un suelo*. 1998. Rev. 2014

24. ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE NORMALIZACIÓN (ISO). *Determinación de la Conductividad eléctrica específica*.1994.

25. CENTRO INTERNACIONAL DE DATOS DE DIFRACCIÓN. (ICDD). *Archivos de difracción de polvos y Relaciones de intensidad de referencia (RIR)*. [En línea]. [Consulta: 25 de junio del 2018]. Disponible en: <https://www.icdd.com/?s=RIR>.

Conflicto de interés

Los autores expresan que no hay conflictos de intereses en el manuscrito presentado.

Contribución de los autores

Elsa Huamán P: Concepción del estudio, diseño de los experimentos, realización de los experimentos, análisis e interpretación de datos, extracción de resultados y conclusiones, escritura y diseño del artículo, preparación de las figuras, revisión y aprobación de la versión final del trabajo.

Gregorio Palma: Realización de los experimentos, análisis e interpretación de datos, escritura y diseño del artículo, reparación de las figuras, revisión crítica del artículo, revisión y aprobación de la versión final del trabajo.

Lisveh Flores: Escritura y diseño del artículo, revisión crítica del artículo, revisión y aprobación de la versión final del trabajo.