



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



CARACTERIZACIÓN DE LA TOXICIDAD EN ARENAS ASOCIADA A RESIDUOS MINEROS: DEPARTAMENTO DEL CHOCÓ, COLOMBIA.

DANIS ANDRÉS SOLANO CORONADO
YENDIS MANUEL CARMONA FUENTES

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
PROGRAMA DE QUÍMICA
MONTERIA

2022

Por una universidad con calidad, moderna e incluyente
Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 Ext. 261 –
e-mail: dptoquimica@correo.unicordoba.edu.co
www.unicordoba.edu.co





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



CARACTERIZACIÓN DE LA TOXICIDAD EN ARENAS ASOCIADA A RESIDUOS MINEROS: DEPARTAMENTO DEL CHOCÓ, COLOMBIA.

DANIS ANDRÉS SOLANO CORONADO

YENDIS MANUEL CARMONA FUENTES

Trabajo de grado como requisito para optar al título de Químico

Director (a):

Iván David Urango Cárdenas
Químico, M.Sc. Ciencias Ambientales

Codirector (a):

Saudith María Burgos Núñez
Químico, M.Sc. Ciencias Ambientales

Universidad de Córdoba
Facultad de Ciencias Básicas
Programa de Química

Montería

2022

Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 Ext. 261 –

e-mail: dptoquimica@correo.unicordoba.edu.co

www.unicordoba.edu.co





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



Nota de aceptación:

Del trabajo titulado: CARACTERIZACIÓN DE LA TOXICIDAD EN ARENAS ASOCIADA A RESIDUOS MINEROS: DEPARTAMENTO DEL CHOCÓ, COLOMBIA.

Iván David Urango Cardenas M.Sc
Director

Saudith María Burgos Núñez M.Sc
Codirector

Erick Lopez Barboza M.Sc
Jurado

Basilio Diaz Pongutá M.Sc
Jurado

Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 Ext. 261 -

e-mail: dptoquimica@correo.unicordoba.edu.co

www.unicordoba.edu.co





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

TRABAJOS DE GRADO - Restricciones de Uso

DERECHOS DE PROPIEDAD INTELECTUAL - prohibición de reproducción

Todo el material contenido en este documento está protegido por la Constitución Política de Colombia, y las Leyes sobre propiedad intelectual concerniente a Derechos de Autor existentes en Colombia.

El uso de imágenes (figuras, mapas, fotografías, entre otras), tablas y demás elementos contenidos en este documento, que sea objeto de protección de la propiedad intelectual será únicamente para usos educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo, mencionando el autor o los autores. Cualquier uso distinto como el lucro o beneficio, reproducción, edición o modificación, entre otros aspectos, incurrirá en violación a la ley y estará sujeto a las sanciones que se establezcan con el fin de proteger los derechos del titular de la propiedad intelectual.

La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del proyecto, serán responsabilidad de los autores. Artículo 61, acuerdo N° 093 del 26 de noviembre de 2002 del consejo superior.

Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 Ext. 261 –

e-mail: dptoquimica@correo.unicordoba.edu.co

www.unicordoba.edu.co





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



DEDICATORIA

A Dios, por su amor y sabiduría para con nosotros.

A la familia Carmona Fuentes, por todo el apoyo.

A la familia Solano Coronado, por la ayuda brindada en el proceso.





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



AGRADECIMIENTOS

Al laboratorio de toxicología y gestión ambiental. A todo el equipo de trabajo. Al director del laboratorio Dr. Robert Paternina Uribe. Al Dr. José Luis Marrugo Negrete director del grupo de investigación Iragua. Al director de la investigación Iván David Urango Cárdenas Químico, M.Sc. Ciencias Ambientales. A la Codirectora Saudith María Burgos Núñez Químico, M.Sc. Ciencias Ambientales.

Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 Ext. 261 –

e-mail: dptoquimica@correo.unicordoba.edu.co

www.unicordoba.edu.co





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	2
2.1. OBJETIVO GENERAL.	2
2.1.1. <i>Caracterizar arenas de residuos mineros para evaluar el riesgo de toxicidad de sus constituyentes.</i>	2
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	2
2.2.1. <i>Evaluar parámetros fisicoquímicos como conductividad eléctrica, pH sulfatos y cloruros y realizar análisis de granulometría.</i>	2
2.2.2. <i>Determinar las concentraciones de los metales arsénico, cromo, cadmio, plomo, mercurio, níquel, cobre y zinc, mediante las técnicas correspondientes (FAAS, GFAAS, GHAAS, DMA, AFS e ICP-OES).</i>	2
2.2.3. <i>Aplicar el procedimiento de lixiviación característica de toxicidad (TCLP) y el procedimiento de lixiviación por precipitación sintética (SPLP) a las arenas de residuos mineros.</i> .	3
2.2.4. <i>Comparar las concentraciones de los metales pesados obtenidos con los valores máximos permitidos establecidos por entes o normas nacionales/internacionales.</i>	3
3. MARCO TEÓRICO	3
3.1. RESIDUOS MINEROS.	3
3.1.1. <i>Residuos de la extracción.</i>	3
3.1.2. <i>Pasivos Ambientales Mineros (PAM).</i>	3
3.1.3. <i>Relaves mineros.</i>	4
3.2. METALES PESADOS.	4
3.3. ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS Y SU IMPACTO EN EL AMBIENTE.	5
3.4. EFECTOS AL MEDIO AMBIENTE PRODUCIDOS POR LA ACTIVIDAD MINERA.	7
3.5. EFECTOS DE LA MINERÍA EN COLOMBIA SOBRE LA SALUD HUMANA.	8
3.6. TÉCNICAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE METALES PESADOS EN RESIDUOS SÓLIDOS.	9
3.6.1. <i>Espectroscopía Emisión Atómica con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES).</i>	9
3.6.2. <i>Espectroscopia absorción atómica de llama, horno de grafito y generación de hidruros.</i>	10
3.6.3. <i>Espectroscopía de Fluorescencia Atómica (AFS).</i>	11
3.7. ENSAYOS DE EVALUACIÓN DE LA TOXICIDAD.	12
3.7.1. <i>Procedimiento de lixiviación característica de toxicidad (TCLP).</i>	12
3.7.2. <i>Procedimiento de lixiviación por precipitación sintética (SPLP).</i>	12
3.8. ENSAYO DE GRANULOMETRÍA.	13
3.9. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN POR JERARQUÍAS DE SPEARMAN (RHO DE SPEARMAN ρ_s).....	14
4. METODOLOGÍA	15

Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 Ext. 261 –

e-mail: dptoquimica@correo.unicordoba.edu.co

www.unicordoba.edu.co





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



4.1.	UBICACIÓN Y SITIO DE MUESTREO.....	15
4.2.	TRATAMIENTO DE MUESTRAS.....	16
4.2.1.	<i>Procesamiento.</i>	16
4.3.	ANÁLISIS REALIZADOS.....	16
4.3.1.	<i>Determinación de parámetros fisicoquímicos.</i>	16
4.3.2.	<i>Análisis granulométrico.</i>	17
4.3.3.	<i>Técnicas para la determinación de metales.</i>	17
4.3.4.	<i>Ensayos de evaluación de la toxicidad.</i>	19
4.4.	TRATAMIENTO DE RESULTADOS.	22
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	22
5.1.	PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS.....	22
5.2.	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.	24
5.2.1.	<i>Tablas y curvas granulométricas.</i>	25
5.3.	ANÁLISIS DE LAS CONCENTRACIONES DE METALES.	31
5.3.1.	<i>Muestras originales versus límites máximos permisibles.</i>	31
5.3.2.	<i>Comparación entre muestras originales y muestras lavadas.</i>	34
5.3.3.	<i>Comparación entre muestras finas y muestras trituradas.</i>	35
5.4.	CORRELACIÓN ENTRE CONCENTRACIONES DE METALES PESADOS Y PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS.....	36
5.4.1.	<i>Coefficiente de correlación entre pH y metales.</i>	37
5.4.2.	<i>Coefficiente de correlación entre MO y metales.</i>	37
5.4.3.	<i>Coefficiente de correlación entre CE y metales.</i>	37
5.5.	TEST DE LIXIVIACIÓN TCLP Y SPLP.	38
5.5.1.	<i>Test TCLP</i>	38
5.5.2.	<i>Test SPLP.</i>	39
6.	CONCLUSIÓN.	41
7.	BIBLIOGRAFÍA.	43
8.	ANEXOS.....	47
8.1.	CONCENTRACIONES DE METALES DE MUESTRAS ORIGINALES PASADAS POR TAMIZ DE 2 MM..	47
8.2.	CONCENTRACIONES DE METALES CON EL PROCESO LAVADO PASADAS POR TAMIZ DE 2 MM. ..	47

Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 Ext. 261 –

e-mail: dptoquimica@correo.unicordoba.edu.co

www.unicordoba.edu.co





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



Resumen

La cuenca de Rio Quito, departamento del Chocó, zona expuesta a una posible contaminación relacionada con la actividad minera que allí se desarrolla. Los residuos mineros generados en dicha actividad representan uno de los mayores riesgos ambientales e históricamente han sido causa de accidentes que se extienden no sólo a los mineros sino a la población circundante (Gutiérrez, 2015), esta actividad genera toneladas de arenas como desechos, de los cuales se sospecha que puede haber presencia de contaminantes como metales pesados, por razón se realizó la caracterización de arenas asociadas a residuos mineros y así evaluar que tan perjudiciales pueden ser con base a su toxicidad.

Con el fin de realizar dicha caracterización se determinaron para parámetros fisicoquímicos como pH, conductividad eléctrica mediante métodos electrométricos, los sulfatos mediante el método turbidímetro y los cloruros por el método argentométrico o método de Mohr. Se realizó un ensayo de granulometría en el cual se aplicó el método de prueba estándar para materiales más finos que 75 μm (n.º 200) tamiz en agregados minerales por el método de lavado ASTM C117-95. Por otra parte, también se realizó la determinación de metales las técnicas fueron Espectroscopia de Absorción atómica de llama (FAAS), Espectroscopia de Absorción Atómica con Horno de Grafito (GFAAS), Espectroscopia de Absorción Atómica con Generación de Hidruros (GHAAS), Análisis directo de mercurio DMA 80. La evaluación de la toxicidad se realizó por los métodos EPA 1311 y EPA 1312.

Se obtuvieron pH de las zonas Congo, Finca Silvio y Rio cari pato ligeramente ácidos, en San Isidro y Boca de pato se obtuvieron pH 4,45 y 4,83 respectivamente, los valores conductividad eléctrica fueron de 1,0 a 15,0 $\mu\text{s/cm}$, los porcentajes de materia orgánica fueron de 2,8 a 13,5%, con respecto a los cloruros los valores fueron relativamente bajos los cuales oscilan entre 20,26 y 40,55 mg/Kg, los sulfatos la mayor concentración 97,06 mg/Kg y la menor concentración 69,61 mg/Kg. Por parte de la granulometría, se encontró que todas las muestras entran en la clasificación de pobremente gradadas. En el caso de los metales se encontró que todas las concentraciones estaban en niveles bajos a excepción del cromo en la muestra Rio Cari Pato que superó los niveles máximos permitidos por la norma (37,300 $\mu\text{g/kg}$), de esta manera, la muestra representativa para este sitio arrojó que la concentración de cromo presente es 38820,00 $\mu\text{g/kg}$. Por último, sobre el test TCLP se encontró que las concentraciones de los metales luego de su aplicación no superaron los límites máximos permisibles. Por su parte, el test SPLP se encontró que la mayoría de los metales están situados por debajo de los límites máximos permisibles a excepción del

Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 Ext. 261 –

e-mail: dptoquimica@correo.unicordoba.edu.co

www.unicordoba.edu.co





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



Cromo (Cr) en muestras Finca de Silvio en el proceso fino y Níquel (Ni) Boca de pato Sin lavar, Rio cari pato fino y Boca de pato fino.

Palabras claves: Caracterización, residuos mineros, metales pesados, test de lixiviación.

Abstract

The Rio Quito basin, department of Chocó, is an area exposed to possible contamination related to the mining activity that takes place there. Mining waste generated in this activity represents one of the greatest environmental risks and historically has been the cause of accidents that extend not only to the miners but to the surrounding population (Gutiérrez, 2015), this activity generates tons of sands as waste, of which it is suspected that there may be presence of contaminants such as heavy metals, for reason the characterization of sands associated with mining waste was performed and thus evaluate how harmful they can be based on their toxicity.

In order to carry out such characterization, physicochemical parameters such as pH, electrical conductivity were determined by electrometric methods, sulfates by the turbidimeter method and chlorides by the argentometric method or Mohr's method. A granulometry test was carried out using the standard test method for materials finer than 75 μm (No. 200) sieve in mineral aggregates by the ASTM C117-95 washing method. On the other hand, the determination of metals was also carried out using the following techniques: Flame Atomic Absorption Spectroscopy (FAAS), Graphite Furnace Atomic Absorption Spectroscopy (GFAAS), Hydride Generation Atomic Absorption Spectroscopy (GHAAS), Direct Mercury Analysis DMA 80. Toxicity assessment was performed by EPA 1311 and EPA 1312 methods.

The pH of the Congo, Finca Silvio and Rio cari pato zones were slightly acidic, in San Isidro and Boca de pato pH 4.45 and 4.83 respectively, the electrical conductivity values were from 1.0 to 15.0 $\mu\text{s}/\text{cm}$, the percentages of organic matter were from 2.8 to 13.5%, with respect to chlorides the values were relatively low, ranging from 20.26 to 40.55 mg/kg, sulfates the highest concentration 97.06 mg/kg and the lowest concentration 69.61 mg/kg. In terms of granulometry, it was found that all the samples were classified as poorly graded. In the case of metals, it was found that all concentrations were at low levels except for chromium in the Rio Cari Pato sample, which exceeded the maximum levels allowed by

Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 Ext. 261 –

e-mail: dptoquimica@correo.unicordoba.edu.co

www.unicordoba.edu.co





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



the standard (37,300 $\mu\text{g}/\text{kg}$), thus, the representative sample for this site showed that the concentration of chromium present was 38820.00 $\mu\text{g}/\text{kg}$. Finally, the TCLP test showed that the concentrations of metals after its application did not exceed the maximum permissible limits. The SPLP test showed that most of the metals are below the maximum permissible limits, except for Chromium (Cr) in samples from Finca de Silvio in the fine process and Nickel (Ni) in Boca de pato Sin lavar, Rio cari pato fino and Boca de pato fino.

Keywords: Characterization, mining waste, heavy metals, leaching test.

Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 Ext. 261 –

e-mail: dptoquimica@correo.unicordoba.edu.co

www.unicordoba.edu.co





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



1. Introducción

Los residuos mineros representan uno de los mayores riesgos ambientales e históricamente han sido causa de accidentes que se extienden no sólo a los mineros sino a la población circundante (Gutiérrez, 2015) esto trae consigo afectaciones medioambientales que van ligadas a la presencia de metales pesados que se extrae desde las zonas más profundas de los ríos y quebradas hasta los residuos superficiales. La actividad minera genera toneladas de arenas como desechos, de los cuales se sospecha que puede haber presencia de contaminantes como metales pesados en estos residuos.

El vertimiento de residuos mineros (arenas) con presencia de metales pesados, tiene un amplio rango de impactos ambientales y socioeconómicos. Entre los impactos ambientales más frecuentes de las minas están: paisajes físicamente alterados, contaminación del agua, pérdida de vegetación, pozos abiertos, huecos. Además, en las minas hay numerosas fuentes de contaminación para aguas superficiales y subterráneas, así como para el suelo; por ejemplo: filtraciones de ácido y lavado de metales. Los impactos socioeconómicos están directamente relacionados con los ambientales y suelen ser inseparables de estos. Un ejemplo importante es la pérdida de suelo con potencial productivo porque se entierran los desechos o residuos de la mina o contaminación directa del suelo. En general los impactos socioeconómicos ocurren porque se altera un bien necesario para la supervivencia humana, como el agua o el suelo productivo (López et al., 2017).

Los residuos de las operaciones minero-metalúrgicas son uno de los más importantes generados por la actividad humana, ya que por sus características químicas y mineralógicas propias (presencia de cantidades importantes de metales, metaloides y compuestos asociados) y las del ambiente donde se localizan, tienen el potencial de dispersar sus componentes al medio ambiente, impactando el agua, los sedimentos, suelos, así como la biota (Burillo et al., 2017).

Dentro de los principales atributos que están relacionados con la movilidad y disponibilidad de metales pesados en el suelo se encuentran el pH, la materia orgánica, los óxidos de Fe y Mn y el contenido de arcilla. Además, la alta concentración de nutrientes puede afectar la disponibilidad de algunos elementos como ocurre en la interacción entre P y As, donde el As disminuye con un mayor valor de P (Arévalo et al., 2016).





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



La toxicidad de los metales pesados se potencia en gran medida por su fuerte tendencia a formar complejos organometálicos, lo que facilita su solubilidad, disponibilidad y dispersión. La estabilidad de muchos de estos complejos frente a la degradación por los organismos del suelo es una causa muy importante de la persistencia de la toxicidad. Pero también la presencia de abundantes quelatos puede reducir la concentración de otros iones tóxicos en la solución del suelo.

Con base a lo anterior, es importante mencionar que esta investigación tiene lugar en la cuenca de Rio Quito, departamento del Chocó, donde se puede apreciar que hay zonas expuestas a una posible contaminación relacionada con la actividad minera que allí se da, de esta manera, observamos una posible problemática en este ambiente. Este departamento es fuertemente afectado por la pobreza y la corrupción, trayendo esto posibles consecuencias negativas a la población. En esto radica la investigación, en caracterizar las arenas de residuos mineros y así evaluar que tan perjudiciales son con base a su toxicidad.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general.

2.1.1. Caracterizar arenas de residuos mineros para evaluar el riesgo de toxicidad de sus constituyentes.

2.2. Objetivos específicos.

2.2.1. Evaluar parámetros fisicoquímicos como conductividad eléctrica, pH sulfatos y cloruros y realizar análisis de granulometría

2.2.2. Determinar las concentraciones de los metales arsénico, cromo, cadmio, plomo, mercurio, níquel, cobre y zinc, mediante las técnicas correspondientes (FAAS, GFAAS, GHAAS, DMA, AFS e ICP-OES).





2.2.3. Aplicar el procedimiento de lixiviación característica de toxicidad (TCLP) y el procedimiento de lixiviación por precipitación sintética (SPLP) a las arenas de residuos mineros.

2.2.4. Comparar las concentraciones de los metales pesados obtenidos con los valores máximos permitidos establecidos por entes o normas nacionales/internacionales.

3. Marco teórico

3.1. Residuos mineros.

3.1.1. Residuos de la extracción.

En el caso de la extracción del mineral se generan grandes cantidades de estériles, los que son dispuestos en las escombreras. Definiendo como estéril de mina a todo material sin valor económico extraído, para permitir la explotación del mineral útil. Los estériles son de los más variados tipos: la capa superficial del suelo es considerada un estéril en minería (aunque sea el soporte de la vegetación), así como las rocas encajantes (Garces, 2017).

En la minería hay un proceso de selección dentro de la masa mineralizada, es decir, selección de la porción que se enviará a tratamiento para la obtención de concentrados. El resto del material se considera estéril (Garces, 2017). Estos estériles van a los botaderos, donde en su gran mayoría no tienen tratamiento alguno y pasan a formar pilas de estéril; en Colombia se observan a menudo pilas de arenas en los lugares donde se da la minería.

3.1.2. Pasivos Ambientales Mineros (PAM).

Los PAM son aquella faena minera abandonada o paralizada, incluyendo sus residuos, que constituyen un riesgo significativo para la vida o salud de las personas o para el medio ambiente (Garces, 2017). Los pasivos de la minería del oro pueden afectar negativamente al medio ambiente al contaminar los suelos, las aguas subterráneas y las aguas superficiales con metales. y, en consecuencia, amenazar la salud de las personas que utilizan estos recursos (Rojas et al., 2022).



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



Los pasivos ambientales son las consecuencias de los daños causados al ambiente, así mismo estos deterioran la calidad de vida de los seres humanos. En este contexto, los pasivos ambientales se definen como “la suma de los daños no compensados producidos por una empresa al ambiente a lo largo de su historia, en su actividad normal o en caso de accidente (Onorio et al., 2019).

3.1.3. Relaves mineros.

Los relaves (o cola) son desechos tóxicos subproductos de procesos mineros y concentración de minerales, usualmente una mezcla de tierra, minerales, agua y rocas. La mayoría de estos materiales no pueden ser reprocesados ni reutilizados en el proceso productivo ya que contienen altas concentraciones de químicos y elementos que alteran el medio ambiente, por lo que deben ser transportados y almacenados en “tranques o pozas de relaves”.

Los residuos mineros generan tres actividades sobre el medio ambiente que provocan la contaminación de este, en especial de los cuerpos de aguas donde el riesgo de contaminar a los pobladores se aumenta. Encontramos, La sedimentación, ya sea de los residuos acumulados en pilas o en relaves que se han erosionado, puede afectar la forma y el curso de las corrientes de agua superficiales. También puede reducir la cantidad de luz que penetra la superficie y afectar el equilibrio acuático. Finalmente, se considera la posibilidad de disminución de la profundidad del cauce y por lo tanto un aumento en el riesgo de inundaciones en épocas de lluvia (Gutiérrez, 2015).

Por su parte, dentro de los metales y minerales que se pueden encontrar en los residuos mineros están los metales pesados, cuyas consecuencias para la salud dependen de sus características químicas. Otros elementos son los elementos de tierras raras que, aunque podrían considerarse a nivel de consecuencias similares a los metales, su proceso de extracción genera altos riesgos de toxicidad y radiación por el uso de otros minerales para su extracción y depuración (Gutiérrez, 2015).

3.2. Metales pesados.

Grupo de elementos químicos que presentan una densidad relativamente alta ($>4.5 \text{ g/cm}^3$) y cierta toxicidad para el ser humano. Además, se suelen incluir en este grupo otros





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



elementos químicos que, a pesar de ser metales ligeros, semimetales o no metales, presentan orígenes y comportamientos asociados; es este el caso del As, B, Be y Se.

Los metales pesados se encuentran generalmente como componentes naturales de la corteza terrestre, en forma de minerales, sales u otros compuestos. No pueden ser degradados o destruidos fácilmente de forma natural o biológica ya que no tienen funciones metabólicas específicas para los seres vivos. En los cultivos, la acumulación de metales pesados se da por medio de su absorción por el agua de riego contaminada, por la tierra mediante las raíces o por la deposición en el follaje de partículas aerotransportadas (Mancilla et al., 2017).

Algunos de estos elementos tales como Cu, Fe y Zn, son considerados como oligoelementos o esenciales, debido a que son requeridos los seres vivos en pequeñas concentraciones porque tienen funciones metabólicas específicas para el desarrollo de los sistemas biológicos, incluso su deficiencia o exceso puede conducir a problemas de salud. Sin embargo, el Cd, As, Pb y Hg, son metales considerados no esenciales, los cuales poseen efectos tóxicos sobre un ecosistema o en un ser vivo, dependiendo de su concentración o de su estado de oxidación. Una de sus características más comunes es que presentan una alta persistencia, bioacumulación a través de la cadena de alimentación y biotransformación; pueden ser encontrados en los ecosistemas por largos periodos de tiempo, debido a que su degradación natural es difícil, llegando finalmente a, provocar problemas en la salud humana y animal (Pinzón, 2019).

3.3. Elementos potencialmente tóxicos y su impacto en el ambiente.

En muchos tipos de residuos mineros y suelos de mina, especialmente en los provenientes de minería metálica, pueden encontrarse elementos potencialmente tóxicos (Cu, Ni, Zn, Pb, As, Hg, Cr, Cd, entre otros metales) en concentraciones anormalmente altas, suficientes para dificultar o impedir el desarrollo vegetal. A menudo los efectos negativos de estos elementos aparecen en combinación con valores muy bajos de pH, asociados a problemas de drenajes ácidos, y a la oxidación de los sulfuros en los que se encuentran habitualmente estos elementos. Aunque las concentraciones totales de estos elementos son un dato importante, en general son más relevantes su movilidad y biodisponibilidad, que dependen de las formas químicas en las que se encuentren (Paradelo, 2013). Aunque las concentraciones de los metales en los residuos mineros sean bajas, el problema persiste, ya que su magnitud también depende de la cantidad de residuos, de las condiciones





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



ambientales a las que están expuestos y de la movilidad de los metales. En los entornos tropicales, donde las temperaturas suelen ser superiores a 18°C y las precipitaciones son intensas, la movilidad de los metales tiende a aumentar considerablemente. Además, la erosión y la oxidación de los minerales presentes en los residuos mineros crean condiciones ácidas, lo que facilita la movilización de los metales hacia las aguas superficiales y subterráneas (Rojas et al., 2022).

La peligrosidad de los residuos mineros y del lixiviado dependerá de la toxicidad de los residuos y de su geo disponibilidad y biodisponibilidad. Ambos vienen determinados por la geología, las concentraciones de metales y metaloides, la acción de los factores biológicos y geoquímicos sobre los residuos y la presencia de materia orgánica en el suelo. La cantidad de residuos mineros y la vulnerabilidad de las aguas superficiales afectadas son factores que influyen en la peligrosidad de los residuos.

El suelo es alterado como resultado de las actividades mineras. Una de las anomalías biogeoquímicas que se generan al momento de la extracción, es el aumento de la cantidad de microelementos en el suelo convirtiéndolos a niveles de macroelementos los cuales afectan negativamente la biota y calidad de suelo; estos afectan el número, diversidad y actividad de los organismos del suelo, inhibiendo la descomposición de la materia orgánica del suelo. Los suelos que quedan tras una explotación minera contienen todo tipo de materiales residuales, escombros estériles, entre otros, lo que representa graves problemas para el desarrollo de la cubierta vegetal, siendo sus características más notables las siguientes: clase textural desequilibrada, ausencia o baja presencia de la estructura edáfica, propiedades químicas anómalas, disminución o desequilibrio en el contenido de nutrientes fundamentales, ruptura de los ciclos biogeoquímicos, baja profundidad efectiva, dificultad de enraizamiento, baja capacidad de cambio, baja retención de agua y presencia de compuestos tóxicos (Puga et al., 2006).

Las plantas cultivadas en suelos contaminados absorben en general más oligoelementos y la concentración de éstos en los tejidos vegetales está a menudo directamente relacionada con su abundancia en los suelos, y especialmente en la solución húmeda (Kabata & Pendias 2001). Los metales tienden a acumularse en la superficie del suelo quedando accesibles al consumo de las raíces de los cultivos. Excesivas concentraciones de metales en el suelo podrían impactar la calidad de los alimentos, la seguridad de la producción de cultivos y la





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



salud del medio ambiente, ya que estos se mueven a través de la cadena alimenticia vía consumo de plantas por animales y estos a su vez por humanos. (Puga et al., 2006).

Los impactos ambientales producto de las liberaciones involuntarias de las soluciones de cianuro, o de derrames a fuentes de agua durante su transporte, si constituyen una amenaza para la salud pública, en función de la utilización de dichas aguas para consumo humano. Independiente de la escala, el empleo de cianuro en minería aurífera efectivamente constituye un riesgo latente. Existen ejemplos catastróficos, siendo uno de los más documentados el ocurrido en la planta de procesamiento de oro de Aurul, en Rumania, el cual, luego del rompimiento de una barrera de contención de solución de cianuro, se liberó la misma, incorporando cianuro y metales pesados, contaminando múltiples fuentes de agua en Rumania, Hungría, Yugoslavia y Bulgaria, con la consecuente muerte de peces y cierre de acueductos (Lopez et al., 2016).

3.4. Efectos al medio ambiente producidos por la actividad minera.

Entre los principales efectos medioambientales de las actividades mineras, que podríamos enumerar teniendo presente que no siempre se dan todos y su trascendencia es variable según sean los casos, son los siguientes: Alteración del paisaje, modificación del hábitat ecológico, destrucción de cubierta vegetal, ruido, emisiones de polvo y sedimentación del mismo, modificación de cursos de agua, modificación de niveles piezométricos, generación de residuos, contaminación de suelos, contaminación de aguas superficiales y subterráneas.

Por otro lado, si hablamos de la contaminación medio ambiental de los suelos, la minería puede impactar los suelos de dos maneras, normalmente combinadas. La primera, de forma física, haciendo desaparecer los suelos por las excavaciones. Aplastando y compactando los suelos por efectos de los ingentes volúmenes de residuos mineros. A través de la construcción de infraestructuras tales como edificios para plantas de tratamiento de minerales, edificios de oficinas, y una red de vías de transporte para tráfico rodado. La segunda, de manera química, ya que los principales minerales que contienen los metales de interés económico son sulfuros, y los sulfuros se oxidan liberando su carga metálica en solución (drenaje ácido). Aquí regresamos a los residuos mineros, que no solo ejercen una presión física sobre los suelos, sino que además pueden originar soluciones químicas que transportan metales pesados, que por descenso llegarán hasta los suelos (Garces, 2017).





3.5. Efectos de la minería en Colombia sobre la salud humana.

Según Olivero (2013) en Colombia la prensa ha evidenciado problemas de salud sobre la minería en Colombia, pero está poco disponible en la literatura científica. La razón no es que los impactos y situaciones no existan, sino, que se ha realizado poca investigación. Lo anterior tiene varias aristas: la comunidad no conoce lo que ocurre, y por tanto participa poco; los gobernantes no poseen datos para tomar acciones que minimicen los impactos, y aunque la academia/gobierno investigue y muestre los problemas y sus posibles orígenes o soluciones, el interés en resolverlos no se concreta, y dichos estudios no son empleados como línea base para avanzar ni como soporte para políticas públicas.

La exposición humana a metales, como el Cobre (Cu), el Plomo (Pb) y el Cadmio (Cd), en los lixiviados de los residuos mineros está asociada a algunas enfermedades. Los efectos de la exposición al cadmio pueden producirse principalmente en forma de daños renales, pero posiblemente también efectos óseos y fracturas (Rojas et al., 2022). En los procesos de extracción de distintos minerales, los impactos sobre la salud humana, por lo general son diferentes, aunque se encuentren similitudes en varios aspectos. Basta visitar las zonas mineras para experimentar la miseria, las pésimas condiciones en las que viven las personas y el abandono generalizado. El uso del mercurio en la minería de oro obedece a que es la tecnología más asequible, menos costosa, y con la cual los mineros artesanales han trabajado por décadas, sin capacitación mínima, pudiendo desarrollarse por individuos sin o con poca escolaridad. El mercurio es un neurotóxico altamente dañino para el desarrollo cerebral de los niños, y en ciertas áreas auríferas, como el Sur de Bolívar y el Noreste Antioqueño, está presente en el aire y el suelo, siendo respirado por sus habitantes, la mayoría menores de edad. Al encontrarse las minas cerca a los cuerpos de agua, el metal llega a los sedimentos desde las corrientes o la atmósfera, allí es transformado en metilmercurio, su forma más tóxica, e incorporado a los peces, el alimento de los pobladores, acumulándose en estos últimos (Olivero, 2013).

Los metales pesados poseen características específicas de bioacumulación y biodisponibilidad en el organismo humano, alterando la fisiología de la sinapsis neuronal, membrana alveolo respiratoria, aparato locomotor, así como alteraciones en el sistema genético y displasias celulares. Estudios realizados en Antioquia Colombia a grupos de mineros, expuestos al polvo de sílice por la polución del polvo de la roca en el interior de



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



las minas, como enfermedad ocupacional asociaron a la tuberculosis pulmonar por la facilidad de migrar por la sílice en el estroma pulmonar. (Lopez et al., 2016).

3.6. Técnicas para la caracterización de metales pesados en residuos sólidos.

3.6.1. Espectroscopía de Emisión Atómica con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES).

ICP-OES, es una de las técnicas más usadas en todo el mundo para determinar trazas de elementos en una gran variedad de matrices, las cuales comúnmente deben digerirse previamente. Hoy en día, es una técnica sólida y ampliamente usada en muchos laboratorios con la finalidad de realizar análisis rutinarios. Entre las principales áreas que emplean esta técnica se encuentran: agricultura y alimentos, geología, aguas y en el campo de la medicina (Jiménez et al., 2020).

Algunas de las aplicaciones de ICP-OES, encontramos: Monitorización de agua/aguas residuales/residuos sólidos. Determinación de trazas de elementos en agua. Monitorización de mercurio en muestras medioambientales. Análisis cuantitativo de varios elementos en muestras medioambientales de agua/suelo/sedimento. Análisis de suelo: análisis del contenido de micronutrientes (agricultura). Determinación de metales preciosos y oro (Agilent Technologies, 2016).

Asimismo, mediante ICP-OES se pueden detectar y determinar cuantitativamente la mayoría de los elementos del Sistema Periódico, pudiéndose analizar una amplia variedad de tipos de muestra. Dentro de esa gran variedad de muestras que puede analizar la técnica encontramos; determinación de metales y posibles contaminantes en suelos, fertilizantes, materias vegetales, alimentos, etc. También encontramos ventajas como; la habilidad de vaporizar, atomizar, excitar y ionizar eficiente y reproduciblemente en un amplio rango de elementos presentes en diferentes tipos de muestra. Una de las razones importante de la superioridad del ICP sobre la llama u horno es la alta temperatura del plasma. Mientras la llama y el horno alcanzan temperaturas de 3300 K, la temperatura del gas en el centro del plasma es aproximadamente 6800 K. Además de mejorar la eficiencia en la excitación e ionización, la alta temperatura también reduce o elimina muchas de las interferencias químicas encontradas en llamas y hornos. Una característica importante del ICP que no es común en otras fuentes de emisión es que cuando los átomos de la muestra llegan al punto





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



de observación del plasma ya han estado un tiempo de residencia de alrededor de 2 milisegundos a temperaturas que van de 6000 a 8000 K. Estos tiempos y temperaturas son de 2 a 3 veces mayores que los que se alcanzan en las llamas más calientes de combustión (acetileno / óxido nitroso). Por lo tanto, la atomización es más completa y se presentan menos interferencias químicas (Jiménez et al., 2020) (Skoog & Leary, 1994).

3.6.2. Espectroscopia de absorción atómica de llama, horno de grafito y generación de hidruros.

3.6.2.1. En AAS de llama (FAAS).

La muestra se prepara como un líquido y se nebuliza en la llama. La característica fundamental de esta técnica es la atomización que sucede en la llama. Dentro de las ventajas encontramos: facilidad de uso, bajo coste, posible reducción del tiempo de análisis, buena precisión. También encontramos desventajas como; Sensibilidad, rango dinámico, requiere gases inflamables, la operación sin supervisión no es posible debido a los gases inflamables, no debe contener cantidades excesivas de sólidos disueltos.

3.6.2.2. AAS de cámara de grafito.

Se necesita disolver la muestra en forma líquida en la mayoría de los casos. La muestra se inyecta en un tubo de grafito y se calienta electrotérmicamente en diferentes etapas para atomizar el analito. En la absorción atómica de cámara de grafito (GFAAS) la atomización se produce en tres etapas: Secado, calcinización y atomización. Dentro de las ventajas encontramos: Alta sensibilidad (debido a que toda la muestra se atomiza a la vez, ya que los átomos libres permanecen en el paso de luz durante más tiempo), volumen de muestra reducido, posible análisis de ultra trazas puede funcionar sin supervisión, incluso durante 24 h. También encontramos desventajas como; muy lento, se pueden analizar menos elementos, menor precisión, más interferencias químicas (en comparación con AA de llama).

3.6.2.3. AAS de generación de hidruros.

Adecuada para elementos que formen hidruros volátiles (As, Sn, Bi, Sb, Te, Ge y Se) cuando reaccionan ante un agente reductor, como el borohidruro sódico. Dentro de las





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



ventajas encontramos: Separación de elementos específicos como hidruros que pueden eliminar la interferencia de la matriz, buena sensibilidad debido al 100% de eficacia de muestreo, buena precisión, más rápido que AA de cámara de grafito. También encontramos desventajas como; Limitado a elementos específicos, algunas interferencias químicas, requiere una preparación de muestra específica (el analito debe convertirse a un estado de oxidación específico) (Agilent Technologies, 2016).

3.6.3. Espectroscopía de Fluorescencia Atómica (AFS).

La espectroscopia de fluorescencia atómica (AFS) es una técnica de emisión que, a diferencia de la AES, ofrece una gran sensibilidad en la región ultravioleta. Sin embargo, su sensibilidad es mucho menor en la región visible debido a las intensas interferencias que experimenta en la línea base y a procesos de “quenching” en esta zona espectral. Para que pueda producirse el proceso de emisión fluorescente, previamente debe haber tenido lugar un proceso de absorción que implicará dos o más transiciones electrónicas (Jiménez, 2008).

Uno de los elementos que se suele estudiar por AFS es precisamente el mercurio ya que este procedimiento es más selectivo y sensible que otras técnicas de espectrometría atómica. Esto se explica por el hecho de que el mercurio absorbe radiación y a continuación produce fluorescencia de resonancia a una longitud de onda de 253,7 nm, de manera que la cantidad de fluorescencia generada va a depender de la intensidad de la radiación incidente. Así pues, aumentando la intensidad de la fuente de radiación puede conseguirse un aumento de la fluorescencia e indirectamente un aumento en la sensibilidad.

Para la determinación de mercurio por AFS, la detección suele combinarse con la generación de vapor frío, vapor que suele ser generado de dos formas: químicamente o por pirólisis. Esta técnica fue desarrollada por Hatch y Ott en 1968 y se basa en la reducción del mercurio iónico divalente (Hg^{2+}) hasta su forma metálica (Hg^0) en disolución ácida utilizando un reductor fuerte como borohidruro sódico (NaBH_4) o cloruro estañoso (SnCl_2). En ambos casos los átomos de mercurio que son vaporizados llegarán hasta el detector AFS al ser arrastrados por una corriente de gas (Jiménez, 2008).





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



3.7. Ensayos de evaluación de la toxicidad.

3.7.1. EPA DE EE. UU. 1311: procedimiento de lixiviación característica de toxicidad (TCLP).

El presente procedimiento ha sido diseñado para determinar la característica de toxicidad por lixiviación de un residuo, sea este líquido, sólido o una mezcla de estas fases, a partir de un análisis practicado a una muestra del lixiviado o extracto de este, obtenido bajo ciertas condiciones estándares. En definitiva, el procedimiento consiste en determinar la movilidad en el residuo de determinados constituyentes tóxicos, sean estos elementos o compuestos químicos, tanto de origen orgánico como inorgánico. Este procedimiento es reconocido por la literatura especializada en la identificación y caracterización de residuos, con el nombre "test TCLP" ("TCLP" por su nombre en inglés, Toxicity Characteristic Leaching Procedure). Con el fin de evitar confusiones que se pudieran originar en la interpretación de dicho procedimiento.

Para decidir sobre la realización del test TCLP, se debe hacer un análisis del origen o fuente de generación del residuo. Esto, con el fin de identificar los eventuales constituyentes tóxicos que éste pudiera contener y, en el caso que no se disponga de antecedentes suficientes descartar de antemano la presencia de alguno de ellos en el residuo. De no ser posible tal estimación, entonces se deberá recurrir a un análisis de laboratorio para determinar cualitativamente y, en caso de que corresponda, un análisis cuantitativo del o los constituyentes tóxicos eventualmente presentes en el residuo. Para tal propósito se podrán utilizar técnicas tradicionales de laboratorio (cromatografía, absorción atómica, fluorescencia de rayos X, etc., según corresponda) (EPA 1311, 1992).

3.7.2. EPA DE EE. UU. 1312: Procedimiento de lixiviación por precipitación sintética (SPLP).

El método SPLP 1312 se utiliza para determinar si los residuos mineros son considerados peligrosos. Diseñado para determinar la movilidad de analitos orgánicos e inorgánicos presentes en líquidos, suelos y residuos. Esta prueba utiliza una mezcla de H_2SO_4 - HNO_3 (60 - 40 % peso), la cual simula una lluvia acida, con nitratos y sulfatos disueltos que se encuentran en el ambiente producto de la contaminación antropogénica. La lixiviación es el proceso por el cual los elementos en un material solido como los residuos mineros, son





liberados al ambiente a través del contacto con el agua. Conociendo la velocidad y proporción a la cual los constituyentes de interés pueden ser liberados, se podrán definir los impactos en el medioambiente potenciales como la contaminación de aguas superficiales, los riesgos ecológicos y la salud humana (García et al., 2015; U.S. EPA 1312, 1988).

3.8. Ensayo de granulometría.

El análisis granulométrico hace referencia a la distribución del tamaño de las partículas de un agregado; dicho análisis se determina a través del paso de una muestra representativa de agregado por una serie de tamices, cuyas aberturas se ordenan de mayor a menor. Entendiéndose por tamiz una malla de abertura cuadrada debidamente estandarizado. Por otro lado, los agregados, son materiales inertes con forma granular, considerados como productos minerales que pueden encontrarse en estado natural o artificial, y cuya mezcla con un cementante permite generar concreto. Los agregados naturales son aquellos que provienen de la explotación de fuentes naturales (Palacio et al., 2017).

Según Palacio et al. (2017) el estudio de los resultados se da de acuerdo al porcentaje de agregado retenido y, en consecuencia, al porcentaje del mismo que pasa a través del tamiz; de esta manera, se establece un control gráfico para los análisis conocidos como curvas granulométricas, caracterizadas por representar en el eje de las abscisas la abertura del tamiz y en el eje de las ordenadas el porcentaje de agregado que pasa por el tamiz respectivo, las cuales se construyen a partir del uso de los modelos establecidos en las ecuaciones (1) y (2).

$$\% \text{ retenido} = \frac{\text{peso retenido en tamiz}}{\text{peso total de muestra}} * 100 \quad (1)$$

$$\% \text{ que pasa} = 100 - \% \text{ retenido acumulado} \quad (2)$$

También, es importante saber que, de acuerdo con su tamaño, los agregados se clasifican en agregados finos y gruesos; los agregados finos, conocidos como arena, son aquellos que pasan a través del tamiz número cuatro, equivalente a 4,76 mm. Por su parte, los agregados gruesos denominados en la industria como grava superan en tamaño el diámetro fijado en el tamiz número cuatro.



Del análisis granulométrico se obtiene información importante, como lo son el coeficiente de uniformidad (Cu).

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3)$$

Donde, D_{60} : Tamaño correspondiente a la pasa del 60% (expresado en mm.) y D_{10} : Tamaño correspondiente a la pasa del 10% (expresado en mm.) Un suelo con un Coeficiente de Uniformidad menor que 4 es un suelo uniforme. Si las partículas de un suelo fueran totalmente uniformes, su coeficiente de uniformidad sería 1.

También, se obtiene del análisis el Coeficiente de Curvatura (Cc). Mide el grado de curvatura de la granulometría.

$$Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} * D_{60}} \quad (4)$$

Un suelo bien gradado tendrá un porcentaje en huecos menor y por tanto tendrá una densidad mayor, serán suelos menos compresibles, más impermeables y fáciles de trabajar en obra.

3.9. Coeficiente de correlación por jerarquías de Spearman (Rho de Spearman ρ_s).

Es una medida de asociación lineal que utiliza los rangos, números de orden de cada grupo de sujetos y compara dichos rangos. Este coeficiente es muy útil cuando el número de pares sujetos (n) que se desea asociar es pequeño (menor de 30) (Montes et al., 2021).

Aparte de permitir conocer el grado de asociación entre ambas variables con la ρ de Spearman es posible determinar la dependencia o independencia de dos variables aleatorias. La fórmula de este coeficiente es:

$$\rho_s = \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2-1)} \quad (5)$$

Siendo:

n = Cantidad de sujetos que se clasifican,



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



x_i = El rango de sujetos i con respecto a la variable x ,
 y_i = El rango de sujetos i con respecto a la variable y ,
 $d_i = x_i - y_i$ es la diferencia de entre los rangos X y Y .

Tabla 1. Grado de relación según coeficiente de correlación.

Rango	Relación
-0.91 a -1.00	Correlación negativa perfecta
-0.76 a -0.90	Correlación negativa muy fuerte
-0.51 a -0.75	Correlación negativa considerable
-0.11 a -0.50	Correlación negativa media
-0.01 a -0.10	Correlación negativa débil
0.00	No existe correlación
+0.01 a +0.10	Correlación positiva débil
+0.11 a +0.50	Correlación positiva media
+0.51 a +0.75	Correlación positiva considerable
+0.75 a +0.90	Correlación positiva muy fuerte
+0.91 a +1.00	Correlación positiva perfecta

Ahora bien, es importante destacar que no es recomendable utilizar el coeficiente de correlación de Spearman para calcular la relación entre dos variables cualesquiera. Esto se da, puesto que, la distribución en el muestreo de r depende de la distribución de las variables X e Y , incluso bajo la hipótesis de que sean independientes, por lo que, su valor se ve afectado por la presencia de valores anómalos, lo cual lo hace poco apropiado para evaluar la correlación en el caso de variables no normales (Palomar, 2022).

4. Metodología

4.1. Ubicación y sitio de muestreo.

El estudio se realizó en la cuenca de Rio Quito, departamento del Chocó-Colombia, situado en el noroeste del país. Se encuentra a 30 km de la capital departamental, Quibdó; dado que el objetivo fue caracterizar las arenas de residuos mineros, para ello se tuvo en cuenta las concentraciones de los metales pesados obtenidos y la evaluación de los parámetros





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



fisicoquímicos, los metales fueron comparados con los parámetros de permisibilidad establecidas por el ente regulador.

El muestreo se realizó en el lugar antes descrito, donde se recolectaron las muestras de arenas de una forma aleatoria, donde la actividad minera tiene un mayor auge. Las muestras se recolectaron de las pilas de arenas en costales de polietileno usando palas o palín, luego, fueron transportadas a la universidad de Córdoba y entregadas al Grupo de aguas química aplicada y ambiental, para posteriormente hacerles el debido tratamiento.

4.2. Tratamiento de muestras.

4.2.1. Procesamiento.

El tratamiento de las muestras fue realizado en el laboratorio de toxicología perteneciente al Grupo de aguas química aplicada y ambiental, posteriormente, el primer tratamiento correspondió a muestras de arenas en una fracción menor a 75 micras (fracción que pasa por el filtro). El segundo estaba ligado al anterior tratamiento, donde se tomaron las cantidades de arenas que no lograron pasar por filtro de tela, se colocaron a secar y luego pasar por un tamiz de 2 mm. Finalmente, el último tratamiento correspondió a las muestras que fueron fuertemente trituradas con material de este tipo de procesos. Cabe resaltar que estas muestras fueron depositadas en bolsas del tamaño necesario y rotuladas con los respectivos códigos para evitar confusiones. Es importante mencionar que, por otra parte, se tuvo en cuenta 5 muestras más que fueron etiquetadas originales, las cuales no fueron sometidas a ningún tratamiento con respecto a la medición de metales pesados, porque se les midió los parámetros fisicoquímicos, como sulfatos, cloruros, conductividad eléctrica y pH.

4.3. Análisis realizados.

4.3.1. Determinación de parámetros fisicoquímicos.

Los parámetros fisicoquímicos como pH, conductividad eléctrica fueron determinados mediante equipos multiparámetros, conductímetro y pH-metro. Mientras tanto, los sulfatos fueron determinados mediante el método turbidímetro, realizando una extracción previa de los sulfatos, la cual consistía en pesar la cantidad de muestra necesaria y posteriormente





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



agregar la solución de fosfato de calcio al 0,008 molar, luego se agitar por 10 minutos, seguidamente se procedió a realizar una filtración y finalmente se realizó la determinación de la concentración de los sulfatos por el método turbidimétrico descrito en el 4500-SO₄²⁻. Por otro lado, los cloruros fueron determinados por el método Argentométrico 4500-Cl, es decir, método de Mohr. Para este se procedió pesando 3.5 g de muestra y se le añadió 35 mL de agua destilada, luego se agitó y filtró con el fin de extraer los sulfatos en las arenas de residuos mineros. Posteriormente, usando como patrón AgNO₃ 0.02 N e indicador K₂Cr₂O₄ 5% se titularon las muestras y se anotó el volumen gastado de patrón para el cálculo final de la concentración usando la ecuación general para cálculos en volumetría en muestras solidas (Baird & Bridgewater, 2017).

4.3.2. Análisis granulométrico

Para el ensayo de granulometría se aplicó el Método de prueba estándar para materiales más finos que 75 µm (n.º 200) Tamiz en agregados minerales por el método de lavado ASTM C117-95, donde se dispuso a pasar la muestra problema por tamices normalizados en forma decreciente. Ahora bien, este ensayo fue aplicado a las 5 muestras originales, es decir, los cinco sitios de donde se tomaron las muestras. Se les aplicó con la finalidad de obtener la distribución por tamaño de las partículas presentes en las muestras y dar una estimación acerca de la posible utilidad que se pueda dar a estas arenas de residuos mineros. Las muestras fueron enviadas al laboratorio de ingeniería de la universidad tecnológica del Chocó, donde se aplicó dicho ensayo.

4.3.3. Técnicas para la determinación de metales.

Para cada una de las técnicas de análisis descritas a continuación con excepción Análisis directo de mercurio fue necesario realizar un pretratamiento a las muestras a analizar, el cual era un proceso digestión ácida que se llevó a cabo con peróxido de hidrógeno y ácido nítrico en una relación 2:8 respectivamente, para lograr la oxidación completa y reducir las interferencias causadas por la materia orgánica. El proceso de digestión consistió en pesar 0.3 gramos de muestra en tubos para digestión, haciendo uso de una balanza analítica, posterior a esto se agregaron 8 mL de HNO₃ y 2 mL de H₂O₂ a la cantidad de muestra antes mencionada. Luego, estos mismos tubos fueron tapados y sellados para ser llevados al horno de digestión o comúnmente llamado digestor (el equipo estar encendido para su previo calentamiento), ya estando introducidos los tubos en el equipo se procedió a





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



seleccionar el método de interés para la realización de la digestión la cual tenía una duración de aproximadamente 1 hora. Finalmente, al terminar el proceso de digestión dentro del equipo, las muestras fueron almacenadas en frascos plásticos de polietileno de 80 mL. Las muestras fueron llevadas a un volumen de aproximadamente 25 mL para así posteriormente ser analizadas

4.3.3.1. Espectroscopia de Absorción atómica de llama (FAAS).

Esta técnica permitió la determinación de metales tales como cromo (Cr), níquel (Ni), zinc (Zn) y cobre (Cu). La cual consistía en tomar una alícuota de muestra, aproximadamente 10 mL esta fue llevada al equipo (Espectrómetro de absorción atómica Thermo SCIENTIFIC iCE 3000), este realizó la cuantificación de la cantidad analito que contenía cada muestra.

4.3.3.2. Espectroscopía de Absorción Atómica con Horno de Grafito (GFAAS).

Se analizaron los metales Pb y Cd. La cual consistía en tomar una alícuota de cada una de las muestras de aproximadamente 1 mL esta fue llevada al equipo (Thermo SCIENTIFIC iCE 3000 Acoplado a horno de grafito GFS), este realizó la cuantificación de la cantidad o concentración metal que contenía cada una de las muestras para cada uno de los metales antes mencionados.

4.3.3.3. Espectroscopía de Absorción Atómica con Generación de Hidruros (GHAAS).

Esta fue la técnica utilizada para la determinación de As. La cual consistía en tomar una alícuota de muestra, aproximadamente 10 mL esta fue llevada al equipo (Thermo SCIENTIFIC iCE 3000 Acoplado a generador de vapor de flujo continuo Thermo SCIENTIFIC VP100), este realizó la cuantificación de la cantidad analito que contenía cada muestra.





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



4.3.3.4. Análisis directo de mercurio DMA 80.

Fue la técnica utilizada para la detección del metal Hg. La cual consistía en pesar entre aproximadamente 0.020 y 0.040 gramos de muestra en celdas de Níquel previamente lavadas y secadas estas fueron llevadas al equipo (Analizador directo de mercurio MILESTONE DMA 80), este realizó la cuantificación de la cantidad o concentración metal que contenía cada una de las muestras.

4.3.4. Ensayos de evaluación de la toxicidad.

En este estudio también se recurrió a métodos experimentales, diseñados para determinar la lixiviación característica de toxicidad de residuos mineros y el procedimiento de lixiviación por precipitación sintética.

4.3.4.1. TCLP.

Según EPA 1311 (1992) el procedimiento de lixiviación característica de toxicidad (TCLP) el cual tiene como finalidad determinar la movilidad en el residuo de determinados constituyentes tóxicos, sean estos elementos o compuestos químicos, tanto de origen orgánico como inorgánico, utiliza fluidos de extracción puestos en contacto con la muestra y son específicos según el test. Se procedió a realizar el TCLP a muestras totalmente sólidas y secas de la siguiente manera, siguiendo los procesos establecidos por la EPA en el método 1311:

Primeramente, se requirió elegir el tamaño adecuado de las muestras, pasándolas por un tamiz de 9.5 mm. Luego se procedió a seleccionar el fluido extractor o solución lixivante, como lo describe el método; si el pH de la muestra era ≤ 5.0 se usaba la solución lixivante #1 y si el pH de la muestra era > 5.0 entonces se usaba la solución lixivante #2.

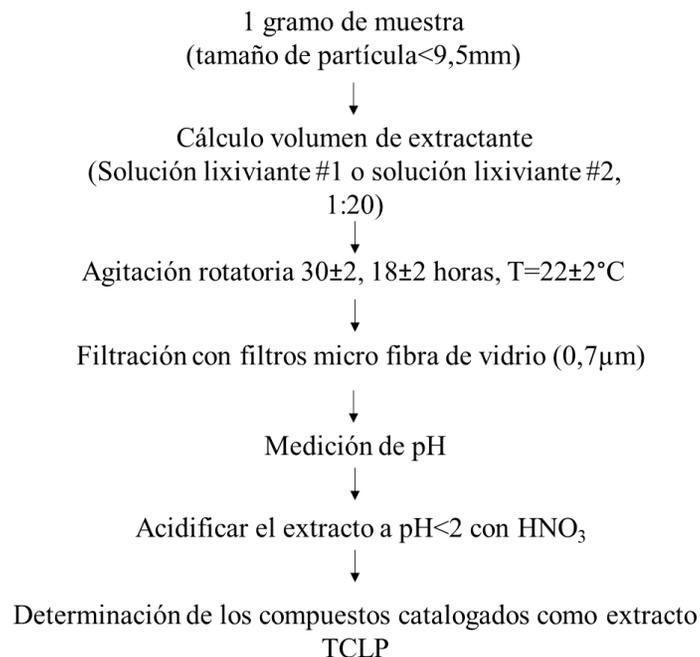
La solución lixivante #1 se preparó agregando 1,425 mL de CH_3COOH glacial a 250 mL de agua (para análisis), y luego se añadió 16,075 ml de NaOH 1 N, y se diluyó hasta 500 mL. Según el test, la solución preparada correctamente debía tener un pH de $4,93 \pm 0,05$ y efectivamente se logró la preparación adecuada de esta porque alcanzó el pH requerido por el test. Por otro lado, solución Lixivante # 2: se preparó diluyendo 1,71 ml de CH_3COOH glacial con agua (para análisis) hasta 300 mL. La solución preparada correctamente debía tener un pH de $2,88 \pm 0,05$ de la cual se logró preparar al pH requerido por el test.





Según el método, se añadió de solución lixiviante 20 veces la cantidad tomada de la muestra. Como se pesó 1 gramos, entonces se añadió 20 mL de solución lixiviante. Se colocaron en agitación durante un periodo de 18 ± 2 horas, a una temperatura de 22 ± 2 °C. Luego de terminado este proceso de mezcla continua, se llevaron a cabo las filtraciones mediante filtros de tamaño $0.7 \mu\text{m}$. Finalmente, se midió el pH de los extractos TCLP y seguidamente se acidificaron con HNO_3 hasta alcanzar pH inferior 2.0 (EPA 1311, 1992). El líquido final, denominado extracto TCLP se le hizo el análisis de los metales por ICP-OES, a excepción del Hg por fluorescencia atómica acoplado a vapor frío y el As por absorción atómica de generación de hidruros. A continuación, el diagrama 1, donde se resume el test.

Diagrama 1. Procedimiento de realización del TCLP.



4.3.4.2. SPLP.

De igual forma para el procedimiento de lixiviación por precipitación sintética se siguen los procesos establecidos por la EPA en el método 1312. Este método se procede de manera



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



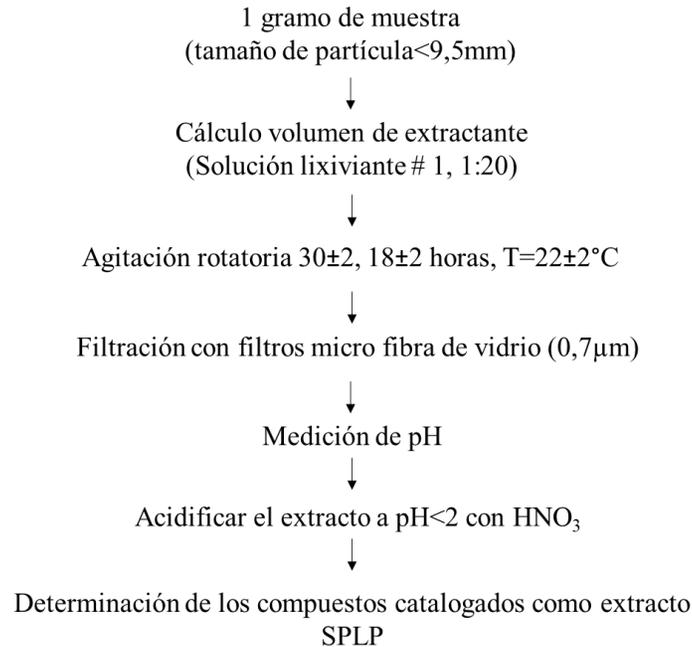
similar al test anterior, lo único que cambian son las soluciones lixiviantes o fluidos extractores. Se procedió así:

Como primer paso, se requirió elegir el tamaño adecuado de las muestras, pasándolas por un tamiz de 9.5 mm. Luego se procedió a seleccionar el fluido extractor o solución lixiviante, como lo describe el método, para este test, se seleccionó el fluido de extracción #1, el cual cumplía con todas las condiciones requeridas por las muestras, es decir, este fluido se aplicaba a nuestro tipo de muestras según la descripción del método. El fluido consiste en una mezcla de ácidos sulfúrico y nítrico (60/40 en peso) diluido a cierto volumen de agua reactivo, hasta alcanzar un pH de $4,20 \pm 0,05$.

Ahora bien, según el SPLP se debía proceder de igual manera que en el TCLP, para lo cual se añadió de solución lixiviante 20 veces la cantidad tomada de la muestra. Como se pesó 1 gramo, entonces se añadió 20 mL de solución lixiviante. Se colocaron en agitación durante un periodo de 18 ± 2 horas, a una temperatura de 22 ± 2 °C. Luego de terminado este proceso de mezcla continua, se llevaron a cabo las filtraciones mediante filtros de tamaño $0.7 \mu\text{m}$. Finalmente, se midió el pH de los extractos SPLP y seguidamente se acidificaron con HNO_3 hasta alcanzar pH inferior 2.0 (EPA 1312, 1988). El líquido final, denominado extracto SPLP se le hizo el análisis de los metales por la técnica de absorción atómica, específicamente Pb y Cd por generación de hidruros; Cr, Ni, Zn y Cu por llama, As por generación de hidruros y Hg por fluorescencia atómica acoplado a vapor frío.

Diagrama 2. Procedimiento de realización del SPLP.





4.4. Tratamiento de resultados.

Los resultados obtenidos de los procedimientos se correlacionan a través de correlación de Spearman. También se compararon con los parámetros máximos permisibles por la normatividad colombiana e internacional aplicable, para establecer la conformidad de los resultados obtenidos y con ellos se realizó el informe final. Finalmente, los resultados granulométricos se analizaron con respecto a los coeficientes de curvatura y uniformidad, y según la clasificación que hace la A.A.S.H.O (1998).

5. Resultados y discusión.

5.1. Parámetros fisicoquímicos.

Según la naturaleza de las muestras tratadas en este estudio, se hace importante tener en cuenta las características químicas y físicas, ya que estas se presentan como agentes que intervienen o influyen de manera considerable a los contaminantes tratados en el estudio; metales pesados. A continuación, en la tabla 2 podemos observar, los factores determinados



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



que afectan la movilidad y disponibilidad de estos contaminantes. Cabe resaltar, que estos fueron determinados a las muestras originales.

Tabla 2. Valores correspondientes a los parámetros fisicoquímicos.

Sitio	pH	Conductividad $\mu\text{S/cm}$	% M. orgánico	Cloruros mg/Kg	Sulfatos mg/Kg
Congo	5,14	15,0	3,43	40,55	82,35
San Isidro	4,45	17,0	3,35	40,55	69,61
Finca Silvio	5,16	5,0	2,81	20,28	93,14
Rio cari pato	5,45	1,0	13,54	20,26	97,06
Boca de pato	4,83	4,0	6,92	20,26	78,43

Como se pudo observar en la anterior tabla, los pH de las zonas Congo, Finca Silvio y Rio cari pato, son ligeramente ácidos. En zonas San Isidro y Boca de pato se obtuvieron pH 4,45 y 4,83 respectivamente, resultando valores menores, es decir, más ácidos, estos valores determinan el grado de adsorción de iones H^+ por las partículas de los pasivos ambientales (PAM), beneficiando así su solubilidad, movilidad, disponibilidad y formas iónicas de un contaminante y otros constituyentes de los PAM.

Los resultados que se obtuvieron de conductividad eléctrica fueron de 1,0 a 15,0 $\mu\text{S/cm}$. La determinación de la conductividad eléctrica es por lo tanto una forma indirecta de medir la salinidad de los extractos de los pasivos ambientales. La conductividad determinada se presentó con valores bajos, este factor deja en evidencia la poca salinidad que tienen estas arenas de residuos y lo que a su vez limita la movilidad de los contaminantes asociados. Según estudios, la salinidad aumenta la movilidad de los contaminantes asociados, ya que los cationes asociados con las sales Na y K pueden reemplazar a estos en lugares de adsorción.

Los porcentajes de materia orgánica van de 2,8 a 13,5% lo que indica que hay poca fracción de desechos vegetales y animales, a lo que se le conoce como humus. En la tabla 3 se ve evidenciado que se encontraron porcentajes bajos de MO en las muestras, lo cual es muy lógico porque este tipo de pasivos ambientales es de una textura arenosa. Como es sabido la materia orgánica juega un papel importante en la adsorción de algunos metales.

Con respecto a los Cloruros y Sulfatos, es importante saber que en la actualidad Colombia no tiene ninguna normativa que hable acerca de los límites máximos permisibles en residuos mineros, suelos o sedimentos y de igual manera en el mundo no existen o hay muy





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



pocas normativas que rijan que tan perjudiciales pueden ser los sulfatos y cloruros en estas matrices. Sin embargo, en el caso de que se quieran usar las arenas como material de construcción, estos parámetros juegan un papel importante, pues los sulfatos atacan al concreto formando compuestos expansivos causando fisuración, mientras que los cloruros llegan hasta la armadura causando despasivación y provocar corrosión.

Ahora bien, con respecto a los cloruros se encontró que los sitios Congo y San Isidro presentaron el valor más alto 40,55 mg/Kg y que en los sitios Boca de pato y Rio cari pato se encontró el valor más bajo entre las muestras analizadas 20,26 mg/Kg. Sí por algún motivo los residuos mineros (arenas) de los sitios de estudio llegasen hasta zonas aledañas, estos valores no representan un peligro, porque son relativamente bajos. También, los valores no representan un inconveniente para ser usados como material de construcción.

Por su lado, de los sulfatos se observó que el sitio Rio Cari pato presentó la mayor concentración 97,06 mg/Kg y que por el contrario el sitio San Isidro presentó la menor concentración 69,61 mg/Kg. En general, la cantidad de sulfatos en los sitios no es alta, esto podría estar relación con el pH de las muestras, ya que se pudo observar que estas tienen pH relativamente bajos. Según la literatura a pH bajos se esperan cantidades bajas de sulfatos, por tal razón se reafirma la relación entre el pH de los sitios y las bajas concentraciones de los sulfatos que se encontraron. Al igual que en los cloruros, los valores de sulfatos no representan un inconveniente para ser usados como material de construcción debido a sus bajas concentraciones en las muestras.

5.2. Análisis granulométrico.

El análisis de granulometría realizado a las 5 muestras estudiadas permitió obtener información acerca del tipo de material dentro del cual se sitúan, así como también, el peso retenido, el porcentaje de material retenido, el porcentaje retenido acumulado y finalmente el porcentaje que pasa por cada uno de los tamices empleados; esto, se puede observar en las tablas 3, 4, 5, 6 y 7 para cada muestra. Luego, se evidenció el comportamiento de los resultados obtenidos en las respectivas figuras para cada muestra (figura 1, 2, 3, 4 y 5), así como también, otros factores relacionados al análisis.





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS

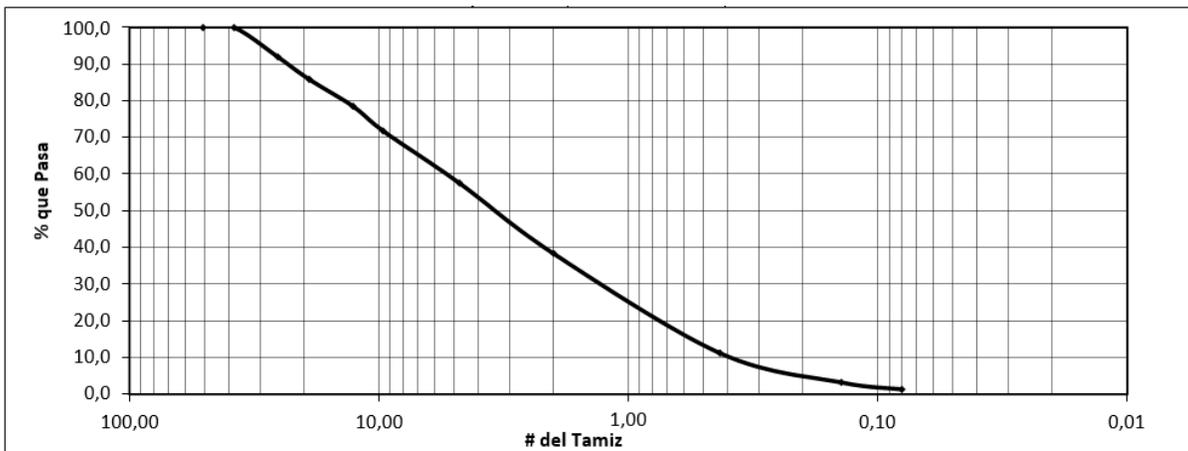


5.2.1. Tablas y curvas granulométricas.

5.2.1.1. Congo.

Tabla 3. Análisis granulométrico del sitio Congo.

Material:		Material grueso granular de color gris con vetas negras y blancas					
TAMIZ (mm)	(pulg)	Peso del Tamiz	Peso Tamiz + Material	Peso Material	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
50,8	2"	680	680	0	0	0	100
38,1	1 1/2"	720	720	0	0	0	100
25,4	1"	688	1020	332	8,1	8,1	91,9
19,05	3/4"	698	948	250	6,1	14,1	85,9
12,7	1/2"	680	982	302	7,3	21,5	78,5
9,63	3/8"	648	924	276	6,7	28,2	71,8
4,76	#4	646	1232	586	14,2	42,4	57,6
2	#10	518	1308	790	19,2	61,6	38,4
0,43	#40	500	1618	1118	27,2	88,8	11,2
0,14	#100	468	798	330	8	96,8	3,2
0,08	#200	472	550	78	1,9	98,7	1,3
FONDO		396	450	54	1,3	100	0
Sumatoria de Todo el Material que Pasa:				4116			





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS

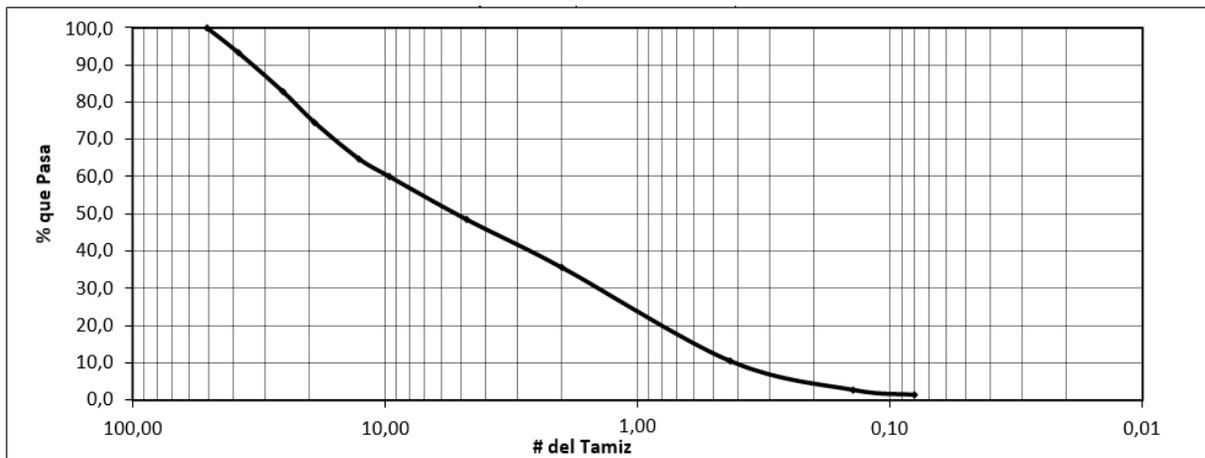


Figura 1. Curva granulométrica del sitio Congo.

5.2.1.2. San Isidro.

Tabla 4. Análisis granulométrico del sitio San Isidro.

Material:		Material grueso granular de color gris claro con vetas negras y blancas					
TAMIZ (mm)	(pulg)	Peso del Tamiz	Peso Tamiz + Material	Peso Material	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
50,8	2"	680	680	0	0	0	100
38,1	1 1/2"	720	1014	294	6,7	6,7	93,3
25,4	1"	688	1144	456	10,4	17,1	82,9
19,05	3/4"	698	1060	362	8,3	25,4	74,6
12,7	1/2"	680	1108	428	9,8	35,2	64,8
9,63	3/8"	648	856	208	4,8	39,9	60,1
4,76	#4	646	1150	504	11,5	51,5	48,5
2	#10	518	1082	564	12,9	64,4	35,6
0,43	#40	500	1600	1100	25,1	89,5	10,5
0,14	#100	468	808	340	7,8	97,3	2,7
0,08	#200	472	530	58	1,3	98,6	1,4
FONDO		396	458	62	1,4	100	0
Sumatoria de Todo el Material que Pasa:				4376			





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



Figura 2. Curva granulométrica de muestra TSC-MO-02. San Isidro.

5.2.1.3. Finca de Silvio.

Tabla 5. Análisis granulométrico del sitio Finca de Silvio.

Material:		Material grueso granular de color café con vetas negras					
TAMIZ (mm)	(pulg)	Peso del Tamiz	Peso Tamiz + Material	Peso Material	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
50,8	2"	680	680	0	0	0	100
38,1	1 1/2"	720	768	48	1,1	1,1	98,9
25,4	1"	688	784	96	2,3	3,4	96,6
19,05	3/4"	698	794	96	2,3	5,7	94,3
12,7	1/2"	680	996	316	7,5	13,2	86,8
9,63	3/8"	648	990	342	8,1	21,2	78,8
4,76	#4	646	1424	778	18,4	39,6	60,4
2	#10	518	1236	718	17	56,6	43,4
0,43	#40	500	1754	1254	29,7	86,3	13,7
0,14	#100	468	920	452	10,7	97	3
0,08	#200	472	544	72	1,7	98,7	1,3
FONDO		396	452	56	1,3	100	0
Sumatoria de Todo el Material que Pasa:				4228			





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



Figura 3. Curva granulométrica del sitio Finca de Silvio.

5.2.1.4. Rio Cari Pato.

Tabla 6. Análisis granulométrico del sitio Rio Cari Pato.

Material:		Material grueso granular de color café con vetas negras					
TAMIZ (mm)	(pulg)	Peso del Tamiz	Peso Tamiz + Material	Peso Material	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
50,8	2"	680	680	0	0	0	100
38,1	1 1/2"	720	1126	406	9,6	9,6	90,4
25,4	1"	688	1272	584	13,8	23,4	76,6
19,05	3/4"	698	1094	396	9,4	32,8	67,2
12,7	1/2"	680	1072	392	9,3	42,1	57,9
9,63	3/8"	648	808	160	3,8	45,9	54,1
4,76	#4	646	938	292	6,9	52,8	47,2
2	#10	518	884	366	8,7	61,4	38,6
0,43	#40	500	1696	1196	28,3	89,7	10,3
0,14	#100	468	778	310	7,3	97,1	2,9
0,08	#200	472	534	62	1,5	98,5	1,5
FONDO		396	458	62	1,5	100	0





Sumatoria de Todo el Material que Pasa: 4226

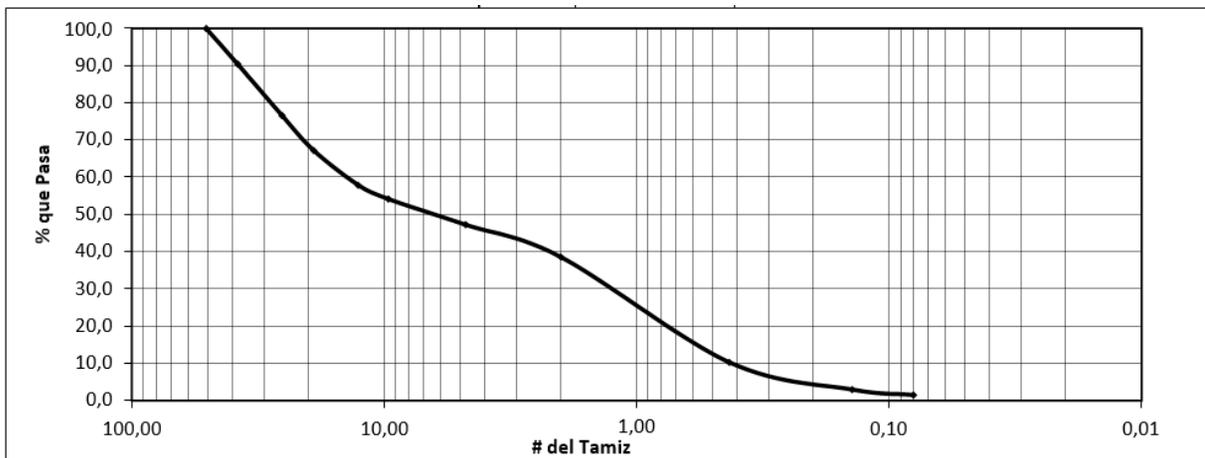


Figura 4. Curva granulométrica del sitio Rio Cari Pato.

5.2.1.5. Boca de Pato.

Tabla 7. Análisis granulométrico del sitio Boca de Pato.

Material:		Material grueso granular de color gris con vetas negras y blancas					
TAMIZ (mm)	(pulg)	Peso del Tamiz	Peso Tamiz + Material	Peso Material	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
50,8	2"	680	680	0	0	0	100
38,1	1 1/2"	720	830	110	2,7	2,7	97,3
25,4	1"	688	916	228	5,6	8,3	91,7
19,05	3/4"	698	1030	332	8,1	16,4	83,6
12,7	1/2"	680	1190	510	12,5	29	71
9,63	3/8"	648	898	250	6,1	35,1	64,9
4,76	#4	646	1234	588	14,4	49,5	50,5
2	#10	518	1300	782	19,2	68,7	31,3
0,43	#40	500	1460	960	23,6	92,3	7,7
0,14	#100	468	708	240	5,9	98,2	1,8





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



0,08	#200	472	490	18	0,4	98,6	1,4
FONDO		396	452	56	1,4	100	0
Sumatoria de Todo el Material que Pasa:				4074			

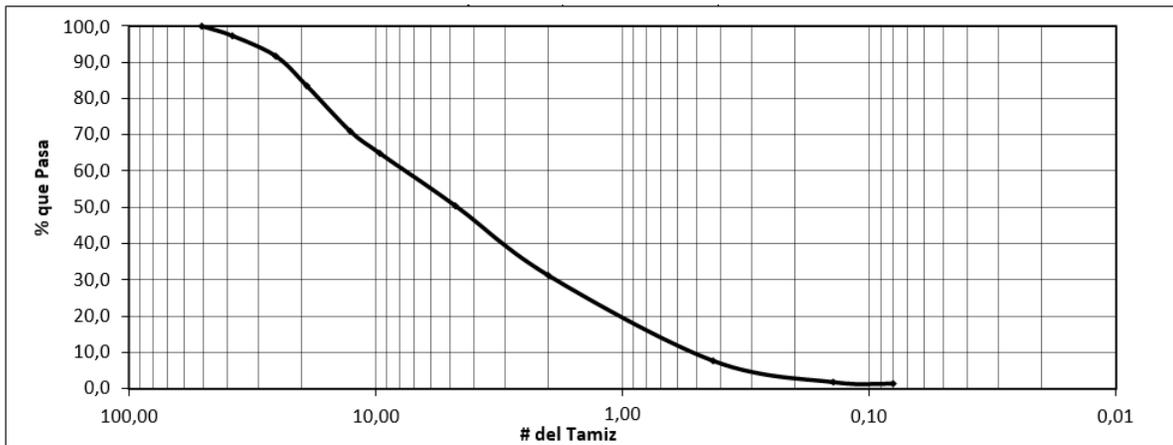


Figura 5. Curva granulométrica del sitio Boca Pato.

De las curvas granulométricas (figura 1, 2, 3, 4 y 5), se observó que la sección de los puntos que se encuentran entre los tamaños 100 mm a 10 mm del tamiz corresponde dentro de la distribución granulométrica a Grava, esto es porque las aperturas de los tamices son más grandes y el porcentaje a pasar es mayor. De forma seguida, se observó que en la sección de los puntos que se encuentran entre los tamaños 10 mm, pasando por 1 mm hasta 0,1 mm corresponden dentro de la distribución granulométrica a Arenas, ya que, al disminuir la apertura de los tamices, el porcentaje de muestra que pasa es menor, es decir, pasan las fracciones más pequeñas de la muestra, en este caso las arenas (fina, media y gruesa). Luego, se observó que la sección de los puntos que se encuentran entre los tamaños 0,1 mm a 0,01 mm del tamiz corresponde dentro de la distribución granulométrica a Fino, esto es porque las aperturas de los tamices son más pequeñas y el porcentaje a pasar es menor, es decir, que solo pasaron las fracciones finas de la muestra. De esta manera se observó que las tendencias de las curvas van en disminución porque al disminuir el tamaño del tamiz, la cantidad de muestra que pasa es menor, es decir, el porcentaje que pasa es directamente proporcional al tamaño o diámetro del tamiz.

Tabla 8. Coeficiente de curvatura (Cc), coeficiente de uniformidad (Cu) y A.A.S.H.O.





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



Sitio	Cu	Cc	A.A.S.H. O
Congo	15,22	0,88	SP
San Isidro	23,59	0,58	GP
Finca de Silvio	14,59	0,82	SP
Rio cari pato	33,56	0,3	GP
Boca de pato	14,87	0,86	GP

Ahora bien, como se puede observar en la tabla 8 se obtuvieron factores importantes, como lo son el coeficiente de uniformidad (Cu), coeficiente de curvatura (Cc) y el A.A.S.H.O (Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes). Los coeficientes de uniformidad (Cu) y curvatura (Cc) se obtuvieron usando la ecuación (3) y (4) respectivamente. Es importante mencionar, que para que la muestra sea considerada como "bien gradada" debe tener un valor de $Cu > 4$ y estar en el rango de $1 < Cc < 3$.

Con respecto a lo anterior, todas las muestras se consideran pobremente gradadas, ya que uno de los coeficientes no entra en el rango establecido para ser consideradas "bien gradadas". Al observar la tabla 8, los coeficientes de uniformidad (Cu) se acogen porque son mayores a 4, pero para el caso de los coeficientes de curvatura (Cc) ninguno de los sitios entra en el rango, por esto las muestras son consideradas "pobremente gradadas". También se pudo observar que todas las muestras tienen bajas uniformidad, ya que los coeficientes de uniformidad (Cu) son altos. Entre más bajo es el coeficiente uniformidad, más uniforme es la muestra, pues, según la literatura se considera que una muestra es uniforme cuando su coeficiente de uniformidad (Cu) es < 4 .

Según la clasificación que hace la A.A.S.H.O (1998), las muestras de los sitios Congo y finca de Silvio se encuentran en la SP, que corresponden a arenas pobremente gradada, mal gradadas, pocos finos o sin finos (arenas limpias). Por otra parte, las muestras de los sitios San Isidro, Rio cari pato y Boca de pato se encuentran en la GP, que corresponden gravas pobremente gradadas, mal gradadas, mezcla de grava-arena, pocos finos o sin finos (gravas limpias).

5.3. Análisis de las concentraciones de metales.

5.3.1. Muestras originales versus límites máximos permisibles.

Con relación a los residuos, a partir del 2005, el INVEMAR ha evaluado las concentraciones de la fracción biodisponible de plomo (Pb), cadmio (Cd), cromo (Cr), zinc





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



(Zn), arsénico (As), mercurio (Hg) y níquel (Ni), con el fin de verificar si hay removilización desde el sistema sedimentario hacia las fuentes de agua. Debido a que en Colombia no existe legislación para el contenido de metales pesados en suelos, el INVEMAR estableció como criterio comparativo la guía internacional de la NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos). En la Tabla 9 se muestran los valores permitidos por la norma NOAA para los metales de interés de esta guía.

Ahora bien, con el fin de establecer los índices de riesgo ambiental, así como el riesgo en la salud humana por la ingesta de algunas especies típicamente consumidas por la población, a continuación, se presenta la comparación entre las concentraciones obtenidas en la figura 6 versus la tabla 9.

Tablas 9. Límites máximos permisibles para metales en suelos o sedimentos establecidos por los niveles de fondo de referencia para Estados Unidos (Buchman, 2008).

NORMA	NOMBRE	ARSÉNICO	CROMO	MERICURIO	PLOMO	CADMIO	NÍQUEL	ZINC	COBRE
	SÍMBOLO	As	Cr	Hg	Pb	Cd	Ni	Zn	Cu
NOAA	µg/Kg	5900	37300	174	35000	596000	18000	123000	35700



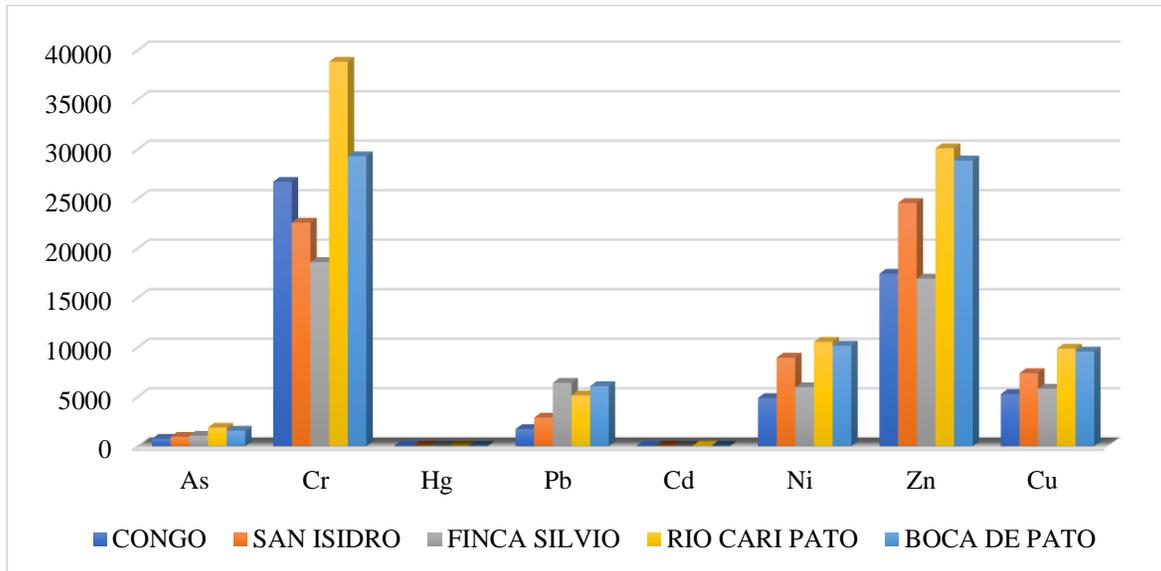


Figura 6. Concentraciones de metales con el proceso sin lavar (muestras originales) y pasadas por un tamiz de 2 mm.

Como se pudo observar en la tabla y figura anterior, para el caso del arsénico, mercurio, plomo, cadmio, níquel, Zinc y cobre, no superan el umbral máximo permitido por la norma en cada uno de los sitios de estudio, esto no quiere decir que las poblaciones y ecosistemas aledaños a los sitios de estudio, no estén expuestas a contaminación por metales pesados, ya que muchos de estos metales pueden ser perjudiciales a concentraciones bajas. Aunque los resultados no superan lo establecido en la normativa es de suma importancia que las comunidades aledañas, eviten la exposición a estos sitios, porque se puede presentar una acumulación de los metales pesados y esto puede terminar en consecuencias negativas para los seres humanos y ecosistemas de la región.

Por su parte, el cromo en la muestra Rio Cari Pato superó los niveles máximos permitidos por la norma. La norma indica que el nivel máximo permitido es de 37,300 $\mu\text{g}/\text{kg}$, mientras que la muestra representativa para este sitio de estudio arrojó que la concentración de cromo presente es 38820,00 $\mu\text{g}/\text{kg}$, lo cual genera preocupación, ya que la exposición a niveles altos de cromo puede producir irritación del revestimiento interno de la nariz, úlceras nasales, secreción nasal y problemas respiratorios tales como asma, tos, falta de aliento o respiración jadeada (Cerro, 2018). El efecto principal que se observa en animales



que ingieren compuestos de cromo (VI) son irritación y úlceras en el estómago y el intestino delgado y anemia. El Departamento de Salud y Servicios Humanos (DHHS), la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) y la EPA han determinado que los compuestos de cromo (VI) son carcinogénicos en seres humanos (Shekhawat *et al.*, 2015).

5.3.2. Comparación entre muestras originales y muestras lavadas.

A continuación, se hace una comparación entre las figuras 6 y 7, para observar cómo se varían las concentraciones de los metales en estudio.

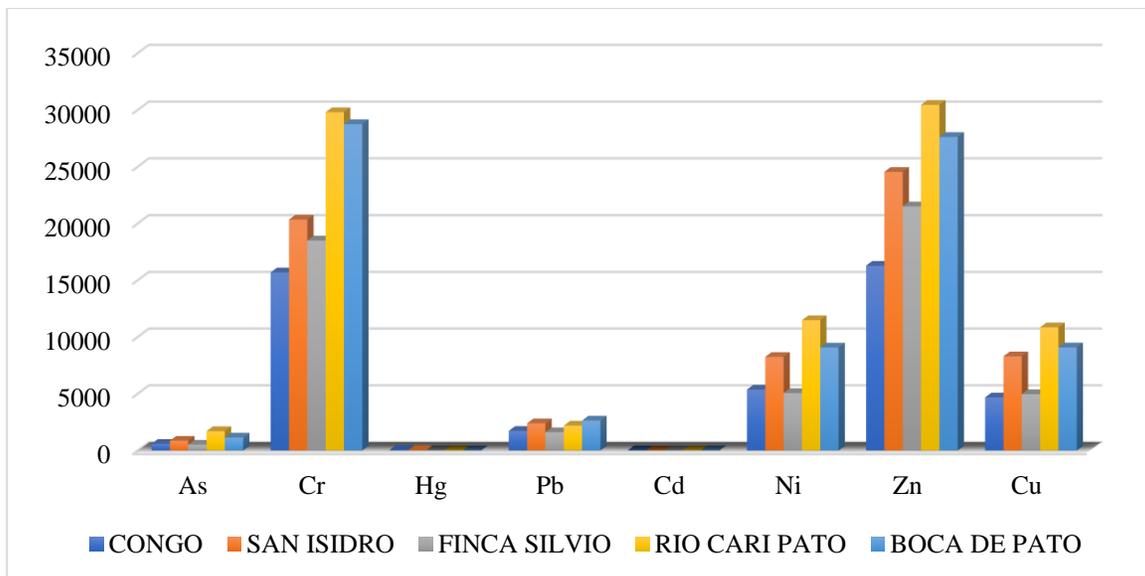


Figura 7. Concentraciones de metales con el proceso lavado y pasadas por un tamiz de 2 mm.

Al observar y comparar las concentraciones de los metales se pudo apreciar que estas disminuyen conforme se le realizó el tratamiento de lavado, con esto se pudo inferir que las concentraciones disminuyeron debido a la remoción de material orgánico e inorgánico, que generalmente se encuentran asociados a estos contaminantes tóxicos.

Nota. Las tablas correspondientes a las figuras 6 y 7 se encuentran en los anexos, sección 8.



5.3.3. Comparación entre muestras finas y muestras trituradas.

En este ítem se compararon las tablas 10 y 11, las cuales representan los procesos de material denotado como fino y triturado respectivamente, esto se realizó con el fin de ver como varía concentración de los metales después de cada proceso, para así hacer una estimación de que fracción contenía más cantidad de los metales en estudio.

Tabla 10. Concentraciones de metales con el proceso de tamizado por un tamiz menor a 75µm, denotado material o fracción finos.

Sitio	Proceso	Tamiz	As	Cr	Hg	Pb	Cd	Ni	Zn	Cu
			µg/kg							
CONGO	Fino	<75µm	1697,77	114334,68	473,91	13358,56	72,61	30770,18	85868,6	28268,15
SAN ISIDRO	Fino	<75µm	2884,83	108108,65	75,67	14952,66	105,82	27481,99	109023,5	30653,06
FINCA SILVIO	Fino	<75µm	2666,4	128151,37	196,53	14680,04	106,37	33102,03	128353,1	32317,66
RIO CARI PATO	Fino	<75µm	5739,15	76287,17	176,5	14651,07	96,87	31382,49	98192,2	36906,66
BOCA DE PATO	Fino	<75µm	4039,11	109491,18	80,1	11978,33	104,98	26063,79	147529,9	34744,29

Tabla 11. Concentraciones de metales con el proceso triturado y tamizado por un tamiz de 2 mm.

Sitio	Proceso	Tamiz	As	Cr	Hg	Pb	Cd	Ni	Zn	Cu
			µg/kg							
CONGO	Triturado	2mm	749,27	39688,71	42,13	4072,82	46,65	9911,26	25439	10643,89
SAN ISIDRO	Triturado	2mm	972,6	63984,2	18,24	3356,64	23,09	14670,78	25299,7	40668,73
FINCA SILVIO	Triturado	2mm	1089,29	29091,15	21,01	6512,3	27,48	9201,5	26791,8	12166,16
RIO CARI PATO	Triturado	2mm	1999,54	39584,33	20,09	5346,97	29,22	10969,35	33128,2	24378,1
BOCA DE PATO	Triturado	2mm	2007,49	28117,74	19,45	6459,06	45,05	9999,93	28566,2	16660,14

Al analizar los resultados de la tabla 10 y 11 se notó que hay más concentración de los metales en la fracción fina, esto es porque la concentración de metales pesados depende de la composición granulométrica del suelo o residuo minero y en general se manifiesta inversamente proporcional al tamaño de partícula. La fracción estudiada en esta investigación tiene un valor de 75 µm, muy cercana al valor < 63 µm reportado por el Sr



Carrea (2017), ya que se elimina la arena dejando las fracciones más finas de cieno y arcilla. Los metales pesados se encuentran principalmente en las partículas de cieno/arcilla (Cerro, 2018), debido a que la materia orgánica podría estar contribuyendo a la presencia de altas concentraciones de estos, pues esta es un excelente adsorbente de metales, por tal razón se presentó mayor concentración de metales pesados en la fracción fina que en la triturada.

5.4. Correlación entre concentraciones de metales pesados y parámetros fisicoquímicos.

Las correlaciones expresan el grado de asociación entre dos variables, según el sentido de esta asociación o relación de estas en términos de aumento o disminución de una con respecto a la otra, para este estudio se trabajó con la correlación de la Spearman. En la tabla 12, se muestran los resultados de los coeficientes de correlación entre las concentraciones de los metales pesados y los parámetros fisicoquímicos (pH, materia orgánica y conductividad eléctrica (CE)) con el fin de mirar la relación o variación presente entre ellos.

Tabla 12. Coeficientes de correlación entre las concentraciones de los metales pesados As, Cr, Hg, Pb, Cd, Ni, Zn y de Cu y, los parámetros fisicoquímicos en las arenas como residuos mineros.

Metales	Rs (pH)	Rs (MO)	Rs (CE)
As	0,5	0,6	-0,9
Cr	0,3	1	-0,7
Hg	-0,1	-0,1	0,6
Pb	0,3	-0,2	-0,5
Cd	0,3	0,2	0,2
Ni	0,2	0,8	-0,7
Zn	0,1	0,9	-0,6
Cu	0,2	0,7	-0,7



5.4.1. Coeficiente de correlación entre pH y metales.

Los resultados de correlación de Spearman (Tabla 12), obtenidos para el Potencial de hidrogeno (pH) y la concentración de metales pesados en los residuos mineros reflejan valores de correlación positiva media para casi todos los elementos analizados, dentro de estos el Cr, Pb, Cd, Ni, Zn y Cu presentan valores de correlación con el pH en torno a 0.1 y 0.4 lo cual indica que, tienen una relación parcial o que están relacionados parcialmente. Para el caso de As, este presenta una correlación positiva considerable, entre 0.5 y 0.75; es decir que al aumentar el pH la concentración de este en su defecto también aumentara.

5.4.2. Coeficiente de correlación entre MO y metales.

La MO juega un papel importante en la disponibilidad de metales pesados, encontrándose una correlación significativa entre esta y los metales evaluados. Lo anterior puede ser debido a que el efecto de la concentración de metales en MO para los sitios muestreados se encuentra influenciado por diversas fuentes, por tanto, los efectos de la materia orgánica fueron muy notorios en los metales como el AS, Cr, Ni, Zn y Cu dando estos un coeficiente de correlación positivo muy alto y, aún más en el caso del Cr que presentó un Rs positivo perfecto. Por otro lado, la correlación entre la MO con los metales Hg y Pb se presentó con un Rs negativo medio, dando a entender que no hay una correlación entre estos.

5.4.3. Coeficiente de correlación entre CE y metales.

La concentración de los metales y la conductividad eléctrica se encuentran correlacionada en forma considerablemente negativa y negativamente fuerte, las cuales están en torno a valores de 0,51 a 0,75 y 0,76 a 0,90 respectivamente, indicando que la concentración de los metales Ar, Cr, Pb, Ni, Zn y Cu no están directamente relacionadas con este parámetro. Por otro lado, el Hg presenta una correlación positiva considerable, la cual indicó que este metal tiene una ligera relación con el parámetro.



5.5. Test de lixiviación TCLP y SPLP.

5.5.1. Test TCLP

En este apartado, se muestran los resultados que se obtuvieron luego de aplicar el TCLP a las muestras procesadas, y también la comparación con los límites máximos permisibles establecidos para el test en el decreto 4741 de 2005 de Colombia.

Tabla 13. Concentraciones máximas permisibles de los contaminantes metálicos para el TCLP.

Metal	Decreto 4741 de 2005
	Máximo permisible (mg/L)
As	5,00
Cd	1,00
Cr	5,00
Pb	5,00
Hg	0,20

Tabla 14. Resultados luego de aplicar el test TCLP.

TEST TCLP							
Sitio	Proceso	Tamiz	mg/L Pb	mg/L Cd	mg/L Hg	mg/L Cr	mg/L As
Congo	Sin Lavar	2mm	< LD	0,0010	0,00020	0,017	< LD
San Isidro	Sin Lavar	2mm	< LD	0,0007	0,00648	0,018	< LD
Finca Silvio	Sin Lavar	2mm	0,005	0,0005	0,00027	0,012	0,0003
Rio cari pato	Sin Lavar	2mm	0,008	0,0006	< LD	0,026	0,0004
Boca de pato	Sin Lavar	2mm	0,007	0,0007	< LD	0,027	0,0005
Congo	Lavado	2mm	< LD	0,0003	< LD	0,008	< LD
San Isidro	Lavado	2mm	< LD	0,0006	0,00008	0,012	< LD
Finca Silvio	Lavado	2mm	0,004	0,0005	0,00012	0,014	< LD
Rio cari pato	Lavado	2mm	0,005	0,0004	< LD	0,023	0,0004
Boca de pato	Lavado	2mm	< LD	0,0007	< LD	0,018	0,0004
Congo	fino	<75um	0,004	0,0034	0,00008	0,036	0,0005
San Isidro	fino	<75um	0,003	0,0016	< LD	0,026	< LD



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



Finca Silvio	fino	<75um	0,008	0,0007	< LD	0,072	0,0006
Rio cari pato	fino	<75um	0,018	0,0008	< LD	0,035	0,0007
Boca de pato	fino	<75um	0,042	0,0012	< LD	0,07	0,0005
Congo	Triturado	2mm	< LD	< LD	< LD	0,007	0,0004
San Isidro	Triturado	2mm	0,002	< LD	< LD	0,014	< LD
Finca Silvio	Triturado	2mm	0,002	< LD	< LD	0,013	0,0005
Rio cari pato	Triturado	2mm	0,006	< LD	< LD	0,004	< LD
Boca de pato	Triturado	2mm	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
LD			0,002	0,0002	0,00005	0,001	0,0003

LD: Límite de detección del método.

Primeramente, es importante mencionar que se considera residuo o desecho tóxico aquel que, al realizarse una prueba de lixiviación característica de toxicidad conocida como test TCLP, las concentraciones son superiores a los niveles máximos permisibles en el lixiviado. Ahora bien, por medio de una comparación entre las tablas 13 y 14, se observó que los valores de los metales Pb, Cd, Hg, Cr y As se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles por la norma, es decir, que cumplen con la legislación, lo cual indica que no representan ningún tipo de riesgo por toxicidad. Por otro lado, se pudo evidenciar que en muchos de los sitios las concentraciones de los metales se encuentran por debajo del límite de detección del método utilizado en su análisis, por lo que, aunque no se puede realizar la comparación con la norma o legislación, permite inferir que también cumplen con la legislación que actualmente se encuentra vigente con respecto a este tipo de prueba.

5.5.2. Test SPLP.

Luego de aplicar el ensayo a las 20 muestras procesadas, se compararon los resultados de los metales con los límites máximos permisibles para el caso de aguas de uso doméstico, según tres organizaciones que regulan esta normativa, como se observa en la tabla 15. En la tabla 16 se aprecian los valores que se obtuvieron luego de la aplicación del test.

Tabla 15. Límites máximos permisibles de los metales, para agua de uso doméstico.

Organización	Metales (mg/L)							
	Pb	Cd	Hg	Cr	As	Ni	Zn	Cu
EPA	0,015	0,005	0.002	0,100	0,050	N/A	5,00	1,30





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



OMS	0,010	0,003	0,001	0,050	0,010	0,020	3,00	2,00
EU	0,020	0,005	0,001	0,050	0,010	0,020	N/A	2,00

EPA: Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos.

OMS: La organización mundial de la salud.

EU: Unión Europea.

Tabla 16. Valores obtenidos al aplicar el SPLP a las muestras de residuos mineros.

TEST SPLP									
Sitio	Proceso	mg/L Pb	mg/L Cd	mg/L Hg	mg/L Cr	mg/L As	mg/L Ni	mg/L Zn	mg/L Cu
Congo	Sin Lavar	<LD	<LD	0,00014	0,011	<LD	<LD	0,154	0,029
San Isidro	Sin Lavar	<LD	<LD	0,00013	0,017	<LD	<LD	0,088	0,009
Finca Silvio	Sin Lavar	<LD	<LD	0,00022	0,009	<LD	<LD	0,133	0,023
Rio Cari pato	Sin Lavar	<LD	<LD	0,00028	0,014	<LD	<LD	0,068	0,016
Boca de pato	Sin Lavar	<LD	<LD	0,00013	0,023	0,0004	0,025	<LD	0,030
Congo	Lavado	<LD	<LD	0,00035	0,002	<LD	<LD	0,045	0,007
San Isidro	Lavado	<LD	<LD	0,00006	0,002	<LD	<LD	0,044	0,012
Finca Silvio	Lavado	<LD	0,00032	<LD	0,009	<LD	<LD	0,082	0,029
Rio Cari pato	Lavado	<LD	<LD	<LD	0,005	<LD	<LD	0,036	0,018
Boca de pato	Lavado	<LD	<LD	<LD	0,006	<LD	<LD	<LD	0,016
Congo	fino	0,0027	<LD	0,00030	0,009	<LD	<LD	0,321	0,108
San Isidro	fino	<LD	<LD	0,00008	0,023	<LD	<LD	0,092	0,015
Finca Silvio	fino	0,0029	<LD	0,00097	0,055	<LD	0,015	0,559	0,029
Rio Cari pato	fino	0,0024	0,00091	0,00043	0,020	<LD	0,033	0,123	0,066
Boca de pato	fino	<LD	<LD	<LD	0,046	<LD	0,033	0,057	0,058
Congo	Triturado	<LD	<LD	0,00011	0,004	0,0004	<LD	<LD	0,011
San Isidro	Triturado	<LD	<LD	0,00006	0,007	<LD	<LD	<LD	0,020
Finca Silvio	Triturado	<LD	<LD	<LD	0,002	0,0004	<LD	0,051	0,039
Rio Cari pato	Triturado	<LD	0,00106	0,00017	0,002	<LD	<LD	<LD	0,001
Boca de pato	Triturado	<LD							
LD		0,002	0,0002	0,00005	0,001	0,0003	0,015	0,035	0,001

LD: Límite de detección método.

Ahora bien, luego de comparar los resultados de la tabla 16 con la tabla 15, se observó que los todos los metales presentaron ciertos valores (<LD) por debajo del límite de detección





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



del método o técnica usada para su análisis, es decir, su contenido es minúsculo en las muestras, por tanto, no se hizo necesario añadir estos resultados a la tabla 18, en este caso, no se pudo realizar la comparación con la información de la tabla 17, por lo que es válido afirmar que cumplen con la legislación o se acogen a los parámetros permisibles con respecto a los tres entes reguladores.

Para el caso de los metales Pb, Cd, Hg, As, Zn y Cu los resultados están por debajo de los límites máximos permisibles con respecto a los tres entes reguladores, es decir, no presentan peligrosidad para el medio ambiente y los organismos que en él habitan. Por su parte, del Cr se obtuvo un valor (0,055 mg/L) que supera los límites máximos permisibles establecidos por la OMS y EU, el cual corresponde al sitio Finca de Silvio proceso fino. También, del metal Ni se obtuvieron tres valores que superaron los límites máximos permisibles establecidos por la OMS y EU, los cuales corresponde a los sitios Boca de pato Sin lavar (0,025 mg/L), Rio cari pato proceso fino (0,033 mg/L) y Boca de pato proceso fino (0,033 mg/L). Con respecto a lo anterior, es importante mencionar que el procesamiento fino o fracción fina, tiene un valor menor a 75 μm , por tanto, el hecho de que estas muestras hayan superado la legislación se atribuye a este tipo de procesamiento, ya que para obtener la fracción fina se elimina la arena dejando las fracciones finas de cieno y arcilla en las cuales los metales se encuentran en mayor abundancia. Por su parte, el hecho de que el valor de restante de Ni (0,025 mg/L) haya superado la legislación se atribuye también al tipo de proceso aplicado, esta pertenece al procesamiento Sin lavar pasado por tamiz 2 mm, en este tipo de procesamiento no se elimina materia orgánica ni fracciones pequeñas que puedan tener metales presentes, caso contrario al de las muestras con procesamiento lavado. Finalmente, el resto de los resultados de Cr y Ni, no superaron los límites máximos permisibles establecidos por los tres entes reguladores, es decir, no representan peligro para el medio que los rodea.

6. Conclusión.

De acuerdo con los objetivos planteados en esta investigación, las características físicas y químicas evaluadas en los pasivos ambientales no representan ningún tipo de riesgos para las comunidades cercanas y los ecosistemas en general, ya que los valores obtenidos fueron bajos. El pH y MO fueron quienes mayor relación tuvieron con los contaminantes a lo largo





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



de la investigación, pues se observó cierta variación en la concentración de contaminantes conforme los valores de pH y MO cambiaban.

Por parte de la granulometría, se encontró que todas las muestras entran en la clasificación de pobremente gradadas. También, se vio reflejado en la clasificación A.A.S.H.O, pues Congo y finca de Silvio son SP, y por su lado las muestras San Isidro, Rio cari pato y Boca de pato se clasificaron en la GP. Lo anterior dejó en evidencia que las muestras presentan porcentajes bajos de material fino.

Con respecto a las determinaciones totales de los metales As, Hg, Pb, Cd, Ni, Zn y Cu, se encontró que no superan los límites máximos permitidos por la norma. Sin embargo, para el caso del Cr se encontró que superó los límites máximos permitidos por la norma, lo cual se debe tener en cuenta, ya que la exposición a este metal puede traer consigo múltiples enfermedades graves. Por otro lado, la concentración de los metales en la fracción fina fue mayor que en la fracción triturada esto debido a que los metales pesados se encuentran principalmente en las partículas de cieno-arcilla, las fracciones más pequeñas de las muestras.

Ahora bien, la concentración de metales pesados en los residuos mineros reflejó valores de correlación de Spearman positiva media con respecto al potencial de hidrogeno para casi todos los elementos, asimismo la materia orgánica reflejo un coeficiente de correlación positivo muy alto en la mayor parte de los metales, y aún más en el caso del cromo que presentó una correlación positivo perfecto. Por otro lado, la correlación entre la conductividad eléctrica y todos los metales en estudio se encuentra correlacionada en forma considerablemente negativa y negativamente fuerte, lo cual indicó que la concentración de los metales no estaba directamente relacionada con la conductividad.

Los resultados de la caracterización química de los pasivos ambientales utilizados en el estudio indican que las concentraciones de metales después de aplicar el test TCLP tuvieron bajos niveles en los extractos de lixiviación, los cuales cumplen con los límites máximos permisibles establecidos en el decreto colombiano 4741 de 2005. Según los resultados obtenidos es válido afirmar que la toxicidad de los residuos no representa una restricción ambiental y se propone la utilización de estos como material en el sector de la construcción o en la mampostería.





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



Por último, sobre el test SPLP se encontró que la mayoría de los metales están situados por debajo de los límites máximos permisibles establecidos por la normatividad a excepción de las muestras Cromo (Cr) Finca de Silvio proceso fino y Níquel (Ni) Boca de pato Sin lavar, Rio cari pato fino y Boca de pato fino. Las pocas muestras que superaron lo establecido por los entes de control, no son un indicador de que no se pueda dar un aprovechamiento a los residuos mineros, pues el exceso se vio reflejado en cantidades relativamente bajas, además, la mayoría de las muestras no presentan ningún tipo de toxicidad con referencia a los metales en estudio.

7. Bibliografía.

Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. EPA DE EE. UU. (1992). Método 1311: Procedimiento de lixiviación característico de toxicidad. Washington, DC: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.

Agilent Technologies. (2016). Fundamentos de Espectroscopia Atómica: Hardware. 5301 Stevens Creek Blvd Santa Clara, CA 95051 Estados Unidos. 800-227-9770. Número de publicación 5991-6593ES.

Arévalo-Gardini, Enrique, Obando-Cerpa, Meyier E., Zúñiga-Cernades, Luis B., Arévalo-Hernández, Cesar O., Baligar, Virupax, & He, Zhenli. (2016). Metales pesados en suelos de plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en tres regiones del Perú. *Ecología aplicada*, 15 (2), 81-89. <https://dx.doi.org/10.21704/rea.v15i2.747>

AASHTO Guide for design of pavement structures, 4th edition, supplement, (1998).

Baird, R. y Bridgewater, L. (2017). Métodos estándar para el examen de agua y aguas residuales. 23ª edición. Washington, DC, Asociación Estadounidense de Salud Pública.

Buchman, M. F. (2008). Screening Quick Reference Tables (SQuiRTs).

Burillo, Juan Carlos, Cardona, Antonio, Castro-Larragoitia, Javier, & Montes, Isidro. (2017). Caracterización y modelación hidrogeoquímica de lixiviados mineros de San Luis Potosí, S.L.P. México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 69(3), 637-654. <https://doi.org/10.18268/bsgm2017v69n3a7>





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



Cerro Medina, L. C. (2018). Evaluación de los niveles de metales pesados en sedimentos superficiales aledaños al emisario submarino de Manzanillo, bahía de Cartagena, Colombia, durante el periodo 1998-2010 (Master's thesis, Universidad de Cartagena).

Garces, Ingrid. (2017). Manejo Ambiental de Residuos Mineros.

García-Arreola, M.E., Soriano-Pérez, S.H., Flores-Vélez, L.M., Cano-Rodríguez, I., & Alonso-Dávila, P.A. (2015). Comparación de ensayos de lixiviación estáticos de elementos tóxicos en residuos mineros. *Revista mexicana de ingeniería química*, 14(1), 109-117.

Gutiérrez Lozano, Edna. (2015). Manejo de residuos en minería - la regulación como herramienta de desarrollo. *Uniandes*.

Jiménez Heinert, M. E., Grijalva Endara, A. de las M., & Ponce Solórzano, H. X. (2020). Plasma acoplado inductivamente en espectroscopia de emisión óptica (ICP-OES). *RECIMUNDO*, 4(4), 4-12. [https://doi.org/10.26820/recimundo/4.\(4\).octubre.2020.4-12](https://doi.org/10.26820/recimundo/4.(4).octubre.2020.4-12)

Jiménez Moreno, M. (2008). Desarrollo de métodos analíticos para especiación de mercurio y su aplicación a la comarca de Almadén.

Kabata-Pendias A. & Pendias H. (2001). Trace elements in soils and plants CRC. Press, Florida. ISBN 0-8493-6639-9. Library of Congress Card Number 83-15083.

Lopez Bravo, M., Santos Luna, J., Quezada Abad, C., Segura Osorio, M., & Perez Rodriguez, J. (2016). Actividad minera y su impacto en la salud humana / The mining and its impact on human health. *CIENCIA UNEMI*, 9(17), 92-100. <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol9iss17.2016pp92-100p>

Mancilla Villa, O; Fregoso Zamorano, B; Hueso Guerrero, E; Guevara Gutiérrez, R; Palomera García, C; Olguín López, J; Ortega Escobar, H; Medina Valdovinos, E; & Flores Magdaleno, H. (2017). Concentración iónica y metales pesados en el agua de riego de la cuenca del río Ayuquila-Tuxcacuesco-Armería. *Idesia (Arica)*, 35(3), 115-123. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292017005000303>

Montes Diaz, Andrea, Juliana, O. C., Bulmaro, J. H., Mixtli, V. M., & César, D. L. (2021) Aplicación del coeficiente de correlación de Spearman en un estudio de fisioterapia.





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



Olivero Verbel, J. (2013). Efectos de la minería sobre la salud humana en Colombia. Movimiento cívico conciencia ciudadana.

Onorio, o. p. c., Velázquez, c. r., Lango, f., Reynoso, m., Chávez, r. c., & Ortiz, n. n. (2019). Caracterización fisicoquímica de pasivos ambientales contaminados con aceites lubricantes en la zona conurbada Veracruz-boca del río. 20 años de tecnología e innovación sustentable, 6.

Palacio León, O., Chávez Porras, A., & Velásquez Castiblanco, Y. L. (2017). Evaluación y comparación del análisis granulométrico obtenido de agregados naturales y reciclados. Tecnura, 21(53), 96–106. <https://doi.org/10.14483/22487638.8195>

Palomar Yarritu, I. (2022). Diseño de gráficos de control no paramétricos para el coeficiente de correlación de Spearman.

Paradelo, R. (2013). Utilización de materiales compostados en la rehabilitación potencial de espacios afectados por residuos mineros y suelos de mina. Boletín Geológico y Minero, ISSN: 0366-0176, 124 (3): 405-419

Pinzón Bedoya, C. H. (2019). Metales pesados en sedimentos y peces de la Ciénaga Grande de Santa Marta, como indicadores de riesgo para la salud humana y el ambiente. Universidad del Atlántico.

Puga, Soraya, Sosa, Manuel, Lebgue, Toutcha, Quintana, Cesar, & Campos, Alfredo. (2006). Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera: Heavy metals pollution in soils damaged by mining industry. Ecología Aplicada, 5(1-2), 149-155.

Rojas Conejo, Johanna, Picado Pavón, Francisco, Suárez Serrano, Andrea, Van Gestel, Cornelis A. M., Golcher Benavides, Christian, & Durán Sanabria, Guillermo. (2022). Pasivo ambiental minero: una fuente potencial de contaminación por metales para los ecosistemas de agua dulce en Costa Rica. Revista Geográfica de América Central, (68), 329-352. <https://dx.doi.org/10.15359/rgac.68-1.12>

Shekhawat, K., Chatterjee, S. y Joshi, B. (2015). Toxicidad del cromo y sus riesgos para la salud. *Revista Internacional de Investigación Avanzada*, 3 (7), 167-172.





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



Skoog, D. A., & Leary, J. J. (1994). Análisis instrumental (4ta edición ed.). Madrid, España: Mc-Graw-Hill Interamericana.

Standard Methods (1998) for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. 20 ed., New York.

U.S. EPA (1988). Test Method 1312. Synthetic Precipitation Leaching Procedure, SPLP.





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



8. ANEXOS

8.1. Concentraciones de metales con el proceso sin lavar (muestras originales) y pasadas por un tamiz de 2 mm.

Sitio	Proceso	Tamiz	As	Cr	Hg	Pb	Cd	Ni	Zn	Cu
			µg/kg							
CONGO	Sin Lavar	2mm	735,84	26687,5	43,34	1729,03	42,46	4855,25	17406,66	5261,38
SAN ISIDRO	Sin Lavar	2mm	941,58	22570	25,09	2881,82	25,12	8935,97	24554,61	7371,69
FINCA SILVIO	Sin Lavar	2mm	1048,18	18590	20,9	6398,39	21,46	5953,46	16918,97	5801,08
RIO CARI PATO	Sin Lavar	2mm	1861,38	38820	22,26	5126,32	31,63	10534,78	30078,87	9846,21
BOCA DE PATO	Sin Lavar	2mm	1556,92	29280	19,7	6061,08	20,51	10146,1	28852,7	9555,97

8.2. Concentraciones de metales con el proceso lavado y pasadas por un tamiz de 2 mm.

Sitio	Proceso	Tamiz	As	Cr	Hg	Pb	Cd	Ni	Zn	Cu
			µg/kg							
CONGO	Lavado	2mm	580,97	15683,24	39,88	1718,42	11,53	5354,5	16270	4667,25
SAN ISIDRO	Lavado	2mm	854,13	20330,9	23,03	2389,28	10,42	8240,41	24536,1	8288,07
FINCA SILVIO	Lavado	2mm	508,83	18486,28	17,4	1607,34	11,11	5053,85	21498,3	4952,24
RIO CARI PATO	Lavado	2mm	1694,43	29791,81	18,49	2186,31	13,65	11467,76	30441,7	10843,88
BOCA DE PATO	Lavado	2mm	1129,15	28741,14	10,71	2627,82	20,45	9066,58	27613,2	9076,46

